

**UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS**

**Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales  
Departamento de Economía de la Empresa**

**Tesis Doctoral**



**Universidad  
Rey Juan Carlos**

**“IDENTIFICACIÓN DE LOS KPI CLAVE PARA LA EFICIENCIA  
DE EMPRESAS DE TRANSPORTE URBANO MEDIANTE EL  
ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA MATRIZ RELACIONAL”**

**Doctorando:**

**Eugenio Bañobre Nebot**

**Directoras:**

**Dra. María Luisa Delgado Jalón**

**Dra. Sandra Flores Ureba**

**Madrid, 2017**



D<sup>a</sup>. María Luisa Delgado Jalón, Profesora Titular de Universidad, y D<sup>a</sup>. Sandra Flores Ureba, Profesora Titular de Universidad, ambas del Departamento de Economía de la Empresa de la Universidad Rey Juan Carlos:

**Certificamos:**

Que bajo nuestra dirección, D. Eugenio Bañobre Nebot, Ingeniero Superior Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid y Master en Gestión del Transporte y la Movilidad por la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid, ha realizado en el Departamento de Economía de la Empresa el trabajo de investigación correspondiente a su Tesis Doctoral titulada:

**“IDENTIFICACIÓN DE LOS KPI CLAVE PARA LA EFICIENCIA DE EMPRESAS DE TRANSPORTE URBANO MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA MATRIZ RELACIONAL”.**

Revisado el mismo, estimamos que puede ser presentado al Tribunal que ha de juzgarlo.

Y para que conste a efectos de lo establecido en cumplimiento de lo dispuesto en la normativa vigente que regula el Tercer Ciclo de estudios universitarios, la obtención del título de Doctor y otros Estudios de Postgrado, autorizamos la presentación de la Tesis en la Universidad Rey Juan Carlos.

Madrid, a 18 de abril de 2017

Fdo.: Dra. D<sup>a</sup>. María Luisa Delgado Jalón    Fdo.: Dra. D<sup>a</sup>. Sandra Flores Ureba



# ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	11
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	14
<b>RESUMEN</b> .....	17
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	19
1.1    Pertinencia de la tesis doctoral.....	20
1.1.1    Precedentes históricos.....	20
1.1.2    Importancia del transporte .....	22
1.1.3    Evaluación de la eficiencia.....	22
1.2    Objetivo de la investigación .....	31
1.3    Metodología de la investigación.....	32
1.4    Estructura de la tesis.....	34
<b>2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SERVICIOS DE TRANSPORTE URBANO EN ESPAÑA</b> .....	37
2.1    Evolución histórica del sector del transporte urbano en España .....	37
2.2    Situación global de los servicios de transporte urbano en España ...	41
2.3    Las principales pautas de movilidad en las ciudades .....	45
2.4    Por qué es necesario mejorar la gestión de la eficiencia en las empresas de transporte urbano.....	47
<b>3. ESTADO DEL ARTE DE LA EVALUACIÓN Y MEJORA DE LA EFICIENCIA DE LAS EMPRESAS DE TRANSPORTE URBANO</b> .....	51
3.1    Métodos de evaluación y mejora de la eficiencia en la empresa .....	51
3.2    Métodos frontera .....	52
3.2.1    Métodos paramétricos.....	53
3.2.2    Métodos no paramétricos .....	58
3.3    Otros métodos.....	64
3.3.1    Cuadro de Mando Integral.....	64

3.3.2	Coste basado en actividades .....	66
3.3.3	Matriz de Medición de la Eficiencia.....	66
3.3.4	Marco de Determinantes de Resultados.....	67
3.3.5	Pirámide del desempeño .....	68
3.3.6	Métodos de la Teoría de Toma de Decisiones .....	70
4.	METODOLOGÍAS DE APLICACIÓN A LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LAS EMPRESAS DE TRANSPORTE URBANO .....	73
4.1	El Cuadro de Mando Integral como modelo de evaluación de la eficiencia.....	74
4.2	Revisión del método elegido: El Cuadro de Mando Integral .....	75
4.2.1	El Cuadro de Mando Integral como herramienta de gestión y control estratégico .....	77
4.2.2	Componentes del Cuadro de Mando Integral .....	80
4.2.3	Viabilidad y Sostenibilidad del Cuadro de Mando Integral .....	96
4.3	Revisión de la literatura existente sobre uso y selección de KPI en el sector del transporte público.....	100
4.3.1	Síntesis de la revisión de la literatura .....	124
4.4	Selección del conjunto de KPI más adecuados para medir la eficiencia del transporte urbano.....	129
4.4.2	Selección de un conjunto de KPI específico para el desarrollo de un CMI para su uso por la Gerencia.....	160
4.5	Métodos de mejora de la eficiencia aplicables al CMI y los KPI .....	162
4.5.1	Búsqueda y resolución de las restricciones .....	162
4.5.2	Métodos matemáticos usados en Optimización de la Eficiencia .....	163
4.5.3	Métodos de gestión de eficiencia similares aplicables .....	169
4.5.4	Matriz de la estructura de diseño MED .....	172
4.6	Aplicación de la MED con Lógica difusa.....	180
4.6.1	Matriz de transformación de los trabajos (MTT) .....	181
4.6.2	Definición del concepto de Matriz de Transformación de los Costes de Mejora de Indicadores .....	188
4.6.3	Revisión de los métodos de resolución de Sistemas lineales aplicables a matrices.....	191

5.	SELECCIÓN DE UN MÉTODO DE RESOLUCIÓN DE LA MTCMI: ANÁLISIS DE LA AUTOESTRUCTURA.....	231
5.1	Identificación de los KPI y modelización de sus relaciones.....	233
5.2	Uso de lógica difusa. Aplicación de coeficientes de ponderación a la matriz	237
5.3	Mejora de los Objetivos de los KPI .....	240
5.4	Costes de mejora de los objetivos .....	241
5.5	Estudio de la Autoestructura de la Matriz.....	242
5.6	Estudio de las soluciones. Interpretación de la autoestructura. Identificación de los KPI más críticos y sus patrones de mejora .....	244
5.6.1	Estudio de los Autovalores .....	246
5.6.2	Estudio de los Autovectores .....	248
5.6.3	Formas de clasificar los KPI .....	249
5.6.4	Mejoras de los KPI .....	251
6.	APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO .....	253
6.1	Caracterización de la EMT de Madrid .....	253
6.1.1	Oferta de servicio .....	256
6.1.2	Velocidad en línea .....	258
6.1.3	Viajeros transportados .....	259
6.1.4	Títulos de transporte.....	262
6.1.5	Ingresos .....	264
6.1.6	Accidentes de circulación.....	265
6.1.7	Ratios de Explotación.....	266
6.1.8	Media anual móvil de viajeros, kilómetros y plantilla .....	267
6.1.9	Cumplimiento del servicio .....	269
6.1.10	Líneas en operación .....	269
6.1.11	Antigüedad del parque .....	274
6.1.12	Consumo de energía .....	277
6.1.13	Indicadores de mantenimiento .....	277
6.2	Aplicación de la metodología de mejora de la eficiencia mediante el Análisis de la Autoestructura de la MTCMI a la EMT de Madrid.....	279

6.2.1	KPI actuales del Cuadro de Mando Integral de Gerencia .....	280
6.2.2	Matriz de interacciones .....	281
6.2.3	Matriz de costes de mejora de los KPI (MCMI) .....	282
6.2.4	Cálculo de Autovalores y Autovectores con coeficientes positivos 284	
6.2.5	Cálculo de autovalores y autovectores con los coeficientes de ponderación positivos y negativos. ....	291
7.	CONCLUSIONES .....	301
7.1	Conclusión .....	301
7.2	Principales aportaciones.....	304
7.3	Limitaciones.....	305
7.4	Futuras líneas de investigación.....	306
8.	BIBLIOGRAFÍA .....	307
9.	APÉNDICES.....	322
9.1	Apéndice 1. Metodología de la MED .....	322
9.1.1	Introducción.....	322
9.1.2	Estructura de la MED .....	324
9.1.3	Elementos de las MED.....	326
9.1.4	Algoritmos de modificación de las MED .....	327
9.1.5	Uso y extensiones.....	328
9.1.6	Matrices de mapeo de dominios (MMD) .....	330
9.1.7	Matriz de dominios múltiples (MDM).....	331
9.1.8	Diferentes tipos de MED .....	337
9.1.9	Dominios.....	337
9.1.10	Tipos de relación.....	338
9.1.11	Escogiendo la MED .....	338
9.1.12	Clasificación de las MED .....	339
9.1.13	MED basada en componentes.....	339
9.1.14	MED basada en equipos.....	342
9.1.15	MED basada en actividades.....	343
9.1.16	MED basada en parámetros.....	345
9.1.17	Atributos adicionales.....	346

9.1.18	Convenciones .....	346
9.1.19	Construyendo una MED .....	347
9.1.20	Criterios para construir MED útiles.....	349
9.1.21	Secuenciación de una MED .....	353
9.1.22	Método de búsqueda de caminos.....	354
9.1.23	Método de la Matriz Adyacente .....	357
9.1.24	Método de la Matriz de Alcance.....	359
9.1.25	Rasgado de una MED .....	360
9.1.26	Dibujo de franjas.....	361
9.1.27	Agrupación de una MED .....	362
9.1.28	MED numéricas .....	364
9.1.29	Análisis de la Estructuras Propia .....	367
9.2	Apéndice 2 Matriz de Transformación de Trabajos (MTT) .....	370
9.2.1	Introducción.....	370
9.2.2	El modelo de la MTT .....	374
9.2.3	Modelo de Iteración .....	375
9.2.4	Supuestos .....	377
9.2.5	Importancia de cada tarea conociendo el autovalor correspondiente. ....	382
9.2.6	Clasificación de los modos.....	383
9.2.7	Resumen del Apéndice 2.....	386



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Imagen 2-1; Cronología de los modos de transporte públicos urbanos de superficie en España.....	41
Imagen 3-1; Matriz de medición de la eficiencia.....	67
Imagen 3-2; Marco de determinantes de resultados.....	68
Imagen 3-3 La pirámide del desempeño para el control estratégico. ....	69
Imagen 4-1; El Cuadro de Mando Integral.....	75
Imagen 4-2 Marco del CMI.....	78
Imagen 4-3; Relaciones entre perspectivas del CMI .....	83
Imagen 4-4 Mapa estratégico; .....	91
Imagen 4-5; Modelo de la Eficiencia Empresarial en el Transporte .....	118
Imagen 4-6; Método de selección de KPI .....	140
Imagen 4-7; Ciclo de gestión de la eficiencia.....	169
Imagen 4-8; Modelo mejorado de Ciclo de Gestión de la eficiencia. ....	171
Imagen 4-9; Matriz de Estructura de Diseño de Ingeniería .....	176
Imagen 4-10; Matriz MED dirigida.....	179
Imagen 4-11; Matriz de Transformación del Trabajos.....	186
Imagen 5-1; Los KPI del Observatorio del Transporte y la Logística.....	234
Imagen 5-2; Relaciones entre esfuerzos de mejora de los KPI. ....	236
Imagen 5-3; Gráfica de $1 / (1 - \lambda)$ para autovalores. ....	246
Imagen 5-4; Gráficos de límites de $1/(1- \lambda)$ para autovalores complejos. ....	247
Imagen 5-5; Análisis de la Autoestructura de la MTCMI. ....	252
Imagen 6-1; Evolución Km en línea mensuales. ....	256
Imagen 6-2; Evolución anual de los km en línea años 2009-2015.....	257
Imagen 6-3; Evolución velocidad en línea. ....	258
Imagen 6-4; Evolución mensual de viajeros transportados en 2015.....	260
Imagen 6-5; Evolución de los viajeros transportados .....	261
Imagen 6-6; Evolución de los viajeros por vehículo-km. ....	261
Imagen 6-7 Evolución de la Media Anual Móvil de viajeros. ....	267
Imagen 6-8; Evolución de la media anual móvil de km en línea. ....	268
Imagen 6-9; Evolución de la media anual móvil de personal. ....	268
Imagen 6-10; Antigüedad media del parque años 2013-15.....	276
Imagen 6-11; Matriz de relación. ....	281
Imagen 6-12; Matriz de pesos de interacciones.....	282
Imagen 6-13; Matriz de pesos de interacciones.....	283
Imagen 6-14; Matriz de coeficientes de ponderación positivos. ....	284
Imagen 6-15; Matriz de autovalores .....	285
Imagen 6-16; matriz de autovectores. ....	286
Imagen 6-17; Matriz de autovalores. ....	287
Imagen 6-18; Matriz de autovectores. ....	287
Imagen 6-19; Matriz MTCMI. ....	289

Imagen 6-20; Matriz autovalores.....	292
Imagen 6-21; Matriz autovalores.....	292
Imagen 6-22; matriz de autovalores .....	293
Imagen 6-23; matriz de autovectores .....	293
Imagen 9-1; Matriz MED dirigida.....	330
Imagen 9-2; Matriz de mapeo de dominios .....	331
Imagen 9-3; Matriz de dominios múltiples. ....	332
Imagen 9-4; MED numérica. ....	334
Imagen 9-5; Ejemplo automóvil. ....	340
Imagen 9-6; Agrupamiento.....	341
Imagen 9-7; Diagrama de relaciones.....	343
Imagen 9-8; MED basada en actividades.....	344
Imagen 9-9; MED de Black. ....	345
Imagen 9-10; MED basada en parámetros después de la secuenciación.....	346
Imagen 9-11; Ejemplo búsqueda caminos.....	356
Imagen 9-12; .Matriz final búsqueda caminos.....	356
Imagen 9-13; Ejemplo Matriz adyacente.....	357
Imagen 9-14; Ejemplo de las limitaciones.....	358
Imagen 9-15; Ejemplo de Dibujo de franjas.....	362
Imagen 9-16; Proceso de desarrollo.....	363
Imagen 9-17; Relaciones entre tareas.....	365
Imagen 9-18; Matriz de Estructura de Diseño.....	372
Imagen 9-19; Matrices de dependencia y de duración.....	377



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1; Fases, objetivos y metodologías aplicadas en la Tesis.....	33
Tabla 2-1; Número de viajeros de transporte urbano 2000-15. ....	42
Tabla 2-2; Viajeros transporte urbano, por CC.AA. 2009-2015 .....	43
Tabla 2-3; Características de los servicios de transporte urbano de las cinco ciudades más habitadas de España. Años 2000-2015. ....	44
Tabla 3-1; Clasificación Métodos evaluación de la eficiencia. ....	53
Tabla 4-1; Ficha objetivo. ....	82
Tabla 4-2; La perspectiva del cliente. Indicadores centrales.....	87
Tabla 4-3; Procesos de la Perspectiva Procesos Internos .....	89
Tabla 4-4; Ficha de Indicador. ....	94
Tabla 4-5; Grupos de atributos por perspectivas.....	100
Tabla 4-6; Sistema de KPI del grupo CoMET / Nova Key. ....	103
Tabla 4-7; Detalles de las medidas de eficiencia utilizadas por la US. FTA. ....	109
Tabla 4-8; Miembros del Consorcio Maretope .....	111
Tabla 4-9; Indicadores de eficiencia empresarial.....	119
Tabla 4-10; Resumen literatura encontrada. ....	126
Tabla 4-11; Posibles variables de entrada para componer KPI. ....	136
Tabla 4-12; Posibles variables de salida para KPI. ....	137
Tabla 4-13; Número de KPI por cada Perspectiva y grupo de atributos. ....	138
Tabla 4-14; KPI de Crecimiento y aprendizaje.....	142
Tabla 4-15; KPI de Cliente. ....	144
Tabla 4-16; KPI de Procesos Internos. ....	147
Tabla 4-17; KPI Financieros.....	150
Tabla 4-18; KPI de Seguridad.....	152
Tabla 4-19; KPI de Medio Ambiente. ....	153
Tabla 4-20; Resumen KPI válidos.....	154
Tabla 4-21; Definiciones de los Indicadores de Referencia. ....	157
Tabla 4-22; Definiciones de los I. de R. Financieros. ....	159
Tabla 4-23; Indicadores por perspectivas. Selección para Gerencia .....	162
Tabla 5-1; Métodos de resolución de SL .....	232
Tabla 5-2; KPI correlacionados en empresas de transporte urbano.....	236
Tabla 5-3; Matriz de transformación del coste de la mejora de los KPI. ....	239
Tabla 5-4; Matriz de coste de mejora de los KPI (PCM). ....	239
Tabla 6-1; Datos Generales EMT Madrid. ....	254
Tabla 6-2; Evolución Datos Generales desde 1948.....	255
Tabla 6-3; Kilómetros recorridos en línea.....	256
Tabla 6-4; Viajes en línea en 2013-2015. ....	257
Tabla 6-5; Evolución de los autobuses en servicio. ....	258
Tabla 6-6; Velocidad en línea en último trienio.....	258
Tabla 6-7; Viajeros transportados en 2015 y 2014. ....	259
Tabla 6-8; Viajeros transportados en el último trienio. ....	260
Tabla 6-9; Viajeros por título de transporte. ....	262

Tabla 6-10; Evolución trienal Títulos EMT y Metrobús .....	263
Tabla 6-11; Evolución, de los viajeros de Abono Transportes, por tipo de Abono.....	264
Tabla 6-12; ingresos generados por la actividad de transporte de viajeros.....	264
Tabla 6-13; Evolución mensual comparativa del índice de colisiones por millón de kilómetros totales registrado en el último trienio .....	265
Tabla 6-14; Colisiones por millón de kilómetros en el último trienio. ....	265
Tabla 6-15; Número de accidentes con daños materiales y personales registrados en 2015 y 2014.....	266
Tabla 6-16; Ratios de Explotación. ....	266
Tabla 6-17; Cumplimiento del servicio. ....	269
Tabla 6-18; Regularidad del servicio. ....	269
Tabla 6-19; Líneas en explotación a 31 de diciembre de 2015, con longitud total (ida y vuelta) en kilómetros. ....	274
Tabla 6-20; Antigüedad material móvil.....	275
Tabla 6-21; Antigüedad media del parque por centros de operaciones.....	276
Tabla 6-22; Consumo de energía por combustible y año. ....	277
Tabla 6-23; Indicadores de mantenimiento 2015 y 2014. ....	277
Tabla 6-24; Indicadores costes mantenimiento. ....	278
Tabla 6-25; KPI de CMI actuales de la EMT de Madrid. ....	280
Tabla 6-26; MTCMI coef. pos. y neg. ....	297
Tabla 9-1; Tipos de relaciones. ....	336
Tabla 9-2; Términos en Teoría de Sistemas.....	337
Tabla 9-3; Tipos de datos en las MED. ....	339
Tabla 9-4; Tipos de interacciones.....	339
Tabla 9-5; Métricas posibles. ....	342
Tabla 9-6; Equipos y participantes.....	364



## RESUMEN

El transporte público urbano en los países más desarrollados es un sector muy importante actualmente, por su gran aportación a la sostenibilidad y por su menor consumo de recursos muy escasos, como el espacio en las vías urbanas en horas punta.

Al transporte urbano se dedican grandes inversiones públicas y el precio de los billetes está fuertemente subvencionado por las administraciones públicas de los países desarrollados.

Por ello, el incremento de la eficiencia técnica del sector, entendida como la relación entre los servicios producidos y el coste de los mismos, puede conseguir un mejor aprovechamiento de los fondos públicos.

A día de hoy, existen diferentes métodos para la evaluación de la eficiencia de las empresas del sector. Estos métodos permiten definir una mejora de la eficiencia técnica, en función de un número limitado de variables. Las variables deben cuantificar las necesidades de transporte existente, según las zonas de la ciudad, los tipo de días y las franjas horarias (la demanda), la prestación de servicios de las empresas (la oferta) y por otro, los recursos consumidos en la producción de dichos servicios (los costes).

La mayoría de las empresas de transporte utilizan el sistema de Indicadores Clave de Funcionamiento (también llamados “Indicadores Clave de Eficiencia”), llamados KPI por las iniciales de su nombre inglés. Quedan por solucionar, sin embargo, dos problemas principales:

El primero es la selección de un conjunto adecuado de indicadores que cumpla todas las expectativas que actualmente se desean para gestionar una empresa de transporte urbano compleja.

El segundo es la determinación de la importancia relativa de los indicadores de eficiencia individuales. Este es un problema hasta ahora no tratado que plantea grandes dudas a los que toman las decisiones en la gestión de las empresas de transporte urbano.

El objetivo de esta tesis es contribuir a mejorar la eficiencia en las empresas de transporte público mediante el uso de una nueva metodología, no utilizada hasta ahora en el sector del transporte público urbano.

Para ello, se ha revisado toda la literatura encontrada sobre desarrollo de métricas de eficiencia para empresas de transporte urbano de las principales ciudades, para escoger un conjunto idóneo de indicadores y posteriormente hemos escogido los indicadores más adecuados para desarrollar una métrica adaptada específicamente a empresas de transporte urbano, que recoge principalmente KPI ya en uso en otras grandes empresas de transporte urbano, para poder compararse con ellas fácilmente.

- Estudiaremos los indicadores más adecuados para desarrollar una métrica adaptada a empresas de transporte urbano y que recoja KPI ya en uso en otras empresas similares para poder comparar con ellas
- Sobre ella aplicaremos posteriormente herramientas matemáticas de resolución de sistemas complejos y de lógica borrosa buscando seleccionar los KPI más adecuados para aumentar más la eficiencia global de la empresa con el mismo esfuerzo.
- Posteriormente, se revisará literatura existente sobre desarrollo de métricas de eficiencia para indicadores clave de funcionamiento específicos para empresas de transporte urbano de las principales ciudades del mundo, para escoger un conjunto idóneo de indicadores que luego nos permitan aplicar la herramienta desarrollada anteriormente
- Finalmente, se aplicará el modelo obtenido en la EMT de Madrid para comprobar su consistencia y viabilidad

# 1. INTRODUCCIÓN

El transporte público urbano es una parte muy importante de la sociedad actual por su gran colaboración en la movilidad de la población en los países menos desarrollados y por su menor uso de un recurso muy escaso que es el espacio en las vías urbanas en las horas punta del transporte al trabajo, al estudio y a las actividades asistenciales y lúdicas.

Como consecuencia de todo ello, a la adquisición de los medios de transporte urbano se le dedican grandes cantidades de dinero por parte de las administraciones públicas y además, por lo general, el coste de los billetes está muy subvencionado, para retirar automóviles particulares de las calles. Por ello, buscar el incremento de la eficiencia técnica del sector, para un mejor aprovechamiento de los fondos públicos, es una necesidad prioritaria.

Sin embargo, no basta únicamente con estudiar el concepto de eficiencia de forma genérico sino que además es necesario disponer de una metodología sencilla que pueda aplicarse en cualquier entorno y que sea capaz de orientar a los directivos sobre las prioridades en la selección de objetivos parciales de mejora y, sobre todo, de aquellos en los que un euro gastado produce una mayor mejora de eficiencia económica. Es decir, es necesario identificar los factores clave potenciadores de la eficiencia general en la organización.

Existen múltiples métodos para la evaluación de la eficiencia. Todos ellos ayudan a definir ciertas mejoras en la eficiencia de estas empresas, normalmente a través del análisis y observación de cierto número de indicadores que reflejan aspectos concretos de la eficiencia. Estos indicadores se centran en las siguientes nociones fundamentales a la hora de definir las situaciones de las empresas de transporte público:

- La necesidad de transporte existente, según las zonas de la ciudad, los tipos de días y las franjas horarias (la demanda),
- La prestación de servicios de las empresas (la oferta),
- Los recursos económicos utilizados para producir dichos servicios (los costes).

En esta tesis hemos intentado contribuir a profundizar en el estudio de la eficiencia en las empresas de transporte público mediante el desarrollo de una nueva metodología que permita interrelacionar los indicadores de gestión para mejorar la eficiencia de las empresas y que sea capaz de identificar cuáles de ellos son los indicadores o KPI claves con mayor repercusión en la mejora de la eficiencia.

## **1.1 Pertinencia de la tesis doctoral**

### **1.1.1 Precedentes históricos**

En los siglos XIX y XX, a raíz de su gran crecimiento debido a la emigración de campesinos a las ciudades para trabajar en las fábricas, en las ciudades se empezaron a implementar sistemas de transporte para satisfacer las necesidades de los habitantes (Papayanis, 1997). Estos sistemas de transporte colectivo tuvieron gran auge en las grandes ciudades hasta el desarrollo del automóvil.

Con el desarrollo de la motocicleta primero y del automóvil después, desde principios del siglo XX en USA hasta mediados del mismo siglo en otros países menos desarrollados, el transporte público experimentó un declive como sistema básico de transporte que se agudizó desde los años 30 del siglo XX en USA, hasta los años 80 del mismo siglo en los países desarrollados menos avanzados, siendo sustituido por los vehículos particulares (EMT de Madrid, 1971).

La crisis del petróleo de los años 1973-78 dio un nuevo impulso al transporte público en muchos países en los que la gasolina de los vehículos particulares estaba gravada con más impuestos, entre ellos España, no así en otros en los que éstos eran muy bajos como los Estados Unidos.

En muchas ciudades europeas y americanas los sistemas de transporte público mantuvieron siempre activos los tranvías desde su implementación, pero en otros países como España, se eliminaron debido a su mayor coste de adquisición y sobre todo a las quejas de los automovilistas que los consideraban como una molestia para poder circular libremente por las estrechas calles de las ciudades españolas, sustituyéndose, los mismos, por autobuses que no presentaban tantos problemas de retención de la movilidad en los casos en que había un problema pues, por ejemplo, los tranvías no podían rodear un obstáculo en la calzada como sí que hacían los autobuses y cuando uno de ellos se averiaba los siguientes no podían circular hasta que el averiado era remolcado hasta las cocheras, inutilizando la vía durante todo el trayecto (EMT de Madrid, 1971).

Entre los años 2000 y 2010 hubo un importante resurgir del tranvía en las ciudades españolas (Monzón, Cascajo, Jordá, Pérez, & Rojo, 2008), aunque no tan generalizado como en la primera etapa.

Las redes de autobuses son flexibles y menos caras de implementar que las de los tranvías ya que, con la compra del material móvil, un diseño adecuado de las líneas y la instalación de los postes de paradas, se monta toda la red. En cambio, los tranvías y los metros, requieren grandes inversiones tanto en infraestructura como en material rodante e incluso en mantenimiento. La flexibilidad y economía que presentan las redes de autobuses son la causa de su éxito mundial frente a los tranvías y metros (Jordà, 2012).

Posteriormente, para ciudades que no podían permitirse el financiar una red de metro o tranvías se desarrollaron los sistemas de Autobuses de Transito Rápido (BRT en inglés) o autobuses de alto nivel de servicio (BHNS en francés) que aparecen como competidores en eficiencia y calidad de servicio frente a los tranvías y metros ligeros (Valdés & López-Lambas, 2010) (Novales, Orro, Conles, & Anta, 2012).

### 1.1.2 Importancia del transporte

Los servicios de transporte son uno de los servicios esenciales que hoy en día presta un municipio a sus ciudadanos. El transporte público urbano ofrecido por los autobuses se utiliza para proporcionar movilidad orientada a la realización de todo tipo de actividades: laborales, de formación, compras, de ocio y son, por tanto, un pilar fundamental de la sociedad urbana desarrollada moderna.

En la mayoría de las principales ciudades de España el servicio es prestado por empresas públicas, sin competencia o con muy poca competencia en la oferta de transporte (CEOE, 2009).

Al ser estos servicios deficitarios y por la subvención en el coste del billete de transporte público que hay en España (que se implementó en los últimos decenios del siglo pasado, para intentar eliminar coches particulares de las calles de las ciudades en las horas punta) la falta de competencia puede ocasionar que se descuide la necesidad de mejorar la eficiencia de las empresas, pues al no haber competencia tampoco hay incentivos para la mejora de las mismas (Jordà, 2012).

### 1.1.3 Evaluación de la eficiencia

La evaluación de la eficiencia de los servicios de transporte urbano es complicada. Los servicios son sistemas muy complejos, tienen muchos elementos que interaccionan entre sí y no son fáciles de caracterizar o modelizar. Si el sistema es complejo, evaluar todos los elementos y las relaciones que se producen entre ellos es una labor ardua. Se debe, por tanto, identificar aquellos elementos más importantes en el funcionamiento del sistema para definir un modelo que, en base a esos elementos, refleje de manera simplificada su funcionamiento (Jordà, 2012).

Para poder ofrecer el servicio de transporte urbano se consumen una serie de recursos. En la evaluación de la eficiencia de ese servicio se debe considerar,

por tanto, la demanda esperada, el servicio ofertado y el consumo de recursos para la generación de esa oferta.

La eficiencia se distingue frente a la efectividad, en que la segunda evalúa el grado de consecución de objetivos pre-establecidos (Talley, 1986). A lo largo de esta tesis, distinguiremos (Talley, 1986) entre:

Eficacia: la relación entre la demanda potencial del público y la oferta generada por las empresas de transporte urbano,

Eficiencia técnica: la relación entre la oferta de transporte dada por la empresa y los recursos que la empresa utiliza para dar esa oferta

Eficiencia global: la relación entre la cobertura de la demanda potencial y el coste del servicio total, pues, ni es bueno poner una oferta de servicio escasa y que siempre vayan llenos los autobuses con los clientes cautivos, ni tampoco lo es, y de nada sirve, dar una oferta plana de transporte, idéntica a lo largo de todo el día que escaseaba en las horas punta y sobraba absolutamente en las horas valle.

En la tesis, los procedimientos y metodologías utilizadas se centran en la mejora de la eficiencia y de la efectividad. Los métodos seleccionados están perfectamente contrastados por los expertos en varias áreas de la ingeniería (Cai, Liu, Xiao, & Liu, 2009), Pero el caso de estudio, sin embargo, obtiene unos resultados relativos, pues depende de los indicadores usados habitualmente por la empresa, y utilizados por ello para el caso de estudio y, por otro, de las opiniones de un pool de expertos, para definir las relaciones que hay entre los indicadores, lo que nos permitirá elegir aquellos que hay que situar en primer lugar en la lista de objetivos a mejorar, por producir un mayor aumento de la eficiencia global de la empresa.

Pues en este tiempo en que vivimos, en el que la población mundial y su nivel de vida son ambos crecientes, es necesaria, más que nunca, una asignación de recursos más eficiente teniendo en cuenta, además, que el máximo de esos recursos debe dejarse disponible para las futuras generaciones, para que también ellos puedan vivir con una cierta comodidad. Esta idea que se conoce

como Desarrollo Sostenible o Sostenibilidad es la que debería implementarse en todos los estudios y proyectos llevados a cabo de ahora en adelante, pues los recursos del planeta no son infinitos y si los agotamos los problemas en el futuro para nuestros descendientes serán mucho mayores.

El concepto de desarrollo sostenible se ha desarrollado durante las últimas décadas basándose en las técnicas de explotación forestal que algunos países como Japón y Alemania han aplicado en los últimos siglos. Desde el origen del concepto, aparecido por primera vez en el "Informe Brundtland" (United Nations, 1987), en la Cumbre de la Tierra de Rio de Janeiro de 1992 y la Conferencia Mundial de Desarrollo Sostenible de Johannesburgo de septiembre de 2002, se ha ido definiendo y dando a conocer este nuevo enfoque.

El desarrollo sostenible consiste en "satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades", según cita el Informe Brundtland. Afecta, por tanto, a todas las actividades de la sociedad, siendo el transporte una de ellas. Un siguiente nivel en el proceso de desarrollo de esta idea es el de la movilidad sostenible.

En septiembre de 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó formalmente el "Programa de Desarrollo Sostenible 2030: universal, integrado y transformador", un conjunto de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Los objetivos se definieron para ser implementados en todos los países como muy tarde en el año 2030 (ONU, 2015).

El transporte es un gran contribuyente a las emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero. Se dice que un tercio de todos los gases producidos se deben al transporte (Buehler & Pucher, 2011). Los gases de escape contienen compuestos y partículas peligrosas para la salud humana y contribuyen decisivamente al cambio climático que se está produciendo en nuestro planeta en los últimos decenios.

El enfoque del transporte sostenible aporta muchos beneficios sociales y económicos que pueden acelerar el desarrollo local sostenible. De acuerdo con una serie de informes de la Asociación Mundial de Estrategias de Desarrollo de Bajas Emisiones, el transporte sostenible puede ayudar a crear puestos de trabajo, mejorar la seguridad de los viajeros a través de la inversión en carriles para bicicletas y vías peatonales y ofrecer una oportunidad práctica para ahorrar tiempo e ingresos familiares así como en los presupuestos gubernamentales, haciendo que la inversión en el transporte sostenible sea una oportunidad de ganar-ganar ( The Low Emission Development Strategies Global Partnership, 2016) .

Algunos países occidentales están haciendo que el transporte sea más sostenible tanto en las implementaciones a largo plazo como a corto plazo, porque muchos de esos países son grandes usuarios del automóvil y el medio de transporte más usado por la gente son los vehículos personales. Alrededor del 80% de los viajes se realizan en automóviles. (Buehler & Pucher, 2011) Por ello los gobiernos respectivos tienen que tomar decisiones drásticas pero vitales para reducir el número total de vehículos en las calles y para reducir las externalidades negativas que el masivo uso del vehículo particular produce en todos los ciudadanos (usuarios o no de los mismos) ( The Low Emission Development Strategies Global Partnership, 2016).

Estas medidas son del tipo:

- Mejorar el transporte público con el fin de proporcionar más movilidad y accesibilidad, y la aplicación al mismo de nuevas tecnologías para proporcionar una red de transporte público más amigable con los usuarios, más confiable y más sensible a los cambios de la demanda.
- Animar a desplazarse caminando y en bicicleta a través de la ampliación de las vías peatonales, estableciendo aparcamientos de bicicletas y bicicleta compartida en el centro de las ciudades, limitar el estacionamiento en las calles y el acceso de vehículos particulares al centro.

- Aumentar los impuestos al automóvil, a los combustibles, a los precios de los estacionamientos y los peajes, alentando a la gente a conducir vehículos más eficientes.

Esta última medida puede producir un problema de equidad social, ya que las personas de bajos ingresos usualmente conducen vehículos más viejos, con menor eficiencia de combustible. El gobierno puede utilizar los ingresos extra recaudados de los impuestos y peajes para mejorar el transporte público y beneficiar a las personas con menos recursos.

En la Estrategia Española de Movilidad Sostenible (Ministerio de Medio Ambiente, 2009) se define ésta y se intenta su implementación mediante la consecución de los objetivos, que se indican a continuación:

- Económicos: satisfacer de forma eficiente las necesidades de movilidad derivadas de las actividades económicas, promoviendo en esta forma el desarrollo y la competitividad.
- Sociales: proporcionar unas adecuadas condiciones de accesibilidad de los ciudadanos a los mercados de trabajo, bienes y servicios, favoreciendo la equidad social y territorial; y los modos de transporte más saludables.
- Ambientales: contribuir a la protección del medio ambiente y la salud de los ciudadanos, reduciendo los impactos ambientales del transporte, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y optimizando el uso de los recursos no renovables, especialmente los energéticos.

Las ideas que dan cuerpo a la movilidad sostenible se han ido ampliando poco a poco. Así, se puede constatar cómo se van definiendo e introduciendo en diferentes estrategias e incluso leyes.

A nivel europeo, el Libro Blanco del transporte (CE, 2011) hace un diagnóstico general del transporte e introduce ideas como la necesidad de realizar una planificación urbana que reduzca las necesidades de movilidad, el establecer políticas de transporte urbano en grandes áreas urbanas o que la sostenibilidad

del sistema de transporte urbano debe contar con la flexibilidad en la operación del servicio y debe utilizar las nuevas tecnologías para poder dar a los gestores de la movilidad toda la información que les sea útil para adecuar la oferta a la demanda potencial. Subraya la necesidad de racionalizar el transporte urbano realizando una gestión de los usos del suelo, mejorando el transporte público en las coronas metropolitanas y creando autoridades únicas de gestión del transporte a nivel regional.

El Libro Verde del transporte urbano (CE, 2007) introduce nuevas ideas como la necesidad de introducir flotas públicas de vehículos ecológicos, de desarrollar Sistemas Inteligentes de Transporte (información al usuario, tomas de datos, tarificación...), la accesibilidad universal a los servicios, la mejora de los tiempos de viaje mediante la implantación de infraestructura separada, la dotación de recursos financieros con un precio justo o la necesidad de un transporte urbano seguro y protegido. En general, una nueva cultura de movilidad urbana, que incluye un seguimiento de la calidad del servicio mediante un sistema de información común y simple.

En un estudio posterior al Libro Verde (CE, 2008), la Comisión Europea recoge las impresiones sobre el Libro Verde de los colectivos implicados en el transporte. Se amplían así algunos de los conceptos tratados en el libro, como la importancia de la recolección y provisión de información a los gestores o el intercambio de buenas prácticas entre ciudades, de tal manera que se puede evaluar la calidad del transporte urbano. Esto último puede ayudar a ajustar los costes y, por tanto, la sostenibilidad económica de los servicios. Se subraya también la necesidad de incluir criterios de sostenibilidad a la hora de establecer los criterios de elección para la financiación o la ejecución de concesiones y contratos.

El informe “Un futuro sostenible para el transporte” de la Comisión Europea (CE, 2009) repasa los resultados de algunas de las políticas llevadas a cabo en la primera década del siglo XXI. Un problema nuevo que se ha planteado es el de adaptar los servicios a una población cada vez más envejecida, lo que va a incrementar notablemente sus costes. Estos servicios y sus redes van a generar importantes gastos en mantenimiento, por lo que surge la necesidad

de crear autoridades que coordinen diferentes operadores o niveles de la administración, de tal manera que se consiga una gestión única o coordinada. Resalta, entre otros, la importancia de usar metodologías e indicadores comunes entre los distintos países a la hora de ejecutar y evaluar las infraestructuras y los servicios, de tal manera que sea posible comparar y aprovechar las buenas prácticas de cada uno.

Por último, el Libro Blanco del transporte (CE , 2011) señala la importancia que va a tener en el futuro la eliminación de las distorsiones económicas del mercado. La internalización de las externalidades hará que los usuarios y administraciones públicas paguen más parte de los costes totales generados por el transporte. También habla de la importancia de proporcionar toda la información necesaria a los usuarios para lograr una movilidad sin discontinuidades. A nivel urbano, señala la necesidad de mejorar la calidad de los servicios de transporte público, en la oferta y adecuación de frecuencias. Por otro lado, se deberá impulsar la gestión de la demanda y la ordenación del territorio para reducir la necesidad de movilidad. Por tanto, es necesaria una gestión más eficiente y sostenible de los recursos, los servicios y las infraestructuras de transporte para lograr alcanzar las nuevas metas.

Se puede apreciar, con la lectura de los documentos europeos mencionados anteriormente, un proceso de desarrollo de la idea de movilidad sostenible al irse incorporando nuevas necesidades al concepto inicial y sus tres pilares. La importancia de la gestión eficiente de los recursos se repite a lo largo de los documentos.

En España, estas ideas y recomendaciones quedan recogidas, principalmente, en los siguientes documentos:

La Estrategia Española de Desarrollo Sostenible (Ministerio de la Presidencia, 2007) en la que, como ideas fundamentales, se recogen:

- la necesidad de integración o coordinación de los diferentes operadores,

- la necesidad de establecer una metodología única para la recopilación de información (creación del Observatorio de la Movilidad Metropolitana (OMM)),
- la necesidad de evaluación e internalización de externalidades.

La Estrategia Española de Movilidad Sostenible (Ministerio de Medio Ambiente, 2009) donde se amplían y extienden las ideas perfiladas en la estrategia de desarrollo sostenible.

La ley Catalana de Movilidad de 2003, donde se recogen y desarrollan los instrumentos necesarios para la aplicación e implementación de muchas de estas ideas.

Este breve repaso a las estrategias europeas y españolas para el desarrollo de la movilidad sostenible nos proporciona dos ideas clave:

- En la evaluación de la sostenibilidad de un sistema de transporte público es necesario tener en cuenta gran cantidad de variables o aspectos que abarquen, o intenten abarcar, los pilares básicos del desarrollo sostenible. Además de proporcionar un servicio seguro y de calidad y el pago de un precio justo por el servicio, en el que se incluyan las externalidades negativas generadas por el modo de transporte en cuestión. Esta evaluación requerirá gran cantidad de información medida mediante indicadores que puedan describir los aspectos comentados.
- Los sistemas de transporte han de ser gestionados y ofertados de manera eficiente, debido a la necesidad de ahorrar recursos escasos y de preservar el medioambiente para las futuras generaciones.

En el último Libro Blanco del transporte (CE, 2011) se indica que la gestión de la eficiencia debe acabar con las distorsiones del mercado. La crisis económica mundial ha afectado mucho a España: desde el año 2008 se ha doblado la tasa de paro nacional, ha disminuido el PIB, numerosas empresas han entrado en concurso de acreedores y las previsiones de crecimiento para España que hace el FMI para los próximos años son bajas: no se esperan crecimientos significativos hasta 2020. A esta grave situación económica, hay que sumar el

problema del déficit y la deuda de las administraciones públicas. La necesidad de equilibrio presupuestario, unida a la mala situación económica, obligó a las administraciones a ajustes y recortes en los servicios públicos. El transporte público urbano se vio afectado a nivel nacional y local. El déficit de los servicios aumentó y disminuyó el ratio de cobertura, que tuvo que ser cubierto por subvenciones (Vassallo & Pérez, 2008). Esta situación conllevó subidas de tarifas y reducción de oferta. Por tanto, la búsqueda de un consumo eficiente de los recursos de las empresas de transporte urbano es muy necesaria. En el mundo actual globalizado, con una gran competencia de los países emergentes, los estados de bienestar del mundo desarrollado se van a ver obligados a replantearse las estrategias, pues nunca parece que volverán a verse periodos económicos de crecimiento y el empleo no parece que vuelva a estos países. Los servicios de transporte público no podrán seguir manteniendo los déficits pasados y actuales. La movilidad sostenible no es posible si los servicios no son sostenibles económicamente.

Diversos autores han realizado análisis de sostenibilidad, tanto en lo referente al desarrollo urbano, como al transporte público urbano. Surgía la cuestión de identificar los criterios cuantitativos para evaluar aspectos tales como las externalidades medioambientales (Nijkamp & Meugel, 1995) o la calidad del servicio (Macario, 2001). Después se estudió la relación entre el uso del suelo y el transporte (Spiekermann & Wegener, 2003) o la necesidad de incorporar el tipo de información ofrecida al usuario o la integración tarifaria entre diferentes operadores (Goldman & Gorham, 2006). Otros autores resaltan la dificultad de crear un único modelo para evaluar los tres pilares del desarrollo sostenible, por lo que optan por utilizar varios modelos de manera conjunta (Fedra, 2004). Todos ellos se basan en el uso de diversos indicadores que intentan recoger los diferentes aspectos de la sostenibilidad, para así poder obtener un valor que permita comparar o hacer un seguimiento a los servicios en las ciudades.

En esta tesis, una vez visto que surge la necesidad de evaluar correctamente y mejorar la eficiencia y la calidad de los servicios de transporte público, el objetivo es determinar un sistema de indicadores común para evaluar la eficiencia de diferentes sistemas de transporte urbano, teniendo en cuenta,

criterios de sostenibilidad y movilidad sostenible. En los servicios de transporte urbano, la medida de la eficiencia significa estudiar la demanda potencial, la cantidad de servicio ofertado y el consumo de recursos.

Se presenta, por tanto, el problema de cómo hacerlo. Existen diferentes maneras de enfocar el problema de la evaluación de la eficiencia de un conjunto de casos de estudio, si bien se pueden resumir en dos grandes líneas: los métodos paramétricos y los métodos no paramétricos. (De Borger, Kerstens, & Costas, 2002) y (Murillo-Zamorano L. R., 2004). Ambos son válidos para analizar el consumo de los diferentes recursos para lograr la producción deseada.

Con los modelos más recientes, incorporados a nuevos programas como Max DEA, es posible hacer un diagnóstico de la empresa más pormenorizado en el consumo de recursos, pudiéndose analizar individualmente cada uno de ellos, con lo que la mejora de la eficiencia es más fácil de conseguir, al actuar sobre cada recurso. Partiendo de estas ideas, y dada la información que proporciona la base de datos del OMM, se quiere abordar el problema del estudio de la eficiencia de los servicios de transporte urbano, teniendo en cuenta el mayor número de criterios de evaluación, en relación con el contexto socioeconómico y la evolución de la red de transporte público.

## 1.2 Objetivo de la investigación

Como se comenta en el apartado anterior, el objetivo primario de la presente tesis es el **desarrollo de una metodología que permita la mejora de la eficiencia en la operación de los servicios de transporte urbano**. Esta metodología se aplica luego a un caso de estudio para su validación.

El objetivo general de la tesis se concreta en una serie de sub-objetivos necesarios para la consecución del anterior:

- OE1: Estudiar los métodos de evaluación de la eficiencia de las empresas de transporte.
- OE2: Identificar variables e indicadores que recojan la esencia de la eficacia y eficiencia del servicio de transporte urbano en las ciudades.
- OE3: Seleccionar una batería de indicadores que sean lo más comunes posibles a las diferentes empresas de transporte urbano de las grandes ciudades del mundo, para poder comparar con ellas en procesos de Benchmarking que permitan aumentar la eficiencia global de las empresas de transporte urbano.
- OE4: Estudiar las distintas metodologías de análisis de indicadores que posibiliten discernir cuales son los más importantes para aumentar la eficiencia global de la empresa.
- OE5: Seleccionar o desarrollar, basado en las herramientas matemáticas de resolución de sistemas con muchas variables y en herramientas de lógica difusa, una metodología de evaluación y mejora de los indicadores en la operación de los servicios de transporte urbano.
- OE6: Aplicar dicha metodología a una empresa para su validación. Concretamente, la metodología desarrollada ha sido aplicada al conjunto de indicadores de gestión del Cuadro de Mandos de la Empresa Municipal de Transportes de Madrid (EMT de Madrid).

### 1.3 Metodología de la investigación

El desarrollo de este trabajo de investigación se ha llevado a cabo utilizando distintas metodologías y técnicas de investigación que se describen a continuación:

- Recopilación y estudio del estado del arte en los métodos de evaluación y mejora de la eficiencia de las empresas de transporte.
- Desarrollo de una propuesta metodológica nueva para mejorar la eficiencia general de las empresas de transporte público. Dicho marco incluye:

- Selección de un método de evaluar la eficiencia, el Cuadro de Mando Integral y los KPI
  - Revisión de la literatura existente sobre KPI del sector del transporte para escoger un conjunto de KPI adecuado
  - Revisión de los métodos de mejora de la eficiencia aplicables al CMI y los KPI
  - Selección y revisión del método elegido: la Matriz de Transformación de los Costes de mejora de los KPI (MTCMI)
  - Revisión de los métodos de resolución de Sistemas Lineales aplicables.
  - Selección de un método: Estudio de la Estructura Propia de la Matriz
  - Aplicación del método del Estudio de la Estructura Propia de la Matriz a la MTCMI
- Aplicación a un caso de estudio, en un operador de transporte urbano de una gran ciudad: La Empresa Municipal de Transportes de Madrid S.A.

En la Tabla 1-1 siguiente, presentamos un resumen de las etapas, objetivos y metodologías utilizadas en el trabajo.

<b>PARTES</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Teórica	OE1	Revisión de fuentes documentales	Recopilación y estudio del estado del arte en los métodos de evaluación y mejora de la eficiencia de las empresas de transporte
	OE2	Revisión de fuentes documentales	Revisión de la literatura existente sobre KPI del sector del transporte para escoger un conjunto de KPI adecuado
Empírica	OE3	Cuadro de Mando Integral	Selección de un método de evaluar la eficiencia, el Cuadro de Mando Integral y los KPI
	OE4	Matriz de Transformación de los Costes de mejora de los KPI (MTCMI)	Selección y revisión del método elegido
	OE5	Lógica difusa y Estudio de la Estructura Propia de la Matriz	Selección de un método: Estudio de la Estructura Propia de la Matriz
	OE6	Método de caso	Aplicación del método del Estudio de la Estructura Propia de la Matriz a la MTCMI

Tabla 1-1; Fases, objetivos y metodologías aplicadas en la Tesis

## 1.4 Estructura de la tesis

La tesis se estructura en los siguientes capítulos:

### **Capítulo 1. Introducción**

Se plantea el problema que se quiere abordar en la tesis, perfilándose los principales objetivos a lograr con la implementación de la metodología. Se comenta brevemente el contenido de la investigación.

### **Capítulo 2. Caracterización de los servicios de transporte urbano en España**

Se hace un repaso de la situación del sector objeto de análisis en la tesis, los operadores de transporte urbano en España, estudiando las características generales así como la naturaleza de las empresas evaluadas y definiendo la necesidad de estas empresas de mejorar su eficiencia.

### **Capítulo 3. Estado del arte de la mejora de la eficiencia técnica de los servicios de transporte urbano.**

Se lleva a cabo un repaso al estado del arte de la mejora de la eficiencia. Se evalúa la idoneidad de cada uno de los enfoques existentes. Por último, se hace una revisión de estudios de diversos autores que utilizan métodos de mejora de eficiencia en sistemas complejos.

### **Capítulo 4. Metodologías de aplicación a la mejora de la eficiencia en las empresas de transporte urbano**

Se desarrolla un marco teórico para resolver el problema de como encaminar mejor la mejora de la eficiencia global de la empresa de transporte público. Para ello, primero se escogen unos indicadores clave de eficiencia basándonos

en la teoría del Cuadro de Mando Integral, justificándose, mediante revisión de la literatura, la elección realizada y la extensión de estos indicadores en las principales empresas de transporte público urbano de Europa.

### **Capítulo 5. Selección de un método de resolución de la MTCMI: análisis de la autoestructura**

Se escoge una metodología de resolución de sistemas lineales para resolver el problema de evaluar que indicadores tienen que interrelación con los otros y se usa una herramienta de lógica difusa para expresar la interrelación anterior, definiendo posteriormente una forma de asignar prioridades a los distintos **Indicadores Clave de Eficiencia (KPI)**, basándonos en el coste iterativo de la mejora de cada uno de ellos y en ver cómo crecen o decrecen unos en comparación con otros.

### **Capítulo 6. Aplicación a un caso de estudio**

Se aplica lo expuesto en el apartado anterior a un operador. Se describen las características del operador de transporte urbano a analizar, así como las características socioeconómicas de la ciudad en las que presta servicio. También se estudia la evolución en eficiencia y del nivel de servicios de transporte público de este operador.

### **Capítulo 7. Conclusiones**

Se indican las principales conclusiones del estudio, señalando las aportaciones más importantes y enumerando las posibles vías a seguir en posteriores investigaciones relacionadas con el tema tratado en esta tesis.

### **Capítulo 8. Bibliografía,**

Se citan todos aquellos estudios, trabajos, artículos y páginas web que han sido consultados en el desarrollo de la tesis.

## **Capítulo 9. Apéndices.**

El Apéndice 1 recoge la metodología completa de creación y estudio de la Matriz de la Estructura de Diseño, una base muy importante para el desarrollo de la metodología que se utiliza en esta tesis.

El Apéndice 2 recoge la metodología completa de creación y estudio de la Matriz de Transformación de los Trabajos, otra base muy importante para el desarrollo de la metodología que se utiliza en esta tesis.

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SERVICIOS DE TRANSPORTE URBANO EN ESPAÑA

En este capítulo se hace una breve introducción a los servicios de transporte urbano en España. Para ello se divide el capítulo en cuatro apartados: en el primero se repasa la evolución histórica del sector. En el segundo, se estudian las grandes cifras de los servicios de transporte urbano españoles, En el tercero, se exponen a modo de conclusión los principales datos de movilidad de los viajeros en España, y en el último, se analiza el por qué es necesario la mejora de la eficiencia en las empresas de transporte urbano.

### 2.1 Evolución histórica del sector del transporte urbano en España

En este apartado haremos un breve estudio a la historia del transporte urbano en superficie en España, estudiando los diferentes modos de transporte a lo largo del tiempo. Se empieza con el ómnibus, para continuar con el tranvía, los trolebuses y finalmente con el autobús durante los últimos noventa años. El autobús es el modo de transporte público urbano en superficie dominante en la actualidad.

Para la redacción de este punto se han consultado las principales páginas web de transporte urbano y de las empresas de transporte urbano de las mayores ciudades de España así como el libro (Papayanis, 1997).

#### Ómnibus

El ómnibus fue el primer modo de transporte público urbano que se usó. Lo puso en funcionamiento Blaise Pascal en París en el año 1662 (Papayanis, 1997) y no apareció en las ciudades españolas hasta la década de los años 40 del siglo XIX (1840 en Barcelona y 1843 en Madrid). Consistía en un pequeño

vehículo arrastrado por caballos. Su capacidad no era muy alta, entre nueve y dieciséis pasajeros, dependiendo si era de un piso o de dos.

A partir de 1870 compartieron las calles con los primeros tranvías. Con el inicio del siglo XX desaparecieron en Madrid, mientras que en Barcelona se mantuvieron hasta los años 30.

## Tranvía

El primer tranvía de España empezó a funcionar en Madrid en el año 1871, seguido de Barcelona, Bilbao y Valencia. Durante los años 80 del siglo XIX el tranvía se extendió a la mayoría de las ciudades grandes y medianas de España. Los primeros tranvías eran de tracción animal. La tracción eléctrica no llegó hasta finales del siglo XIX. El primer tranvía eléctrico fue el de Bilbao en el año 1896.

A partir de los años 50 del siglo XX, los tranvías empezaron a perder peso frente al trolebús y el autobús. En los años 60 desaparecieron de casi todas las ciudades españolas, debido a las dificultades económicas de muchas de ellas y a la creciente competencia de los autobuses, desapareciendo completamente durante los años 70.

En el año 1994 Valencia reintrodujo el tranvía, pero con una importante diferencia, ya que se hizo, siempre que se pudo, por una vía separada del tráfico rodado general. De esta forma los diferentes modos no se interfieren y se mejora la velocidad comercial del tranvía.

Posteriormente diversas ciudades han seguido los pasos de Valencia, como Bilbao en 2002, Alicante en 2003, Barcelona en 2004, Madrid, Tenerife, Sevilla, Murcia y Vélez-Málaga en 2007, Vitoria en 2008, Zaragoza y Jaén en 2011. Todos estos proyectos eran muy electoralistas y no se estudió adecuadamente su viabilidad económica por lo que muchos de ellos o se enfrentan en la actualidad a importantes problemas económicos o han cerrado, como el de Parla.

En algunas ciudades como Soller y La Coruña, los tranvías se han mantenido o reintroducido con fines turísticos.

### Trolebús

El trolebús es un autobús de tracción eléctrica, o un motor de tranvía en un autobús, que circula por las calles con más libertad que el tranvía por no estar limitado por las vías y que toma la corriente de un cable aéreo mediante un largo trole que gira lateral y horizontalmente y que le permite separarse bastante del trazado de la catenaria.

Su existencia en España fue corta, ya que comenzó en los años 40 del siglo XX (el primer trolebús empezó a funcionar en Bilbao en el año 1940) y terminó en los años 70, cuando los combustibles fósiles todavía eran baratos y no se preveía tener que volver a la tracción eléctrica. El trolebús actuó de puente entre los tranvías y el autobús. El último funcionó en Pontevedra hasta 1989. En el año 2008 fue reintroducido en Castellón de la Plana.

En la actualidad, es todavía un modo de transporte muy utilizado en la mayoría de los países de Europa del Este y en algunos de Iberoamérica.

### Autobús

El autobús es el sistema de transporte público urbano de superficie más usado en las ciudades españolas. La flexibilidad que presenta frente a los tranvías y los trolebuses, en cuanto a necesidades de infraestructura y su economía de adquisición, explica su gran implantación.

Se utilizó por primera vez en Barcelona en 1906, en una línea que cubría el Paseo de Gracia. Debido a su bajo rendimiento y a la multiplicidad de problemas mecánicos de aquellos primeros modelos, desapareció en el año 1908. En el año 1922 fue reintroducido en Madrid y Barcelona, siguiéndoles Valencia en 1927 y Las Palmas de Gran Canaria en 1929. Desde entonces, no

ha dejado de usarse. Hasta mediados de siglo, estuvo siempre detrás del tranvía y no fue hasta que llegaron los problemas económicos de la industria ferroviaria en los 70 que el autobús tuvo la oportunidad de ocupar el primer lugar.

Los servicios de autobús urbano atravesaron problemas económicos durante los años 50 y 60 debido a la creciente motorización del país, hasta llegar a una situación financiera límite, momento en el que muchos Ayuntamientos tomaron la decisión de municipalizar los servicios. Madrid, en 1947, inició el proceso, si bien, en algunos casos como Palma de Mallorca, la municipalización no se produjo hasta 1985.

Durante los años previos a la crisis económica iniciada en 2008-2009, se produjo un importante esfuerzo inversor en la renovación de las flotas y en la aplicación de nuevas tecnologías a los servicios (Informes del Observatorio de la movilidad metropolitana, 2005-2011). La introducción de los sistemas de ayuda a la explotación (SAE), la accesibilidad de los vehículos para personas de movilidad reducida, la inclusión de diferentes sistemas tecnológicos que facilitan la información al usuario y el pago así como la ampliación de las flotas con autobuses de gas (GNC y GLP), híbridos o eléctricos han conseguido que las flotas actuales estén relativamente modernizadas, mejorando la calidad de los servicios y aumentando su atractivo hacia los usuarios.

En la actualidad, los servicios son prestados o bien por empresas públicas pertenecientes a los ayuntamientos o bien a través de concesiones a operadores privados. En la mayoría de los casos, los ingresos tarifarios de las empresas son inferiores a los costes de explotación (Sánchez Toledano, Carrasco Díaz, & Sánchez Toledano, 2014) por lo que es necesario el aporte de subvenciones por parte de las administraciones públicas para cubrir el déficit. En algunos casos de gran desequilibrio, esta situación ha provocado problemas de frecuencias y conflictividad laboral con los trabajadores.

En la imagen siguiente se resume la cronología de cada uno de los modos de transporte públicos urbanos de superficie en España, indicándose los principales hitos de cada uno de ellos.

### Energía de Tracción

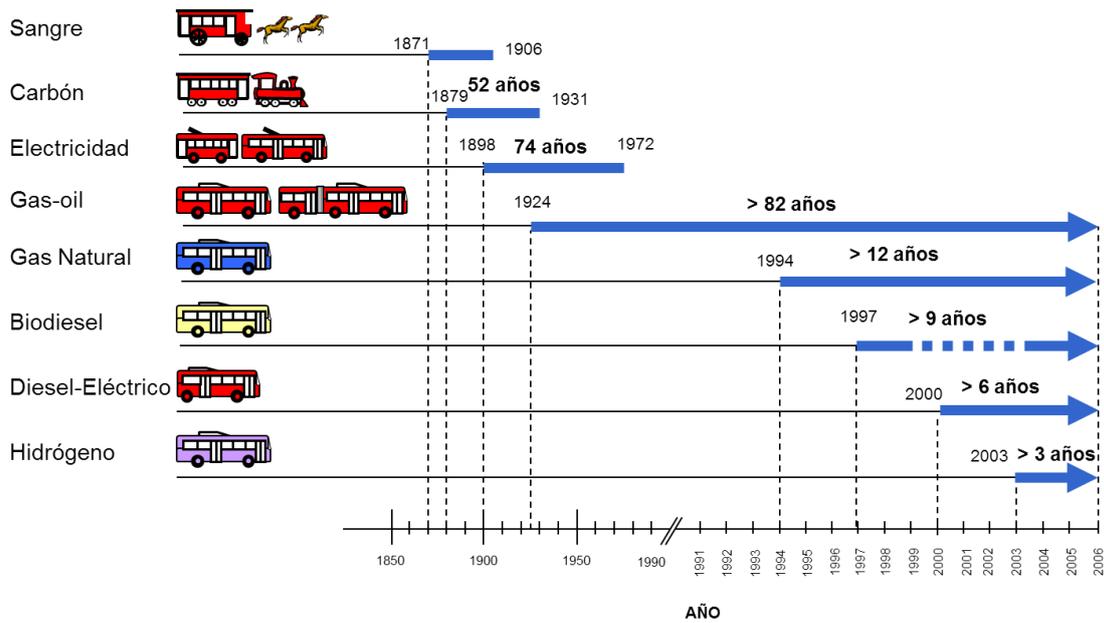


Imagen 2-1; Cronología de los modos de transporte públicos urbanos de superficie en España.

Fuente: EMT de Madrid

## 2.2 Situación global de los servicios de transporte urbano en España

En este apartado se incluyen algunas de las cifras más representativas sobre la situación de los servicios de transporte urbano en España.

El sector está constituido por 189 empresas (CEOE, 2009), de las que 32 son de gestión municipal, generalmente, las de las grandes ciudades. Las 157 empresas restantes son empresas privadas que operan en pequeñas ciudades en régimen de concesión.

El conjunto de las empresas factura aproximadamente 1.200 millones de euros al año (0,1 % del PIB), dando empleo a unos 22.200 trabajadores, 16.000 de ellos de las empresas públicas. La flota total es de unos 7.200 vehículos, 4.800 de los cuales pertenecen a las grandes empresas de gestión municipal.

En las tablas 2-1, 2-2 y 2-3 se indican la información que recopila el Ministerio de Fomento (2015) respecto al sector.

	Total			Metropolitano			Autobuses				
	N.º de viajeros (millones)	Índice 2000=100	Participación (%)	N.º de viajeros (millones)	Índice 2000=100	Participación (%)	N.º de viajeros (millones)	Índice 2000=100	Participación (%)	N.º de viajeros en municipios > 500.000 hab.	Nº de viajeros del resto de los municipios
2000	2.609,2	100	100	871,2	100	33,4	1.738,0	100	66,6	1.033	705
2001	2.636,9	101	100	904,9	104	34,3	1.732,0	100	65,7	s.d.	s.d.
2002	2.618,0	100	100	932,0	107	35,6	1.686,0	97	64,4	966	720
2003	2.702,8	104	100	1.005,8	115	37,2	1.697,0	98	62,8	973	724
2004	2.809,0	108	100	1.089,0	125	38,8	1.720,0	99	61,2	970	750
2005	2.952,2	113	100	1.131,2	130	38,3	1.821,0	105	61,7	973	848
2006	3.005,6	115	100	1.157,6	133	38,5	1.848,0	106	61,5	1.003	845
2007	3.060,4	117	100	1.210,4	139	39,6	1.850,0	106	60,4	967	883
2008	3.030,4	116	100	1.220,4	140	40,3	1.810,0	104	59,7	925	885
2009	2.932,2	112	100	1.177,6	135	40,2	1.754,6	101	59,8	912	843
2010	2.919,7	112	100	1.183,7	136	40,5	1.736,0	100	59,5	898	838
2011	2.938,0	113	100	1.199,5	138	40,8	1.738,5	100	59,2	888	850
2012	2.793,4	107	100	1.146,0	132	41,0	1.647,4	95	59,0	846	802
2013	2.721,7	104	100	1.096,1	126	40,3	1.625,6	94	59,7	839	786
2014	2.742,0	105	100	1.110,8	128	40,5	1.631,1	94	59,5	836	795
2015	2.785,1	107	100	1.133,1	130	40,7	1.651,9	95	59,3	844	808

Tabla 2-1; Número de viajeros de transporte urbano 2000-15.

Fuente: Ministerio de Fomento

A lo largo de los últimos 20 años, el número de viajeros ha oscilado entre los 1.600 millones y los 1.800 millones anuales. La situación en ese periodo es, por tanto, bastante estable. Del total de viajeros, unos mil millones son transportados en las empresas de las cinco ciudades españolas más grandes (Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla y Zaragoza). Los otros millones (600-800) son viajeros del resto de ciudades. La tendencia en los últimos años es la de un descenso de viajeros en las principales ciudades, causado por la competencia de los modos ferroviarios, que han experimentado importantes crecimientos en sus redes y los efectos sobre el empleo, y por tanto, sobre la movilidad, que ha causado la crisis económica. Por otro lado, se produce un crecimiento de

viajeros en pequeñas y medianas ciudades, de tal manera que las cifras en el año 2015 son prácticamente similares para ambos grupos.

En la Tabla 2-2 se muestran los viajeros de servicios de transporte urbano por CC.AA. Destacan la Comunidad de Madrid, que representa el 27,6 % del total de viajes, seguida de Cataluña, con el 16,34 % y Andalucía, con el 13,34 %. Son las comunidades más pobladas y con las áreas metropolitanas más importantes de España, de ahí que entre las tres sumen casi el 60% de los viajes. Aragón y la Comunidad Valenciana, con las áreas metropolitanas de Zaragoza y Valencia, aportan cada una un 7% adicional, con lo que junto a las anteriores, alcanzan un porcentaje de casi el 75% de los viajes en transporte urbano del país.

Unidades: Miles de viajeros

COMUNIDADES AUTÓNOMAS	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
ANDALUCÍA	237.068	231.446	226.132	218.497	214.537	215.772	220.716
ARAGÓN	125.519	123.712	120.528	117.751	118.328	119.669	119.866
ASTURIAS	35.142	36.814	35.819	34.110	33.642	33.080	32.773
CANARIAS	53.565	53.693	54.113	51.953	52.807	53.693	55.148
CASTILLA Y LEÓN	74.783	73.869	75.199	70.836	66.305	65.386	65.032
CASTILLA - LA MANCHA	24.287	24.297	24.675	22.386	19.355	18.973	18.846
CATALUÑA	303.383	292.321	291.929	265.181	262.355	265.084	270.313
VALENCIA	135.129	130.129	130.887	124.353	123.982	126.248	127.964
EXTREMADURA	12.367	11.926	12.017	11.686	11.154	10.923	10.674
GALICIA	61.174	60.759	62.258	60.393	60.206	60.219	60.336
MADRID	482.782	482.790	484.407	458.158	456.579	451.146	456.808
MURCIA	17.158	17.261	18.911	18.245	16.653	17.161	17.496
PAÍS VASCO	74.400	78.768	81.678	82.380	80.811	83.146	84.266
OTRAS (1)	118.042	118.407	119.707	111.514	108.935	109.153	111.707
<b>TOTAL</b>	<b>1.756.808</b>	<b>1.738.202</b>	<b>1.740.271</b>	<b>1.649.455</b>	<b>1.627.662</b>	<b>1.631.667</b>	<b>1.653.960</b>

(1) Desde el año 2002 incluye Baleares, Cantabria, Navarra y La Rioja. A partir de 2005 Ceuta y Melilla pasan a 'Otras' y salen de Andalucía.

Tabla 2-2; Viajeros transporte urbano, por CC.AA. 2009-2015

Fuente: Ministerio de Fomento (2009)

Por último, en la Tabla 2-3 se muestran algunas de las características de los servicios de transporte urbano en España para las principales ciudades. Así, mientras la oferta de infraestructura, la flota, o la cantidad de servicios ofrecidos aumenta considerablemente, el número de viajeros permanece estable en

torno a los mil millones anuales. Como se indica más arriba, este estancamiento de la demanda, pese al aumento de la oferta, se puede deber a la mejora de los modos ferroviarios, a la crisis económica y al mayor uso del coche.

AÑOS	Líneas de transporte		Vehículos			N.º de viajeros (millones)	N.º de viajeros /km (millones) (*)
	Número	Km	Número	Plazas-km ofertadas (millones)	Vehículos-km (millones)		
2000	379	6.083	3.808	15.492	189,1	1.033,0	s.d.
2001	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
2002	408	5.408	4.044	16.768	191,1	965,7	s.d.
2003	411	5.451	4.134	17.168	196,1	972,5	s.d.
2004	416	5.587	4.112	16.967	193,4	969,9	s.d.
2005	430	5.743	4.176	17.044	194,0	973,2	s.d.
2006	457	6.208	4.272	17.396	198,0	1.002,7	s.d.
2007	461	6.246	4.336	17.443	197,9	967,4	s.d.
2008	469	6.324	4.385	17.216	195,4	925,3	s.d.
2009	482	6.536	4.422	17.782	202,6	912,2	s.d.
2010	487	6.602	4.401	17.642	202,1	898,2	2.495,3
2011	478	6.596	4.380	17.206	201,9	887,8	2.511,3
2012	473	6.629	4.255	16.764	197,2	845,6	2.432,8
2013	449	6.280	4.175	16.465	189,7	839,4	2.458,5
2014	446	6.269	4.153	16.244	186,3	835,8	2.436,7
2015	453	6.347	4.165	16.462	185,6	843,6	2.463,9

(\*) Cifra real o estimada por medio del número de viajeros y el recorrido medio de los mismos para el año.  
s.d.: Sin dato.

**Tabla 2-3; Características de los servicios de transporte urbano de las cinco ciudades más habitadas de España. Años 2000-2015.**

**Fuente: Ministerio de Fomento (2015)**

Como puede observarse por los datos analizados en este apartado, los servicios de transporte urbano, en España no suponen una parte importante del PIB, pero sin duda son un sector fundamental para el funcionamiento de la economía. Las cifras de viajeros indican que las empresas llevan años transportando la misma cantidad de personas.

Este hecho entra en contradicción con el aumento de la población y de la movilidad. Lo que ocurre es que los viajes en transporte urbano están creciendo a un ritmo menor que los viajes en los nuevos modos ferroviarios y, sobre todo, los viajes en coche. La causa no es exclusiva de la calidad del servicio, el problema es el nuevo desarrollo urbano, consistente en un urbanismo de baja densidad y basado en gran cantidad de infraestructura viaria, lo que fomenta un mayor uso del vehículo privado.

### **2.3 Las principales pautas de movilidad en las ciudades**

Durante el año 2014 se contabilizaron en el conjunto de las áreas metropolitanas alrededor de 3.300 millones de viajes. Aproximadamente 1.623 millones de esos viajes se realizaron en autobús, mientras que 1.678 millones se realizaron en modos ferroviarios (metro, tranvía y ferrocarril de cercanías). Dichas cifras son muy similares, suponiendo respectivamente un 49,3% y un 50,7% de todos los viajes realizados, porcentajes casi idénticos a los del año anterior.

En cuanto a los viajes realizados en autobús, alrededor de 1.255 millones de viajes se realizaron en autobús urbano frente a los 368,1 millones de viajes realizados en autobús metropolitano. Esto se explica porque en las ciudades la necesidad de desplazamiento es mayor y por ello se realizan diariamente muchos más viajes que a nivel metropolitano.

El metro, por su parte, supuso un total de 1.097,4 millones de viajes y las cercanías de Renfe 393,4 millones de viajes. Se debe destacar el importante papel que juega el metro en la movilidad urbana, pues a pesar de encontrarse solamente en 6 de las áreas metropolitanas estudiadas su número de viajes es ligeramente inferior al de viajes en autobús urbano, presente en todas las áreas metropolitanas estudiadas.

El tiempo medio de viaje en el conjunto de las áreas metropolitanas es de 19,2 minutos, casi un minuto superior al dato de 2013. Este indicador viene

fuertemente influenciado por el tamaño de las áreas metropolitanas siendo mayor cuanto más grande es el área, como es el caso de Madrid, con 29 minutos. Finalmente, observando el indicador correspondiente al porcentaje de viajes intermodales se puede apreciar la gran diferencia que existe en este indicador entre cada una de las áreas metropolitanas. De este modo, aunque el valor promedio es de 5,1%, en las áreas correspondientes a Madrid, Barcelona, Alicante o Lleida se alcanzan valores cercanos al 10%, debido a su extensión y variedad de oferta de Transporte Público.

El reparto modal es el siguiente:

Los viajes por motivo de trabajo presentan un claro predominio del vehículo privado, suponiendo el 62% de los desplazamientos totales.

Para el resto de modos de transporte se puede apreciar la gran influencia que tiene la superficie del área metropolitana. Así, en las ciudades pequeñas, donde las distancias son menores y hay menos tráfico, los desplazamientos a pie y bicicleta superan a los realizados en transporte público, como en Alicante, Lleida o Pamplona, con un 27% frente al 10% del transporte público.

Sin embargo, en las ciudades grandes, donde las distancias y el tráfico son mayores, el transporte público juega un importante papel en la movilidad diaria, alcanzando el 23% de los desplazamientos totales en el conjunto de las áreas formadas por Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla y Bizkaia.

Durante el periodo de crisis económica, este tipo de movilidad ha sufrido cambios en el reparto modal de los viajes, disminuyendo de forma general la movilidad realizada en los modos motorizados, especialmente en los privados, y aumentando ligeramente la movilidad realizada a pie y bicicleta.

En paralelo, estamos asistiendo a cambios en el modelo de movilidad urbana: aumento de la movilidad peatonal -propiciada por su priorización en los centros urbanos- así como del uso de la bicicleta, con crecimientos espectaculares en algunas ciudades. De este modo, nuestras ciudades se suman a una tendencia generalizada en los países más avanzados, con un cambio de “cultura” de movilidad como indicaba el Libro Verde de la Movilidad Urbana, lanzado como

documento de debate por la Unión Europea en 2007 (CE, 2007). Asimismo, estamos asistiendo a la proliferación de nuevas iniciativas de movilidad, englobadas en el concepto de “shared-economy: car-sharing, bike-sharing, parking-sharing”, que supone resolver los problemas de movilidad mediante una oferta flexible a nivel individual, sin el recurso a la propiedad del vehículo. Esto lleva a muchos a preconizar que los servicios de transporte se integrarán ofertando paquetes completos de todos los servicios de movilidad, en lo que se está empezando a denominar MaaS: (Mobility as a Service).

Ante esta situación, los servicios de transporte urbanos se enfrentan en el futuro próximo a un importante reto, que no solo consiste en aumentar el número de viajeros que transportan, sino en hacerlo a un coste relativo menor, siendo necesario para ello mejorar la eficiencia en su gestión, con el objeto de ser más competitivo.

## **2.4 Por qué es necesario mejorar la gestión de la eficiencia en las empresas de transporte urbano**

Para la mayoría de las empresas de transporte urbano, mejorar continuamente la eficiencia se ha convertido en un tema crítico para ganar y mantener la competitividad. Las mejores empresas de transporte urbano, como Transport for London, RATP de París, BVG de Berlín, EMT de Madrid, etc..., utilizan diferentes herramientas de gestión de la eficiencia para medir los resultados de sus estrategias. Pero el seguimiento y la mejora de la eficiencia de una empresa de transporte urbano se han convertido en una tarea cada vez más compleja.

Un sistema complejo de gestión de la eficiencia incluye muchos procesos de gestión, (Cai, Liu, Xiao, & Liu, 2009) como:

- Identificación de medidas,
- Definición de objetivos,

- Planificación,
- Comunicación,
- Supervisión,
- Información
- Realimentación.

Estos procesos se han incorporado en la mayoría del software de Sistemas de Información Empresarial tales como:

- SAP,
- Enterprise Performance Management de Oracle,
- i2 de IBM,
- etc.

Estos programas miden y monitorizan los Indicadores Clave de Eficiencia (KPI) que son cruciales para optimizar la eficiencia de las empresas de transporte urbano. Para las empresas es fundamental medir su comportamiento para mejorar su eficacia y la eficiencia de sus operaciones de transporte.

Mejorar la eficiencia de la empresa de transporte urbano es un proceso continuo que requiere tanto un sistema analítico de medición de la eficiencia como la puesta en práctica de unos procesos de negocio que la mejoren para conseguir los objetivos marcados para los KPI (Kittelsohn & Associates Inc. et al., 2003).

Para medir la eficiencia de la empresa de transporte urbano se usa un conjunto de indicadores que miden la influencia del funcionamiento real de la operación de las empresas sobre los ingresos y los costes de todo el sistema. Estas variables se han obtenido de las prácticas de gestión de las empresas de transporte urbano y de los estudios de Benchmarking realizados por varias organizaciones que pretendían medir la eficiencia de dichas prácticas y la mejora de las mismas (Iglesias Pérez, 2014) (Král & Roháčová, 2013).

Después de seleccionar los KPI de entre todos los indicadores posibles, generalmente los directivos tienen que intentar mejorarlos para llegar a su punto óptimo a través de:

- Planificación,
- Monitorización
- Ejecución.

De acuerdo con los resultados de los Procesos de Mejora de los KPI seleccionados, los directivos pueden hacer informes actualizados sobre esos KPI, para comparar las varias posibilidades de gestión de la empresa de transporte urbano. En ese ciclo de Gestión de la Eficiencia, se encuentran muchos problemas, tanto en la medición de la eficiencia como en su mejora.

Los directivos de las empresas de transporte urbano, por lo general, centran sus esfuerzos en la selección de un método adecuado (que sea eficiente en la relación efectividad / coste) para evaluar la eficiencia de su empresa. Pero una vez que se selecciona y desarrolla adecuadamente un método de evaluación de la eficiencia de la empresa, los directivos deben poder identificar cuáles de los puntos que se pueden mejorar deben ser los primeros en la lista de los objetivos de mejora.

Sin embargo, para ellos es difícil definir con una función matemática asequible las complejas relaciones (Rodríguez Rodríguez, Alfaro Saiz, & Ortiz Bas, 2009) entre todos los diferentes factores que intervienen en la eficiencia de la empresa y escoger el orden de prioridad de los factores para mejorar la eficiencia general de la empresa mejorando cada uno de ellos.

La determinación de prioridades dentro de un conjunto dado de factores se ha convertido en un cuello de botella para muchas empresas en sus esfuerzos por mejorar su gestión de la operación de transporte, pues estos problemas han recibido relativamente poca atención de los investigadores hasta ahora y hay todavía grandes lagunas entre las necesidades prácticas de las empresas y las soluciones desarrolladas (Cai, Liu, Xiao, & Liu, 2009)

En el apartado siguiente, se desarrollan y explican los métodos que existen actualmente para la medición de la eficiencia en las empresas, con el objetivo de identificar aquel que se considera más oportuno para el desarrollo de esta tesis.

### **3. ESTADO DEL ARTE DE LA EVALUACIÓN Y MEJORA DE LA EFICIENCIA DE LAS EMPRESAS DE TRANSPORTE URBANO**

La medida de la eficiencia empresarial empieza con el trabajo de (Debreu, 1951), el primer autor que se pregunta cómo se puede medir la ineficiencia en el uso de recursos, definiéndola como la distancia entre la producción real y la producción óptima. En su trabajo, establecía un ratio entre recursos consumidos y un índice de precios, que podía tomar valores entre 0 a 1, siendo este último el valor de la eficiencia máxima. De esta manera, estableció las bases de la medición de la eficiencia en el uso de recursos, las empresas ineficientes y la ineficiencia de la organización económica (Farrell, 1957), basándose en el trabajo de (Debreu, 1951), estableció otra medida de la eficiencia mediante un ratio outputs-inputs. En ese trabajo Farrel (1957) perfila el concepto de la frontera de eficiencia y señala que se podría establecer bien por cálculos de ingenieros especializados o mediante el estudio de los comportamientos reales de las empresas analizadas. Define la eficiencia como el éxito en producir la mayor cantidad posible de outputs con una determinada cantidad de inputs dada y comenta que, aunque no es la mejor forma de medir la eficiencia de las empresas, sí que es práctica y satisfactoria. Estableciendo, por tanto, un marco de estudio continuado por numerosos autores posteriormente.

#### **3.1 Métodos de evaluación y mejora de la eficiencia en la empresa**

En una búsqueda realizada sobre la medición de la eficiencia en las empresas, (Prior, 1989) se han encontrado los siguientes métodos de gestión de la eficiencia:

Los métodos frontera:

- Análisis de la Envolvente de Datos (Data Envelopment Analysis, DEA)
- Análisis DEA-Chebyshev DCF
- Análisis de Frontera Gruesa, (Thick Frontier Analysis, TFA),
- Aproximación a Distribución Libre, (Distribution Free Approach, DFA),
- Análisis de Frontera Estocástica (Stochastic Frontier Analysis, SFA)

Otros sistemas como:

- Cuadro de Mando Integral (Balanced Score Card o BSC),
- Coste Basado en la Actividad (Activity Based Costing o ABC)
- Matriz de Medición de la Eficiencia,
- Marco de Determinantes de Resultados,
- Pirámide de Eficiencia,

Herramientas de la Teoría de Toma de Decisiones

- Proceso de Jerarquía Analítica (Analytic Hierarchy Process, AHP)
- Análisis Relacional Gris.

### 3.2 Métodos frontera

Los métodos frontera son aquellos en los que se utiliza una frontera de eficiencia para clasificar a las distintas empresas. La frontera de eficiencia se obtiene a partir de las observaciones reales realizadas y a ella pertenecen sólo los casos de mejores prácticas. Se consideran ineficientes todas las empresas que no estén dentro de la frontera.

En las últimas décadas se han desarrollado dos enfoques en la evaluación de la eficiencia mediante métodos frontera (Neely, 2005):

Los métodos paramétricos, orientados principalmente a la evaluación de la eficiencia en la asignación de recursos, aunque también a la evaluación de la eficiencia técnica

Los métodos no paramétricos, usados exclusivamente para evaluar la eficiencia técnica

Dentro de ellos se distinguen los Determinísticos de los Estocásticos y forman cuatro enfoques diferentes, en función de la medición del error:

	Medición del error	
	Determinísticos	Estocásticos
Paramétricos	OLS corregido, etc.	Métodos Frontera con supuestos explícitos sobre la distribución del término de error
No paramétricos	FDH, DEA y modelos similares	Programación de re-muestreo limitado

Tabla 3-1; Clasificación Métodos evaluación de la eficiencia.

Fuente: De Borger et al., 2002

En el sector del transporte urbano han sido más utilizados para la evaluación de la eficiencia de costes y la eficiencia técnica los métodos paramétricos estocásticos y los métodos no paramétricos determinísticos.

### 3.2.1 Métodos paramétricos

Se pueden utilizar dos tipos de funciones objetivo (Viton, 1986);

- las funciones de producción, en las que manteniendo constante el valor de los inputs se busca la optimización maximizando la cantidad de outputs obtenidos. Se usan para evaluar la eficiencia técnica.
- las funciones de costes, en las que se mantienen constantes los valores de los outputs y se optimiza minimizando la cantidad de inputs utilizada en la producción. Con ellas se evalúa la eficiencia en la asignación de recursos.

En ambos casos se dice que son funciones frontera, ya que representan un máximo o un mínimo no rebasable. La producción de una empresa  $k$  se puede expresar mediante una función de producción de la siguiente manera:

$$y_k = f(x_k; \beta) + \varepsilon_k \quad (3.1)$$

El valor de la producción es  $y_k$ . Para alcanzarlo, es necesario que se consuma una serie de inputs  $x_k$ , representado mediante la función  $f(x_k; \beta)$ , siendo  $\beta$  un vector de parámetros desconocido. La ineficiencia técnica, o desviación en la producción, de la empresa  $k$  respecto al resto de empresas que comparten la misma tecnología, es decir, respecto a la frontera, viene representada por el término de error  $\varepsilon_k$ . El principal inconveniente de estos modelos es que se debe suponer, *a priori*, la forma de la función  $f(x_k; \beta)$ , siendo habituales, entre otras, las siguientes suposiciones:

- Función Cobb-Douglas. Popularizada a partir del trabajo de (Cobb & Douglas, 1928), esta función relaciona la producción con el trabajo y el capital consumidos. El uso de variaciones de la función está muy extendido en la resolución de problemas económicos. La función original presenta la siguiente forma  $Q = \beta L^\alpha K^{1-\alpha}$ , (donde  $Q$  representa la producción,  $L$  el trabajo y  $K$  el capital.  $\beta$  y  $\alpha$  son parámetros a estimar).
- Función translogarítmica La función translogarítmica es una generalización de la función de producción Cobb-Douglas. Su nombre procede de "transcendental logarítmica". Presenta la siguiente forma

$$\ln(Q) = \ln(A) + \alpha_l \ln(L) + \alpha_k \ln(K) + \alpha_m \ln(M) + \beta_{ll} \ln(L) \ln(L) + \beta_{kk} \ln(K) \ln(K) + \beta_{mm} \ln(M) \ln(M) + \beta_{lk} \ln(L) \ln(K) + \beta_{lm} \ln(L) \ln(M) + \beta_{km} \ln(K) \ln(M)$$

donde  $Q$  representa la producción,  $L$  el trabajo,  $K$  el capital y  $M$  los suministros.  $A$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes de la regresión.

- Función cuadrática<sup>1</sup> de costes de (Viton, 1986). Para evaluar las economías de alcance en un contexto de múltiples salidas, es crucial utilizar una función de costo cuadrática porque permite la incorporación de cero salidas. Ésto no es posible con la función de Cobb-Douglas ni con la función Translogarítmica donde todas las salidas se dan en registros. La función de coste cuadrático se puede escribir como:

---

<sup>1</sup> El nombre "cuadrático" se refiere a la presencia de términos cuadráticos de productos y precios de los factores; No impone ninguna asunción *a priori* de la tendencia de las curvas de costo.

$$\begin{aligned}
C_{it} = & \alpha + \beta_Y Y_{it} + \beta_Q Q_{it} + \beta_K W_{K_{it}} + \beta_L W_{L_{it}} \\
& + \frac{1}{2} (\beta_{YY} (Y_{it})^2 + \beta_{QQ} (Q_{it})^2 + \beta_{KK} (W_{K_{it}})^2 + \beta_{LL} (W_{L_{it}})^2) \\
& + \beta_{YQ} Y_{it} Q_{it} + \beta_{YK} Y_{it} W_{K_{it}} + \beta_{YL} Y_{it} W_{L_{it}} \\
& + \beta_{QK} Q_{it} W_{K_{it}} + \beta_{QL} Q_{it} W_{L_{it}} + \beta_{KL} \ln W_{K_{it}} W_{L_{it}} \\
& + \beta_N N_{it} + \beta_t t + \varepsilon_{it}
\end{aligned}$$

Otro inconveniente importante en la aproximación expuesta en (3.1) es que los parámetros no son estimados estadísticamente, sino que deben ser calculados utilizando técnicas de programación matemáticas (Murillo-Zamorano L. R., 2004). Por otro lado, y según las especificaciones del término de error  $\varepsilon_k$ , los métodos paramétricos pueden ser clasificados en dos grupos: métodos determinísticos y estocásticos. Hay quien (Murillo-Zamorano L. R., 2004) indica que se han desarrollado varias técnicas determinísticas, como los mínimos cuadrados ordinarios modificados, los mínimos cuadrados ordinarios corregidos y la estimación de la máxima probabilidad. El mismo autor añade que esta vía de investigación ha sido desechada frente a las técnicas estocásticas. Esto se debe a que, para poder aplicar el primer grupo de técnicas, habría que considerar que ningún elemento exterior a las empresas influye en el valor de la producción. Esta hipótesis es poco realista, ya que achacar toda la desviación de la producción respecto de la frontera a la ineficiencia técnica de la empresa en cuestión significaría dejar de considerar elementos sobre los que la empresa no tienen ningún poder (Viton, 1986).

Algunos (De Borger, Kerstens, & Costas, 2002) añaden que los métodos determinísticos dan valores de la eficiencia inverosímilmente bajos respecto a los métodos estocásticos.

Por otro lado, respecto a las técnicas econométricas estocásticas, los trabajos de (Aigner, Lovell, & Schmidt, 1977), (Battese & Corra, 1977) y (Meeusen & van Den Broeck, 1977) supusieron un cambio en el enfoque del problema del estudio de las funciones de producción, ya que en ellos se propuso separar el término de error  $\varepsilon_k$  en dos componentes,  $u_k$  y  $v_k$ , quedando la función de producción (3.1) expresada así:

$$y_k = f(x_k; \beta) + (u_k + v_k) \quad (3.2)$$

Así, la componente  $v_k$  recoge la parte de la desviación en la producción atribuible a las variables exógenas a la empresa o componente estocástica, asumiéndose que es independiente y con distribución normal  $v_k \sim N(0, \sigma^2)$ . En cuanto a la componente  $u_k$ , es la parte del error asociada a la ineficiencia técnica de la empresa y es independiente de  $v_k$ . Al resolver el problema (3.1) se obtiene la desviación o error total, por eso, si lo que se busca es el valor de la ineficiencia técnica (término  $u_k$ ), se ha de separar el término de error  $\varepsilon_k$ , haciéndose algunas estimaciones.

En la literatura se han utilizado diferentes distribuciones estadísticas para la componente  $u_k$ , siendo las más habituales la semi normal y la exponencial (Murillo-Zamorano L. R., 2004). Si se asume que ambas componentes del error  $u_k$  y  $v_k$  son independientes entre sí y respecto a los inputs, y se usa una de las distribuciones indicadas, entonces pueden ser usadas las funciones de probabilidad y se pueden determinar estimaciones de máxima probabilidad (Murillo-Zamorano & Vega-Cervera, 2001) y (Murillo-Zamorano L. R., 2004).

Una cuestión que se presenta es que las distribuciones semi-normal y exponencial tienen moda igual a cero. Esto causa problemas en la evaluación de los valores de la ineficiencia, ya que puede producir niveles de eficiencia técnica altos, al imponerse que la mayoría de las empresas se encuentren próximas a la frontera de eficiencia (valor de ineficiencia igual a cero), lo que no tiene por qué ser acorde a la realidad (Cummins & Zi, 1998). De ahí que se hayan intentado aplicar otras distribuciones, como la distribución Gamma de dos parámetros (Meeusen & van Den Broeck, 1977) (Cummins & Zi, 1998), si bien la complejidad de los cálculos y el mayor número de restricciones impuestas ha ocasionado que en la mayoría de los estudios realizados se utilicen las dos primeras distribuciones (Murillo-Zamorano L. R., 2004).

En algunos trabajos, como los de (Jorgensen, Pedersen, & Volden, 1997) y (Cummins & Zi, 1998) se utilizan diversas distribuciones y después se comparan los resultados utilizando coeficientes de correlación (por ejemplo, el de Spearman). (Cummins & Zi, 1998), a la hora de estudiar la ineficiencia con

una base de datos en la que disponen de información de varios años, hacen lo siguiente:

- Calculan una función de producción para cada año, con lo que pueden estudiar la evolución de los parámetros, es decir, evaluar los cambios tecnológicos en el conjunto de empresas
- Obtienen una única función con el conjunto de datos de todos los años, con lo que consiguen un mayor número de grados de libertad y, además, no necesitan imponer ninguna distribución para la componente  $u_k$ , ya que pueden asumir que es constante a lo largo de los años.

Una vez obtenidos los valores de la ineficiencia técnica  $u_k$ , se puede estudiar, mediante una regresión posterior, la influencia que tienen las variables exógenas sobre ella (Jorgensen, Pedersen, & Volden, 1997); (Coelli, Perelman, & Romano, 1999); (McMullen & Lee, 1999); (Murillo-Zamorano & Vega-Cervera, 2001). Además de hacer la regresión a posteriori, (Coelli, Perelman, & Romano, 1999) incluyen las variables exógenas en el propio modelo, comparando después ambos resultados.

(Murillo-Zamorano & Vega-Cervera, 2001) rechazan esta opción, indicando que es más correcto realizar el método de dos etapas que incluir las variables exógenas en el modelo junto a los inputs, si bien señalan que en ocasiones es complicado saber qué variables son inputs y cuáles son variables exógenas.

Por último, (Roy & Yvrande-Billon, 2007) plantean primero una serie de hipótesis respecto a las variables exógenas, estudiando, mediante test estadísticos, la validez o no de dichas hipótesis. Una vez hecho esto, incluyen esas variables en el modelo, desechando el método de las dos etapas.

Algunos autores, frente a la disyuntiva entre utilizar los modelos frontera paramétricos y los no paramétricos en la obtención de la ineficiencia técnica, aplican ambos métodos siempre que es posible, dada la necesidad de información precisa, y después comparan los resultados (De Borger, Kerstens, & Costas, 2002); (Cummins & Zi, 1998); (Murillo-Zamorano & Vega-Cervera, 2001). Estos estudios concluyen que el método utilizado es determinante a la

hora de establecer una clasificación de empresas en función de su eficiencia. (Murillo-Zamorano & Vega-Cervera, 2001) indican que los métodos paramétricos son útiles para el estudio de los costes de los factores de producción, ya que pueden utilizar los valores de los precios. En cambio, los métodos no paramétricos son más apropiados para evaluar la eficiencia técnica. Por otro lado, en (Brons, Nijkamp, & Pels, 2005) se realiza un meta-análisis con distintos estudios sobre eficiencia técnica, concluyendo que los resultados de los métodos paramétricos y los no paramétricos son bastante similares. Otros (Cullinane, Teng-Fei, Dong-Wook, & Ping, 2006) también hallan importantes correlaciones entre los resultados de ambos métodos, al aplicarlos a terminales de contenedores. Por tanto, no parece claro cuál de los dos métodos es mejor, aunque las limitaciones de uno y otro pueden acabar determinando su uso.

Por último, algunos estudios tratan de combinar ambos métodos de evaluación. Así en (Fried, Schmidt, & Yaisawarng, Incorporating the operational environment into a nonparametric measure of technical efficiency, 1999) (Fried, Lovell, Schmidt, & Yaisawarng, 2002), (Avkiran & Rowlands, 2008) y (Avkiran N. , 2009), se desarrolla una metodología de varias etapas en las que se aplican, combinadamente, métodos no paramétricos y paramétricos, intentando aprovechar las fortalezas de cada uno y evitando sus debilidades.

Si en vez de funciones de producción, tal como se ha explicado a lo largo de este apartado, se usan las funciones de costes, similares a la expresada en (3.1), se puede estimar la eficiencia en la asignación de recursos del conjunto de empresas mediante el estudio de la elasticidad de los factores de producción.

### 3.2.2 Métodos no paramétricos

Los métodos frontera no paramétricos no definen, *a priori*, una forma de la frontera de eficiencia. Además, entre ellos se diferencian en la forma en cómo

se calcula la frontera o de qué manera se mide la distancia entre las unidades analizadas y la frontera, es decir, la eficiencia técnica de cada unidad.

En este apartado se describen aquellos modelos más usados y algunos estrechamente relacionados con ellos.

### 3.2.2.1 Análisis Envolvente de Datos DEA

El Análisis de Envolvente de Datos, (*Data Envelopment Analysis* o DEA, por sus siglas en inglés), iniciado por (Charnes, Cooper, & Rhodes, 1978), es un método no paramétrico en la investigación operativa y en la economía para la estimación de fronteras de producción. Compara los KPI de una empresa con los de las mejores de entre sus homólogas. Se utiliza para medir empíricamente la eficiencia productiva de Unidades de Toma de Decisiones (DMU) que pueden ser empresas o partes de ellas. Aunque la DEA tiene un fuerte vínculo con la teoría de la producción en economía, la herramienta también se utiliza para la evaluación comparativa en la gestión de operaciones, donde se selecciona un conjunto de medidas para comparar la eficiencia de las operaciones de fabricación y de servicio.

El análisis envolvente de datos es un método cuyo objeto es el cálculo de eficiencias relativas de un conjunto de empresas. Las empresas se escogen con características comunes, pero su eficiencia relativa varía según las características propias de cada una de ellas.

El DEA es un método empírico y no paramétrico, no hace ninguna suposición inicial sobre la forma de la frontera y no hay que estimar ningún parámetro (Charnes, Cooper, & Rhodes, 1978). No se da preferencia a ningún factor de la operación: tanto outputs como inputs se incorporan en un único modelo (independientemente de las unidades en las que se midan), lo que supone una ventaja (Pestana & Peypoch, 2010). Se trata, por tanto, de obtener un ratio output múltiple / input múltiple. Por otro lado, el DEA mide la eficiencia relativa respecto a la mejor observación de los resultados de operación del conjunto de

empresas que se están evaluando, frente a la posibilidad de basarse en la media observada o en un resultado de operación predeterminado.

Dados los outputs de la empresa, que miden su producción, y dados los inputs, los recursos consumidos en la producción de los outputs, la eficiencia técnica se calcula mediante el ratio output / input, es decir, la relación de inputs consumidos para producir una determinada cantidad de outputs. Para tal fin, se agregan todos los outputs y todos los inputs y se estudia el ratio conjunto, de ahí el término output e input múltiple. De esta manera, cuanto mayor es el valor del output, y menor el de los inputs, mayor es la eficiencia, ya que menor es el consumo de inputs en producir outputs. Cada empresa analizada por los modelos DEA presenta un ratio outputs/inputs. En el caso del transporte urbano, los outputs pueden ser variables como vehículos-km o plazas-km, mientras que los inputs son más numerosos, incluyendo variables de infraestructura, flota, o financieras.

Aquellas empresas que presentan valores mayores del ratio sirven de referencia (frontera de eficiencia) para evaluar la eficiencia de los que presentan ratios menores. Este hecho, unido a que se seleccionan *a priori* unas variables y se utilizan también unos determinados casos de estudio, hace que se obtenga una eficiencia relativa entre empresas. El método hace un Benchmarking utilizando el ratio outputs/inputs como indicador de la eficiencia de la producción.

Odeck y Alkadi, (2001) indican cuatro ventajas del DEA frente a los métodos paramétricos:

- No requiere explicitar a priori la forma de la función de producción.
- No requiere información sobre precios, lo que facilita los análisis de eficiencia.
- Permite el análisis simultáneo de varios outputs e inputs, mediante un output y un input compuesto, composición de todos los outputs y todos los inputs considerados.
- La eficiencia es medida respecto al valor más alto de resultados de operación observado. No es, por tanto, una medida de la eficiencia

absoluta, ya que depende del conjunto de empresas que se estén considerando.

Murillo-Zamorano L. R., (2004) añade como ventaja que, en los modelos DEA, la asignación de pesos de los factores se realiza automáticamente, por lo que se gana en objetividad, ya que no se tiene que estimar su valor, como en otros métodos de evaluación, como los de análisis multicriterio, que utilizan la técnica de Proceso Analítico Jerárquico (o AHP, por sus siglas en inglés) para establecer los pesos de cada criterio (Sayers, Jessop, & Hills, 2003); (Yedla & Shrestha, 2003); (Tzeng, Lin, & Opricovic, 2005); (Wey & Chang, 2009, pp.). Por el contrario, y como inconveniente principal, (Avkiran & Rowlands, 2008) señalan que el método DEA asume que el valor de la eficiencia es completamente achacable a la operación del DMU y, por tanto, no tiene en cuenta ningún tipo de error estadístico, cosa que sí hacen los métodos paramétricos, ni el efecto de variables no controlables por el operador. Esto puede dar lugar a resultados engañosos, por lo que la toma de decisiones puede ser incorrecta. Además, según (Pestana & Peypoch, 2010), el método DEA no dice a los encargados de tomar las decisiones cómo deben mejorar la eficiencia. Añaden que, al ser métodos no paramétricos, se dificulta la realización de test estadísticos para comprobar hipótesis.

### 3.2.2.2 Modelo DEA-Chebyshev

Una nueva metodología de benchmarking de eficiencia que es capaz de incorporar la probabilidad al mismo tiempo que preserva las ventajas de una técnica de modelado no distributivo y no paramétrico. Esta nueva técnica se conoce como el modelo DEA-Chebyshev. (Khoo-Fazari, Yang, & Paradi, 2013) La base del modelo DEA-Chebyshev se basa en el modelo Análisis de Envoltura de Datos (DEA). La combinación de la DEA normal con la frontera DEA-Chebyshev (DCF) puede proporcionar con éxito un buen marco para la evaluación basada en datos cuantitativos y en el conocimiento cualitativo de la gestión intelectual. Se ha demostrado estadísticamente que este modelo es efectivo en la predicción de una nueva frontera, por lo que las unidades

eficientes según el DEA pueden ser diferenciadas y clasificadas. Es una mejora con respecto a otros métodos, ya que es fácilmente aplicable, práctico, no computacionalmente intensivo y fácil de implementar.

### **3.2.2.3 Análisis de Frontera Gruesa, (TFA),**

Para la estimación de los parámetros de eficiencia cuando se dispone de datos de panel. Se basa en la afirmación de que si las desviaciones de la frontera de las empresas eficientes  $X$  son completamente aleatorias, se debe observar para este grupo de empresas que la probabilidad de situarse por encima o por debajo de la frontera es igual a un medio (Berger & Humphrey, 1992). Esta hipótesis se puede probar para conjuntos de datos de panel, pero requiere la clasificación de la muestra completa en un grupo de empresas  $X$ -ineficientes y un grupo de empresas  $X$ -eficientes (mejores prácticas). La frontera de costos se estima usando solamente las observaciones de esta última categoría. (Berger & Humphrey, 1992)

### **3.2.2.4 Aproximación a Distribución Libre, (DFA),**

El enfoque de Aproximación a Distribución Libre (DFA) (Berger A. , 1993) para estimar la eficiencia supone que las empresas individuales muestran una ineficiencia  $X$  constante a lo largo del tiempo y que la ineficiencia puede ser revelada mediante la estimación de una función de coste de panel (o utilidad o producción).

Otros estudios de la eficiencia a menudo imponen suposiciones arbitrarias sobre las distribuciones de eficiencia y error aleatorio para separar una de la otra. Este enfoque impone mucha menos estructura en estas distribuciones y sólo supone que las eficiencias son estables en el tiempo, mientras que el error aleatorio tiende a la media. Se hace estimando los efectos específicos de la empresa sobre los costos usando conjuntos de datos de panel. Encontramos resultados similares a los de la literatura: las diferencias gerenciales en la

eficiencia son importantes mientras que las diferencias de eficiencia debidos a la eficiencia de escala no lo son.

### 3.2.2.5 Análisis de fronteras estocásticas

El análisis de fronteras estocásticas (SFA) es un método de modelización económica. Tiene su punto de partida en los modelos de frontera de producción estocástica introducidos simultáneamente por (Aigner, Lovell, & Schmidt, 1977) y (Meeusen & van Den Broeck, 1977).

El modelo de frontera de producción sin componente aleatorio puede describirse como:

La producción observada del productor  $y$  es una función de:

- Las entradas utilizadas por el productor  $x$
- La frontera de producción  $f(x_i, \beta)$ ,
- Un vector  $\beta$  de los parámetros de la tecnología a estimar,

La eficiencia técnica, TE, definida como la relación entre la producción observada y la potencia máxima posible.

También se puede añadir una función de componente estocástico  $\exp \{v_i\}$  que describe los problemas aleatorios que afectan al proceso de producción. Estos problemas no son directamente atribuibles al productor o a la tecnología subyacente. Estos problemas pueden provenir de cambios climáticos, adversidades económicas o simple suerte. Cada productor se enfrenta a un problema diferente, pero suponemos que los problemas son aleatorios y se describen por una distribución común.

Si asumimos que la Eficiencia Técnica es también una variable estocástica, con una función de distribución específica, común a todos los productores, podemos escribirlo como exponencial donde  $u_i \geq 0$ , porque  $TE_i \leq 1$ . Así, obtenemos la siguiente ecuación:

$$y_i = f(x_i; \beta) \cdot \exp\{-u_i\} \cdot \exp\{v_i\}$$

Supongamos que  $f(x_i, \beta)$  toma la forma de Cobb-Douglas, el modelo puede escribirse como:

$$\ln y_i = \beta_0 + \sum_n \beta \ln x_{ni} + v_i - u_i$$

donde  $v_i$  es el componente de "ruido", que es una variable distribuida normalmente a los dos lados, y  $u_i$  es el componente de ineficiencia técnica no negativo. Juntos constituyen un término de error compuesto, con una distribución específica que se determinará, de ahí el nombre de "modelo de error compuesto" como se le llama a menudo.

El Análisis de Fronteras Estocásticas ha examinado también la eficiencia de los "costes" y la "utilidad" (Kumbhakar & Knox Lovell, 2003). El enfoque de la "frontera de costos" intenta medir cuán lejos de la minimización del costo total (es decir, costo-eficiencia) está la empresa.

En función del modelo, se añade el componente no negativo de la ineficiencia de costes en lugar de sustraerse en la especificación estocástica. El análisis de la frontera de beneficios examina el caso en el que los productores son tratados como maximizadores de beneficios (tanto la producción como las ingresos deben ser decididos por la empresa) y no como minimizadores de costos (donde el nivel de producción se considera exógeno). La especificación aquí es similar con la "frontera de producción".

### 3.3 Otros métodos

#### 3.3.1 Cuadro de Mando Integral

El Cuadro de Mando Integral (Balanced Scorecard, BSC) es una herramienta de gestión de la eficiencia estratégica, un informe estructurado casi estándar, apoyado por métodos de diseño y herramientas de automatización, que pueden ser utilizados por los directivos para realizar un seguimiento de la ejecución de las actividades por parte del personal bajo su control y supervisar las consecuencias derivadas de estas acciones.

Este sistema de medición de la eficiencia empresarial se basa en gran medida en la teoría que fue desarrollada en la década de 1990 por Kaplan y Norton y la Escuela de Negocios de Harvard (Kaplan & Norton, 2014).

Es un método de medición y una estrategia de gestión y proporciona información de los procesos de negocio internos y de los resultados externos, con el fin de mejorar continuamente la eficiencia empresarial estratégica y los resultados. El Cuadro de Mando Integral ha sido adoptado por un gran número de empresas.

A diferencia de los sistemas anteriores de medición de la eficiencia empresarial, que se centraban en la medición de la eficiencia a través de indicadores financieros y por ello en el seguimiento de los resultados de años pasados, el enfoque del Cuadro de Mando Integral mide también la visión y la estrategia de las empresas, lo que da una visión más completa de su eficiencia empresarial futura. Para conseguirlo, el Cuadro de Mando Integral utiliza generalmente un mínimo de cuatro tipos de indicadores para la medición de los resultados:

El término Cuadro de Mando Integral se utiliza comúnmente para denominar dos conceptos:

- Indicadores individuales que miden parámetros para administrar la eficiencia de la empresa y que pueden ser operativos o estratégicos;
- El Sistema de Gestión Estratégica, tal como se definió originalmente por Kaplan & Norton.

La característica más importante que define el Cuadro de Mando Integral es su enfoque en la estrategia de la organización seleccionando un pequeño número

de indicadores para supervisar una combinación dada de resultados financieros y de gestión (Kaplan & Norton, 2014).

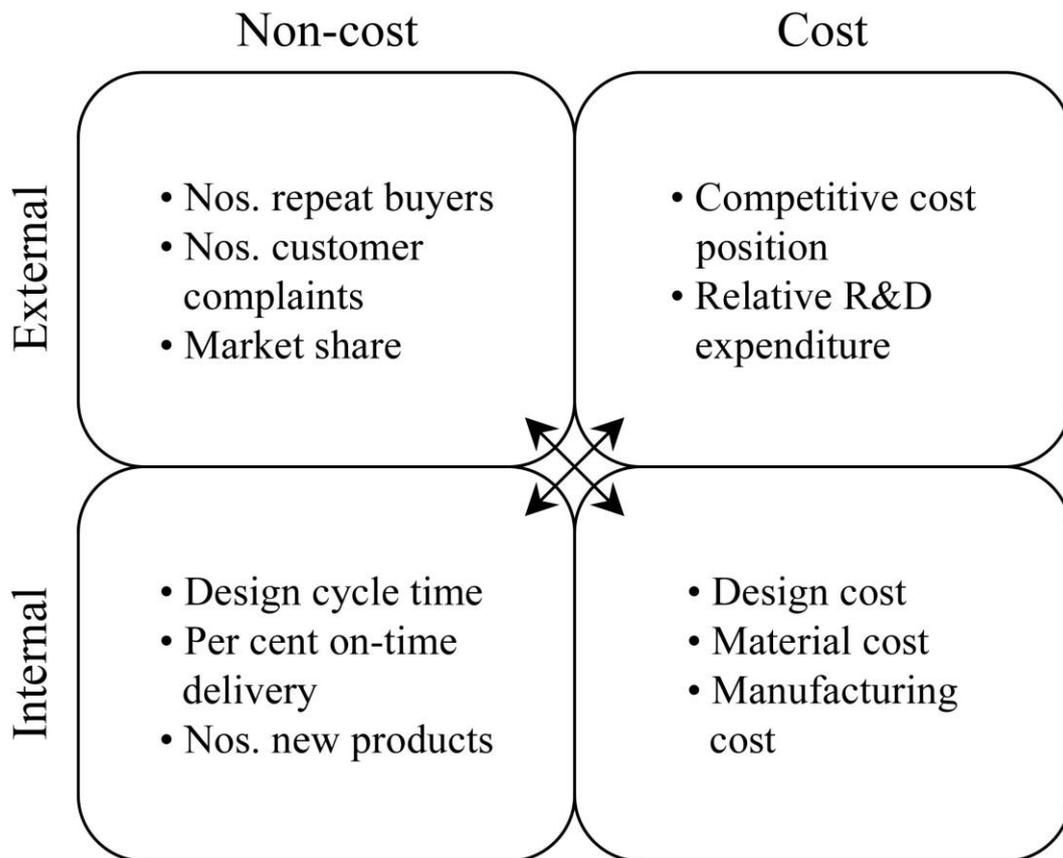
### **3.3.2 Coste basado en actividades**

El Coste Basado en Actividades (ABC) es una metodología de cálculo de costes que identifica las actividades en una organización y asigna el coste de cada actividad que utiliza recursos, a los productos y servicios según el consumo real de cada uno de los servicios (Brimson, 1991). Este modelo asigna más costes indirectos (gastos generales) a los costes directos comparados con el sistema de asignación de costes convencionales (Hicks, 1997).

El CIMA (Chartered Institute of Management Accountants) define el ABC como un enfoque para la asignación de costes y monitorización de actividades que incluye el seguimiento del consumo de recursos y el coste de los resultados finales. Los recursos se asignan a actividades y las actividades a objetos de coste basados en estimaciones de consumo (Liberatore & Miller, 1998). Estos últimos utilizan conductores de costes para fijar los costes de las actividades a los productos.

### **3.3.3 Matriz de Medición de la Eficiencia**

Al igual que con el Cuadro de Mando Integral, la fuerza de la Matriz de Medición del desempeño radica en la manera en que intenta integrar diferentes clases de desempeño empresarial financiero y no financiero, interno y externo (Keegan, Eiler, & Jones, 1989) tal y como se puede observar en la imagen 3.1



**Source:** Keegan *et al.*, 1989

Imagen 3-1; Matriz de medición de la eficiencia  
Fuente: Keegan et al. 1989

Sin embargo, la Matriz no está tan bien preparada como el Cuadro de Mando Integral y no hace explícitos los vínculos entre las diferentes perspectivas de la eficiencia empresarial, que es, sin duda, una de las mayores fortalezas del Cuadro de Mando Integral de Kaplan y Norton.

### 3.3.4 Marco de Determinantes de Resultados

Una alternativa, que supera esta crítica, es el Marco de Determinantes de Resultados.

Este marco, representado en la imagen 3, que fue desarrollado por (Fitzgerald, Johnston, Brignall, Sivestro, & Voss, 1991), se basa en la premisa de que existen dos tipos básicos de medida del desempeño en cualquier organización:

los que se relacionan con los resultados (competitividad, desempeño financiero) y aquellos que se centran en los determinantes de los resultados (calidad, flexibilidad, recursos Utilización e innovación). El atractivo de esta distinción es que pone de relieve el hecho de que los resultados obtenidos son una función del desempeño del negocio anterior con respecto a determinantes específicos ± , es decir, los resultados son indicadores rezagados, mientras que los determinantes son indicadores adelantados.

Results	Financial performance
	Competitiveness
Determinants	Quality
	Flexibility
	Resource utilisation
	Innovation

Source: Fitzgerald *et al.*, 1991

Imagen 3-2; Marco de determinantes de resultados

Fuente Fitzgerald *et al.* 1991

### 3.3.5 Pirámide del desempeño

Antes que Kaplan y Norton hicieran su propuesta del Cuadro de Mando Integral, (McNair, Lynch, & Cross, 1990) propusieron un modelo piramidal centrado en 3 niveles: las unidades de negocio, los sistemas operativos de negocio y los departamentos o centros de trabajo (Imagen 3-3), y por encima de ellos, la visión de la empresa, es decir, el establecimiento de lo que desea ser. En este modelo, representado en la imagen 3.3, se proponían indicadores

de naturaleza financiera y no financiera para medir el desempeño de la organización: su efectividad externa y eficiencia interna.



Imagen 3-3 La pirámide del desempeño para el control estratégico.  
Fuente: McNair, Lynch y Cross (1990)

Los departamentos y centros de trabajo son el corazón de esta pirámide de resultados, ya que son la base de las operaciones de la organización. En este nivel se miden variables relacionadas con la Calidad y la Entrega de productos (los cuales miden la efectividad externa) así como los Tiempos de ciclos y los Desperdicios (para medir la eficiencia interna).

El siguiente nivel es el operativo, donde se definen criterios de Satisfacción del Cliente (externo), la Flexibilidad (externo e interno) y Productividad (interno), que están estrechamente vinculados tanto a las metas establecidas, tanto en el nivel inferior (departamentos) como en el superior (unidades de negocio), configurándose en lo que se podría denominar inductores de resultado de los objetivos de ese nivel superior.

El último nivel es de las unidades de negocio, donde se definen las variables relacionadas con los clientes (Mercado; externo) y los accionistas (Financieros; internos), los cuales determinan qué es lo verdaderamente importante en la organización.

### **3.3.6 Métodos de la Teoría de Toma de Decisiones**

Las herramientas de la Teoría de Toma de Decisiones se están utilizando actualmente para resolver problemas de evaluación de eficiencia en empresas, ponderando con ellos la importancia relativa de los diferentes indicadores clave de eficiencia (KPI). Dentro de estas herramientas se destacan: el proceso de jerarquía analítica y el análisis relacional gris.

#### **3.3.6.1 Proceso de Jerarquía Analítica**

Una de las herramientas utilizadas es el Proceso de Jerarquía Analítica (Analytic Hierarchy Process o AHP), que utiliza una matriz de comparación por parejas y se usa como una herramienta de toma de decisiones cuantitativa para vincular los KPI a la misión, los objetivos y las estrategias generales (Saaty, 1999). Pero sin embargo, hay expertos (Cao, Leung, & Ley, 2008) que dicen que el Proceso de Jerarquía Analítica no tiene una base teórica suficientemente estable como para apoyar al cien por cien las decisiones obtenidas y eso podría causar confusión entre los directivos, porque una matriz de comparación por parejas no satisface al cien por cien la consistencia necesaria para poder utilizar sin dudas de su efectividad el Proceso de Jerarquía Analítica.

El Proceso de Jerarquía Analítica se puede usar para determinar el "peso" o la importancia relativa entre cada dos KPI (Saaty, 1999); pero no especifica bien las relaciones entre todos los KPI ni la importancia de los trabajos realizados para el cumplimiento de sus objetivos, que son factores muy importantes en la búsqueda de la mejora continua de la eficiencia de la empresa en entornos cambiantes.

#### **3.3.6.2 Análisis Relacional Gris**

Otra técnica de toma de decisiones utilizada para resolver problemas de evaluación de Métricas de Eficiencia ha sido el Análisis Relacional Gris. Este método se ha utiliza para aplicar los pesos a la hora de seleccionar medidas

significativas de eficiencia en las empresas en lugar de utilizar los métodos estadísticos tradicionales. Es similar al Proceso de Jerarquía Analítica, se utiliza en niveles estratégicos, pero no selecciona KPI en un entorno variable. Depende más del grado de correlación entre los factores que realmente generan un grado de Relación Gris, y no considera las estrategias y las actividades relacionadas entre sí. Es por esta razón, que no es un método muy útil para la toma de decisiones en un entorno cambiante (Kung & Wen, 2007).



## 4. METODOLOGÍAS DE APLICACIÓN A LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LAS EMPRESAS DE TRANSPORTE URBANO

Los modelos analizados para la evaluación de la eficiencia de las empresas de transporte urbano, cómo ya se ha comentado, tienen sus limitaciones. En primer lugar, utilizan demasiadas variables, algunos de ellos tienen hasta 40 indicadores para medir la eficiencia en los costes, en la calidad del servicio, en la fiabilidad, la puntualidad, la flexibilidad y la innovación. Aunque estas medidas ofrecen información muy valiosa para la toma de decisiones, el seleccionar las más importantes de todas, para desarrollar estrategias de mejora para la empresa en su totalidad, es aún difícil para muchos directivos.

Además los modelos existentes no proporcionan funciones de relación entre todas las diferentes variables, asumen que los KPI no están interrelacionados. Por tanto, estos describen bien las operaciones y sirven como una buena herramienta de comparación entre empresas y en ejercicios de Benchmarking, pero no son muy eficaces en la mejora de la eficiencia general de la empresa mediante el cumplimiento de los objetivos fijados para los indicadores más importantes.

Para muchos directivos de empresas de transporte que tratan de asignar recursos de manera eficiente y alcanzar metas de eficiencia, ésto representa un problema.

Estas limitaciones son superadas por alguno de los modelos existentes, como el Cuadro de Mando Integral, el cual ilustra las relaciones de causa y efecto entre algunas de las variables relacionadas con el objetivo de los Indicadores Clave de Eficiencia (KPI) (Kaplan & Norton, 2014), aunque estas relaciones son poco eficaces para el análisis cuantitativo de las intrincadas relaciones entre ellos.

Para abordar estas limitaciones, y partiendo del modelo del Cuadro de Mando Integral, en este apartado se propone un enfoque sistemático que ayudará a

analizar y seleccionar los grupos de indicadores más adecuados y las estrategias para mejorar la eficiencia general de la empresa de transporte urbano.

Para ello, se justificará la elección del Cuadro de Mando Integral como método de evaluación de la eficiencia, se explicará de forma detallada dicho modelo y se realizará una revisión bibliográfica, a través de estudios realizados y normativa, para destacar los KPI que se utilizan para medir la eficiencia en el transporte urbano. Y partiendo de dicha revisión, se creará un sistema de KPI que abarque de forma global todas las situaciones de la empresa, siguiendo el marco conceptual del “Cuadro de Mando Integral.

#### **4.1 El Cuadro de Mando Integral como modelo de evaluación de la eficiencia**

De todos los métodos de evaluación de la eficiencia vistos en el Capítulo 3, se ha seleccionado el Cuadro de Mando Integral por:

- Su capacidad de evaluación de la eficiencia de forma suficientemente simple.
- Su capacidad de evaluación comparativa.
- Su capacidad de evaluación estratégica, que explicaremos más adelante.
- Su ya alto nivel de uso en funciones de Gestión de la eficiencia, a día de hoy, en las empresas más importantes de transporte urbano. (Askarany, Smith, & Yazdifar, 2007).
- Su eficiencia en coste, una vez ya implementadas las aplicaciones de gestión, lo que permite su utilización por los gestores de las empresas.

## 4.2 Revisión del método elegido: El Cuadro de Mando Integral

El Cuadro de Mando Integral (en adelante CMI) tiene su origen en 1990<sup>2</sup> con el estudio realizado a múltiples empresas, denominado “La medición de los resultados en la empresa del futuro”, patrocinado por el Nolan Norton Institute y que lideró David Norton, director general de Nolan-Norton, junto con Robert Kaplan, asesor académico (Kaplan & Norton, 2014).

El objetivo del estudio era establecer un modelo de medición de la eficiencia de una empresa que no tuviera en cuenta únicamente los indicadores financieros utilizados hasta entonces, ya que estos indicadores reflejaban la consecución y mantenimiento de los resultados a corto plazo pero no la creación de valor de las empresas a largo plazo. Esto fue necesario para enfrentarse a los cambios que se estaban produciendo en esos momentos en los que la Sociedad de la información y entornos más turbulentos y competitivos, demandaban empresas cuya estratégica las diferenciara del resto y que produjeran valor a largo plazo. De dicha necesidad surgió la aplicación del Cuadro de Mando Integral como instrumento de medida donde se combinaban Indicadores financieros y no financieros (Flores, 2012).

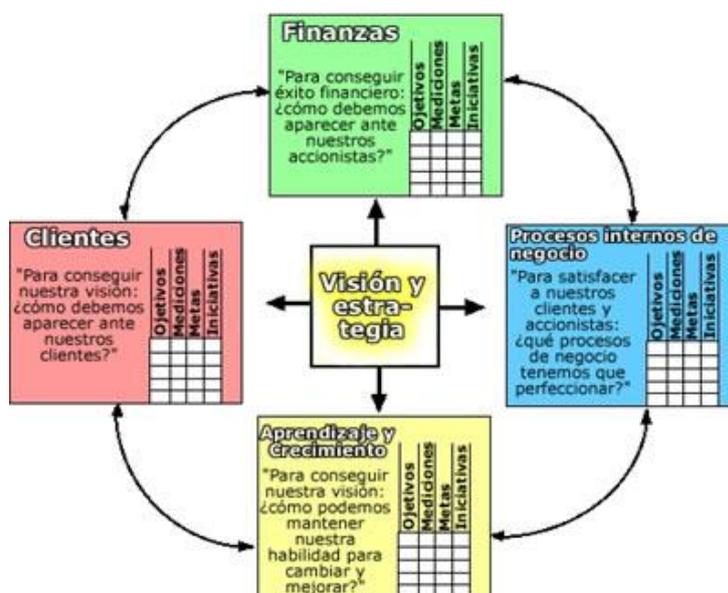


Imagen 4-1; El Cuadro de Mando Integral.

Fuente: (Kaplan y Norton 1992)

<sup>2</sup> Las principales conclusiones del estudio las publicaron en 1992 en la Harvard Business Review bajo el título "Balanced Scorecard, Measures that drive performance".

La combinación de dichos indicadores para obtener información de gestión no era muy novedosa, ya que a principios del siglo XX durante la revolución llamada “scientific management” ya se habían desarrollado los primeros “Cuadros de control” que combinaban indicadores financieros y no financieros para obtener información de la empresa. Más tarde, en los años 70 en Francia se empezó a utilizar una herramienta denominada “Tableau de Bord” o “Cuadro de Instrumentos” (Lauzel & Cibert, 1973), considerado el antecedente del CMI, que consistía en incorporar diversos ratios para el control financiero del negocio. En esa misma época, en Estados Unidos, diversas empresas: General Electric, General Motors, Dupont y Matsushita, desarrollaban cuadros de control que incluían indicadores para realizar el seguimiento de los procesos de la empresa.

En función de lo señalado, puede considerarse que el Cuadro de Mando Integral utiliza instrumentos que ya existían en el Cuadro de control (indicadores financieros y no financieros, seguimiento de los procesos de la empresa) pero la evolución experimentada por esta herramienta desde su formulación en 1992 (Kaplan & Norton, 2014) permite dar un paso más, al considerar que la selección de indicadores deben estar basada en el modelo de negocio y en las relaciones de causa-efecto de los diferentes componentes de la empresa (Dávila, 1999) y no sólo en la intuición del directivo o en las ocho áreas claves como establece el tablero de control.

Actualmente, el Cuadro de Mando Integral ha dejado de ser “un conjunto de indicadores que proporciona a la alta dirección una visión comprensiva del negocio”<sup>3</sup> para convertirse en “una herramienta de gestión que traduce la estrategia de la empresa en un conjunto coherente de indicadores” ayudando a las empresas a llevar a cabo sus procesos de gestión (Kaplan & Norton, 2014), permitiendo a éstas, según ellos:

- Aclarar y traducir o transformar la visión y la estrategia.
- Comunicar y vincular los objetivos e indicadores estratégicos.

---

<sup>3</sup> Definición del Cuadro de Mando Integral en el momento de su formulación en 1992 donde se consideraba una herramienta para medir resultados

- Planificar, establecer objetivos y alinear las iniciativas estratégicas.

#### 4.2.1 El Cuadro de Mando Integral como herramienta de gestión y control estratégico

Como ya hemos señalado, el Cuadro de Mando Integral es una herramienta de gestión estratégica<sup>4</sup>, adecuado para implementar y comunicar la estrategia por parte de las empresas, debido a que transforma a ésta, en un conjunto multidimensional de indicadores financieros y no financieros (Kaplan & Norton, 2014), (Hanson & Towle, 2000), (Malmi, 2001) y (Ahn, 2001) de evaluación de la eficiencia<sup>5</sup> estructurados en función de una Jerarquía de Perspectivas y desarrollados a través de la visualización de los principales temas o ejes estratégicos de la empresa (Camaleño, 1998), (Amat & Dowds, Qué es y cómo se construye el cuadro de mando integral, 1998), (Amat & Soldevilla, “La aplicación del Cuadro de Mando Integral - Un ejemplo en la Unidad de Relaciones Internacionales de una universidad pública”, 1999), (Mora & Vivas, 2001).

Por ello, el CMI puede ser utilizado como sistema de gestión para implementar la estrategia y como sistema de control y supervisión de la misma (Martinsons, Davison, & Tse, 1999) (Escobar, 2002).

Teniendo en cuenta el proceso de gestión estratégica<sup>6</sup> dentro de la empresa, (Amat & Dowds, Qué es y cómo se construye el cuadro de mando integral, 1998) y (Amat & Soldevilla, “La aplicación del Cuadro de Mando Integral - Un ejemplo en la Unidad de Relaciones Internacionales de una universidad pública”, 1999)) establecen que el proceso de formulación de la estrategia debe estar relacionado con el proceso de desarrollo del CMI, debido a que su propia construcción conlleva un ejercicio de reflexión estratégica (Flores, 2012).

---

<sup>4</sup> Aunque el objetivo real de esta herramienta sea la gestión de la estrategia de la empresa, el control y la supervisión es otra de sus funciones, siendo esta última, la utilidad que muchas empresas dan al CMI, limitando con ello su poder de actuación y por tanto, su finalidad real.

<sup>5</sup> Que permitan equilibrar las visiones de corto y largo plazo.

<sup>6</sup> La Planificación y Gestión estratégica se basa en cuatro etapas (Wheelen y Hunger 2002): Estudio del entorno, Formulación de la estrategia, Implementación de ésta, y Evaluación y control.

Una vez que el gestor tenga una idea clara de a dónde se dirige, cuál es su negocio, misión, visión, líneas estratégicas y cuáles son los procesos que definen su cadena de valor, el CMI se encargará de traducir éstos en objetivos concretos.

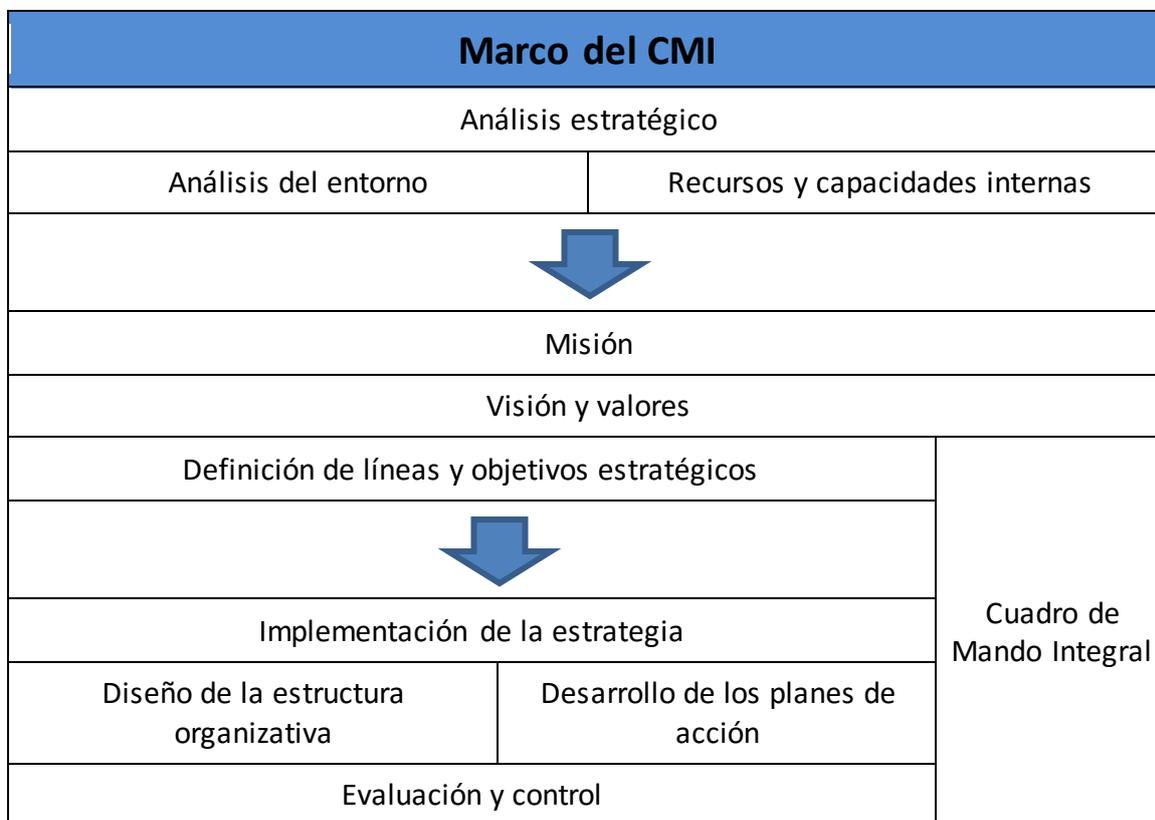


Imagen 4-2 Marco del CMI.

Fuentes: Kaplan y Norton 2001 y Wheelen y Hunger 2002

En la imagen 4-2 podemos comprobar donde se enmarcaría el Cuadro de Mando Integral dentro del proceso de gestión estratégica.

Tal y como hemos mencionado anteriormente, una vez definida la misión y la visión y las líneas estratégicas de la empresa, se introduce el CMI, debido a que éste permite traducir las grandes líneas estratégicas en objetivos específicos y, así, fijar la estrategia y convertirla en parámetros cuantificables, trasladable a políticas y acciones reales y operativas. Además, permite comunicar dichas políticas a los diferentes miembros de la empresa, para alinear las conductas de los que participan en el proceso (The Balanced Scorecard Institute, 2014).

El CMI como soporte para la comunicación, permite involucrar al personal con la estrategia de la empresa (Camaleño, 1998); (Hanson & Towle, 2000) reflejando como las acciones del personal consiguen el objetivo marcado por la empresa y establecer, en caso de existir desviaciones, las medidas correctivas necesarias. Un personal involucrado casi siempre asegura que la estrategia se implemente con éxito. Para ello, además de la comunicación, es necesario integrar los objetivos conseguidos con la evaluación del desempeño y las políticas de reconocimientos de los empleados.

Dentro del proceso de gestión estratégica, y como soporte del CMI, es importante revisar el diseño de la estructura organizativa de la empresa, debido a que un conocimiento adecuado de la estructura de la empresa, de los procesos que definen su cadena de valor y de los responsables de ésta, permite desarrollar, de una forma más operativa, los objetivos marcados por la empresa.

Por lo que respecta a los objetivos, éstos permitirán, según Kaplan y Norton (Kaplan & Norton, 2014):

- “cuantificar los resultados a largo plazo que desea alcanzar,· identificar los mecanismos y proporcionar los recursos necesarios para alcanzar estos resultados,
- establecer metas a corto plazo para los indicadores financieros y no financieros del CMI”

El CMI contribuye al proceso de supervisión y control debido a que integra todas las fases del control estratégico, desde la propia formulación de la estrategia hasta su implementación y el aprendizaje corporativo de ésta; ofrece un sistema de medidas que permite a los gestores evaluar las unidades de negocio y puede, y debe utilizarse, como herramienta para estructurar la política de comunicación y revelación de información a los mercados - analistas financieros e inversores (Kraus & Lind, 2010).

Sin embargo, para que el control resulte posible, es necesaria la existencia de un entorno de control en la empresa, es decir, un ambiente positivo para llevarlo a cabo, siendo éste el que marcará las pautas de funcionamiento de la empresa, Informe COSO, (Coopers&Lybrand, 1997).

Para evaluar la existencia de un ambiente de control adecuado en la empresa existen diversos aspectos subjetivos a tener en cuenta, relacionados con la integridad y valores éticos, cómo pueden ser:

- la existencia e implementación de códigos de conducta,
- la forma de llevar a cabo las negociaciones con empleados, proveedores, etc.
- el compromiso de competencia profesional,
- la existencia de descripciones formales de los puestos de trabajo,...
- la independencia de los consejeros del Consejo de Administración,
- la frecuencia con la que la empresa facilita información,
- etc.

#### **4.2.2 Componentes del Cuadro de Mando Integral**

Definidas las funciones que el Cuadro de Mando Integral tiene dentro de la empresa, es preciso describir los conceptos que son necesarios para su diseño e implementación. Estos elementos no hay que entenderlos como integrantes del CMI, sino que son aquellos que, de alguna manera, repercuten o condicionan su creación, en cualquier tipo de empresa, siendo éstos los siguientes:

- **Misión:** representa la identidad de la empresa y su razón de ser, refleja el negocio al que se dedica, e implica definir en qué términos la empresa rendirá cuentas en el futuro y de qué manera guiará su actividad. Como indican Mora y Vivas (Mora & Vivas, 2001) su definición debe incluir los servicios que ofrece, los mercados y clientes a los que se dirige, tecnología, filosofía de la empresa y su responsabilidad social e imagen

pública, destacando aquellos aspectos que la diferencian de su entorno competitivo. Dicha definición debe responder a las siguientes preguntas: ¿cuál es la esencia del negocio?, ¿qué quiere ser? y ¿cómo debería hacerlo?. La misión debe ser estable en el tiempo pero su concepción puede ir cambiando para adaptarse al entorno de la empresa.

- **Visión y Valores:** hace referencia tanto a los objetivos a largo plazo que la empresa espera alcanzar como a los principios o valores que caracterizan su comportamiento. El análisis conjunto de ambos aspectos es debido a que, el término valor, es considerado en algunos casos una acepción más de la visión (Niven, 2003), definida ésta como un conjunto de valores, aspiraciones y metas de una empresa. Es el eje impulsor de los objetivos estratégicos de la empresa y, aunque su definición responde a la pregunta ¿qué queremos ser?, dicha respuesta tiene que ser coherente con la realidad de la empresa – debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades<sup>7</sup>- y con la misión de ésta.
- **Líneas y Objetivos Estratégicos:** una vez realizado el análisis externo e interno de la empresa y definida cuál es la visión y la misión, se establecen las líneas y objetivos estratégicos que guiarán el desarrollo de éstas. .

Las líneas estratégicas son consideradas como el conjunto de acciones, actividades que definen la estrategia de la empresa, mientras que a las acciones concretas que se agrupan en dichas líneas se les denomina, objetivos estratégicos.

Estos objetivos deben definirse para cada Perspectiva de la empresa estableciéndose una conexión de relaciones causa y efecto entre ellos que permitan explicar cómo la empresa va a conseguir implantar su estrategia, tanto a corto como a largo plazo. En cuanto al número de objetivos, varía conforme los autores: para (Niven, 2003) son necesarios tres para cada Perspectiva, (Kaplan & Norton, 2014) establece entre tres y cuatro y (Horvarth & Partners, 2004) plantean entre cuatro y cinco, debido a que según estos

---

<sup>7</sup> A este análisis se le denomina matriz DOFA, FODA O SWOT (por sus siglas en inglés) y su función es determinar los factores clave de éxito (FCE) de la empresa, es decir, aquellas variables que diferencian a la organización en su entorno competitivo.

autores “el CMI sólo debe contener aquellos objetivos que tienen una especial relevancia para una ejecución con éxito de la estrategia (objetivos estratégicos) y no aquellos que la empresa requiera, desde el punto de vista operativo”, pues según ellos el CMI es un modelo de estrategia, no es un modelo operativo empresarial.

Los objetivos reproducen la estrategia de la empresa pero en su vertiente más operativa se materializan en los presupuestos, considerándose éstos una referencia a alcanzar por los objetivos previstos para el ejercicio y que hay que tener en cuenta cuando se diseñen los indicadores que evaluarán su desempeño.

En cuanto al tipo de objetivos a desarrollar dependerá del nivel del Cuadro de Mando Integral que se realice. Si se trata de un CMI estratégico los objetivos serán sólo los de nivel corporativo, pudiendo concretarse los demás objetivos de niveles más operativos, cuando se desarrollen los cuadros de mando pertinentes.

Una vez seleccionados los objetivos, es necesario diseñar una ficha descriptiva para cada uno de ellos que, según Horvath & Partners (Horvarth & Partners, 2004), debe contener: el nombre del objetivo, su definición y explicación, personas responsables de su consecución y fecha para su obtención, tal y como se muestra en la Tabla 4-1:

<b>FICHA DE OBJETIVO</b>
Nombre del objetivo:
Descripción del objetivo:
Responsables del objetivo:
Fecha de consecución:

Tabla 4-1; Ficha objetivo.

Fuente: (Flores, 2012) basado en (Horvarth & Partners, 2004)

## **.Perspectivas**

El Cuadro de Mando Integral sugiere que veamos la empresa desde cuatro Perspectivas y recomienda desarrollar métricas, recolectar datos y analizarlos en relación con cada una de estas Perspectivas.

Las Perspectivas son también los grupos principales que configuran el modelo de negocio de la empresa y que influyen en la consecución de sus resultados. Se consideran las dimensiones claves de una empresa y, por tanto, en las que deben basarse los objetivos estratégicos de ésta.

Se pueden distinguir, según la metodología aplicada en (Martínez & Milla, 2005), dos tipos de Perspectivas, las externas y las internas:

- las Perspectivas externas: engloban los resultados de la actuación de la empresa, siendo las más habituales, la Perspectiva financiera y la Perspectiva cliente, del modelo de Kaplan y Norton, .
- las Perspectivas internas: comprenden aquellos grupos de objetivos donde la empresa tiene algún margen de actuación. Utilizando el mismo ejemplo que en el caso anterior, estarían representadas por: la Perspectiva de procesos internos y la Perspectiva de formación y crecimiento

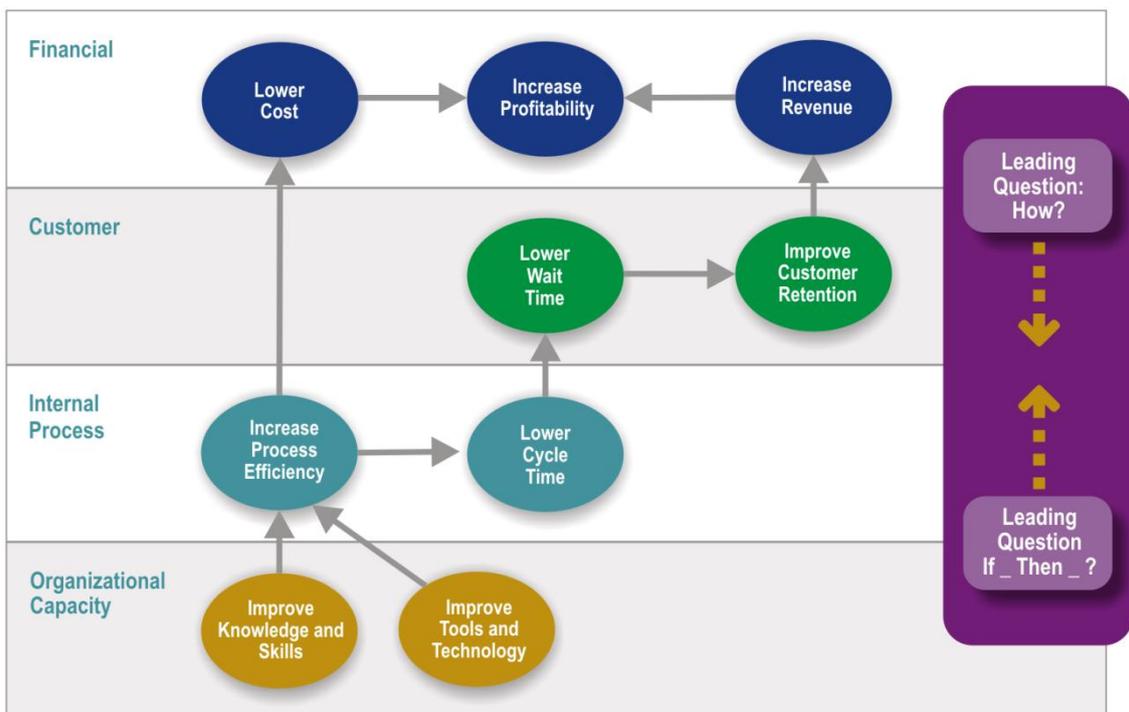


Imagen 4-3; Relaciones entre perspectivas del CMI

Fuente: <http://www.balancedscorecard.org/portals/0/images/StrategyMapLogic.png>

La definición de las Perspectivas está determinada por el modelo de negocio, circunstancias del sector y estrategia y la naturaleza de las empresas, por ello,

aunque la propuesta de (Kaplan & Norton, 2014) se centra en cuatro grandes Perspectivas:

- Financiera
- Clientes
- Procesos internos
- Formación y Crecimiento<sup>8</sup>

Estas Perspectivas no son las únicas, debido a que puede variar tanto en número, definición y jerarquía, en función de la empresa que estemos analizando (Quinlivan, 2000) y (Fernández, 2002), siendo esta diferencia mayor cuando hablamos del sector público.

El número de Perspectivas no es tan importante pero sí la relación entre ellas (Niven, 2003), ya que la división de los objetivos estratégicos, en función de las Perspectivas definidas y la relación causa y efecto de cada uno de ellos, consigue la creación de valor a largo plazo – a través del equilibrio entre los objetivos a largo y corto plazo - para la empresa y la vinculación de la estrategia a todos los miembros de la empresa (Martínez & Milla, 2005), (Kaplan & Norton, 2014).

Debido a la amplia variedad de empresas y sectores que utilizan las Perspectivas de Kaplan y Norton y por considerarlas importantes para la definición de nuestro modelo haremos una breve definición de cada una ellas:

**La Perspectiva financiera:** define los resultados tangibles que se espera con la ejecución de la estrategia en términos financieros tradicionales. Se considera el objetivo a largo plazo de la empresa y, por ello, todos los objetivos y medidas de las demás Perspectivas tienen que orientarse para su consecución.

Los objetivos financieros estarán relacionados con la fase en la que se encuentre el ciclo de vida del negocio o de las unidades de negocio que analicemos, pudiendo identificarse tres (Kaplan & Norton, 2014): crecimiento, sostenimiento y cosecha. La definición de estas fases se realiza para unidades

---

<sup>8</sup> Dichas perspectivas son las utilizadas para el desarrollo del modelo, ya que es la estructura de negocio que, según los autores, puede encontrarse para analizar el desempeño estratégico, en la mayoría de las empresas privadas.

de negocio pero puede aplicarse de forma genérica para toda la empresa, siendo importante que los directivos definan donde se encuentra la empresa. Dichas fases varían a medida que cambian los objetivos de la entidad, los cuales tendrán que ser revisados periódicamente con el objeto de reafirmar o cambiar la estrategia financiera de la unidad.

En función de la fase en la que se encuentre la empresa, podemos distinguir dos tipos de estrategias financieras, estas son:

- Estrategia de crecimiento: la entidad puede aumentar sus ingresos, mediante nuevas fuentes de ingresos -derivada de un aumento de ventas debido a la expansión de la oferta de productos y servicios, nuevos clientes y mercados- o bien aumentando la fidelización de los clientes actuales. Es considerada una estrategia a largo plazo.
- Estrategia de productividad, relacionada con la mejora de la utilización de los activos o la mejora de la estructura de costes. Se considera una estrategia a corto plazo.

El equilibrio de ambas estrategias por parte de las empresas podrá conseguir el fin último de esta Perspectiva, la maximización del valor para el accionista, debido a que para aumentar los ingresos es necesario o aumentar las ventas o reducir los costes o ambas a la vez.

Teniendo en cuenta la jerarquía de las diferentes Perspectivas de la empresa, a la financiera se la considera la última, por evaluar el éxito de la empresa a largo plazo así como las variables que influyen en la creación y consecución de dicho objetivo.

**La Perspectiva del cliente:** permite identificar el segmento de cliente y de mercado donde la empresa pretende competir y definir las propuestas de valor para dicha selección (clientes – objetivo). Según Kaplan y Norton (Kaplan & Norton, 2014) “la proposición de valor define la estrategia de la empresa para el cliente describiendo la combinación única de producto, servicio, relación e imagen que una empresa ofrece a los clientes que tiene en su objetivo. La

proposición de valor debe comunicar aquello que la empresa espera hacer para sus clientes mejor o diferente que la competencia”.

Además, y continuando con los mismos autores, los elementos que caracterizan, de forma general, la proposición de valor del cliente, están relacionados con:

- el tiempo, o plazos de entrega, la capacidad de la empresa de responder de manera rápida y fiable el pedido de un cliente
- la calidad, es considerada hoy en día como necesidad competitiva, en lugar de ventaja competitiva, pero la reinención de ese concepto, incorporando mayores prestaciones a los productos y servicios puede convertirlo en una ventaja para la empresa
- el precio, es una de las características más valoradas por los clientes.

La combinación de estos elementos por parte de la empresa conseguiría el liderazgo de ésta, siempre y cuando los estándares establecidos para cada uno de ellos fueran percibidos por los clientes como los de mayor valor, teniendo la empresa que ir adaptándose a medida que la percepción del cliente fuera variando. Esta situación teóricamente sería la mejor, pero en la realidad, las empresas líderes en su sector se caracterizan por elegir cuál es la proposición de valor que va a satisfacer las necesidades de su cliente objetivo y esforzarse en conseguirla, utilizando para ello una de las estrategias competitivas, que determinarán los objetivos de sus clientes y sus procesos (Porter, 1987. Rev. 2002); (Treacy & Wiersema, 1999).

Determinado el segmento objetivo por parte de la empresa y la proposición de valor que necesitan satisfacer, la empresa deberá establecer cuáles son los elementos que debe mejorar para conseguir los niveles establecidos por la empresa (Flores, 2012).

La mayoría de las empresas suelen utilizar dos conjuntos de KPI para la Perspectiva clientes, y que definiremos como sus autores en ambos casos (Kaplan & Norton, 2014). La primera es denominada “Grupo Central de Indicadores” y representa las medidas genéricas sobre clientes y el segundo grupo son los “Inductores de Actuación de los Resultados del Cliente” que

responden a la pregunta ¿Qué es lo que la empresa ha de entregar a sus clientes para alcanzar un alto grado de satisfacción, retención, adquisición y por último, cuota de mercado? ”.

Los KPI del Grupo central y su definición quedan reflejados en la Tabla 4-2:

INDICADORES CENTRALES DE LA PERSPECTIVA CLIENTE	
Cuota de mercado	Refleja la proporción de ventas, en un mercado dado (en términos de número de clientes, dinero gastado o volumen de unidades vendidas), que realizan una unidad de negocio.
Incremento de clientes	Mide, en términos absolutos o relativos, la tasa en que la unidad de negocio atrae o gana nuevos clientes o negocios
Retención de clientes	Sigue la pista, en términos relativos o absolutos, a la tasa que la unidad de negocio retiene o mantiene de las relaciones existentes con sus clientes.
Satisfacción del cliente	Evalúa el nivel de satisfacción de los clientes según unos criterios de actuación específicos dentro de la propuesta de valor añadido.
Rentabilidad del cliente	Mide el beneficio neto de un cliente o de un segmento, después de descontar los únicos gastos necesarios para mantener ese cliente

Tabla 4-2; La perspectiva del cliente. Indicadores centrales

Fuente Kaplan y Norton 2001

Estos KPI hay que complementarlos con aquellos indicadores que permitan medir el aumento de valor por parte de los clientes. Aunque éstos variarán en función de la rama de actividad que estemos analizando, Kaplan y Norton (Kaplan & Norton, 2014) establecieron un conjunto de características comunes para todos ellos: imagen, características del producto, funcionalidad, calidad, precio, plazo de entrega, etc.

**La Perspectiva de Procesos Internos:** identifica los procesos y actividades que hace o puede hacer la empresa para generar mayor valor añadido para los accionistas y clientes seleccionados por ésta una vez identificados los objetivos en ambas Perspectivas. Según (Olve, Roy, & Wetter, 1999) los directivos de la empresa deben estudiar todos los procesos internos de la misma para conocer los recursos y capacidad que posee y determinar dónde puede mejorar. Aunque cada negocio tiene sus propios procesos para crear valor a sus clientes y accionistas, (Kaplan & Norton, 2014) presentaron un modelo genérico

de cadena de valor en el ámbito de los procesos internos, basado en cuatro tipos de proceso:

- Procesos de Innovación, cuya función es investigar cuales son las necesidades de los clientes y crear productos o servicios acorde con éstas
- Procesos Operativos, relacionados con la producción de los bienes o la prestación de servicios de la empresa; comienza cuando el cliente pide el producto y finaliza cuando se entrega el mismo.
- Procesos Post Venta, cuya finalidad es atender al cliente una vez ofrecido el producto
- Procesos Sociales<sup>9</sup>, relacionados con el cumplimiento y superación de las normativas nacionales e internacionales relacionadas con el medioambiente, salud, higiene del trabajo y contratación de los trabajadores.

Los procesos relacionados con cada una de estas categorías, y para los cuales se desarrollarán objetivos e indicadores concretos, están recogidos en la Tabla 4-3.

<b>PROCESOS DE LA PERSPECTIVA DE PROCESOS INTERNOS</b>	
Procesos Operativos	Gestión de Proveedores
	Producción de bienes o servicios
	Distribución de bienes o servicios
	Gestión del riesgo
Procesos de Gestión de clientes	Selección de clientes ( imagen de marca)
	Adquisición de clientes
	Retención de clientes
	Fidelización
Procesos de innovación	Búsqueda de oportunidades ( nuevos productos y servicios)
	Gestión de la investigación y desarrollo

<sup>9</sup> En el modelo genérico de cadena de valor de Kaplan y Norton (1997) no aparecía estos procesos pero sí en su desarrollos posteriores (Kaplan & Norton, 2014)

	Diseño y desarrollo de nuevos productos y servicios
	Lanzamientos de nuevos productos y servicios al mercado
Regulación	Medio ambiente
	Seguridad y salud
	Empleo
	Inversiones en la comunidad

Tabla 4-3; Procesos de la Perspectiva Procesos Internos

Fuente: Kaplan y Norton 2004

**La Perspectiva de Innovación y Formación:** trata de identificar los objetivos que la empresa necesita para poder mejorar los parámetros de las otras tres Perspectivas definidas (Headley, 1998); (Niven, 2003) (Davis & Albright, 2004) la alineación de éstos con la estrategia se consideran la base para conseguir el éxito de la misma.

La base de esta Perspectiva son: el capital humano (capacidades de los empleados), el capital de información (capacidades de los sistemas de información) y el capital organizativo (cultura, liderazgo, alineamiento con los objetivos y trabajo en equipo) (Aparisi & Ripoll, 2000).

El capital humano, se refiere a la capacidad estratégica de los empleados, es decir, las habilidades, talento y know-how de los empleados para ejecutar una estrategia. Para ello, es necesario identificar los trabajos que tienen impacto sobre la estrategia, definir las características del puesto y describir el perfil (conocimientos, habilidades, valores) que debe cumplir el empleado para realizarlo. Definidas éstas, es necesario evaluar dichas capacidades dentro de la empresa (valorar las competencias actuales con las requeridas), incorporando nuevo personal o formando al actual si no se cumple con las características necesarias para el desarrollo de la estrategia.

Las medidas utilizadas para medir la actuación de los empleados son: la satisfacción, la retención y la productividad de los trabajadores.

El capital de información, hace referencia a los sistemas de información, aplicaciones e infraestructuras necesarias para apoyar la estrategia. Los componentes relacionados con este concepto son: la infraestructura tecnológica, cuya función es conseguir la información necesaria para la empresa, y las aplicaciones clave de información cuya función es el análisis y la comunicación de la información.

Por último, el capital organizativo, que se define según (Martínez & Milla, 2005) como la capacidad de la empresa para movilizar y sostener el proceso de cambio requerido para ejecutar la estrategia. Los elementos que constituyen esta capacidad son: cultura, liderazgo, alineamiento y trabajo en equipo.

Los objetivos relacionados con éstos, deben seguir las siguientes líneas:

- cambiar actitudes y comportamientos de los empleados de una empresa, debido a que son ellos los que caracterizan el funcionamiento de ésta
- desarrollar líderes que consigan movilizar al personal hacia el conocimiento y cumplimiento de la estrategia
- desarrollar objetivos e incentivos a todos los niveles de la empresa, de tal manera que el cumplimiento de éstos tenga su reflejo en la estrategia global de la empresa
- comunicar los objetivos estratégicos a todos los niveles y compartir conocimientos a lo largo de toda la empresa.

Teniendo en cuenta la definición de cada una de las Perspectivas, se puede determinar las relaciones de causa-efecto entre los objetivos estratégicos definidos para cada una de ellas. Así, para conseguir los resultados financieros que la empresa pretende (Perspectiva financiera) es necesario satisfacer a los clientes - objetivos. Para ello la empresa analizará cuáles son esos clientes (Perspectiva cliente) y que procesos pueden generarles un valor añadido (Perspectiva de procesos internos) siendo los activos intangibles la base para conseguir estos procesos (Perspectiva de Innovación y Formación).

## 1. Mapa Estratégico:

Se considera uno de los elementos fundamentales del CMI y una de las grandes aportaciones de éste. Describe gráficamente las relaciones causa-efecto entre los objetivos estratégicos de cada una de las Perspectivas, y no entre los indicadores, siendo dicha relación la que determina la estrategia a seguir y muestra el conjunto de actividades que conducirán a la entidad hacia el cumplimiento de su visión. Refleja la formulación y la ejecución de la estrategia, vinculando ésta a los activos intangibles con los procesos de creación de valor.

Aunque no existe una forma única de representar el mapa estratégico, la más común y por tanto, la que nosotros utilizaremos para su desarrollo posterior, es la que reflejamos en la imagen 4-4:

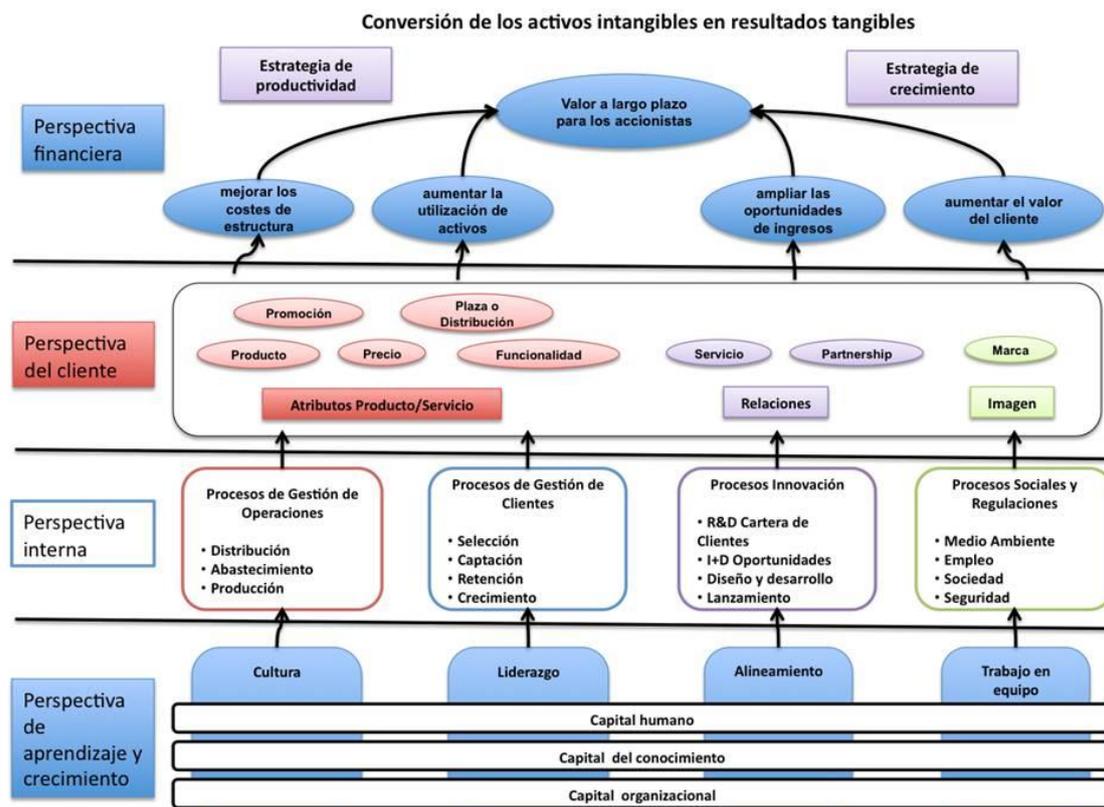


Imagen 4-4 Mapa estratégico;

Fuente: Kaplan y Norton 2004

Tal y cómo se puede comprobar en la imagen 4-4, en el eje vertical se representan jerárquicamente las Perspectivas definidas por la empresa,

mientras que en los ejes horizontales, se establecen los diversos objetivos estratégicos definidos para cada uno de ellos, así como sus relaciones causales, representadas éstas mediante flechas.

Cabe mencionar, que este modelo no es estático sino que tiene que ir adaptándose a los cambios que puedan producirse en las empresas (Flores, 2012).

## **2. Indicadores o KPI:**

Son los ratios de gestión que sirven para medir y valorar el cumplimiento de los objetivos estratégicos (Martínez & Milla, 2005). Sirven para evaluar comparando con los resultados esperados y comunicar los resultados obtenidos.

Debido a que el CMI define la estrategia mediante relaciones causa-efecto de los objetivos de las diferentes Perspectivas, tenemos que distinguir entre dos tipos de indicadores:

- **Indicadores de resultados:** miden el grado de obtención del resultado, como por ejemplo la rentabilidad.
- **Indicadores inductores o inductores de la actuación:** miden las acciones que se realizan para conseguir el objetivo, como por ejemplo la inversión en formación.

Un CMI bien hecho debe incluir una combinación de ambos tipos de indicadores, ya que es tan necesario para la empresa conocer la forma en que se conseguirán los resultados - inductores de actuación- cómo saber si esas actuaciones han tenido éxito - indicadores de resultado-, siendo la elección óptima de los indicadores uno de los procesos más complejos en la utilización de esta herramienta. Una selección equivocada, puede producir una desviación de la estrategia seleccionada por la empresa y no permitir evaluar el grado de consecución de los objetivos en base a lo presupuestado.

En cuanto al número de indicadores que deben utilizarse para la elaboración del CMI, no existe un número fijo<sup>10</sup>, pero sí es necesario un número mínimo de éstos, teniendo las empresas que seleccionar aquellos indicadores que consideren estratégicos, es decir, que sirvan para definir la estrategia y conseguir una excelencia operativa y no los orientados a controlar y seguir el negocio -indicadores de diagnóstico- debido a que de este tipo pueden encontrarse en multitud de empresas.

Por tanto, para realizar una buena selección de indicadores, algunos de los criterios a tener en cuenta son los siguientes:

- Los indicadores deben estar ligados con la estrategia,
- Los indicadores deben de usar criterios de evaluación cuantitativos antes que cualitativos. Debido a que los primeros son objetivos (%) mientras que los segundos se basan en criterios subjetivos (bueno–malo)
- Los indicadores deben ser eficientes, dando una relación “coste de obtención de los datos” / “beneficios aportados por tener el indicador” adecuada
- Los indicadores deben ser entendibles, o sea que el significado de los indicadores los sea, tanto en su finalidad como en su función
- Los indicadores no deben presentar ambigüedad, deben tener una definición clara y no dar posibilidad a problemas de interpretación
- Los indicadores deben ser fácilmente actualizables y actualizados, o sea, se deben elegir indicadores que nos ofrezcan datos de forma periódica
- Los indicadores deben ser relevantes, deben describir suficientemente bien el proceso u objetivo que estemos intentando evaluar y no dar una información que ya esté dando otro indicador
- Los indicadores deben ser controlables, la información que nos dan los indicadores deben poder controlarse de alguna manera, pues de nada sirve saber que algo va bien o mal si no se puede cambiar.

---

<sup>10</sup> Kaplan y Norton consideraron, en función de su experiencia en múltiples empresas, que 24 indicadores integrados podrían formular y comunicar la estrategia de una empresa.

FICHA DE INDICADOR	
Nombre	Denominación del indicador
Definición	Descripción detallada del mismo
Perspectiva	Perspectiva con la que se relaciona
Objetivo	Objetivo a alcanzar
Medición	Descripción del método de cálculo del indicador de forma exacta y detallada
Fuentes	Fuente/s de información para su cálculo
Frecuencia	Periodicidad de cálculo de su valor.
Propósito	Motivo de su utilización
Responsable/s	Responsable/s (persona/s o departamento/s) tanto de la obtención y comunicación de los datos obtenidos, como de la mejora de los resultados.

Tabla 4-4; Ficha de Indicador.

Fuente: Kaplan y Norton 2004

Una vez seleccionados los indicadores, y para una adecuada gestión de los mismos, hay que elaborar una ficha objetivo para cada uno de ellos, donde se debe detallar, al menos, los contenidos de la Tabla 4-1.

### 3. Objetivos:

Es el valor que se desea obtener para un indicador en un periodo de tiempo determinado.

Permite comparar a la empresa con sus competidores y guiar la toma de decisiones. Su definición tiene que ser considerada razonable por el responsable de conseguirlas. Dicha racionalidad se consigue cuando los objetivos cumplen los siguientes tres requisitos:

- Son asequibles, que se puedan alcanzar fácilmente con esfuerzo. Si no, provocan desmotivación o indiferencia.
- Son retadoras, que el responsable las vea como un reto y obtenga su recompensa por alcanzarlas, pues no hay nada más desmotivador que

hacer un esfuerzo extra, que los demás no hacen, y no obtener recompensa, monetaria y de reconocimiento.

- Son gestionables, que se puedan gestionar adecuadamente, estableciendo revisiones de los resultados intermedios con una frecuencia adecuada para poder corregir las posibles desviaciones.

En cuanto a los plazos, lo adecuado es el establecimiento de objetivos a corto plazo, mensuales o trimestrales y metas a largo plazo (anuales, quinquenales).

De esa manera, las primeras darán a conocer a la empresa en qué situación se encuentra y medir la cantidad y destino de los recursos que deberán invertir si se quieren conseguir los objetivos a largo plazo, relacionando con ello gestión presupuestaria y estratégica. Dicha filosofía debe aplicarse a las metas de los indicadores de todas las Perspectivas de la empresa, no sólo a la Perspectiva financiera, como es habitual.

Iniciativas estratégicas: son las acciones, actividades, programas o proyectos que la empresa debe desarrollar para alcanzar las metas definidas para cada indicador.

Debido a que pueden existir múltiples acciones a implantar para la empresa, algunas ya puestas en funcionamiento por ésta, la gerencia realizará un proceso de selección y priorización de iniciativas y una asignación de recursos específicos a las iniciativas seleccionadas. Para la elaboración de dicho proceso, la empresa seguirá aquel o aquellos criterios que considere que es importante tener en cuenta, como pueden ser los recursos necesarios para su realización, el coste de la acción, el tiempo necesario para completarse, etc.

Además, éstos criterios deberán coordinarse con el proceso de asignación/obtención de recursos y la gestión presupuestaria.

Responsables: en la metodología del CMI, es importante asignar personas que se responsabilicen de cada una de los elementos de éste, comprometiendo de esa manera a los miembros de la empresa con la estrategia y mejorando su implementación.

### 4.2.3 Viabilidad y Sostenibilidad del Cuadro de Mando Integral

Una vez presentadas algunas indicaciones sobre los aspectos básicos de su implementación es necesario realizar algunas reflexiones sobre la viabilidad y sostenibilidad temporal de esta herramienta.

De entrada, es preciso, tal y como se indicó anteriormente, que exista en la empresa la madurez necesaria para su puesta en marcha, básicamente en los dos órdenes señalados:

- Pensamiento estratégico
- Entorno de control

Considerados ambos aspectos, es necesario que la Dirección de la empresa conozca la herramienta del CMI y qué beneficios puede aportar a la empresa. En este sentido, se debe tener en cuenta que la aplicabilidad del CMI no puede concebirse en términos absolutos sino como un proyecto escalable. Se deberá definir una hoja de ruta orientada a la consecución de hitos concretos y vinculada a un itinerario de mejora, debiendo concebirse como una herramienta global que pueda traducirse en cuadros de mando específicos para unidades de negocio, centros de operaciones y cualesquiera otras unidades operativas de la empresa, alineados con los objetivos estratégicos globales de la empresa (Thompson & Mathys, 2008).

Para asegurar la supervivencia de este proceso a largo plazo, debe existir un apoyo total de la dirección de la empresa y un sistema de comunicación eficiente que permita comunicar dicho apoyo, proporcionar información al CMI y distribuir los resultados de la herramienta en las diferentes áreas de la empresa. Una buena comunicación permitirá ofrecer los beneficios del sistema y evitar considerar a éste sólo como una herramienta de control de sus actividades.

Por último, para que cualquier proyecto de esta naturaleza resulte operativo, viable y sostenible en el tiempo, es necesaria la disponibilidad de herramientas informáticas adecuadas para su desarrollo y su integración en el sistema de

información de la entidad, tal y cómo hemos comentado en el apartado anterior, siendo la estructura y el contenido de los sistemas de información de la empresa una de las mayores dificultades que tiene la empresa para la implementación del CMI (Escobar, 2002).

La implementación de un sistema informático que contemple todas las etapas en la explotación del Cuadro de Mando Integral permitirá integrar el aspecto planificador de la herramienta con el necesario control que debe llevar aparejado. Dicho control obliga a articular mecanismos para una alimentación permanente del CMI -bases de datos de los diferentes sistemas orígenes de la información -operaciones, recursos humanos, inventario, económico-financiero, etc.- y para el proceso de los datos que de ellos se derivan -cálculo actualizado de los indicadores que contiene-. Con esta información se permite generar medidas de control de las operaciones con la frecuencia que resulte necesaria y generar bases de datos capaces de informar sobre los aspectos estratégicos del negocio.

Además, la aplicación utilizada deberá ser capaz de alimentar los diferentes Cuadros de Mando que a lo largo del proceso de implementación global sean definidos por la empresa, evitando, de este modo, los problemas en la escalabilidad del CMI, es decir, la integridad de la información y su actualización. Por tanto, para que cualquier propuesta de desarrollo de procesos de planificación y control estratégicos resulte operativa será necesaria la integración en el sistema de información y la existencia de herramientas informáticas potentes para la gestión del Cuadro de Mando Integral.

Finalmente, el éxito de cualquier desarrollo del CMI depende, esencialmente, de los siguientes aspectos (Kaplan & Norton, 2014):

- definición de la estrategia
- selección de mediciones adecuadas
- proceso de creación
- filosofía que se trate de comunicar

Las perspectivas del Cuadro de Mando Integral para las empresas de transporte urbano.

Debido a que en la tesis planteada, se ha propuesto el desarrollo de un sistema de KPI para las empresas de transporte urbano basado en el enfoque del Cuadro de Mando Integral, es necesario asegurar que se eligen los indicadores más apropiados para esta industria específica. Por lo tanto, además de los cuatro Perspectivas del Cuadro de Mando Integral estándar, se propone incluir otras dos perspectivas. Siendo éstas: "la seguridad" de las personas y del vehículo y el impacto del servicio de transporte en el "medio ambiente".

Por tanto, las perspectivas que debería incluir el CMI en las empresas de transporte, así como el contenido de cada una de ellas, estarían formado por las siguientes perspectivas:

**Aprendizaje y Crecimiento:** en esta se incluirá la capacitación de los empleados y las actitudes de la cultura corporativa relacionadas tanto con las capacidades de mejora de las personas y las empresas. En el clima actual de rápido cambio tecnológico, se hace necesario que el personal esté siempre en modo de aprendizaje. Se han desarrollado métricas para orientar a los directivos a dedicar el esfuerzo de formación en donde puede ayudar más.

**Cliente:** La filosofía de gestión moderna ha mostrado la importancia de la orientación al cliente y la satisfacción del cliente en cualquier negocio. Los indicadores de satisfacción del cliente son indicadores principales: si los clientes no están satisfechos encontrarán otros proveedores que satisfagan sus necesidades. Puntuar bajo en estos indicadores es un importante indicador de que la empresa va mal, a pesar de que el panorama financiero actual pueda parecer bueno.

**Procesos Internos:** esta Perspectiva se refiere al éxito de los procesos de negocio internos. Las métricas basadas en esta perspectiva permiten a los administradores saber cómo está funcionando su negocio y si sus productos y servicios se ajustan a los requisitos del cliente.

**Financiero:** Los autores del Cuadro de Mando Integral no despreciaron la necesidad de datos financieros. Los datos financieros oportunos y precisos son siempre importantes y los directivos hacen y harán siempre lo necesario para poder proporcionarlos. De hecho, el manejo y procesamiento correcto de los datos financieros es en muchas empresas suficiente para gestionarlas. Desde la implementación de las bases de datos corporativas y los sistemas de gestión inteligentes se han centralizado y automatizado más partes del procesamiento de datos. Pero el problema es que el énfasis que actualmente hacen muchas empresas en las métricas financieras lleva a una situación de "desequilibrio" con respecto a otras áreas importantes.

**Seguridad:**, se podría argumentar que la Seguridad ya está dentro de las Perspectivas "Procesos Internos" o "Cliente" y de hecho comparte mucho con ambas Perspectivas. Pero, debido a su gran importancia en la sociedad, en las empresas de transporte de los países desarrollados creemos que es mejor no colocar "Seguridad" en una de estas Perspectivas sino crear una nueva dimensión independiente.

**Medio ambiente:** es un área cada vez más importante. Los servicios de transporte en autobús contribuyen a la contaminación de la ciudad y hacen uso de unos recursos escasos, que son las calles en las horas punta. Los clientes se preocupan cada día más por el medio ambiente y las normas internacionales sobre el cuidado del medioambiente deben ser respetadas.

Junto con las perspectivas, y con el fin de describir de forma más específica el CMI en la industria del transporte en autobús, se han definido algunos grupos de atributos dentro de las seis Perspectivas. Estos grupos de atributos se han desarrollado a partir de los resultados de la revisión de la literatura y de la revisión de los indicadores utilizados actualmente por los operadores. En este sentido, y en lo que respecta a la calidad del servicio prestado a los clientes, éstos se han relacionado estrechamente con las categorías de la Norma Europea UNE ISO 13816, ya que es un sistema estándar para la medición de estos atributos (Fundación CETMO, 2006).

Las Perspectivas se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, junto con los grupos de atributos que parecen más interesantes por su correcta definición del concepto y por su extensión entre la mayoría de los operadores, véase (Randall, Condry, & Trompet, 2007).

Perspectiva	Grupo de atributos
Crecimiento y Aprendizaje	Crecimiento Aprendizaje
Cliente	De tiempo De calidad de servicio, que incluye: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Personal / Atención al cliente</li> <li>• Información al cliente</li> <li>• Afección medioambiental del Vehículo</li> <li>• Afección medioambiental de las paradas / estaciones</li> </ul> Satisfacción del Cliente Accesibilidad
Procesos Internos	Productividad del personal Utilización de los activos Fiabilidad (de los vehículos)
Seguridad	Seguridad Protección
Financieros	Eficiencia financiera Eficacia financiera
Medio ambiente	Afecciones Medioambientales

Tabla 4-5; Grupos de atributos por perspectivas

Fuente: (Randall, Condry, & Trompet, 2007)

### 4.3 Revisión de la literatura existente sobre uso y selección de KPI en el sector del transporte público

Con el objeto de identificar los KPI más utilizados para medir la eficiencia en el transporte público se ha realizado una revisión bibliográfica utilizando como fuentes:

- Estudios comparativos de transporte
- Normas oficiales (por ejemplo (Comité Europeo de Normalización, 2002)) y documentos de orientación de los mismos.
- Otros estudios, artículos académicos e investigaciones pertinentes

De la revisión realizada, se tratará de determinar el interés que cada revisión realizada ha tenido para la realización de este trabajo.

Con respecto a los estudios comparativos: existe una cantidad relativamente limitada de literatura publicada disponible en el campo del Benchmarking de autobuses, habiéndose realizado sólo unos pocos estudios anteriores. Gran parte de la literatura estudiada no se refiere a estudios de Benchmarking específicos, sino que abarca la investigación en general en la medición y las recomendaciones y directrices para la realización de tales mediciones de eficiencia

Los principales estudios revisados serían los siguientes:

### **Sistemas de Indicadores Clave de Eficiencia, CoMET y Nova Key**

Los grupos de evaluación comparativa (Benchmarking) de empresas de metro, CoMET y Nova Key” (Proyectos CoMET y Nova Key, 2014) se iniciaron con la intención de definir y acordar los objetivos de los KPI, que constituye la máxima eficiencia dentro de las empresas de metro.

Componentes del Grupo CoMET:

- **Beijing Subway** (Beijing Mass Transit Railway Operation Corporation – BMTROC)
- **Berlin U-Bahn** (Berliner Verkehrsbetriebe – BVG)
- **Delhi Metro** (Delhi Metro Rail Corporation – DMRC)
- **Guangzhou Metro** (Guangzhou Metro Corporation – GMC)
- **Hong Kong MTR** (MTR Corporation Limited)
- **London Underground** (London Underground Limited – LUL)
- **Metro de Ciudad de Méjico** (Sistema de Transporte Colectivo – STC)
- **Metro de Madrid**
- **Metro de Moscú**
- **New York City Subway** (MTA New York City Transit – NYCT)
- **Metro de Paris y RER** (Régie Autonome des Transports Parisiens – RATP)
- **Metro de Santiago**

- **Singapore MRT** (Singapore Mass Rapid Transit Corporation Ltd – SMRT)
- **Metro de Shanghai** (Shanghai Shentong Metro Group – SSMG)
- **Metro de São Paulo** (Companhia do Metropolitano de São Paulo – MSP)
- **Metro de Taipei** (Taipei Rapid Transit Corporation – TRTC)

Componentes del Grupo de Benchmarking de Metros Nova:

- **Bangkok MRT** (Bangkok Expressway and Metro Company Limited – BEM)
- **Metro de Barcelona** (Transports Metropolitans de Barcelona – TMB)
- **Buenos Aires Metrovias**
- **Brussels Metro** (Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles – STIB)
- **Istanbul Metro** (Metro Istanbul)
- **Kuala Lumpur RapidKL Rail** (RapidKL / Prasarana)
- **Lisbon Metro** (Metropolitano de Lisboa – ML)
- **London DLR** (Docklands Light Railway Limited)
- **Montréal Metro** (Société de Transport de Montréal – STM)
- **Nanjing Metro** (Nanjing Metro Operation Company Limited – NMOC)
- **Newcastle Tyne & Wear Metro** (Nexus)
- **Oslo T-Bane** (Oslo Sporveien)
- **Metro Rio**
- **Shenzhen Metro** (Shenzhen Metro Group Company Limited – SZMC)
- **Sydney Trains**
- **Toronto Subway** (Toronto Transit Commission – TTC)
- **Vancouver SkyTrain** (British Columbia Rapid Transit Company Limited –TransLink)

Los indicadores fueron definidos y seleccionados en base a una combinación de la experiencia en la medición de la eficiencia empresarial de empresas de metro individuales y los factores que se consideraron de mayor importancia, con el objetivo de garantizar una visión global y equilibrada.

Los sistemas de KPI resultantes de CoMET y Nova Key comprenden un total de 41 indicadores clave de eficiencia, en gran parte centrados en el eficiencia operativa, dentro de las siguientes cinco categorías:

- Crecimiento y Aprendizaje
- Cliente

- Procesos Internos
- Financiera
- Seguridad

Hay 21 KPI principales entre estas categorías para el uso del nivel superior de gestión y 20 KPI secundarios para ayudar en la comprensión funcional y la aplicación de las normas de mejora continua. Véase la Tabla 4-6 para una lista completa de los indicadores.

<b>Crecimiento y aprendizaje</b>	<b>Procesos internos</b>	<b>Cliente</b>
<b>Sistema y prestación de servicios</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Participación modal <ul style="list-style-type: none"> <li>% de cambio en el tamaño de la red</li> <li>% de cambio en los viajes de pasajeros</li> </ul> </li> <li>• Cambio en la capacidad operada km <ul style="list-style-type: none"> <li>% de cambio en km de vehículos</li> </ul> </li> </ul>	<b>Eficiencia</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Km. de vehículos / horas totales de mano de obra <ul style="list-style-type: none"> <li>Kilometraje de vehículos / año / conductor</li> <li>Índice de absentismo laboral por todas las causas</li> </ul> </li> <li>• Viajes de pasajeros / Total de horas de trabajo</li> </ul> <b>Fiabilidad y Disponibilidad</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Km. de vehículos entre incidentes</li> <li>• Trenes a tiempo / Trenes totales</li> <li>• Proporción de coches disponibles en hora punta</li> </ul>	<b>Provisión y utilización de la capacidad</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad km / Ruta km <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pasajero km / Capacidad km</li> </ul> </li> </ul> <b>Calidad de servicio</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Viajes de pasajeros a tiempo / Viajes de pasajeros <ul style="list-style-type: none"> <li>Retraso total de pasajeros / viajes de pasajeros</li> </ul> </li> <li>• Grado de satisfacción del cliente</li> </ul>
<b>Organización y Personas</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de días de formación/personal</li> <li>• Grado de satisfacción del empleado</li> </ul>		
<b>Seguridad</b>		
<b>Muertos equivalentes / Billón de viajes de pasajeros</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Total de muertes <ul style="list-style-type: none"> <li>Suicidios / Miles de pasajeros</li> <li>Intento de suicidios / Billón de viajes de pasajeros</li> <li>Muertes por actividad ilegal / Billón de viajes de pasajeros</li> <li>Muertes por accidentes / Billón de viajes de pasajeros</li> </ul> </li> <li>• Lesiones graves / Billón de viajes de pasajeros</li> <li>• Lesiones menores / Billón de viajes de pasajeros</li> </ul>		
<b>Tiempo de personal perdido por accidentes / Total de personal</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Incidencias del crimen / Millones de viajes de pasajeros</li> </ul>		
	<b>Financieros</b>	
	<b>Ingresos comerciales totales / Coste operativo</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ingresos comerciales no relacionados con el transporte / Ingresos comerciales totales</li> </ul>	
	<b>Coste total de explotación / km de vehículos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Coste de operaciones de servicio y horas totales de personal / km de vehículos</li> <li>Coste de mantenimiento y horas totales de personal / km de vehículos</li> <li>Coste administrativo y horas totales de personal / km de vehículos</li> </ul>	
	<b>Coste de inversión / km de vehículos (promedio de 10 años)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Coste de inversión en material rodante / km de vehículos</li> <li>Coste de inversión en estaciones e infraestructuras / km de vehículos</li> <li>Coste de inversión en otras inversiones / Km. de vehículos</li> </ul>	
	<b>Coste de las operaciones / viajes de pasajeros</b>	
	<b>Ingresos por tarifa / viajes de pasajeros</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tasa de falta de pago de billete</li> </ul>	

Tabla 4-6; Sistema de KPI del grupo CoMET / Nova Key.

Fuente: <http://cometandnova.org/benchmarking/>

Los datos se recogen anualmente por cada empresa de metro de acuerdo con definiciones estandarizadas y se meten dentro de una sola base de datos, lo

que permite las comparaciones y los análisis que deben realizarse, según sea necesario.

De interés para este estudio

- El sistema de KPI obtenido
- El marco de trabajo del Grupo de Benchmarking de empresas de Metro.

**Norma Europea EN 13.816. Definición de calidad de servicio, objetivación y medición. (Comité Europeo de Normalización, Bruselas, 2002).**

Esta norma del Comité Europeo de Normalización (CEN) se elaboró con el objetivo de promover la mejora de la calidad del servicio en los transportes públicos y centrar el interés en las necesidades y expectativas de los clientes (Comité Europeo de Normalización, 2002).

Como tal, la norma EN 13.816 se refiere únicamente a una parte de las medidas de eficiencia que comprenderán el sistema de KPI a seleccionar.

Según los criterios del Cuadro de Mando Integral, la norma se refiere, en gran parte, a las medidas contempladas en el epígrafe de "Clientes". Sin embargo, se deben destacar algunos aspectos importantes que deben tenerse en cuenta al desarrollar indicadores dentro de cualquiera de las categorías del Cuadro de Mando Integral.

La norma fue desarrollada para dos propósitos:

- El uso por parte de los proveedores de transporte público que deseen medir y controlar la calidad de los servicios que prestan a los clientes
- Para su uso por las autoridades responsables de licitación y/o contratación de servicios de transporte público y que deseen especificar el nivel de calidad del servicio que las empresas concesionarias deben proporcionar.

Cabe señalar que la norma se desarrolló para cubrir todos los modos de transporte público de pasajeros, larga distancia y transporte rural así como los servicios urbanos. Por lo tanto, aunque ha sido diseñada para ser adecuada para la gestión de la calidad en las operaciones de autobuses urbanos, no fue desarrollada exclusivamente para este fin.

Esta norma establece los criterios para la medición de la calidad de servicio y establece que las medidas deben ser:

- Tan centradas en el cliente como sea posible
- Rentables
- Adecuadas

También es importante que las medidas:

- Consideren las necesidades de los clientes potenciales (no sólo de los ya existentes)
- Se basen en definiciones claras
- Consideren las especificidades locales y cualesquiera otras que sean importantes.
- Tengan uno objetivos que sean realistas (y asequibles)

La norma también destaca dos criterios importantes que deben tenerse en cuenta al seleccionar los indicadores de calidad del servicio:

- El nivel de investigación y recopilación de datos debe ser adecuado al tamaño de la empresa interesada.
- Algunos criterios están relacionados con los parámetros de diseño de la red y, por lo tanto, están fuera del control de las empresas concesionarias, que tienen poco o ningún control sobre la planificación de la red.

De interés para este estudio es:

- La guía completa sobre la selección y medición de indicadores para medir la calidad del servicio.

## **Manual para la Medición de la Satisfacción del Cliente y Calidad de Servicio (Transportation Research Board, Washington DC, 1999).**

Este manual fue desarrollado para proporcionar orientación a las agencias de transporte en el desarrollo de indicadores clave de eficiencia (principalmente relacionados con la calidad del servicio) y la medición de la satisfacción del cliente.

Parte de la investigación realizada por el Transportation Research Board, (U.S. Federal Transportation Research Board, 1999), consistió en la elaboración de una lista exhaustiva de las medidas de calidad de servicio. Se produjo un conjunto inicial que luego fue revisado siguiendo encuestas a los clientes, que se utilizaron para determinar el valor relativo de diferentes indicadores de calidad.

A pesar del título, varios de los indicadores incluidos en el manual van más allá del ámbito de la calidad de servicio (que se da al cliente) y cubren algunos aspectos de la eficiencia empresarial financiera, tales como la rentabilidad.

El manual incluye algunas descripciones útiles de diversos aspectos de la medición de la eficiencia y la definición de indicadores, entre ellos los siguientes:

- "Frecuencia" se divide en "período de operación" y "frecuencia convencional"; el primero se refiere a cuando el servicio opera y la segunda a la frecuencia con que se pasa dentro de esos períodos.
- se definen los diferentes aspectos de la fiabilidad y la puntualidad (cada uno de los cuales se puede medir):
  - Porcentaje de trenes / autobuses que llegan a puntos predefinidos a tiempo (definiendo "a tiempo" como dentro de una ventana de tiempo pre-determinada). Se puede medir por separado durante diferentes períodos de tiempo.
  - Variación en el tiempo de viaje entre dos puntos.
  - Promedio de minutos de retraso medidos en lugares específicos.
  - La regularidad de los servicios respecto del horario previsto, en lugares específicos.

- Recomendación para la medición de la aglomeración: observación directa de los pasajeros de los vehículos que pasan por puntos especificados previamente, por lo general los puntos de carga máxima.

El manual también identifica algunos posibles problemas con la medición de la calidad del servicio, que también podrían aplicarse a otros aspectos de la medición de la eficiencia empresarial. Estos problemas se dividen en las siguientes categorías: de sesgo, de error de agregación, de inconsistencia, de irrelevancia desde la perspectiva de los pasajeros, de insignificancia, de coste de reunir y analizar los datos.

Como parte del estudio, establecieron contacto con cuarenta y tres agencias de transporte en los EE.UU. y Canadá con el fin de determinar los tipos de medidas utilizadas para medir la eficiencia y la satisfacción del cliente. Se encontró que los indicadores recogidos se adaptaban en grandes rasgos a una de estas ocho categorías:

- Estado de los vehículos.
- Disponibilidad de vehículos para el servicio
- Frecuencia de las averías del servicio de transporte
- Puntualidad y fiabilidad
- Frecuencia de accidentes relacionados con el tránsito
- Número de quejas de pasajeros
- Percepción de la seguridad desde el punto de vista de los pasajeros
- Comunicación con los viajeros

Los resultados de la encuesta indicaron también que la mayoría de los datos recogidos se refieren a retrasos, accidentes y averías, siendo recogidos datos de las otras categorías por muy pocas agencias de transporte.

Los indicadores más inusuales e interesantes medidos por las agencias participantes fueron los siguientes (U.S. Federal Transportation Research Board, 1999):

- Número de pasajeros a los que se deniega el embarque debido al exceso de ocupación
- Porcentaje de vehículos libres de grafitis
- Número de reclamaciones de los pasajeros

De interés para este estudio

- Aunque se centró en la calidad del servicio, este manual proporciona también orientación sobre los tipos de indicadores que pueden utilizarse para la medición de los atributos de eficiencia más centrados en el cliente.
- También destaca la medida en que los indicadores varían entre los operadores de transporte, tanto en términos de los aspectos medidos y sus definiciones.
- Además, se ofrece una descripción de cada grupo de atributos de servicio

### **Administración de Tránsito Federal (F. T. A.), Base de Datos Nacional de Tránsito [EE.UU.]**

La F.T.A. solicita una gran cantidad de datos de los proveedores de transporte en EE.UU. Estos datos se guardan en la Base de Datos Nacional de Tránsito e incluye algunos indicadores clave de eficiencia así como estadísticas básicas (Administración de Tránsito Federal (FTA), 2014).

Los datos se centran principalmente en los aspectos operativos y financieros, en lugar de las que se refieren a la calidad del servicio prestado a los clientes. En particular, no había ninguno que midiese la puntualidad y la fiabilidad del servicio.

Se incluyen las siguientes categorías de datos:

- Información general
- Información financiera

- Uso de los fondos de capital
- Características
- Medidas de eficiencia empresarial

Las medidas de eficiencia incluyen los seis indicadores que se detallan en la siguiente tabla.

Tipo de medida	Indicadores específicos medidos
Eficiencia del Servicio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costes de operación por milla comercial de vehículo</li> <li>• Costes de operación por hora comercial de vehículo</li> </ul>
Rentabilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costes de operación por milla de pasajero</li> <li>• Costes de operación por viaje no enlazado de pasajero</li> </ul>
Efectividad Servicio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viajes no enlazados de pasajeros por milla comercial de vehículo</li> <li>• Viajes no enlazados de pasajeros por hora comercial de vehículo</li> </ul>

Tabla 4-7; Detalles de las medidas de eficiencia utilizadas por la US. FTA.

Fuente: U.S. Federal Transit Administration.

Los Gastos de Operación, según define la Federal Transit Administration, incluyen los siguientes: coste de los trabajadores, beneficios de los trabajadores, coste de los servicios, coste de los materiales y suministros, coste de los servicios públicos, coste de las bajas, costes de responsabilidad civil, impuestos, coste de los transportes subcontratados, gastos varios y otros gastos.

La Federal Transit Administration también mide el indicador "relación pico - valle", lo que da una indicación de la concentración horaria del servicio. Se define como el número de vehículos en funcionamiento durante el horario pico de lunes a viernes (máximo de la mañana o de la tarde) dividido por el número de vehículos en funcionamiento durante el período valle entre semana (Administración de Tránsito Federal (FTA), 2014).

De interés para este estudio es:

- El conjunto de los KPI cubre una amplia gama de aspectos del transporte público
- La comparación realizada entre los distintos operadores

**Manual de Benchmarking. Ampliando la Calidad del Transporte Público (EQUIP). (Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas 2000)**

Este proyecto, financiado por la Unión Europea (Proyecto EQUIP , 2000), fue coordinado por la Universidad de Newcastle (Reino Unido) con la colaboración de las empresas y universidades siguientes:

- VIATEK Viatek Ltd, Tampere
- ASM ASM Brescia SPA
- BOKU Universität für Bodenkultur
- ETTS European Transport and Telematics Systems Ltd
- EUR Erasmus University, Rotterdam

con el objetivo de elaborar un manual de referencia para la autoevaluación de la eficiencia interna y la calidad del servicio de los operadores de transporte público

De particular importancia para este estudio son los siguientes puntos:

- Un amplio conjunto de KPI desarrollado para cubrir todas las áreas de operación de autobuses
- Recomendaciones para la evaluación comparativa del transporte público urbano
- Colaboración con las empresas y operadores de transporte público

Los indicadores desarrollados en este estudio se agruparon en 12 áreas de medición de los resultados (Proyecto EQUIP , 2000): Perfil de la empresa, Orientación estratégica, Marco legal y organizacional, Ingresos y Tarifas. Utilización de activos, Fiabilidad del servicio, Costes de operación, Eficiencia de la empresa, Efectividad técnica, Satisfacción de los empleados, Satisfacción del cliente y Seguridad.

De interés para este estudio

- Se definió un conjunto completo de KPI
- Los indicadores fueron desarrollados específicamente para la evaluación comparativa

### **Manual MARETOPE (Managing and Assessing Regulatory Evolution in Transport Operators in Europe).**

El proyecto MARETOPE: (Gestión y evaluación de la evolución normativa en las operaciones locales de transporte público de Europa. Comunidad Europea. Programa de Crecimiento Competitivo y Sostenible, 1998-2002) es otro de los proyectos europeos que intentan conseguir mejorar el transporte en la Comunidad Europea (Proyecto MARETOPE, 2014).

#### **Consortio - MARETOPE:**

Coordinador: Consultores en Transportes, Innovación y Sistemas	PT
National Technical University of Athens	EL
NEA, Transport Research and Training	NL
Erasmus University Rotterdam	NL
ISIS, Instituto di Studi per l'Informatica e i Sistemi	IT
Chancellor Masters and Scholars of the University of Oxford	UK
Halcrow Group Limited	UK
Institute of Transport Economics	NO
LT Consultants, Ltd.	FI
Hovedstadens Udviklingsrad / Trafikdivisionen	DK
TransTec Transport und Technologie GmbH	DE
Hamburger Verkehrsverbund GmbH	DE
FGM-AMOR, Forschungsgesellschaft Mobilitaet	AT
INFRAS	CH
École Nationale des Ponts et Chaussées France	FR
Transman Consulting for Transport System Management Ltd	HU

**Tabla 4-8; Miembros del Consorcio Maretope**

**Fuente:** <http://www.transport-research.info/project/managing-and-assessing-regulatory-evolution-local-public-transport-operations-europe>

El objetivo de este estudio fue investigar los efectos del cambio normativo y organizacional (entre no competencia, competencia controlada y total

liberalización) en las redes de transporte público local y proporcionar una guía para la gestión de estos cambios.

En particular, se evaluaron los cambios en la productividad y el servicio al cliente que se produjeron después de estos cambios normativos. Para ello se definió un conjunto de indicadores clave de eficiencia para evaluar estos efectos. Es este aspecto del estudio el que es de mayor importancia comparativa para el futuro.

El análisis de eficiencia empresarial se basó en cinco dimensiones: productividad del trabajo, eficiencia organizativa y su coste, eficiencia técnica, la eficacia del mercado y el bienestar económico.

La investigación se basó en una encuesta a 207 empresas de transporte público en 108 ciudades europeas.

Se desarrolló una lista de indicadores clave de eficiencia junto con cuestiones de interpretación asociada y recopilación de datos y los posibles problemas de la obtención de los datos. Se incluyeron los siguientes indicadores de productividad, que son de importancia.

Indicadores de productividad:

- Ingresos / Gastos totales
- Ingresos / Km de pasajeros
- Kilómetros de pasajero / Km de vehículo
- Coste Total / Km de pasajeros
- Gastos totales de personal / Número de empleados
- Costes no de personal / Km de vehículo
- Ingresos / Km de vehículos
- Km de vehículos / Número de empleados

Además de los indicadores de productividad, también se desarrollaron los siguientes indicadores de calidad:

- Kilómetros de vehículos / Población del área

- Kilómetros de vehículos / Kilómetros de líneas
- Kilómetros de líneas / Área servida (en km<sup>2</sup>)
- Kilómetros de pasajeros / Población del área
- Velocidad media en hora pico
- Velocidad media fuera de hora pico
- Kilómetros de carril bus / Kilómetros de líneas

El análisis cuantitativo se realizó con datos de 31 ciudades, desde 1990 a 2000, que permite realizar análisis tanto de series comparativas entre ciudades como de series temporales. Las ciudades fueron seleccionadas de acuerdo con el estado de su transporte público urbano, distinguiendo entre empresas con reforma organizacional y de la competencia.

Los datos fueron comparados para una serie de países europeos. Se calcularon valores medios de los sistemas seleccionados para cada país (no obstante, se observó que las muestras no fueron siempre representativas del país en su conjunto).

Este proyecto se basó sobre trabajos anteriores del proyecto ISOTOPE (Proyecto ISOTOPE, 1995/1997) patrocinado por la Comisión Europea y también en el trabajo de (Mackie & Nash, 1982).

De interés para este estudio

- Indicadores de Productividad y Calidad
- La experiencia obtenida de la comparación internacional

### **Indicadores de Calidad para el transporte en autobús. Departamento de Transportes del Reino Unido**

El departamento de Transportes del Reino Unido ha establecido un conjunto de indicadores de calidad de transporte en autobús que se utilizan para evaluar la eficiencia empresarial de los operadores de autobuses en Inglaterra (la mayoría son empresas privadas) (Departamento de Transportes del Reino Unido, 2013).

Estos indicadores se aplican sólo a Inglaterra, ya que la responsabilidad del transporte en Escocia, Gales e Irlanda del Norte está transferida a los gobiernos regionales de estos países del Reino Unido.

Los indicadores se dividen en tres categorías:

- Encuesta de satisfacción de los pasajeros de autobús
- Fiabilidad del servicio de autobús
- Edad de la flota de autobuses

La mayoría de los indicadores están relacionados con encuestas de satisfacción de pasajeros de autobuses. Las encuestas se llevaron a cabo de forma estandarizada en todo el país, en 150 ubicaciones de Londres y 400 en otros lugares. Se les pidió a los pasajeros que evaluaran un total de 22 atributos y los resultados se ponderaron y se agruparon en las siguientes categorías:

- Servicio en general y confiabilidad
- Valor obtenido con respecto al coste del servicio e información exhibida en las paradas de autobús
- Seguridad en y, estado de, las paradas y marquesinas
- Estado de los autobuses y velocidad del viaje
- Atención y eficiencia del personal / comodidad y nivel de ocupación del autobús

Por fiabilidad de la encuesta, se anota el porcentaje perdido (o no recorrido) del servicio previsto. Las razones se dividen por causas, entre ellas: congestión del tráfico, los problemas de dotación de personal y problemas mecánicos.

Los indicadores se recogen por separado para Londres, otras áreas metropolitanas y áreas no metropolitanas.

De interés para este estudio es:

- Aplicación de encuesta estándar de satisfacción del cliente a través de diferentes operadores / tipos de servicio

## **Medición de la productividad en el sector de los autobuses urbanos de Australia, Hensher, David A; y Daniels, Rhonda, (1995)**

Este trabajo (Hensher & Daniels, 1995) analiza la eficacia relativa de los operadores de autobuses urbanos de Australia mediante la medición de la productividad bruta de los factores de producción (Ingresos brutos/costes totales). El énfasis se hace, en gran medida, en la eficiencia de costes y la rentabilidad de los operadores de autobuses urbanos públicos y privados.

Se sugiere que hay dos medidas ideales del resultado desde el punto de vista de la demanda (o final):

- N° de Pasajeros
- Pasajeros / km

Se recomienda Pasajeros / km como una medida mejor, sin embargo, se observó que a menudo es menos precisa que el número de pasajeros, pues para que no lo sean deben medirse las distancias de desplazamiento de los viajeros con exactitud.

Las longitudes de viaje son caras de medir con precisión y muchos operadores de transporte no las miden normalmente.

Los resultados del servicio se definen como dentro de una de las dos categorías siguientes:

- Los resultados intermedios se relacionan con el nivel de servicio prestado (por ejemplo, vehículos - km)
- Los resultados finales se refieren al consumo / demanda de servicios (por ejemplo, los pasajeros - km)

Igualmente hay dos medidas de resultado ideales desde el lado de la oferta (o intermedio):

Km x vehículo (o km x asiento)

Horas x vehículo (o horas x asiento)

Hora - vehículos (u horas - asiento) son preferibles a Vehículos - km pues se evita con ellos el sesgo potencial debido a la congestión del tráfico y otros impactos del entorno operativo.

Cinco categorías de entradas se definen como las que forman la base para el resultado intermedio o final.

Son los siguientes:

- Trabajo
- Energía
- Mantenimiento sin mano de obra
- Capital invertido en vehículos
- Otros recursos

De interés para este estudio es:

- Definición de las métricas ideales desde el lado de la oferta y de la demanda
- Definición de los resultados intermedios y finales

**Calidad del servicio - desarrollo de un índice de calidad de servicio en la prestación de los contratos comerciales de autobuses. (David A. Hensher, Peter Stopher, Philip Bullock (2003))**

Este documento (Hensher, Stopher, & Bullock, 2003) identifica las dimensiones de calidad de servicio que son importantes para los pasajeros de autobús. Se identificaron trece atributos y luego se usaron para definir las preguntas en una encuesta de preferencias declaradas

Los atributos cubrían las siguientes áreas:

- Tiempo de viaje
- Tarifas

- Tipos de billetes
- Autobuses / hora (frecuencia)
- Puntualidad
- Distancia a la parada de autobús
- Disponibilidad de asientos en el autobús
- Información en las paradas
- Accesibilidad al autobús
- Facilidades en las paradas de autobús
- Temperatura dentro del autobús
- Actitud del conductor
- Limpieza general del autobús

De interés para este estudio es:

- Las categorías definidas en este estudio nos proporcionan una indicación de los tipos de categorías de KPI, que se pueden utilizar para un sistema completo de indicadores clave de eficiencia.

### **Evaluación de la eficiencia empresarial para Transporte en Autobús (Gordon J. Fielding, Timlynn T. Babitsky y Mary E. Brenner. (1985))**

En este trabajo (Fielding, Babitsky, & Brenner, 1985) se aborda la necesidad de un marco sencillo para medir la eficiencia del servicio de autobuses, así como el desarrollo de ese marco. Se sugiere en él que se puede utilizar un pequeño subconjunto de indicadores clave de eficiencia para medir la eficiencia del servicio de autobuses.

Los estudios anteriores se centraron en la minimización del "coste por pasajero" y sugirieron que un único conjunto KPI puede ser adecuado para un uso a alto nivel en las empresas y autoridades de transporte. Sin embargo, este documento sugiere que los servicios de autobús deben cumplir con los requisitos de los diferentes grupos de indicadores clave de eficiencia y, por lo tanto las medidas individuales de los KPI no son apropiadas.

Objetivo: conocer el conjunto mínimo de indicadores clave de eficiencia (KPI) para transmitir la máxima información de aquella necesaria sobre la eficiencia.

Se hace distinción entre:

- Eficiencia del Servicio - la relación entre la entrada de recursos y la producción del servicio
- Eficacia del Servicio - la capacidad de las empresas de autobuses para cumplir ciertos objetivos

Se definen también tres categorías de parámetros estadísticos:

- Entradas al servicio
- Resultados del servicio
- Consumos del servicio

Se define, también, en el documento, un Modelo Conceptual de Eficiencia del Transporte Público. Éste está formado por un triángulo con cada una de las tres categorías anteriores en cada esquina (Imagen 4-7).



Imagen 4-5; Modelo de la Eficiencia Empresarial en el Transporte

Fuente: Fielding, Babitsky y Brenner. (1985)

Como parte de este trabajo, se identificaron varios problemas con la obtención de datos relativos a la medición de eficiencia empresarial de los servicios de transporte en autobús. Estos incluyen, por ejemplo, diferentes clasificaciones de los mismos entre los distintos operadores (ej. en las subvenciones y en los datos de mantenimiento) que muchas veces se consideran sospechosos.

Se seleccionaron un total de 48 indicadores (22 de eficiencia de costes y 26 de la eficacia del servicio) que más tarde se redujeron a 30. De éstos, se identificaron los siete mejores indicadores clave de eficiencia y siete alternativos utilizando el **análisis factorial** (técnica estadística para explicar las correlaciones entre las variables observadas en términos de un número menor de variables no observadas llamadas factores), como se muestra en la Tabla 4-9.

Concepto de Desempeño	Mejor indicador	Indicador alternativo
Producción por coste unitario	Horas comerciales de vehículos / gastos operativos	Millas comerciales de vehículos / gastos operativos
Utilización del servicio	Viajes sencillos de pasajeros por horas comerciales de vehículos	Viajes sencillos de pasajeros por millas comerciales de vehículos
La generación de ingresos por unidad de gasto	Ingresos de explotación por gastos operativos	Ingresos de pasajeros por total de gastos operativos
Eficiencia de la mano de obra	Horas totales de vehículos por empleado	Horas comerciales de vehículos por hora operativa de empleado
Eficiencia de los vehículos	Total de millas de vehículos por n <sup>o</sup> máximo de vehículos	Horas totales de vehículos por n <sup>o</sup> máximo de vehículos
Eficiencia del Mantenimiento	Total de millas de vehículos por empleado de mantenimiento	Horas totales de vehículos por empleado de mantenimiento
Seguridad	Total de millas de vehículos (en millones) por accidente	Total de horas comerciales de vehículos por accidente

**Tabla 4-9; Indicadores de eficiencia empresarial**

**Fuente: Fielding, Babitsky y Brenner. (1985)**

Se encontró que los primeros tres "mejores indicadores" en la Tabla 4-9 eran los más importantes en la determinación de la eficiencia, según definían los directivos la eficiencia empresarial.

El documento también señala que las comparaciones de indicadores con los de otros operadores considerados iguales (evaluación comparativa) es uno de los resultados más reveladores de análisis.

De interés para este estudio

- Definición del Modelo Conceptual de Eficiencia Empresarial de Transporte Público. Se puede utilizar para garantizar que los KPI propuestos cubren los tres aspectos importantes (Eficacia y eficiencia de costes y efectividad del servicio).

### **Web de la Federación Nacional de Usuarios de autobús (U. K.)**

La Federación Nacional de Usuarios de Autobús (NFBU) en el Reino Unido es una organización que tiene como objetivo representar las necesidades de los usuarios de autobuses en el Reino Unido. El NFBU establece unas directrices (que publican en su página web <http://bususers.org/>) para orientar a las empresas de transporte público en las buenas prácticas en prestación del servicio de transporte público autobús y que cubren las siguientes áreas (siempre desde la perspectiva de los pasajeros):

- Antes del viaje
- Paradas de autobús y terminales
- El autobús (vehículos)
- Tarifas y billetes
- Puntualidad y fiabilidad
- Quejas y reclamaciones
- Consultas / Información

Se recomiendan algunos niveles objetivos de eficiencia dentro de estas categorías (Federación Nacional de Usuarios de autobús U.K., 2014), sin embargo, no son en general muy específicas.

Sin embargo, se sugiere que la fijación de objetivos de puntualidad y fiabilidad puede no ser apropiada dentro de la industria de los autobuses, ya que muchos de los factores que influyen en estos se encuentran en parte fuera del control de los operadores (la congestión del tráfico).

### **Medición de la eficiencia del Servicio de Ferrocarril del Reino Unido. Autoridad Estratégica del Ferrocarril del Reino Unido (S.R.A.)**

La Autoridad Estratégica del Ferrocarril del Reino Unido (S.R.A.) fue un organismo público no departamental del Reino Unido creado en virtud de la Ley de Transporte de 2000 para proporcionar una dirección estratégica para la industria ferroviaria.

El SRA se estableció en 2001 en un intento de aumentar la regulación de interés público de la red ferroviaria fragmentada después de la privatización de British Rail. Incorporó al anterior director de las franquicias de ferrocarril de pasajeros del gobierno conservador. Su función principal era adjudicar y hacer cumplir las franquicias ferroviarias de pasajeros en las que los operadores se comprometieron a proporcionar ciertos niveles de servicio.

El SRA funcionó bajo las guías y directrices de la secretaria de estado para el transporte, en Escocia del ministro escocés para el transporte y en el área Gran Londres del Alcalde de Londres.

El SRA fue discontinuado en 2006 y sus funciones transferidas al Departamento de Transporte Ferroviario, a la Red Ferroviaria y a la Oficina de Reglamentación Ferroviaria.

El SRA utilizó una serie de medidas de eficiencia empresarial para evaluar los niveles de servicio proporcionados por las empresas privadas que operan las franquicias de explotación ferroviaria (Servicio de la Industria del Ferrocarril del Reino Unido, 2014).

Si bien algunas de estas medidas están específicamente relacionadas con el sector ferroviario y pueden no ser apropiadas para los sistemas de autobús, es

de interés el sistema utilizado para medir la fiabilidad y puntualidad. Éste se basa en el "retraso promedio", que representa el número medio de minutos de retraso con el que los pasajeros llegan a su destino, más que el retraso medio de los propios servicios. Por ejemplo: cuando se cancela un servicio, el retraso contado se basa en el número de minutos que los pasajeros llegan tarde a su destino (desde la hora de llegada programada del servicio cancelado) tomando el siguiente servicio e incluyendo el retraso medio de ese servicio posterior.

De interés para este estudio

- Definición de un indicador de eficiencia alternativo para medir los retrasos.

### **Revisión Estratégica de Transport for London (TfL) - Estudio de Ciudades Comparables. (2003)**

Comparación de la red de autobuses de Londres, Birmingham, Manchester, París, Berlín, Nueva York, Singapur y Hong Kong (Transport for London (TfL), 2003).

Los indicadores se centraron en las características de las ciudades y los costes: coste por kilómetro, el coste por pasajero, los ingresos por tarifa por pasajero y el ratio de recuperación de costes.

Concluyó que los costes están muy influidos por la velocidad del tráfico y los costes de mano de obra local.

Concluyó que es difícil obtener datos sobre costes de los operadores, desglosados y comparables.

De interés para este estudio

- Experiencia en la obtención de datos comparables a nivel internacional.

## **Estudio Internacional de Benchmarking de Transport for London (TfL)**

Comparación entre Londres, París, Nueva York y Tokio (Transport for London (TfL), 2013).

Enfocado en el transporte en general y las características de las ciudades.

Los indicadores de autobús: fiabilidad, puntualidad, velocidad media, accidentes, ocupación.

La comparación de la fiabilidad de los autobuses estuvo algo limitada por la falta de consistencia de los datos y de comparabilidad entre las ciudades.

De interés para este estudio

- Comparación de indicadores comunes a nivel internacional.

## **Seguimiento de Servicios de Transporte en Autobús en ciudades extranjeras, Gobierno Central de Hong Kong, LIU E,; WU J. LEE J.(1996)**

El estudio (Liu, Wu, & Lee, 1996) incluyó un ejercicio de seguimiento de las prácticas de control del servicio, centrado en el control de pago del billete.

Además de Hong Kong, la encuesta abarcó las ciudades de Singapur, Seúl, Londres, Tokio, Osaka, Sídney, París, Toronto, Vancouver, Nueva York, Los Ángeles, Bangkok y Taipéi

De interés para este estudio

- Recopilación de datos de los sistemas de transporte en autobús en todo el mundo.
- Comparación de los indicadores clave de eficiencia entre los operadores, incluyendo de la demanda y de utilización de la flota.

## **Benchmarking de transporte público en autobús en 4 importantes ciudades danesas (Consejo Danés de Transporte, 2000)**

El objetivo principal de este estudio (Consejo Danés de Transporte, 2000) fue investigar las diferencias de costes, ingresos y subsidios entre los sistemas de autobuses concesionados por las autoridades locales y las que habían permanecido controladas por las autoridades locales:

- Empresas públicas de autoridades locales con la planificación y el funcionamiento coordinados (Arhus y Odense)
- Planificación del servicio hecho por una empresa pública, pero con las operaciones subcontratadas al sector privado (Copenhague y Aalborg)

El estudio concluyó lo siguiente:

- Los costes (medidos por hora de servicio) varían considerablemente entre los sistemas
- Los ingresos varían significativamente
- Menor variación entre los subsidios que entre los costes e ingresos
- Los costes se reducen, pero no se encontró ningún beneficio claro en esa reducción de costes debida a utilizar operadores privados

De interés para este estudio

- Demuestra la capacidad de comparar los sistemas con diferentes estructuras organizativas.

### **4.3.1 Síntesis de la revisión de la literatura**

Este punto recoge las conclusiones de la revisión de la literatura realizada, los indicadores de eficiencia y categorías y variables de medición que se pueden utilizar.

## TABLA RESUMEN

Documento	De interés para este estudio
Grupo CoMET y Nova Key	El sistema de KPI obtenido El marco de trabajo del Grupo de Benchmarking de empresas de Metro.
Norma Europea 13.816.	Definición de calidad de servicio, objetivación y medición. La guía completa sobre la selección y medición de indicadores para medir la calidad del servicio.
Manual para la Medición de la Satisfacción del Cliente y Calidad de Servicio (Transportation Research Board, Washington DC)	Aunque se centró en la calidad del servicio, este manual proporciona también orientación sobre los tipos de indicadores que pueden utilizarse para la medición de los atributos de eficiencia más centrados en el cliente. También destaca la medida en que los indicadores varían entre los operadores de transporte, tanto en términos de los aspectos medidos y sus definiciones. Además, se ofrece una descripción de cada grupo de atributos de servicio
Base de Datos Nacional de Tránsito de la Administración Federal	El conjunto de los KPI cubre una amplia gama de aspectos del transporte público La comparación realizada entre los distintos operadores
Manual de Benchmarking.(EQUIP)	Se definió un conjunto completo de KPI Los indicadores fueron desarrollados específicamente para la evaluación comparativa
Manual MARETOPE	Indicadores de Productividad y Calidad La experiencia obtenida de la comparación internacional
KPI de Calidad. DoT del Reino Unido	Aplicación de encuesta estándar de satisfacción del cliente a través de diferentes operadores / tipos de servicio
Medición de la productividad autobuses. Hensher y Daniels	Definición de las métricas ideales desde el lado de la oferta y de la demanda Definición de los resultados intermedios y finales
Calidad de servicio en autobuses. (Hensher, Stopher, Bullock)	Las categorías definidas en este estudio nos proporcionan una indicación de los tipos de categorías de KPI, que se pueden utilizar para un sistema completo de indicadores clave de eficiencia.
Evaluación de la eficiencia del Transporte en Autobús; Fielding, Babitsky y Brenner.	Definición del Modelo Conceptual de Eficiencia Empresarial de Transporte Público. Se puede utilizar para garantizar que los KPI propuestos cubren los tres aspectos importantes (Eficacia y eficiencia de costes y efectividad del servicio).
Web de la Federación Nacional de Usuarios de autobús (U. K.)	Se sugiere que la fijación de objetivos de puntualidad y fiabilidad puede no ser apropiada dentro de la industria de los autobuses ya que muchos de los factores que influyen en éstos se encuentran en parte fuera del control de los operadores (la congestión del tráfico).
Medición de la eficiencia del Ferrocarril de U.K. (S.R.A.)	Definición de un indicador de eficiencia alternativo para medir los retrasos.
Revisión Estratégica de Transport for London (TfL) - Estudio de Ciudades Comparables.	Experiencia en la obtención de datos comparables a nivel internacional.
Estudio Internacional de Benchmarking de Transport for London (TfL)	Comparación de indicadores comunes a nivel internacional
Estudio del Gobierno Central de Hong Kong, LIU, WU, LEE (1996)	Recopilación de datos de los sistemas de transporte en autobús en todo el mundo.

	Comparación de los indicadores clave de eficiencia entre los operadores, incluyendo de la demanda y de utilización de la flota.
Benchmarking de transporte público en autobús (Consejo Danés de Transporte)	Demuestra la capacidad de comparar los sistemas con diferentes estructuras organizativas.

**Tabla 4-10; Resumen literatura encontrada.**

**Fuente: Elaboración propia**

Como síntesis, decir que ha habido pocos estudios comparativos internacionales relacionados con los autobuses. En general, éstos se han centrado, en gran medida, en uno de los siguientes aspectos:

- Describir las diferencias entre las operaciones de autobuses de las diferentes ciudades en términos de las características generales de la ciudad (como la densidad de población y el reparto modal) y las características de los servicios de autobuses (por ejemplo, los factores de carga).
- Comparaciones específicas, para comparar una característica particular (en el caso del estudio de Hong Kong) o para comparar las estructuras organizativas (estudio danés).

Estos estudios difieren del objetivo de este informe debido a que no cubren todos los aspectos del funcionamiento del autobús y se centraron en responder preguntas específicas, en lugar de proporcionar un marco para la identificación de las mejores prácticas.

Lo que estos estudios de Benchmarking no resaltan, sin embargo, son las grandes dificultades en la obtención de datos coherentes y comparables de diferentes operadores. Estas dificultades se refieren en gran parte a tres áreas principales:

- Problemas de los operadores con la obtención de datos
- Diferencias en la clasificación entre los operadores
- Diferencias en la definición de indicadores específicos (la más destacada, la puntualidad)

Parte de los problemas que originan las dificultades de comparabilidad de los datos parecen haber sido debidos al hecho de que se trataba de estudios realizados en un lapso corto de tiempo, con plazos limitados. Ésto no permitió que se refinaran los procesos de obtención de datos una vez que se identificaron las inconsistencias iniciales y la escasez de algunos datos. Tampoco permitió el análisis de tendencias o la identificación de mejoras.

A diferencia de los otros estudios de Benchmarking revisados, los grupos de Benchmarking de metro CoMET y Nova son de mayor relevancia, ya que representan un proceso más comparable en el tiempo.

A modo de conclusión, cabe destacar que la revisión de la literatura ha demostrado el grado en que anteriores estudios pueden aportar información para la elección de los KPI del sistema para empresas de autobuses. También ha puesto de relieve algunas de las cuestiones clave relacionadas con la selección de los aspectos y variables de eficiencia utilizados en los KPI. Esta información se utiliza para proporcionar una base para el desarrollo de los indicadores clave de eficiencia.

Además, se ha podido comprobar que no se tienen en cuenta las relaciones que hay entre los indicadores escogidos y, aunque se clasifiquen en diferentes categorías, las diferentes medidas que nos dan los KPI normalmente están correlacionadas. Las correlaciones entre diferentes KPI surgen de las relaciones inherentes de los diferentes procesos de gestión de las empresas de transporte y de las influencias mutuas de las actividades realizadas para mejorar el cumplimiento de los diferentes KPI.

Por ello, es importante conseguir una metodología fácil y fiable para identificar y analizar las relaciones entre los KPI y los procesos de gestión y es muy necesario para mejorar la eficiencia de gestión de las empresas de transporte.

Para optimizar la eficiencia de las empresas, es más importante identificar indicadores importantes en varios niveles y optimizar cada uno de ellos sin bajar la eficiencia global de la empresa, que intentar maximizar o minimizar los indicadores escogidos.

#### 4.3.1.1 Métricas de eficiencia para empresas de transporte urbano

Junto con la revisión realizada, cabe destacar que existen varias métricas (o Conjuntos de Indicadores) utilizadas en la evaluación de la eficiencia de las empresas de transporte urbano que han sido diseñadas para **medir** la eficiencia en la operación, **evaluar** la eficacia de las mejoras aplicadas midiendo la variación de los KPI y **examinar** la alineación estratégica de toda la gestión de la empresa (Iglesias Pérez, 2014).

Las medidas individuales de la eficiencia de la empresa de transporte urbano se clasifican generalmente en estas categorías:

- De proceso
- De calidad
- De tiempo
- De coste
- De flexibilidad
- De enfoque estratégico
- De enfoque operativo
- De enfoque táctico

Sin embargo, como muchas de estas métricas, o sistemas de medición, no tienen una estrategia definida para escoger indicadores independientes que definan de una manera fácil a que indicadores hay que dar prioridad, ni un enfoque que busque un equilibrio entre dichos indicadores para que la empresa cubra mejor todos sus objetivos, ni un proceso sistemático de mejora, en las empresas del mundo real se tienen dificultades para escoger las métricas más adecuadas.

También se han desarrollado otras métricas y modelos de referencia para la Operación de las Empresas de Transporte Urbano, para facilitar la construcción de una herramienta sistemática de medición y mejora de la eficiencia de las empresas de transporte urbano. Son sistemas usados para la identificación de problemas, la evaluación y el seguimiento de dichas empresas (Iglesias Pérez, 2014). En dichos modelos, hay un sistema de indicadores clave de eficiencia o

KPI para la medición de la eficiencia a múltiples niveles y que suele abarcar los procesos principales de la empresa de transporte urbano:

- Planificación
- Nombramiento
- Operación
- Control de la Operación
- Medición de resultados
- Realimentación

#### **4.4 Selección del conjunto de KPI más adecuados para medir la eficiencia del transporte urbano**

Los indicadores clave de funcionamiento (KPI) son importantes para que una empresa siga una senda competitiva pues, además de servir para que los directivos vigilen la marcha de la empresa, constituyen un aspecto fundamental de la evaluación comparativa entre empresas. Si están bien diseñados, permiten la comparación de la eficiencia entre empresas en bases universalmente compatibles y comprensibles. Al definir indicadores de eficiencia objetivos válidos para todas las empresas, se puede lograr un nivel más alto de comparabilidad.

Después de un proceso de desarrollo iterativo, los KPI pueden ser utilizados por las empresas en sus diferentes niveles y con diferentes propósitos.

Los KPI correctamente definidos se pueden utilizar para entender mejor las diferencias entre operadores, para identificar las mejores prácticas (lo que requiere un análisis en mayor profundidad), para identificar problemas de gran importancia y para fijar objetivos internos de mejora (Randall, Condry, & Trompet, 2007).

Cuando se usan anonimizados, los KPI también se pueden utilizar externamente para dar información a las partes interesadas.

El objetivo de este punto es crear un sistema de KPI que abarque la problemática de todas las empresas, siguiendo el marco conceptual del “Cuadro de Mando Integral”, que permite el análisis comparativo en su conjunto, establecer unos objetivos para cada uno de los KPI y después establecer un procedimiento sistemático para averiguar qué orden de prioridad hay entre los KPI, en cuanto al aumento de la eficiencia global de la empresa.

Para cumplir con este objetivo, en este apartado se:

- Establecerá el marco metodológico para la selección de un sistema de KPI para la evaluación y la evaluación comparativa de una empresa de transporte urbano.
- Establecerá los pasos a dar en el proceso de desarrollo del sistema de KPI.
- Describirá las razones y ventajas de un Sistema de KPI específico para empresas de transporte urbano.
- Resumirá la literatura clave sobre la selección de indicadores clave de eficiencia (que se centra en los de sistemas de autobuses, pero que incluye los de otros modos de transporte de los que es posible la transferencia).
- Establecerá la mejor selección de KPI, de entre todos los posibles, para una empresa de transporte urbano.
- Especificará y definirá los datos que deben ser recogidos (índices de referencia) por las empresas de autobuses, para facilitar la adopción del sistema de KPI seleccionado.

#### **4.4.1.1 Características de los KPI seleccionados**

La elección adecuada de KPI, ayudan a los directivos de la empresa a poder guiarla en la senda de la mejora de la eficiencia, así como el desarrollo de los KPI permite lograr altos niveles de comparabilidad de los datos (Randall, Condry, & Trompet, 2007). Para ello, los KPI debe tener definiciones claras, datos normalizados y ajustes por influencias externas (por ejemplo, los salarios, las velocidades de tráfico, la inflación, etc.) son muy importantes para lograr

este objetivo (Randall, Condry, & Trompet, 2007). Sin embargo, también sin comparabilidad perfecta, los datos para los KPI pueden ser muy útiles. Las mejores prácticas se pueden destacar y analizar mediante el uso de comparaciones de "ordenes de magnitud".

Con respecto al nivel de indicadores, según Según (Randall, Condry, & Trompet, 2007) es muy útil en la gestión de las empresas disponer de una "jerarquía ordenada de indicadores" utilizando KPI primarios y secundarios pues, en los diferentes niveles de la empresa, se utilizan diferentes grupos de indicadores.

(Randall, Condry, & Trompet, 2007) dicen que, idealmente, no se debe intentar trabajar con muchos más de 15 KPI primarios, ya que, por lo general, no es posible permanecer muy centrado en un número mayor que éste.

El número ideal de indicadores clave de eficiencia secundarios (Randall, Condry, & Trompet, 2007) depende de los aspectos que deban de ser cubiertos por los indicadores. En cada dirección de la empresa se usa un paquete distinto de KPI secundarios para controlar las variables menos significativas que las de los primarios. Estos indicadores secundarios se escogen relacionados con los KPI primarios pero desglosando de forma más fácil, para cada Director de Área, todos los conceptos esenciales involucrados en los KPI primarios y proporcionando una comprensión más profunda de éstos.

Y con respecto a los principios para elegir a los KPI estos serán según Según (Randall, Condry, & Trompet, 2007), los KPI se escogerán de acuerdo con los siguientes principios:

- Deben ser exhaustivos y concisos - Debe haber un equilibrio entre una visión total y la profundidad, necesario para el enfoque de gestión. La clasificación de los indicadores clave de eficiencia en primarios y secundarios se hace para lograr este equilibrio.
- Deben ser internamente coherente - Se supone que las empresas de autobuses usan un conjunto coherente de definiciones internas para derivar de estas sus KPI.

- Siempre que sea posible, los datos deben conciliarse con otros datos anteriores publicados, para maximizar la coherencia del estudio.
- Deben ser externamente relevantes para fines de evaluación comparativa - Por ejemplo, los indicadores de productividad del personal deben tener en cuenta el uso de contratistas externos de mano de obra para el ajuste de la diferencia entre los miembros causados por este factor.
- Deben ser estadísticamente fiables, tener una tolerancia adecuada y coherente - Si se van a permitir tolerancias, es importante asegurarse de que sean lógicas y consistentes.
- Deben estar basados en fuentes de datos muy confiables - Algunos indicadores clave de eficiencia no lo cumplen y deben ser excluidos.
- Los beneficios de medir cualquier KPI deben ser mayores que los costes de recoger la información y analizarla.
- Deben apoyar la consecución de mayor eficiencia empresarial de las empresas a través de los factores críticos de éxito – Los KPI deberían ser diseñados para dar una visión clara de lo que constituye el éxito.
- Deben apoyar la búsqueda de las mejores prácticas - Los KPI deben ayudar a identificar las mejores prácticas actuales y las condiciones en que estas prácticas son las mejores, ya que una buena práctica para una empresa no es necesariamente transferible a otra. Por ejemplo, el programa de mantenimiento para una empresa con alta ocupación podría ser muy diferente del de una empresa con baja ocupación.
- Deben estar bien estructurados, con flexibilidad para el cambio y la evolución en el tiempo - El sistema de KPI, que se clasificará en indicadores primarios y secundarios, se diseñará para permitir esa flexibilidad.

Una buena elección de KPI pueden ser utilizados por la empresa en los diferentes niveles y con diferentes propósitos, para la identificación de problemas de alta prioridad y el establecimiento de objetivos internos de mejora pero también para comprender mejor las diferencias entre los operadores.

Además, en una etapa posterior del desarrollo de los KPI, se pueden utilizar métodos de análisis estadístico de los datos de los KPI como el Análisis de Regresión y los métodos de análisis no paramétricos como el Análisis de la Envoltura de Datos (AED), (Randall, Condry, & Trompet, 2007) para proporcionar una mayor comprensión de los resultados..

Los resultados de los Indicadores Clave de Eficiencia también se pueden utilizar para la actividad de Benchmarking entre empresas similares.

Los indicadores de eficiencia empresarial pueden cubrir todos los aspectos de un negocio y, por lo tanto, suele ser apropiado en la evaluación comparativa clasificar los indicadores de acuerdo con determinados aspectos o áreas de eficiencia empresarial, que llamamos "Perspectivas". Éstos no se refieren a áreas de negocio independientes, físicamente u organizativamente, sino a aspectos de eficiencia, como la utilización de los activos y la productividad del personal.

En la definición de indicadores clave de eficiencia para la industria del transporte público, también es importante tener en cuenta que, a diferencia de otros tipos de industria, el "producto" (la capacidad de transporte en cada franja) sólo puede ser consumida cuando se produce y no se puede almacenar.

La literatura se refiere, en general, a cualquiera de los aspectos del servicio que experimentan los clientes (incluyendo la puntualidad y fiabilidad) o a medidas más internas, como los costes. El grupo de atributos directamente experimentados por los clientes se puede medir desde dos perspectivas diferentes (Trompet, 2010):

- Desde la perspectiva de los clientes (por ejemplo, la proporción de clientes que llegan a tiempo).
- Desde la perspectiva de los operadores (por ejemplo, la proporción de vehículos que llegan a tiempo).

Está claro que es mejor medir de acuerdo a la perspectiva de los clientes, sin embargo, en algunas empresas, ésto es más complicado, pues se requieren

generalmente los datos de recuento de pasajeros (o una estimación del número de pasajeros).

En general, los atributos de servicio que pueden observar los clientes serán de mayor relevancia a nivel del regulador (y la alta dirección) que los indicadores más "internos" que serán de mayor interés para las personas más estrechamente implicadas en el desarrollo de las operaciones.

En términos de la productividad y de mediciones de costes, hay tres aspectos distintos que pueden ser medidos (Fielding, Babitsky, & Brenner, 1985):

- Eficiencia de Costes - Esto se refiere a como de eficientemente un operador es capaz de proporcionar un cierto nivel de servicio (por ejemplo, en términos de vehículos x km) para un coste dado. No se refiere a si el servicio ofrecido lo piden los clientes (o si lo usan). Por lo tanto, un servicio eficiente, no siempre es un servicio eficaz, si lo que se produce de manera eficiente no es lo que se demanda (y por lo tanto probablemente no será consumido).
- Eficacia de Costes - Esto relaciona el nivel de ocupación del servicio con el coste del suministro de ese servicio.
- Eficacia de Servicios - Esto se refiere a como de eficientemente la prestación del servicio responde a las necesidades de los clientes.

Estas tres categorías han sido aprobadas por la Administración Federal de Tránsito de los EEUU (Administración de Tránsito Federal (FTA), 2014), que utiliza categorías similares para sus indicadores clave de eficiencia.

La lista más completa de KPI encontrados durante la revisión de la literatura fue la que se desarrolló para el proyecto EQUIP (Proyecto EQUIP , 2000). Ésta cubre todos los aspectos de las operaciones de autobuses.

#### 4.4.1.2 Variables de referencia.

Los KPI se forman generalmente reflejando una relación entre dos variables, por lo general relacionan las entradas o inputs al servicio (coste, horas de trabajo, etc.) con una salida o output (km x vehículo, etc.). Las relaciones entre dos variables normalizan los datos, lo que permite comparaciones de empresas de diferentes tamaños. Al comparar los datos a nivel internacional, las entradas y salidas empleadas se deben elegir adecuadamente con el fin de minimizar el impacto de características del sistema que están fuera del control del operador (por ejemplo, el tamaño del sistema, la congestión del tráfico) (Trompet, 2010).

Una de las variables de salida claves relacionada con los servicios de autobús se refiere a la circulación de vehículos en la red viaria para ofrecer un servicio a los clientes. Ésto se puede medir o en términos de la distancia recorrida por los vehículos o por el tiempo durante el cual están en servicio (es decir, km x vehículos u horas x vehículos).

Hay una serie de cuestiones relativas a si la medida más adecuada son los km x vehículos u horas x vehículos. Hay quien afirma (Hensher & Daniels, 1995) que se prefiere las horas x vehículos, ya que "permite eliminar la calidad del entorno operativo" mediante la eliminación de los efectos de los retrasos causados por el tráfico o por los pasajeros, así como diferentes velocidades de tráfico entre ciudades. (Fielding, Babitsky, & Brenner, 1985) determinaron los indicadores con la influencia más significativa en la eficiencia y encontraron que los relacionados con la hora x vehículo son más significativos. Sin embargo, (Fielding, Babitsky, & Brenner, 1985) también tomó nota de que a veces los reguladores prefieren los vehículos x km, y se pueden utilizar como una alternativa. Del mismo modo, el estudio de evaluación comparativa danés basó los indicadores en "horas dentro del horario de servicio" (diferentes de las horas reales de los vehículos, ya que en los primeros los retrasos no se incluyen).

La excepción a lo anterior es en el mantenimiento, donde los vehículos x km son una de las medidas preferidas.

Además de los kilómetros x vehículo frente a horas x vehículo, fueron identificados como relevantes para la medición de la eficiencia empresarial de los servicios de autobús otra serie de entradas y salidas importantes. Éstas se muestran en las tablas 5 y 6, junto con las cuestiones relativas a su uso en los KPI.

VARIABLES ENTRADA	COMENTARIOS
Vehículos	Número y tipo
Horas de personal (con longitud de turno)	Necesidad de identificar también las horas de las actividades subcontratadas.
Gastos de personal	Incluirá también los gastos generales, tales como contribuciones a la Seguridad Social y planes de pensiones.
Coste de Operación	Coste de Operación incluye el mantenimiento, los repuestos, el combustible, los gastos de administración, gestión y operación.
Coste de Capital	Los costes de capital incluirán tanto material rodante (vehículos) como infraestructuras fijas (paradas de autobús, separadores de carriles bus, de venta de billetes, de sistemas tecnológicos, etc.). Sería apropiado el coste medio en un período de 5 a 10 años.
Apoyo financiero (del gobierno, de las autoridades de transporte, del Ayuntamiento etc.)	Es importante que sean incluidas las subvenciones "ocultas", como: rebajas de impuestos en los combustibles, de cotización de la Seguridad Social, etc. En los subsidios deben distinguirse entre los de apoyo a los ingresos de explotación, los de apoyo a la inversión de capital y los de apoyo a las tarifas reducidas.
Infraestructuras (carriles bus, paradas, depósitos, etc.)	La provisión y/o el mantenimiento de infraestructuras puede ser, o no, responsabilidad del operador.

**Tabla 4-11: Posibles variables de entrada para componer KPI.**

**Fuente: Randall et al (2007)**

SALIDAS	COMENTARIOS
Km x Vehículos	Influido por la velocidad del tráfico.
Horas x Vehículos	Evita el impacto de la velocidad del tráfico. Tal vez la mejor medida para la Oferta.
Km x asientos	Aunque el nº. de asientos pueden indicar el tamaño del vehículo (y la capacidad), puede ser influido de manera significativa por:  • El espacio para estar de pie
Horas x asientos	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El espacio multiusuario / minusválidos</li> <li>• El número de puertas</li> </ul> <p>(el n° de asientos en un autobús de longitud estándar (12 m) de un solo piso puede variar significativamente entre un tipo de autobús y otro)</p>
Km x capacidad (= km de vehículos x capacidad del vehículo)	Depende del diseño del vehículo y de si los pasajeros pueden seguir entrando hasta que se utilice todo el espacio físico o de si los conductores limitan las entradas.
Horas x capacidad (= horas de vehículos x capacidad del vehículo)	Depende del diseño del vehículo y de si los pasajeros pueden seguir entrando hasta que se utiliza todo el espacio físico o de si los conductores limitan las entradas.
Viajes de pasajeros	Total de embarques o viajes solamente, incluye Intercambios. No toma en cuenta la duración del viaje y no se puede utilizar fácilmente para el cálculo de los factores de ocupación y/o hacinamiento
Pasajeros x km	Una mejor medida de la demanda, pero puede ser difícil de medir con precisión. Puede ser utilizado para el cálculo de los factores de ocupación promedio.

**Tabla 4-12: Posibles variables de salida para KPI.**

**Fuente: Randall et al (2007)**

Como parte del proceso de desarrollo de los indicadores clave de eficiencia (KPI) se recogieron detalles de los KPI utilizados en la actualidad por varias empresas de autobuses importantes (Randall, Condry, & Trompet, 2007). Estos KPI se utilizaron como una de las entradas principales para el desarrollo del sistema de KPI propuesto.

Teniendo en cuenta las perspectivas y los atributos desarrollados para un CMI de una empresa de transporte urbano, en la tabla 4.13, se ofrece un resumen de los tipos y el número de indicadores clave de eficiencia utilizados por cada una de las empresas, junto con una visión general de cómo se relacionan con las Perspectivas del Cuadro de Mando Integral y los grupos de atributos relacionados.

Perspectivas	Grupos de atributos	Empresas									Total
Crecimiento y Aprendizaje	Crecimiento			1							1
	Aprendizaje		1								1
Cliente	Oferta y utilización	2	1	3	1	1	2	1	1		12
	Tiempo	2	3	2	3	13	2	3	2	1	31
	Calidad del servicio*	2	3	10	1	7		2	5		30
	Accesibilidad		1	1	1	2	1				6
Procesos Internos	Utilización de activos	1	1	1	2		3	3			11
	Productividad personal	2	10		1		3	3	7	1	27
	Confiabilidad y disponibilidad	2	3	11	1	6	1	7	4	16	51
Seguridad	Seguridad activa	1	1	3	4	6		4	1		20
	Seguridad pasiva					2	2		1		5
Financieros	Efectividad financiera	3	5	1		1	4	14	4		32
	Eficiencia Financiera	3	3	1	2	3	6	2	4		24
Medio Ambiente	Medio Ambiente	1	1		2		3	1		1	9
Antecedentes		5	4	6	2	4	9	3	1		34

<b>Total</b>	24	37	40	20	45	36	43	30	19	294
--------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

\* "Calidad del servicio" incluye los siguientes grupos de atributos detallados:

Información del personal (atención al cliente)										
Calidad del interior del vehículo										
Calidad en paradas y terminales										
Tarifas y billetes										

Tabla 4-13; Número de KPI por cada Perspectiva y grupo de atributos.

Fuente: Randall et al. (2007)

Cómo se puede observar en la tabla, el número de indicadores clave de eficiencia (KPI) usados en general por las empresas varía entre 20 en unas y más de 40 en otras (Randall, Condry, & Trompet, 2007). En general, las empresas de autobuses centran normalmente sus indicadores clave de eficiencia en las Perspectivas "Cliente" y "Procesos Internos".

Para la Perspectiva "Cliente", casi todas las empresas miden el grado en que el servicio real prestado se ajusta al servicio programado, tanto en términos de km x vehículo operados (fiabilidad) como en los servicios prestados a tiempo (puntualidad). Para los "Procesos Internos", los indicadores comunes son la fiabilidad y la disponibilidad de la flota así como la proporción de la flota utilizada en la hora pico.

Con respecto a "Seguridad", cuando se mide, se suele representar por el indicador "accidentes por cada 10.000 km de vehículo", mientras que la "Protección" (llamando como tal al conjunto de tareas dedicadas a prevenir los riesgos) casi nunca es cubierta por los KPI.

"Crecimiento y Aprendizaje" y "Medio ambiente" fueron las dos Perspectivas menos cubiertas dentro de los conjuntos de KPI de las empresas de autobuses. La mayoría de las diferencias se encontraron en de la Perspectiva "Financiera". Algunas empresas de autobuses, incluyen un número bastante elevado de indicadores clave de eficiencia financiera, mientras que otras usan muy pocos. Por ejemplo, una empresa utiliza únicamente el KPI de ingresos y no mide los costes.

#### **4.4.1.3 Selección de KPI por Perspectivas del CMI en empresas de transporte urbano**

En este punto se plantea un primer proyecto de sistema de indicadores clave de eficiencia (KPI) para empresas de transporte urbano. Éste se basa en una combinación de los indicadores existentes utilizados por los operadores de autobuses (Randall, Condry, & Trompet, 2007) y los resultados de la revisión de la literatura realizada, siempre clasificándolos según las Perspectivas del Cuadro de Mando Integral y los atributos definidos en el apartado XX .

Cabe destacar que las funciones y responsabilidades de cada una de las operadoras de autobuses de las que se tienen datos son diferentes. Por ejemplo, los servicios de mantenimiento de London Bus Services Limited se subcontratan y, como tal, los indicadores centrados en la producción relacionada con el mantenimiento son menos relevantes para la empresa. En consecuencia, los indicadores clave de eficiencia de interés para cada empresa serán diferentes. Sin embargo, en este estudio, se ha tratado de crear un sistema de KPI que lo abarque todo, siguiendo el marco definido por el Cuadro de Mando Integral, que permite el análisis comparativo en el grupo en su conjunto.

Este enfoque maximiza el valor global del sistema de KPI. Sin embargo, existe la limitación de que algunos datos son difíciles de obtener para algunas empresas, en particular cuando no los han recogido nunca y la empresa tiene poco o ningún control del elemento de eficiencia que está midiendo. Por ello, (Randall, Condry, & Trompet, 2007) recomiendan que cada empresa haga todo

lo posible para obtener todos los datos, si es necesario con la ayuda de autoridades de transporte y contratistas.

En los siguientes apartados, se definen los Indicadores Clave de Eficiencia potenciales que se identificaron en cada Perspectiva, clasificados por grupo de atributos, identificados por medio del proceso que se define en la imagen la Imagen 2.1.

Además, para cada KPI identificado, se incluye una breve descripción de lo que se mide, junto con los pros y los contras de la selección de ese KPI para el sistema final de KPI.

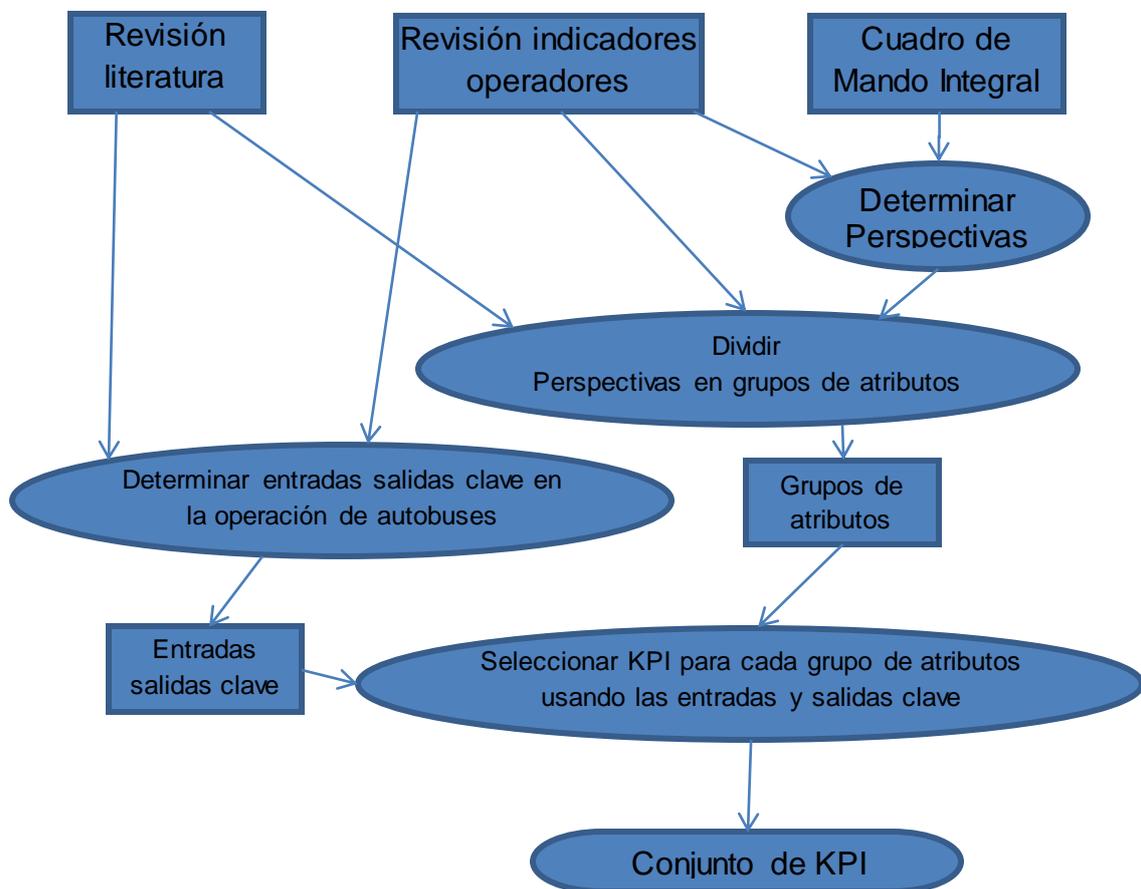


Imagen 4-6; Método de selección de KPI

Fuente Randall et al.

En resumen, en cada perspectiva se incluyen los siguientes datos:

- Información general sobre la Perspectiva, incluyendo su propósito y los detalles de cada uno de los grupos de atributos.
- Una síntesis de los KPI identificados.
- KPI primarios y secundarios recomendados para la evaluación comparativa de autobuses.

### **Perspectiva “Crecimiento y Aprendizaje”**

El objetivo de Crecimiento y Aprendizaje es medir los cambios en las operaciones y en el servicio a través del tiempo (crecimiento) para proporcionar una indicación de la capacidad directiva y estratégica de la empresa para mejorar o modernizar las operaciones (aprendizaje).

Cuando se deben cumplir obligatoriamente normas internacionales, por ejemplo: la modernización de la flota de autobuses respecto a las normas de emisiones EURO, los indicadores no se clasifican aquí. La razón es que estos indicadores no miden la fuerza innovadora de una empresa, sino sólo el estado de la empresa en el cumplimiento de las normas.

Los indicadores clave de eficiencia de "crecimiento y aprendizaje", presentados anteriormente, no son utilizados normalmente por las empresas de autobuses en sus respectivos sistemas de KPI. Por ejemplo, mientras que "la edad promedio de la flota" es un indicador común, sólo una empresa publica este indicador en la Perspectiva “crecimiento y aprendizaje”. Aunque estos tipos de KPI no se incluyen por las empresas de autobuses en sus métricas actuales, varios de estos indicadores se han utilizado con éxito en los grupos de evaluación comparativa CoMET y Nova metro (Proyectos CoMET y Nova Key, 2014).

Por lo tanto, en función de su uso más común en las empresas de transporte y las necesidades de reflejar al menos los parámetros más importantes de la Perspectiva “Crecimiento y Aprendizaje” se incluyen en la selección los siguientes KPI (Randall, Condry, & Trompet, 2007):

<b>Crecimiento y Aprendizaje</b>	
<b>Primarios</b>	
Variación de viajeros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque mide el indicador general clave de demanda de los clientes</li> <li>• Porque hay datos disponibles en todas las compañías de autobuses revisadas y es más preciso que pasajeros x km</li> </ul>
Porcentaje de cambio en los ingresos reales de vehículos x km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque mide el cambio en el servicio prestado</li> <li>• Porque hay datos disponibles en todas las empresas</li> </ul>
Horas de formación del personal por cada 1.000 horas de trabajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque mide la actitud hacia la formación del personal y la calidad del personal dentro de la empresa</li> <li>• Porque puede indicar el nivel de uso de las nuevas tecnologías</li> <li>• Porque los datos están disponibles en todas las empresas</li> </ul>
<b>Secundarios</b>	
Horas de formación de conductores por cada 1000 horas de conducción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KPI específico para los conductores, ya que interactúan más con los pasajeros y son la mayor parte de la plantilla total</li> <li>• Porque mide la actitud del conductor con respecto a los pasajeros y la seguridad y cualificación de los conductores</li> <li>• Porque mide el nivel de uso de nuevas tecnologías en vehículos</li> <li>• Porque los datos están disponibles en las empresas de autobuses revisadas</li> </ul>

Tabla 4-14; KPI de Crecimiento y aprendizaje

Fuente: (Randall, Condry, & Trompet, 2007)

### **Perspectiva “Cliente”**

El objetivo de la Perspectiva “Cliente” es medir los aspectos de la empresa que están directamente relacionados con los clientes y son visibles para éstos. Incluye la evaluación del nivel de servicio prestado a los clientes y mide la eficacia con que este servicio responde a las expectativas y necesidades del cliente.

La Perspectiva “Cliente” se divide en cinco áreas distintas:

- Capacidad y utilización: mide la cantidad de servicio prestado a los clientes y la medida en que estos servicios son utilizados por los clientes.
- Tiempo: incluye las medidas que describen cuánto satisfacen las necesidades de los clientes, la puntualidad y la frecuencia del servicio prestado.
- Calidad: cubre las áreas que reflejan la calidad del servicio prestado a los clientes (según lo medido directamente, no a través de la satisfacción del cliente. Medición objetiva)

- Satisfacción del cliente: mide el grado de satisfacción declarado por los clientes con el servicio prestado. (Medición subjetiva).
- Accesibilidad: incluye medidas tanto de la facilidad con que toda la población de la ciudad puede acceder a la red de autobuses como de la accesibilidad de los vehículos para los clientes, sobre todo de aquellos con necesidades especiales.

El objetivo ahora es seleccionar los indicadores clave de eficiencia que proporcionen información sobre los aspectos del servicio relacionados con los clientes, que están menos influenciados por factores externos tales como la estructura de la red y la velocidad del tráfico.

La mayoría de empresas tienen indicadores clave de eficiencia relacionados con la prestación y utilización de la capacidad de transporte, pero definidos individualmente. Sin embargo, los datos relativamente estándar que se utilizan para calcular estos indicadores indican que es posible el desarrollo de indicadores clave de eficiencia comunes con facilidad.

La mayoría de las empresas de autobuses miden una serie de indicadores relativos a la Perspectiva "Cliente". Todos tienen algún tipo de indicador que mide la puntualidad de sus servicios y la proporción entre los viajes programados (u horas, o Km) y los realmente operados.

En términos de Calidad de Servicio, hay una muy amplia gama de medidas diferentes utilizadas para evaluar la limpieza, la comodidad, etc., reflejando la dificultad de obtener mediciones precisas en este ámbito. Sin embargo, hay pocas fuentes de datos comunes entre todas las empresas revisadas, por lo que la selección de indicadores comunes para el grupo es un poco más difícil.

Dos empresas declararon que cuentan el resultado medio de las encuestas de satisfacción del cliente como un KPI y otras tres empresas señalaron que cuentan el número de comentarios, quejas y sugerencias de los clientes como otros tres KPI. Sin embargo, este tipo de indicadores son muy difíciles de comparar, ya que son muy subjetivos, y los resultados están influidos por

factores culturales y también por la extensión y la calidad de otros medios de transporte en la ciudad (contra los que son juzgados siempre los autobuses).

Sólo tres compañías de autobuses utilizan una medida relacionada con la accesibilidad, sin embargo, ésta no es fácil de medir objetivamente, ya que en muchos sitios hay una reglamentación que obliga a la empresa a hacer accesibles los autobuses.

#### KPI seleccionados

<b>Cliente</b>	
<b>Primarios</b>	
Puntualidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque es una medida muy importante para los clientes (probablemente la más importante si ya se han conseguido niveles aceptables de fiabilidad).</li> <li>• Porque proporciona una medida del grado en que el servicio real coincide con servicio programado.</li> <li>• Porque necesita unas definiciones comunes (número de minutos antes y después que se consideran como resultados puntuales, los lugares de medición, como se toman las muestras, etc.)</li> </ul>
Fiabilidad vehículos x km operados realmente / vehículo x km programados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporciona una medida de lo bien que el operador proporciona el servicio prometido a los clientes.</li> <li>• Porque los datos están disponibles en las empresas de autobuses revisadas</li> <li>• Porque es una definición directa que proporciona comparabilidad.</li> <li>• Porque recibe influencias externas (tales como por ejemplo, congestión de tráfico), en gran parte bajo el control de los operadores (Londres divide los datos por causa interna o externa).</li> </ul>
Pasajeros x kilómetros por Kilómetros comerciales x vehículo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporciona una medida de la capacidad utilizada en comparación con el servicio prestado.</li> <li>• Porque aunque es menos precisa que la capacidad disponible, es más consistente, (ya que la capacidad sentada y de pie varía con el tamaño y tipo del vehículo), y más fácil de recoger. La capacidad ofertada también está influida por las adquisiciones de vehículos.</li> </ul>
<b>Secundarios</b>	
Exceso de tiempo de espera	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque es la que mejor mide el tiempo real que los pasajeros esperan un autobús (de media) en comparación con el tiempo que tendrían que esperar según la frecuencia publicada para esa hora.</li> <li>• Porque proporciona una medida muy buena de la calidad del servicio prestado desde el punto de vista de los clientes.</li> </ul>
Porcentaje de vehículos accesibles en silla de ruedas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque da la medida de la cantidad de vehículos que son accesibles.</li> <li>• La legislación en Europa y de otros países hace que la accesibilidad sea un requisito obligatorio.</li> </ul>
Porcentaje de paradas con información a los clientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque es una buena medida del esfuerzo para ayudar al cliente.</li> <li>• Porque es comparable si está claramente definido - por ejemplo, "Porcentaje de las paradas de autobús mostrando horarios actualizados".</li> </ul>

Tabla 4-15; KPI de Cliente.

Fuente: (Randall, Condry, & Trompet, 2007)

## **Perspectiva “Procesos Internos”**

El objetivo de esta Perspectiva del Cuadro de Mando Integral es medir la eficiencia de la empresa en el uso de sus activos materiales y sus recursos humanos. Las principales áreas de medición son:

- **Utilización de Activos**

Los KPI dentro de esta área miden el éxito de la empresa en la utilización de sus activos físicos (en este caso, sus autobuses) para dar servicio a los clientes. Los KPI comparan resultados de los servicios, tales como horas de vehículos y kilómetros de vehículos, ya sean los totales o sólo los de servicio comercial a los clientes, con el número total de horas o kilómetros de vehículos posibles.

- **Productividad del Personal**

Los KPI de productividad del personal miden el esfuerzo de la empresa en aprovechar las horas de personal disponibles, o sea, las horas totales de prestación de servicio por cada unidad de trabajo que paga. La productividad del personal mide el éxito de una empresa en la gestión de su personal y el trabajo de éste para cumplir el servicio. Es un factor que, junto con la utilización de los activos de capital, conduce a la producción del servicio.

- **Fiabilidad y disponibilidad**

Estos KPI miden la eficiencia de una empresa en el uso tanto de sus activos físicos como de su mano de obra para ofrecer un servicio al cliente que sea fiable. Los KPI dentro de esta área miden la eficacia global de la utilización de los activos y la productividad del personal, que a su vez influyen en la satisfacción del cliente.

El objetivo es seleccionar los indicadores clave de eficiencia que proporcionen información sobre procesos internos que sean lo menos influidos por factores

tales como la estructura de red de transporte, las velocidades del tráfico y otros factores externos.

Aparte de dos operadores que consideran km por vehículo como un KPI, el único indicador utilizado por los demás en el grupo de atributos de utilización de activos es la proporción de flota utilizada durante el periodo pico. Ésto puede reflejar el hecho de que la utilización del vehículo (fuera del periodo pico) se vea influida en gran medida por el nivel de servicio requerido para satisfacer la demanda del cliente o los requerimientos del servicio del regulador o contractuales (claramente, aumentar el uso de los vehículos proporcionando niveles de servicio innecesarios no es del interés de los operadores).

Muy pocas empresas de autobuses miden los KPI en el área de productividad del personal. Ésto es sorprendente dado que los gastos de personal representan un gran porcentaje del coste total de operación de los autobuses y, también, que, a diferencia de los vehículos que una vez comprados están disponibles casi continuamente, los costes laborales del personal están directamente relacionados con el número de horas necesarias para proporcionar el servicio. Por ejemplo: una sola empresa de autobuses declara que tiene un KPI relacionado con la productividad de los conductores y ésto en términos de Km x vehículo (y no en horas vehículo), que se refieren más a cómo se emplean los autobuses que a cómo de bien se emplean los conductores.

En contraste con “utilización de los activos” y “productividad del personal”, la mayoría de las empresas de autobuses miden algunos indicadores clave de eficiencia relacionados con la fiabilidad y disponibilidad. Los usados más frecuentemente son: “Distancia media entre averías” (Mean Distance Between Failures o MDBF) y “Proporción de la flota disponible en periodo pico”.

#### KPI seleccionados

<b>Procesos Internos</b>	
Primarios	
Porcentaje de la flota utilizada en periodo pico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque se utiliza como KPI por todas las empresas de autobús revisadas</li> <li>• Porque define claramente la adaptación de la empresa a la demanda máxima.</li> </ul>

Horas de operación de vehículos por horas de trabajo de personal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque dividiéndolo en las categorías de personal: conductores, controladores, otro personal de operaciones, mantenimiento, administración y gestión nos da un KPI muy comparable en todas las empresas.</li> <li>• Porque mide la cantidad de personal requerido por cada hora que un vehículo funciona.</li> </ul>
Distancia media entre averías	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque es una buena medida de la eficacia de las empresas en el correcto mantenimiento de la flota para la operación</li> <li>• Porque refleja los factores principales que son el estado general de la flota de autobuses (edad, desgaste) y/o el éxito de una empresa de mantenimiento o los servicios de mantenimiento de la propia empresa en la realización de mantenimiento para evitar la interrupción del servicio.</li> </ul>
<b>Secundarios</b>	
Horas comerciales de vehículos por vehículo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporciona una medida de la intensidad con que se utilizan los activos (autobuses) en todo el día. Medidas más altas reflejan un uso más amplio de los vehículos a través del día, describiendo el perfil del servicio (factor de pico).</li> <li>• Porque mide el impacto de la operación sobre las necesidades de mantenimiento. Con medidas más altas es necesario mayor mantenimiento por vehículo.</li> <li>• Porque Kilómetros de vehículo por vehículo está más afectada por las condiciones externas de la velocidad del tráfico y de la red de rutas, y la medida es, por lo tanto, menos preferible, aunque más precisa para calcular el mantenimiento necesario.</li> </ul>
Absentismo del personal (en porcentaje)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque es la mejor medida de la eficacia interna de una empresa en la gestión de personal.</li> <li>• Porque es un indicador general de la moral y el éxito de la gestión de personal, aunque está influido por factores externos</li> </ul>
Porcentaje de la flota disponible en periodo pico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque se utiliza como KPI por todas las empresas de autobuses consultadas</li> <li>• Porque es un claro indicador junto con el de porcentaje de la flota en servicio en periodo pico de la bondad del mantenimiento o de la calidad de los autobuses.</li> </ul>

Tabla 4-16; KPI de Procesos Internos.

Fuente: (Randall, Condry, & Trompet, 2007)

### Perspectiva “Financiera”

El objetivo de la Perspectiva “financiera” es evaluar la eficiencia financiera de la organización, en términos de cómo de bien se utiliza el dinero invertido en la operación del servicio de autobuses para dar el servicio a los pasajeros y en términos de cómo se generan los ingresos por la operación de estos servicios por medio de los ingresos por venta de billetes, otros ingresos comerciales y subsidios.

Hay dos grupos de atributos específicos correspondientes a esta Perspectiva:

- Eficiencia Financiera: mide el nivel de ingresos necesarios para proporcionar un servicio definido (en términos de capacidad prestada a los clientes).
- Efectividad Financiera: mide cuan bien se utiliza lo invertido para proporcionar un nivel y tipo de servicio que satisfaga las necesidades de los clientes (que a su vez trae ingresos por tarifas).

Se deben esperar comparaciones financieras con variación considerable, ya que hay varios factores que influyen en el coste y los ingresos que están más allá del control de las organizaciones. Los costes se ven afectados por las variables nacionales, regionales y municipales, mientras que los ingresos están determinados en gran medida por las políticas tarifarias y objetivos políticos así como por la forma en que se optimiza el servicio para satisfacer la demanda del cliente.

El análisis de tendencias y las comparaciones proporcionales, pueden dar información útil, ya que la efectividad financiera tiene una importancia fundamental para los accionistas y otras partes interesadas.

Es necesario obtener la información de los costes dividida en varias categorías.

#### 1. Costes de explotación:

- Costes de operación: incluye los costes salariales del conductor y los gastos de combustible
- Costes de mantenimiento: incluye los costes de mano de obra y los repuestos
- Costes de Administración y Gestión: costes laborales del personal de administración y gestión.

#### 2. Costes de capital:

- Costes de capital: compra y amortización de los vehículos y las infraestructuras fijas (depósitos / garajes, estaciones, etc.).

En los ingresos hay que incluir los ingresos por tarifa de los pasajeros así como otras fuentes de ingresos: la publicidad, alquiler de vehículos, etc.. También es necesaria información sobre subvenciones y ayudas de financiación de los estamentos públicos.

El objetivo es seleccionar aquellos KPI que miden la eficiencia y la eficacia financieras y que proporcionan comparaciones simples y precisas para las organizaciones.

Cuatro organizaciones de autobuses utilizan KPI para medir la eficiencia financiera, la mayoría de los cuales los relacionan o con los costes totales u operativos o con los vehículos x km operados.

Hay también una amplia gama de otros indicadores clave de eficiencia en esta área, en relación con aspectos tales como el trabajo, el mantenimiento y los gastos generales. Dos empresas utilizan indicadores clave de eficiencia en estas áreas específicas, pero, sus indicadores combinados con otros indicadores clave de eficiencia confirman que hay una amplia gama de indicadores opcionales relativos a la eficiencia financiera. La diferencia más importante entre los indicadores seleccionados se refiere a la clasificación de los elementos de coste, ya que los elementos utilizados se incluyen en todos los indicadores.

Aunque la mayoría de las organizaciones de autobuses utilizan algunos indicadores clave de eficiencia para medir la eficacia financiera (Randall y otros 2007), la cantidad de opciones distintas en las que clasifican los gastos, los ingresos y la demanda significa que hay pocos indicadores comparables entre los operadores. Sin embargo, los indicadores clave de eficiencia medidos con mayor frecuencia relacionan los viajes de pasajeros con los costes, los ingresos y las subvenciones.

#### KPI seleccionados

<b>Financiera</b>	
Primarios	
Coste Total por total Km x Vehículo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque relaciona los costes totales de la organización con el grado de utilización de los vehículos.</li> <li>• Porque los datos son sencillos de recoger.</li> </ul>

Coste total de operación por hora comercial de vehículo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque es una buena medida de la eficiencia financiera de la organización en la producción de servicios de transporte.</li> <li>• Porque los datos son sencillos de recoger.</li> <li>• Porque incluye todos los costes, incluido el conductor, el trabajo de mantenimiento, repuestos, combustible, gestión y otros..</li> <li>• Porque en los países desarrollados el componente de mayor coste de entre los costes operativos es el trabajo del conductor, que se correlaciona más estrechamente con las horas x vehículo que con los kilómetros x vehículo.</li> </ul>
Coste total de operación por viaje de pasajero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque relaciona los costes totales de funcionamiento de la organización con el uso del servicio por los pasajeros.</li> <li>• Porque es más fácil de recoger el dato de viajes que los kilómetros de pasajeros (para lo cual es necesario saber la distancia que viajan los pasajeros y no todas las empresas lo saben con precisión).</li> <li>• Porque correlaciona bien con la tarifa que los clientes están dispuestos a pagar por el servicio (cómo perciben el valor del viaje en autobús) en lugar de la distancia del viaje que hacen.</li> </ul>
Ingresos totales comerciales / Coste total de funcionamiento (ratio de recuperación)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque relaciona los ingresos totales recaudados (ingresos por tarifas, las tarifas de publicidad, etc.) con los gastos de funcionamiento del servicio.</li> <li>• Porque es una medida global de lo subvencionado que esta, o lo rentable que es, el servicio prestado.</li> </ul>
<b>Secundarios</b>	
Ingresos por tarifa por embarque de pasajero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque mide los ingresos medios por tarifa cobrados por cada embarque de pasajero, comparando los ingresos recaudados con los servicios utilizados.</li> <li>• Porque proporciona un indicador básico para la comprensión del origen de la recaudación total y el diseño de las políticas tarifarias de una organización.</li> <li>• Porque ya es recogida y utilizada como KPI por varias empresas.</li> </ul>
Coste total de operación por km comercial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque mide el coste total para el suministro del servicio básico dado a los pasajeros.</li> <li>• Porque ya lo usan muchas empresas.</li> </ul>
Coste de Operación por hora comercial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque es la primera parte más importante de la descomposición del coste operativo total: por hora comercial de vehículo</li> </ul>
Coste de Mantenimiento por hora comercial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque es la segunda parte más importante de la descomposición del coste operativo total: por hora comercial de vehículo</li> </ul>
Coste de Administración por hora comercial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque es la tercera parte más importante de la descomposición del coste operativo total: por hora comercial de vehículo</li> </ul>

Tabla 4-17; KPI Financieros.

Fuente: (Randall, Condry, & Trompet, 2007)

## Perspectiva “Seguridad”

El objetivo de la Perspectiva “Seguridad” es medir el grado en que la empresa de autobuses proporciona un entorno seguro para sus clientes y personal así como para los no usuarios (por ejemplo, los automovilistas y los peatones).

La Perspectiva “Seguridad” se divide en dos áreas separadas:

- La “Accidentabilidad” a secas, se refiere a los accidentes de los usuarios, el personal y los no usuarios. Esto incluye, pero no se refiere exclusivamente a ellos, los accidentes de tráfico
- La “Protección” se refiere a “acciones preventivas” realizadas por la empresa para mejorar la seguridad de los clientes y empleados antes de que ocurra ningún suceso que la ponga en peligro.

El objetivo es seleccionar los indicadores clave de eficiencia que están menos influidos por factores externos tales como la estructura de la red y la velocidad del tráfico.

Cuatro organizaciones de autobuses miden la frecuencia con la que sus vehículos se ven involucrados en accidentes como un KPI. Dos de ellas, miden todos los accidentes, mientras que otra sólo tiene en cuenta en aquellos en los que se producen lesiones y otra sólo mide los accidentes de tráfico. Otra mide el número de colisiones, que diferencia de los accidentes, ya que no incluye los accidentes dentro del autobús. Otros indicadores clave de seguridad medidos por las empresas de autobuses son el impacto de las lesiones en el personal, medido en términos de días de trabajo perdidos, absentismo, etc.

Sólo dos organizaciones tienen medidas relativas a la Protección, pero no hay indicadores comunes en esta zona.

#### KPI seleccionados

<b>Seguridad</b>	
Primarios	
“Muertes equivalentes” por millón de horas totales de vehículos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporciona una medida de la seguridad total de la operación de autobuses</li> <li>• Porque las horas de vehículos son más relevantes que los kilómetros, pues como medida está menos influida por la velocidad del tráfico y la forma de la red de líneas</li> <li>• Porque utiliza factores de ponderación para poder contar tanto los accidentes leves como los graves.</li> </ul>
Número de accidentes por cada 10.000 horas totales de trabajo de los vehículos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporciona una medida de la seguridad de la red de autobuses</li> <li>• Porque las horas de trabajo son más relevantes que los kilómetros, pues como medida es menos influida por la velocidad del tráfico y la forma de la red de líneas.</li> <li>• Porque el número de accidentes también es importante junto con las “muertes equivalentes” ya que cada accidente puede también causar daños materiales</li> <li>• Porque los accidentes sin víctimas o heridos también causan retrasos en el servicio</li> </ul>
Tiempo perdido del personal a causa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporciona una medida de las consecuencias de los</li> </ul>

de accidentes por millón de horas de trabajo	<p>accidentes para las operaciones y la productividad del personal</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque incluye todo el tiempo dedicado a los accidentes (es decir, la investigación, re-evaluación del conductor, remolque del vehículo accidentado, etc.), incluso si el personal no resulta lesionado (por ejemplo, cuando un accidente causa graves daños materiales y el autobús no puede reanudar el servicio)</li> <li>• Porque se tienen en cuenta todos los accidentes ocurridos en trabajos de mantenimiento.</li> </ul>
Incidencia de la delincuencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporciona una medida de la seguridad a bordo</li> <li>• Porque ya la usan la mayor parte de las empresas revisadas.</li> </ul>
<b>Secundarios</b>	
“Muertes equivalentes” de pasajeros por millón de pasajeros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporciona una medida de la seguridad de los servicios de autobús para los pasajeros</li> <li>• Porque al usar viajeros como denominador expresar mejor la visión del cliente</li> </ul>
“Muertes equivalentes” de personal por cada millón de horas de personal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporciona una medida de la seguridad en el trabajo en la empresa de autobuses</li> <li>• Porque al usar horas de personal en el denominador, tiene en cuenta todos los incidentes relacionados con el trabajo (incluyendo el mantenimiento).</li> </ul>
“Muertes equivalentes” de otros por cada millón de horas de vehículos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporciona una medida de seguridad de la red de carreteras</li> <li>• Porque Horas de vehículos es más relevante que Kilómetros de vehículos, pues como medida está menos influida por la velocidad media del tráfico y la forma de la red de líneas.</li> </ul>

Tabla 4-18; KPI de Seguridad.

Fuente: (Randall, Condry, & Trompet, 2007)

### Perspectiva “Medio ambiente”

El objetivo de la Perspectiva “Medio Ambiente” es medir los aspectos de la organización que se relacionan con el impacto sobre el medio ambiente derivado de la operación de los autobuses. Ésto se refiere sobre todo al consumo de energía y las emisiones contaminantes.

El objetivo es seleccionar los indicadores clave de eficiencia que proporcionan información sobre los aspectos ambientales que son relevantes para la operación de autobuses y su mantenimiento así como para las preocupaciones medioambientales generales.

Los KPI ambientales son relativamente poco comunes en comparación con las otras Perspectivas. Tres de las empresas de autobuses miden el consumo de combustible, pero sólo una tiene en cuenta el porcentaje de la flota que cumple los estándares de emisiones internacionales como un KPI.

KPI seleccionados

<b>Medio Ambiente</b>	
<b>Primarios</b>	
Consumo de energía (en Kwh) de combustible por cada 100 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporciona una medida del consumo de energía independiente de los diferentes tipos de combustible</li> <li>• Porque es un KPI medioambiental principal ya que indica el consumo de recursos que afectan al medioambiente.</li> <li>• Porque se puede unificar en Kwh aunque haya distintos tipo de combustible</li> </ul>
Emisiones por cada 100 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque proporcionan una medida del nivel de las emisiones de CO2, CO, HC, NOx, CH4, Sulfuros, Partículas de diferentes tamaños, etc.</li> <li>• Porque da una idea de lo respetuosa que es la empresa con el medio ambiente</li> <li>• Porque correlaciona mejor con la contaminación real que la empresa emite que la que se obtiene de los litros de combustible.</li> </ul>
% de vehículos con menos emisiones de lo exigido por la ley.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porque unido al anterior proporciona una medida más real de lo comprometida que está la empresa con mantener limpio el medioambiente de la ciudad.</li> </ul>
Grado de implementación de las normas medioambientales EMAS o ISO 14.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporciona una medida de lo comprometida que está la empresa con mantener limpio el medioambiente con las actividades de mantenimiento.</li> <li>• La norma medioambiental EMAS es más completa que la ISO 14.000. pero sólo se aplica en Europa.</li> </ul>

Tabla 4-19; KPI de Medio Ambiente.

Fuente: (Randall, Condry, & Trompet, 2007)

## TABLA RESUMEN DE KPI

<b>Crecimiento y Aprendizaje</b>
<b>Primarios</b>
Variación de viajeros
Porcentaje de cambio en los ingresos reales de vehículos x km
Horas de formación del personal por cada 1.000 horas de trabajo
<b>Secundarios</b>
Horas de formación de conductores por cada 1000 horas de conducción
<b>Cliente</b>
<b>Primarios</b>
Puntualidad
Fiabilidad vehículos x km operados realmente / vehículo x km programados
Pasajeros x kilómetros por Kilómetros comerciales x vehículo
<b>Secundarios</b>
Exceso de tiempo de espera
Porcentaje de vehículos accesibles en silla de ruedas
Porcentaje de paradas con información a los clientes
<b>Procesos Internos</b>
<b>Primarios</b>
Porcentaje de la flota utilizada en periodo pico
Horas de operación de vehículos por horas de trabajo de personal
Distancia media entre averías
<b>Secundarios</b>
Horas comerciales de vehículos por vehículo
Absentismo del personal (en porcentaje)
Porcentaje de la flota disponible en periodo pico
<b>Seguridad</b>
<b>Primarios</b>

"Muertes equivalentes" por millón de horas totales de vehículos.
Número de accidentes por cada 10.000 horas totales de trabajo de los vehículos
Tiempo perdido del personal a causa de accidentes por millón de horas de trabajo
Incidencia de la delincuencia
<b>Secundarios</b>
"Muertes equivalentes" de pasajeros por millón de pasajeros
"Muertes equivalentes" de personal por cada millón de horas de personal
"Muertes equivalentes" de otros por cada millón de horas de vehículos
<b>Primarios</b>
Coste Total por total Km x Vehículo
Coste total de operación por hora comercial de vehículo
Coste total de operación por viaje de pasajero
Ingresos totales comerciales / Coste total de funcionamiento (ratio de recuperación)
<b>Secundarios</b>
Ingresos por tarifa por embarque de pasajero
Coste total de operación por km comercial
Coste de Operación por hora comercial
Coste de Mantenimiento por hora comercial
Coste de Administración por hora comercial
<b>Medio Ambiente</b>
<b>Primarios</b>
Consumo de energía (en Kwh) de combustible por cada 100 km
Emisiones por cada 100 km
% de vehículos con menos emisiones de lo exigido por la ley.
Grado de implementación de las normas medioambientales EMAS o ISO 14.000

Tabla 4-20; Resumen KPI válidos

#### 4.4.1.4 Definición y selección de los Indicadores de variables de referencia

El objetivo de estos indicadores es proporcionar la información básica necesaria sobre las características de la organización de autobuses y el papel de la operación de los autobuses en cada ciudad y ser los ladrillos que sirven para componer los KPI seleccionados.

Casi todos estos indicadores ya están siendo recogidos por las empresas de autobuses revisadas (Randall, Condry, & Trompet, 2007).

Se deben recoger por las empresas los datos o indicadores de referencia siguientes, ya que son esenciales porque caracterizan la naturaleza y el servicio de la empresa de autobuses y/o porque son ladrillos importantes para construir los KPI seleccionados.

Muchos de estos indicadores de referencia, tales como la edad media de la flota y la velocidad media comercial, se usan como KPI por una o varias de las empresas de autobuses revisadas (Randall, Condry, & Trompet, 2007). Sin

embargo, después de la revisión de las características de los componentes de los KPI, Randall Condry y Trompet (2007) recomiendan que se incluyan el grupo de indicadores de referencia que se detalla a continuación, junto con su definición

<b>Definiciones de los indicadores de referencia operativos</b>		
<b>Nº</b>	<b>Indicador de referencia</b>	<b>Definición / explicación</b>
1	<b>Embarques de pasajeros (miles)</b>	Número anual de "embarques" de pasajeros. Cada vez que un pasajero sube a un autobús cuenta como un embarque. Nota: Es diferente de un "viaje" de pasajero que se puede definir como: un pasajero haciendo una o más embarques de autobús con el fin de completar un viaje a su destino.
2	<b>Km x Pasajeros (miles)</b>	Total anual de kilómetros recorridos por todos los pasajeros de autobús. Igual a: embarques anuales de pasajeros x longitud promedio del viaje (km).
3	<b>Km totales de vehículos reales(miles)</b>	Total anual de todos los kilómetros recorridos por todos los autobuses. Igual a: Km de vehículos totales (m) e igual a Distancia total real anual recorrida por autobuses en servicio comercial y en viajes no comerciales (es decir km en vacío). Excluye el total de km vehículo de autobús turístico, autobús escolar y otros servicios especiales distintos de proporcionar transporte público normal.
3a	<b>Km comerciales reales de vehículos (miles)</b>	Km anuales de vehículos recorridos en servicio comercial "normal". Esto incluye todos los km en el que un autobús está disponible para que suban los pasajeros, por lo que incluye los km en los que no viaja ningún pasajero (debido a la falta de demanda). Excluye los km comerciales de autobuses turísticos, autobuses escolares y otros servicios especiales distintos a proporcionar transporte público normal. No se incluyen los km x vehículo en los que se realizan viajes no comerciales (por ejemplo, ir con los autobuses desde la estación hasta el principio o final de la línea, llevar autobuses vacíos desde el final de una línea hasta el principio de otra línea, viajes por razones de mantenimiento, ITV, etc.).
3b	<b>Km de vehículos en vacío reales (m)</b>	Distancia real anual recorrida por autobuses en todos los viajes no comerciales. O sea, km desde/hasta el depósito a/desde inicio/fin de la línea y km recorridos desde un extremo de la línea hasta el inicio de otra línea. Excluye total km de vehículo en vacío del autobús turístico, autobús escolar y otros servicios especiales distintos de proporcionar transporte público normal.
4	<b>Km vehículo comerciales programados (m)</b>	Km de vehículos anuales totales que los autobuses deben recorrer según la programación definida en el servicio comercial. Excluye kilómetros de vehículo realizados en desplazamientos no comerciales. Por ejemplo, tendría en cuenta los km vehículo comerciales programados y no lo realmente realizado debido a, por ejemplo, las cancelaciones. Excluye los km programados de autobús turístico, autobús escolar y otros servicios especiales distintos de proporcionar transporte público normal.
5	<b>Horas de trabajo de vehículos totales reales (m)</b>	El total anual de horas reales que los autobuses funcionan en servicio comercial y no comercial (o sea, incluye tiempos muertos). Esto es, todo el tiempo desde la salida del depósito hasta llegar de vuelta al depósito. Excluye horas totales de vehículos de autobús turístico, autobús escolar y otros servicios especiales distintos de proporcionar transporte público normal.
5a	<b>Horas de vehículos comerciales reales (m)</b>	Horas anuales reales que los autobuses permanecen en servicio comercial. Incluye horas en las que ningún pasajero viaja en los autobuses (debido a falta de demanda). Incluye el tiempo de regulación en las paradas intermedias. No incluye el tiempo de desplazamientos no comerciales. No incluye el tiempo de paradas en cabeceras. Excluye horas comerciales de autobús turístico, autobús escolar y otros servicios especiales distintos de proporcionar transporte público normal.

5b	<b>Horas de vehículos en vacío reales (m)</b>	Horas reales anuales que los autobuses recorren en servicio no comercial. Por ejemplo, horas de funcionamiento desde o hasta el depósito o desde inicio o fin de la línea y horas de funcionamiento desde el extremo de una línea hasta el inicio de otra. Excluye horas totales en vacío de autobús turístico, autobús escolar y otros servicios especiales distintos de proporcionar transporte público normal.
5c	<b>Horas de vehículos reales en paradas temporales de regulación (m)</b>	Horas anuales reales que los autobuses esperan en la cabecera de la línea antes de que empiece el viaje de regreso. El tiempo de parada temporal de regulación permite absorber la variabilidad del tiempo de funcionamiento y permite a los autobuses cumplir el horario. Cuando las horas de paradas temporales de regulación reales no están disponibles, puede ser aceptable proporcionar (notificándolo) las horas programadas de paradas temporales de regulación. Excluye las horas totales de paradas temporales de regulación de autobús turístico, autobús escolar y otros servicios especiales distintos de proporcionar transporte público normal.
6	<b>Horas comerciales de vehículos programadas (m)</b>	Total de horas anuales de autobuses programados para ejecutarse en el servicio comercial. Incluye el tiempo en las paradas intermedias. Excluye desplazamientos no comerciales (tiempos muertos) Excluye paradas temporales en cabecera. Excluye horas comerciales programadas de autobús turístico, autobús escolar y otros servicios especiales distintos de proporcionar transporte público normal.
7	<b>Operación del Servicio - horas de trabajo de conductor (m)</b>	Total de horas anuales de trabajo en las actividades de conducción para todos los empleados a tiempo completo, tiempo parcial y temporales, cuya principal tarea es conducir (horas de conducción > 50% de su tiempo total). Eso es, todas las horas desde fichaje de entrada a fichaje de salida, por lo que, también incluye las horas de formación, descansos y horas extraordinarias. Excluye horas pagadas pero no trabajadas, como las vacaciones y baja por enfermedad. Incluye las horas de trabajo de los conductores de las empresas subcontratadas, si hay.
8	<b>Horas de formación de conductores</b>	Horas totales anuales de formación para todos los conductores. Excluye las horas utilizadas en la formación inicial.
9	<b>Porcentaje de Absentismo de conductores</b>	Porcentaje de horas de servicio del conductor "programadas o planificadas" no trabajadas por enfermedad, accidente, huelga o retraso. No están incluidos los permisos programados o vacaciones o días festivos. Las horas extraordinarias del conductor o conductores de reemplazo no compensan las horas programadas de trabajo de conductores ausentes.
10	<b>Porcentaje de las paradas con información estática para pasajeros</b>	Porcentaje de paradas de autobús (nota: cuando múltiples líneas de autobús paran en la misma parada, se cuenta como una parada) en un día o período del año adecuado y representativo, que tienen <b>información estática</b> correcta de las líneas a los pasajeros, que están directamente a disposición de todas las personas, que muestran el horario o la frecuencia programada. Independientemente del hecho de que la parada de autobús también puede tener información dinámica para pasajeros.
11	<b>Porcentaje de las paradas con información dinámica para los pasajeros</b>	Porcentaje de paradas de autobús (nota: cuando múltiples líneas de autobús paran en la misma parada, se cuenta como una parada) en un día o período del año representativo y adecuado, que cuenta con <b>información dinámica</b> para pasajeros, por ejemplo, pantallas de información en la parada del autobús que muestran la hora prevista, en tiempo real, en que los autobuses llegarán a esa parada.
12	<b>Flota - número total de vehículos</b>	Media anual (más de 12 meses) del número total de vehículos operables, que también incluye todos los vehículos en mantenimiento, pero excluye los vehículos retirados. No incluye los vehículos comprados, pero que aún no estén listos para el servicio de pasajeros. Se deben excluir los vehículos utilizados sólo para los servicios de transporte a la demanda, los servicios de transporte escolar y servicios de autobuses turísticos.
13	<b>Flota en uso durante la hora más pico</b>	Media anual (más de 12 meses) de la flota en uso durante la hora pico (definida como la hora con el mayor número de embarques de pasajeros). Si hay una gran variación en diferentes horas pico en las

		diferentes líneas, tomar la flota en uso durante la hora pico de cada línea.
14	<b>Número de autobuses de piso bajo</b>	Media anual del número total de vehículos en operación que tengan piso bajo.
15	<b>Numero de autobuses que cumplen la norma de emisiones (EURO, EPA o del país)</b>	Media anual (más de 12 meses) del número total de vehículos operables que se clasifican como (EURO, EPA o la del país).
16	<b>Numero de autobuses que cumplen más de la norma de emisiones vigente (EURO, EPA o del país)</b>	Media anual (más de 12 meses) del número total de vehículos operables que se clasifican sobre la norma medioambiental vigente (EURO, EPA o la del país).
17	<b>Porcentaje de centros de trabajo con ISO 14000 o EMAS</b>	Número de centros de trabajo que tienen implementada y auditada una norma medioambiental como ISO 14.000 o EMAS
18	<b>Kwh de combustible / año</b>	Cantidad total anual de Kwh de combustible consumido en la distancia total recorrida por los autobuses en servicio comercial y no comercial. No incluye el consumo de combustible de los autobuses turísticos, autobuses escolares y otros servicios especiales fuera de proporcionar transporte público normal.

Tabla 4-21; Definiciones de los Indicadores de Referencia.

Fuente: Randall et al. (2007)

Definiciones de los I. de R. Financieros		
Nº	Indicador de referencia	Definición / explicación
CT	<b>COSTE TOTAL DEL SERVICIO DE AUTOBÚS = [CO + I]</b>	Total de los costes de funcionamiento del autobús + gastos totales de inversión de autobuses. No incluye los costes de depreciación ni financieros (por ejemplo, intereses).
CO	<b>COSTES DE OPERACION DE AUTOBUS [CS + CM + CA]</b>	Total de los costes de operación de servicios + gastos de mantenimiento + administración y otros gastos generales. Excluye la depreciación, inversiones y gastos financieros (intereses).
CS	<b>Costes de operación del servicio [Sa + Sb]</b>	Total de los costes del servicio de autobús + gastos de gestión y de apoyo de la operación del servicio. Se excluye la depreciación.
Sa	<b>Servicio - Servicio de Autobús - Total (Sa1 + Sa 2 + Otros)</b>	Coste total anual de los servicios de autobús, incluidos los costes de conductores, los costes de controlar el servicio y costes de combustible. Se excluye depreciación.
Sa1	<b>Servicio - Servicio de autobús - Conductores</b>	Coste total anual de conductores. Incluye los salarios, las pensiones, los impuestos y las horas extraordinarias. Parte del total del coste del servicio de autobuses.
Sa2	<b>Servicio - Servicio de autobús - Combustible</b>	Coste total de combustible anual. Excluye reducción del impuesto de combustible. No incluye coste de las instalaciones de abastecimiento de combustible. Parte del total del coste del servicio de autobuses.
Sb	<b>Servicio - Mantenimiento y Apoyo</b>	Coste total anual para la planificación de servicios, emisión de billetes, control de ingresos, equipos de inspección, seguridad de operación, protección / policía, gestión / investigación de incidentes, controladores, supervisores de la calle y de gestión de los conductores y el personal de apoyo de servicios.
CM	<b>Coste de mantenimiento [Mi + Mf + Md]</b>	Coste total de mantenimiento de la flota y los depósitos +

		mantenimiento de infraestructura y las instalaciones de estaciones / paradas. Incluye el mantenimiento menor y mayor, pero excluye la renovación de los activos amortizados y las nuevas inversiones. Se excluye la depreciación.
<b>Mi</b>	<b>Mantenimiento - Infraestructura y Instalaciones de paradas / estaciones</b>	Coste total anual de todo el mantenimiento de infraestructuras, estaciones / paradas, limpieza, mantenimiento de las estaciones y paradas y mantenimiento de sistemas de información de pasajeros estáticos y dinámicos en las estaciones y paradas. Incluye el coste de la gestión y administración de la infraestructura y de mantenimiento de las estaciones / paradas. No incluye la renovación de los activos amortizados y las nuevas inversiones. Por ejemplo, <b>incluye la reparación</b> de una pantalla de información a los pasajeros dinámica porque es mantenimiento, sin embargo, <b>no incluye la renovación</b> de una pantalla dinámica de información a los pasajeros porque es inversión y debe ser excluida de esta categoría. Se excluye la depreciación.
<b>Mf</b>	<b>Mantenimiento – Flota</b>	Coste total anual de todo el mantenimiento de autobuses, limpieza de autobuses, etc. Incluye gastos de gestión y administración del mantenimiento de la flota. No incluye la renovación de los activos amortizados y las nuevas inversiones. Por ejemplo, la reparación de un motor es el mantenimiento, la sustitución de un motor es renovación y debe ser excluida de esta categoría. Las grandes revisiones planificadas de "mitad de vida" se incluyen en el mantenimiento, sin embargo, cualquier programa específico para mejorar la flota claramente más allá de su especificación original o extender la vida útil del activo más allá de la que en un principio estaba prevista, debe ser incluido en los gastos de inversión. Se excluye cualquier depreciación.
<b>Md</b>	<b>Mantenimiento – Depósitos</b>	El coste anual total del mantenimiento de los depósitos y equipos, limpieza de depósitos, mantenimiento de las instalaciones de abastecimiento de combustible. Incluye el coste de gestión y administración de los depósitos de mantenimiento. No incluye la renovación de los activos amortizados y las nuevas inversiones. Se excluye la depreciación.
<b>CA</b>	<b>Costes de Administración y otros gastos generales</b>	Coste anual de marketing, relaciones públicas, gestión y desarrollo de recursos humanos, formación de conductores y servicios de apoyo de capacitación del personal, contratos / legales, administración general, finanzas y contabilidad (sin embargo no incluye el coste de la financiación), las compras, la organización y los métodos de análisis, Sistemas de información / IT, salud y seguridad, soporte de ingeniería y todos los demás gastos generales corporativos asignados al departamento de autobuses.
<b>I</b>	<b>Total de inversión</b>	Promedio anual de 5 años de los gastos de inversión en flota + depósitos + infraestructura + instalaciones de paradas / estaciones + otras inversiones.
<b>la</b>	<b>Parte de [I] en flota</b>	Promedio anual de 5 años de los gastos de inversión de la flota. Por ejemplo, la compra de vehículos nuevos, renovaciones de motor, el cambio total del interior y programas específicos para mejorar los vehículos fuera de su especificación original. Excluye depreciación e intereses. Coger, si se tienen, los datos desglosados de los últimos 10 años y calcular para cada año el promedio de los 5 años anteriores.
<b>lb</b>	<b>Parte de [I] en depósitos</b>	Promedio anual de 5 años de los gastos de inversión en depósitos. Excluye depreciación e intereses. Coger, si se tienen, los datos desglosados de los últimos 10 años y calcular para cada año el promedio de los 5 años anteriores.
<b>lc</b>	<b>Parte de [I] en infraestructura e Instalaciones de paradas / estaciones</b>	Promedio anual de 5 años de los gastos de inversión de las infraestructuras e instalaciones de paradas / estaciones. Excluye depreciación e intereses. Coger, si se tienen, los

		datos desglosados de los últimos 10 años y calcular para cada año el promedio de los 5 años anteriores.
<b>Id</b>	<b>Parte de [I] para otras inversiones</b>	Promedio anual de 5 años de otros gastos de inversión. Excluye depreciación e intereses. Coger, si se tienen, los datos desglosados de los últimos 10 años y calcular para cada año el promedio de los 5 años anteriores.
<b>IO</b>	<b>Ingresos de Operación [IC+ST+OS]</b>	Ingresos comerciales totales + Total subvención de tarifa + total de otras subvenciones de ingresos operativos.
<b>IC</b>	<b>Total ingresos comerciales [IT+Ic]</b>	Total ingresos por tarifas + total otros ingresos comerciales.
<b>IT</b>	<b>Ingresos totales por tarifa</b>	Ingreso total anual por tarifas de todas las fuentes - incluyendo pases de temporada / abonos y compras anticipadas por individuos y/o empresas, pero sin incluir las subvenciones para tarifas reducidas dadas por las administraciones públicas. Incluye los ingresos proporcionales asignada a la empresa de autobuses de billetes / pases / abonos multimodales vendidos por otras organizaciones / operadores, pero utilizados para viajar en los servicios de autobuses.
<b>Ic</b>	<b>Otros ingresos comerciales</b>	Los ingresos anuales de otras actividades comerciales, como la publicidad en los autobuses y alquileres de las propiedades de la empresa, los ingresos por alquiler de locales en las estaciones de autobuses, los ingresos por uso de la red de comunicaciones, por consultoría y por otras actividades empresariales.
<b>ST</b>	<b>Subvenciones de tarifa</b>	Subvenciones anuales de las administraciones públicas para compensar el dejar viajar a precio reducido o gratis a determinadas clases y grupos socio-económicos de pasajeros (por ejemplo, ancianos, desempleados, discapacitados, etc.).
<b>OS</b>	<b>Otras subvenciones de ingresos de explotación</b>	Subvenciones anuales de funcionamiento general, los ingresos por impuestos rebajados o no pagados, subvenciones de combustible, compensaciones, otras subvenciones a pérdidas etc. Excluye subvenciones a la inversión de capital.
<b>SI</b>	<b>Subvenciones a inversiones de capital</b>	Subvenciones de las administraciones públicas, anuales, y no anuales anualizadas, para las inversiones de capital.
<b>TS</b>	<b>Subvenciones totales anuales a Operación e Inversiones [OS + SI]</b>	Ingresos por subvención a la operación + a las inversiones si no se pueden desglosar en las anteriores

Tabla 4-22; Definiciones de los I. de R. Financieros.

Fuente: Randall et al. (2007)

La Tabla 4-21 y 4-18 proporciona las definiciones para los elementos de datos de KPI necesarios para componer el sistema de KPI. Los indicadores de referencia que no están en negrita son categorías separadas necesarias del indicador "principal" de referencia. Éstos siempre suman el 100% del indicador de referencia en negrita más cercano por encima de ellos.

Todos los indicadores de referencia deben de abarcar la red "normal" de servicios de autobuses operados o controlados por la empresa y sus actividades conexas, incluidas las partes y actividades que sean subcontratadas. Deben excluirse de todos los indicadores de referencia la

influencia de las operaciones no "normales" de autobuses como: autobús turístico, autobús escolar y las operaciones de transporte a la demanda.

#### 4.4.2 Selección de un conjunto de KPI específico para el desarrollo de un CMI para su uso por la Gerencia

A la hora de desarrollar un CMI que sea útil para la gerencia, es necesario seleccionar un conjunto menor de indicadores de los definidos en el apartado anterior en función de su **mayor representatividad** de la Perspectiva a medir y lo común de su utilización entre las empresas revisadas (Randall, Condry, & Trompet, 2007).

Después, se les debe definir un "Objetivo" de eficiencia en función de la experiencia previa de los directivos y de los resultados de los métodos de comparación de eficiencias (métodos frontera) y de Benchmarking (Randall, Condry, & Trompet, 2007).

A continuación, se buscarían y aplicarían los métodos más adecuados para mejorar cada indicador, buscando siempre la consecución de la máxima eficiencia de la empresa.

Teniendo en cuenta estas premisas, los indicadores seleccionados por perspectivas quedarían definidos en la Tabla 4-23

<b>Perspectiva Crecimiento y Aprendizaje</b>	
Crecimiento	
CA1:	Porcentaje de variación en los pasajeros (promedio a 5 años)
CA2:	Porcentaje de variación en los km comerciales (promedio a 5 años)
CA3:	Porcentaje de variación en las horas comerciales (promedio de 5 años)
Aprendizaje	
CA4:	Número de horas de formación de conductores por horas de conductor (excluyendo la formación inicial)
<b>Perspectiva Cliente</b>	
Capacidad ofertada y Utilización	
C1:	Km Pasajeros / ingresos reales por km vehículo

<b>Tiempo</b>	
C2:	Km comerciales operados realmente x vehículo / kms x vehículo programados
C3:	Hora vehículos comerciales operados realmente / hora de vehículos comerciales programadas
<b>Calidad de los Servicios</b>	
C4:	Porcentaje de paradas de autobús con la información del cliente (estática y dinámica)
<b>Accesibilidad</b>	
C5:	Porcentaje de los vehículos con piso bajo
<b>Perspectiva Procesos Internos</b>	
<b>Utilización de Activos</b>	
PI1:	Porcentaje de la flota utilizada en el periodo pico
PI2:	Km comerciales reales / km totales
PI3:	Horas comerciales reales por horas totales reales
<b>Productividad del personal</b>	
PI4:	Horas de conducción reales totales / horas totales de conductor
PI5:	Tasa de absentismo de conductores
<b>Perspectiva Seguridad</b>	
S1:	Muertes equivalentes por millón de horas totales de vehículos.
S2:	Número de accidentes por cada 10.000 horas totales de trabajo de los vehículos
S3:	Tiempo perdido del personal a causa de accidentes por millón de horas de trabajo
S4:	Incidencia de la delincuencia (a bordo de los autobuses) por cada millón de pasajeros
S5:	"Muertes equivalentes" de pasajeros por millón de pasajeros
S6:	"Muertes equivalentes" de personal por cada millón de horas de personal
S7:	"Muertes equivalentes" de otros usuarios de la carretera por cada millón de horas de vehículos
<b>Perspectiva Financiera</b>	
<b>Eficiencia Financiera</b>	
EF1 a y b:	Coste total por km / hora vehículo total real
EF2 a y b:	Coste total por km / hora vehículo comercial real
EF3 a y b:	Coste total de operación del servicio por km / hora vehículo comercial real
EF4 a y b:	Coste total de mantenimiento por km / hora vehículo comercial real
EF5 a y b:	Coste total de administración por km / hora vehículo comercial real
EF6:	Ingresos comerciales totales (categorías) / coste total de la operación (relación de recuperación)
<b>Eficacia Financiera</b>	
EF7:	Coste total de la operación por cada embarque de pasajeros

EF8:	Ingresos por tarifa por embarque de pasajeros
<b>Perspectiva Medio ambiente</b>	
MA1:	Consumo de combustible por cada 100 km
MA2:	Porcentaje de la flota que cumple los estándares de emisiones EURO.
MA3:	Vehículos con estándar de emisiones más elevada de lo exigido por la ley.
MA4:	Grado de implementación de las normas medioambientales EMAS o ISO 14.000 en la empresa

Tabla 4-23; Indicadores por perspectivas. Selección para Gerencia

Fuente: Elaboración propia

## 4.5 Métodos de mejora de la eficiencia aplicables al CMI y los KPI

Identificados ya han sido identificados y seleccionados los indicadores más importantes para la empresa, surge el siguiente problema: la dificultad de coordinar las mejoras en todos los indicadores identificados para mejorar la eficiencia general de la empresa.

Existen dos métodos para hacer frente a este problema:

- Búsqueda y resolución de las limitaciones que impiden ser más eficientes.
- Aplicación de métodos matemáticos de optimización de la eficiencia en la función de producción.

### 4.5.1 Búsqueda y resolución de las restricciones

Este método implica descubrir los cuellos de botella en la empresa utilizando un método ya contrastado, por ejemplo, la Teoría de las Restricciones, que usa un conjunto de herramientas que se utilizan normalmente para implementar la filosofía de la mejora continua.

La Teoría de Restricciones mejora la eficiencia en un sistema, centrando la atención en las limitaciones del sistema (Rahman, 2002). Concentrando los recursos de la empresa en la lucha correcta contra las restricciones, los directivos pueden lograr una mejora significativa, que “puede” llegar a ser suficiente para alcanzar el nivel de eficiencia deseado.

En la Teoría de Restricciones, el método que se usa consiste en encontrar un sistema adecuado para identificar y resolver los cuellos de botella en los procesos de planificación, operación, gestión de la misma y nivel de servicio.

Pero, el método de la Teoría de las Restricciones no nos proporciona información sobre los cuellos de botella más importantes ni nos indica el punto óptimo de mejora de la eficiencia global para cada KPI.

Cuando las variables están acopladas o correlacionadas es muy difícil encontrar el cuello de botella más importante; al mejorar un indicador se puede estar bajando la eficiencia en otro u otros sin saberlo.

#### **4.5.2 Métodos matemáticos usados en Optimización de la Eficiencia**

Los métodos llamados de Optimización de la Eficiencia se basan en la suposición de que en la función de producción hay un punto de eficiencia máxima, al variar los indicadores seleccionados. La Teoría de la Optimización de Funciones y las técnicas correspondientes comprenden un área muy extensa de la matemática aplicada.

En el caso más simple, un problema de optimización consiste en maximizar o minimizar una función real eligiendo sistemáticamente los valores de entrada dentro de los del conjunto permitido y calculando los valores de la función, escoger el máximo o mínimo.

De manera más general, la optimización incluye encontrar los "mejores valores disponibles" de una función objetivo dada sobre un dominio definido,

simplificando, buscando una aproximación válida dentro una variedad de diferentes tipos de funciones objetivo y diferentes tipos de dominios.

#### 4.5.2.1 Técnicas de optimización por ordenador

Para resolver estos problemas, los investigadores pueden usar algoritmos, que terminan en un número finito de pasos o métodos iterativos, que convergen a una solución (en un tipo específico de problemas) o heurísticas que pueden proporcionar soluciones aproximadas a algunos problemas (aunque sus iteraciones no converjan) (Parkinson, Balling, & Hedengren, 2013) (Nemhauser, Rinnooy Kan, & Todd, 1989).

Dentro de los algoritmos de optimización para ordenador destacan:

- Algoritmo simple de George Dantzig, diseñado para la programación lineal.
- Extensiones del algoritmo Simplex, diseñado para la programación cuadrática y para la programación lineal-fraccional.
- Variantes del algoritmo Simplex, que son especialmente adecuadas para la optimización de redes.
- Algoritmos combinatorios.

#### 4.5.2.2 Métodos iterativos

Los métodos iterativos utilizados para resolver problemas de programación no lineal difieren según se evalúen los Hessianos<sup>11</sup>, los gradientes o sólo los valores de las funciones (Parkinson, Balling, & Hedengren, 2013) (Nemhauser, Rinnooy Kan, & Todd, 1989).

Mientras que la evaluación de Hessianos (H) y gradientes (G) mejora la tasa de convergencia, para las funciones para las cuales estas cantidades existen y

---

<sup>11</sup> La matriz hessiana o hessiano de una función  $f$  de  $n$  variables, es la matriz cuadrada de  $n \times n$ , de las segundas derivadas parciales.

varían lo suficientemente poco a poco, tales evaluaciones aumentan la complejidad computacional de cada iteración. En algunos casos, la complejidad computacional es excesivamente alta.

Un criterio importante para los optimizadores es simplemente el número de evaluaciones de funciones requeridas, ya que eso a menudo ya es un gran esfuerzo computacional, generalmente mucho más esfuerzo que dentro del propio optimizador, que tiene que operar principalmente sobre las  $N$  variables. Las derivadas proporcionan información detallada para los optimizadores, pero son aún más difíciles de calcular,

P.ej. Aproximar el gradiente lleva al menos  $N + 1$  evaluaciones de la función. Para las aproximaciones de las 2<sup>as</sup> derivadas (recogidas en la matriz Hessiana) el número de evaluaciones de la función es del orden de  $N^2$ .

El método de Newton requiere las derivadas de segundo orden, por lo que para cada iteración el número de llamadas de función es del orden de  $N^2$ , pero para un optimizador de gradiente puro más sencillo es sólo  $N$ . Sin embargo, los optimizadores de gradiente necesitan usualmente más iteraciones que el algoritmo de Newton. Cuál es el mejor con respecto al número de llamadas de función depende del problema en sí (Parkinson, Balling, & Hedengren, 2013) (Nemhauser, Rinnooy Kan, & Todd, 1989).

#### **4.5.2.3 Métodos que evalúan Hessianos (o aproximan Hessianos, usando diferencias finitas):**

(Nemhauser, Rinnooy Kan, & Todd, 1989)

- Método de Newton
- Programación cuadrática secuencial: Un método basado en Newton para problemas restringidos de escala pequeña-mediana. Algunas versiones pueden manejar problemas de gran dimensión.
- Métodos del punto interior: Ésta es una clase grande de métodos para la optimización restringida. Algunos métodos de punto interior usan sólo

información del sub gradiente y otras requieren la evaluación del Hessiano.

#### 4.5.2.4 Métodos que evalúan gradientes o gradientes aproximados de alguna manera (o incluso sub gradientes):

(Nemhauser, Rinnooy Kan, & Todd, 1989)

- Métodos de descenso de coordenadas: Algoritmos que actualizan una única coordenada en cada iteración
- Métodos de gradiente conjugado: Métodos iterativos para grandes problemas. (En teoría, estos métodos terminan en un número finito de pasos con funciones objetivas cuadráticas, pero esta terminación finita no se observa en la práctica en ordenadores de precisión finita).
- Descenso en pendiente (alternativamente, "pendiente más pronunciada" o "ascenso más pronunciado"): Un método (lento) de interés histórico y teórico, que ha renovado el interés por encontrar soluciones aproximadas de enormes problemas.
- Métodos de sub gradiente - Un método iterativo para grandes funciones de Lipschitz, localmente, usando gradientes generalizados. Siguiendo a Boris T. Polyak, los métodos de proyección de subgrupos son similares a los métodos de gradiente conjugado.
- Método del haz de descenso: Un método iterativo para problemas de tamaño pequeño-mediano con funciones locales de Lipschitz, particularmente para problemas de minimización convexa (similar a los métodos de gradiente conjugado).
- Método elipsoide: Un método iterativo para pequeños problemas con funciones objetivas cuasi convexas y de gran interés teórico, particularmente en el establecimiento de la complejidad temporal polinómica de algunos problemas de optimización combinatoria. Tiene similitudes con los métodos cuasi-Newton.
- Método de gradiente reducido (Frank-Wolfe) para la minimización aproximada de problemas especialmente estructurados con restricciones lineales, especialmente con redes de tráfico. Para problemas generales

sin restricciones, este método se reduce al método del gradiente, que se considera obsoleto (para casi todos los problemas).

- Métodos cuasi-Newton: Métodos iterativos para problemas de tamaño medio-grande (por ejemplo,  $N < 1000$ ).
- Método de aproximación estocástica de perturbación simultánea (SPSA) para la optimización estocástica. Utiliza una aproximación de gradiente aleatoria (eficiente).

#### 4.5.2.5 Métodos que evalúan sólo valores de función:

Si un problema es continuamente diferenciable, los gradientes pueden ser aproximados utilizando diferencias finitas, en cuyo caso se puede usar un método basado en gradientes (Nemhauser, Rinnooy Kan, & Todd, 1989). Los métodos son:

- Métodos de interpolación
- Métodos de búsqueda de patrones, que tienen mejores propiedades de convergencia que la heurística Nelder-Mead (con simplices).

#### 4.5.2.6 Convergencia global

Más generalmente, si la función objetivo no es una función cuadrática, entonces muchos métodos de optimización usan otros métodos para asegurar que alguna sub-secuencia de iteraciones converge a una solución óptima (Nemhauser, Rinnooy Kan, & Todd, 1989). El primer, y aún popular, método para asegurar la convergencia se basa en búsquedas lineales, que optimizan una función a lo largo de una dimensión.

Un segundo método, cada vez más popular, para garantizar la convergencia se basa en la búsqueda y utilización de regiones de confianza. Tanto el de las búsquedas lineales como el de las regiones de confianza, se utilizan en métodos modernos de optimización no diferenciable.

Por lo general, un optimizador global es mucho más lento que los optimizadores locales avanzados (como el BFGS), por lo que puede construirse un optimizador global eficiente iniciando el optimizador local desde diferentes puntos de partida.

#### 4.5.2.7 Heurísticas

Además de con los algoritmos finitos (de terminación finita) y con los métodos iterativos (convergentes), se pueden optimizar funciones complejas mediante heurísticas. Una heurística es cualquier algoritmo que matemáticamente no está garantizado que encuentre la solución pero que puede hacerlo rápidamente en algunos casos determinados y bien conocidos y, por ello, es muy útil en ciertas situaciones prácticas (Nemhauser, Rinnooy Kan, & Todd, 1989).

#### 4.5.2.8 Lista de algunas heurísticas conocidas:

(Nemhauser, Rinnooy Kan, & Todd, 1989) (Freitas, 2002) (Witten & Eibe, 1999)

- Algoritmo Memético
- Evolución diferencial
- Algoritmos evolutivos
- Relajación dinámica
- Algoritmos genéticos
- Subida de la colina con reinicio aleatorio
- Heurística simplicial de Nelder-Mead
- Optimización de Enjambre de Partículas
- Algoritmo de Búsqueda Gravitacional
- Optimización de Colonias de Abejas Artificiales
- Recocido Simulado
- Túnel Estocástico

- Búsqueda Tabú
- Optimización de Búsqueda Reactiva (RSO) (implementado en LIONSolver)

Aunque la teoría de la Optimización de la eficiencia es ampliamente aceptada por los investigadores, es difícil que en una empresa los directivos implementen una estrategia de optimización de la eficiencia global basada en ella, porque es muy difícil de aplicar en la práctica empresarial, tanto en términos de obtención de datos como de cálculo y además es difícil de entender y de relacionar sus conceptos teóricos con situaciones reales en la práctica de la gestión de empresas.

#### 4.5.3 Métodos de gestión de eficiencia similares aplicables

La gestión de la eficiencia de las empresas de transporte urbano siempre ha sido abordada como un proceso que se ajusta a los cuatro pasos clásicos del Ciclo de Gestión: Planificación, Operación, Medición de resultados y Análisis de los resultados (Shewhart, 1931).



Imagen 4-7; Ciclo de gestión de la eficiencia.

Fuente: Shewhart 1931

Posteriormente, se han utilizado otros modelos más adaptados a las posibilidades de las empresas de transporte urbano de hoy en día, que incluyen dos puntos más, como se puede ver en los vértices del hexágono de la Imagen 4-8.

Los directivos obtienen los objetivos de gestión de la empresa, de la estrategia general de la misma y de los datos históricos, luego modelizan el resultado para analizar su factibilidad, posteriormente planifican como alcanzar dichos objetivos, ponen en marcha el plan operativo, monitorizan la operación y por último analizan las desviaciones sobre lo planificado e informan de los resultados a superiores y accionistas.

Cuando los resultados no coinciden con lo esperado, la dirección intenta comprender las razones de las diferencias y propone acciones correctivas en la operación para intentar volver al camino planificado. El problema es que no siempre se ajustan los objetivos y los KPI que ya no son compatibles con la realidad.

En todas las empresas se hacen revisiones de los objetivos, del grado de implementación de los procedimientos establecidos para alcanzarlos, del grado de cumplimiento de dichos objetivos y se actualizan los planes operativos.

Sin embargo, dado que en las empresas de transporte urbano las relaciones entre los KPI usados se han hecho más y más complejas, con las metodologías existentes cada vez es más difícil medir sus dependencias y conflictos.

Una vez que han sido definidos los KPI y sus objetivos, los directivos no pueden modificar fácilmente los KPI antes de que se hayan recorrido los seis pasos del hexágono de la Imagen 4-8. Ésto hace que el bucle de realimentación sea demasiado largo y, como la mayoría de las empresas tienen un sólo proceso de planificación anual, generalmente a la vez que el Presupuesto, donde se comparan los resultados del año anterior con los presupuestos y objetivos del próximo año y se definen los planes y el coste para alcanzarlos, es demasiado tiempo para muchas de las empresas.

Dado que hoy en día las empresas de transporte urbano necesitan ser más eficientes y responder más rápidamente a las nuevas oportunidades y amenazas en el mercado, es muy deseable conseguir acortar el tiempo en el ciclo de gestión de la eficiencia.

Por ello, se propone añadir un paso más: introducir un bucle de realimentación más corto entre la definición de los objetivos y la elaboración del plan operativo, analizando los KPI entre estos puntos del ciclo de gestión e implementando un nuevo plan operativo, si es necesario.

Después del primer paso, que define objetivos y articula los KPI de la empresa y el segundo paso, que busca modelos que representen la gestión, se debe dar un nuevo paso: analizar las relaciones entre los KPI y modelizar su mejora para obtener más datos sobre el coste de obtener el objetivo marcado para cada uno de ellos.

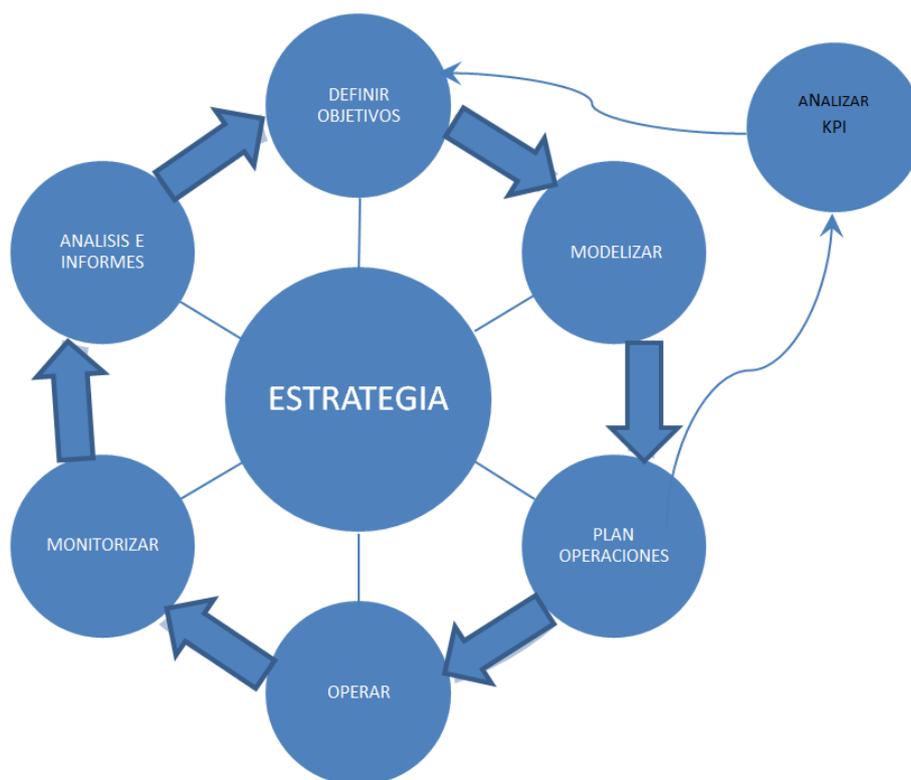


Imagen 4-8; Modelo mejorado de Ciclo de Gestión de la eficiencia.

Fuente: Cai et al. 2007.

Además, en cada una de estas revisiones, se debería analizar la viabilidad de cada KPI y recalcularse el coste financiero y operacional del cumplimiento de cada KPI, proporcionando de esta manera a los directivos una herramienta que conecta muy sólidamente los KPI con los planes y presupuestos operativos.

#### **4.5.4 Matriz de la estructura de diseño MED**

Un método que se puede usar también trasplantándolo de la Ingeniería de Diseño es el de la matriz de estructura de diseño (MED), (Steward, 1981).

Este método fue uno de los iniciales en el uso de los métodos de resolución de Sistemas Lineales aplicados a Problemas de Ingeniería.

Es una representación simple, compacta y visual de un sistema o proyecto en forma de matriz cuadrada, el equivalente de una matriz de adyacencia en la teoría de grafos y se utiliza en ingeniería de sistemas y gestión de proyectos para modelar la estructura de sistemas o procesos complejos, realizar análisis de sistemas, planificar proyectos y diseñar organizaciones.

La matriz de estructura de diseño recoge todos los subsistemas o actividades constituyentes, el intercambio de información correspondiente y las interacciones y patrones de dependencia entre los elementos. Cuando los elementos de la matriz representan actividades, la matriz detalla qué información se necesita para iniciar una actividad en particular y muestra dónde se encuentra la información generada por esa actividad. De esta manera, se puede reconocer rápidamente que otras actividades dependen de los resultados de información generados por cada actividad.

La representación en forma de matriz tiene muchas ventajas: la matriz puede representar un gran número de elementos del sistema y sus relaciones de una forma compacta y resalta patrones importantes (como bucles de realimentación). Con la MED se pueden usar las técnicas de análisis basadas en matrices para mejorar la estructura del sistema (Cullen, 1990). La

modelización de prioridades de actividades permite representar vínculos de realimentación que no pueden ser modelizados por otras técnicas.

El análisis de la MED proporciona información sobre cómo administrar sistemas o proyectos complejos, destacando los flujos de información, las secuencias de tareas o actividades y las iteraciones. Ayuda a los equipos a racionalizar los procesos con actividades interdependientes. También se puede utilizar para seguir los efectos de un cambio pues hace posible identificar rápidamente todos los procesos o actividades que dependen de una especificación.

Una MED es una matriz cuadrada que representa los vínculos entre los elementos del sistema, que se representan en las filas y en las columnas de la matriz. Estos elementos pueden representar, por ejemplo, componentes del producto, equipos de diseño o actividades del proyecto. Las celdas fuera de la diagonal se utilizan para indicar las relaciones entre los elementos. Una marca en una de esas celdas indica un enlace directo entre dos elementos y puede representar relaciones de diseño, restricciones entre componentes de producto, comunicación entre equipos, flujo de información o relaciones de precedencia entre actividades. Los elementos de una fila indican las salidas que el elemento en esa fila proporciona a los otros elementos y los de una columna las entradas que el elemento en esa columna recibe de otros elementos. Por ejemplo, en la MED que sigue, la marca en la fila A y columna B indica un enlace de A a B (salida de A, entrada a B) que puede verbalizarse como "A influye en B". Las filas y las columnas pueden intercambiarse (sin que cambie el significado). Existen las dos posibilidades en la representación.

Las celdas de la diagonal se usan normalmente para representar los elementos del sistema. Además, se pueden utilizar para representar auto-iteraciones (por ejemplo, reelaboración de un trabajo). Las auto-iteraciones son necesarias cuando los elementos de la matriz representan un bloque de actividades o subsistemas que pueden detallarse, permitiendo una estructura jerárquica de la MED.

$$\begin{array}{c}
 A \\
 B \\
 C \\
 D \\
 E \\
 F \\
 G
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 A & X & & & & & X \\
 & B & & X & & & \\
 X & & C & & & & X \\
 & & & D & & & \\
 & X & & & E & X & \\
 & & X & & & F & \\
 X & & & & X & & G
 \end{bmatrix}$$

Hay dos categorías principales de MED: estáticas y temporales. Las **MED estáticas** representan sistemas en los que todos los elementos existen simultáneamente. Una MED estática es equivalente a un gráfico de N2 o una matriz de adyacencia. Los elementos en las celdas fuera de la diagonal son, muchas veces, simétricos respecto a la diagonal (por ejemplo, en una MED organizacional que indica las interacciones entre los equipos, hay una marca del equipo C al equipo E y una marca del equipo E al equipo C, indicando que las interacciones son mutuas). Las MED estáticas se analizan generalmente con algoritmos de agrupamiento (Hipp, Güntzer, & Nakhaeizaeh, 2000).

Una **MED temporal** es similar a un diagrama de precedencia o a la representación matricial de un grafo dirigido. En las MED temporales, el orden de las filas y columnas indica un flujo temporal: las actividades anteriores en un proceso aparecen en la parte superior izquierda de la MED y las actividades posteriores aparecen en la parte inferior derecha. Términos como "feed forward" (alimentación hacia adelante) y "feedback" (retroalimentación) adquieren significado cuando se hace referencia a interfaces.

Un elemento de retroalimentación es un elemento por encima de la diagonal (cuando las filas representan la salida). Las MED temporales se analizan normalmente utilizando algoritmos de secuenciación, que reordenan los elementos de la matriz para minimizar la cantidad de elementos de retroalimentación y los colocan lo más cerca posible de la diagonal.

Las matrices MED también se pueden estar basadas en componentes, en arquitecturas, en personas o en equipos (MED de organización de empresa o de equipo de proyecto). Estas dos últimas son consideradas como MED estáticas (porque representan los elementos existentes). Las MED basadas en

actividades y las MED basadas en parámetros se definen como basadas en el tiempo, ya que su ordenación implica flujo temporal.

El uso de las MED en la industria aumentó considerablemente en los años noventa. Las MED se han aplicado por ahora en la construcción, en desarrollo de semiconductores, de componentes de automoción, de tecnología aeroespacial y de tecnología de telecomunicaciones.

Inicialmente, los elementos de celdas fuera de la diagonal indicaban sólo la existencia o no de una interacción entre elementos, usando una "X" o un "1". Las que son así se definen como MED binarias. Posteriormente los elementos se han ampliado para poder indicar relaciones cuantitativas que indica la "fuerza" de la vinculación (llamadas MED numéricas) o relaciones estadísticas (MED de probabilidad).

Varios trabajos anteriores: (Chestnut H. , 1965) y (Chestnut H. , 1967); (Hall, 1962); (Morris, 1970) y (Schlager, 1956) desarrollaron modelos de cómo relacionar los diferentes aspectos de un problema de ingeniería. (Alexander E. R., 1982) desarrolló una técnica gráfica donde las necesidades funcionales son nodos y las interacciones entre las necesidades son arcos. Su idea fue segmentar el grafo en subsecciones que tengan relativamente pocas interacciones con otros grupos a través de las fronteras exteriores. Estas segmentaciones gráficas dan lugar a subsistemas técnicos que deben separar las necesidades técnicas en problemas solucionables de forma independiente.

El método de la MED es similar a la técnica de Alexander, pero ahora los nodos son tareas específicas de diseño de ingeniería y los arcos tienen sentido e indican flujos de información entre tareas. Los nodos del gráfico están dispuestos en una matriz cuadrada donde cada fila y su columna correspondiente se identifican con una de las tareas. A lo largo de cada fila, los elementos no nulos indican de qué otras tareas requiere información la tarea dada. Cada columna indica qué otras tareas reciben información de la tarea dada. Los elementos diagonales no transmiten ningún significado en este punto, ya que una tarea no puede depender de su propia terminación. La

Imagen 4-9 muestra una matriz MED cualquiera de estructura de diseño de ingeniería.

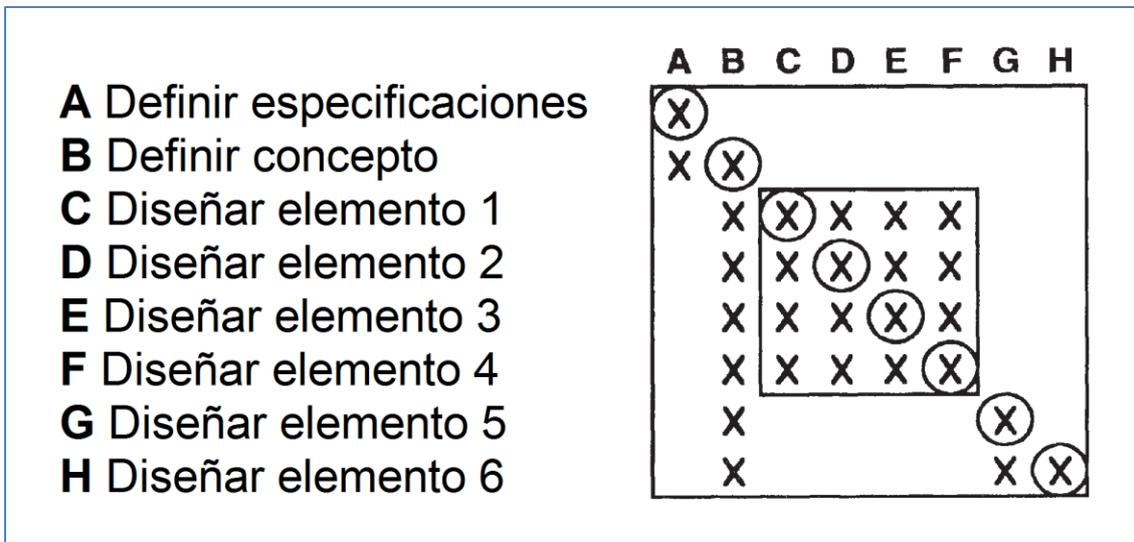


Imagen 4-9; Matriz de Estructura de Diseño de Ingeniería

Fuente: Steward(1981)

En este proceso, la tarea C requiere información de las tareas B, D, E y F, la tarea B requiere información sólo de la tarea A y la tarea A no necesita ninguna información para comenzar.

La matriz MED se puede utilizar para identificar un orden en conjuntos de tareas y/o identificar aspectos problemáticos en el proceso de diseño de ingeniería. Algunos, o todos los elementos de la matriz, pueden hacerse sub-diagonales (o sea que están en la diagonal situada debajo de la diagonal principal) tales como los correspondientes a las tareas A, B, G y H en la Imagen 4-9, reordenando las tareas de la matriz usando diferentes algoritmos.

Una matriz completamente sub-diagonal indica que existe una secuencia donde todas las tareas pueden ser completadas con toda la información disponible de entrada. Esa secuencia puede contener tanto tareas que deben realizarse en serie como tareas que pueden realizarse en paralelo. La información en una matriz de diseño sub-diagonal será entonces similar a la expresada en un gráfico de **CPM** (método del camino crítico) o **PERT** (Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos).

Normalmente, debido a la complejidad en los procesos de diseño de ingeniería modernos, la matriz no puede reordenarse para conseguir que todos sus elementos estén en la sub-diagonal (como en las tareas C y F en la Imagen 4-9). En estos casos, existe un flujo cíclico de información en el proceso de diseño de ingeniería y no son aplicables las técnicas estándar **CPM / PERT** debido a la presencia de tales ciclos. Del mismo modo, no es posible una progresión secuencial de las tareas de diseño de ingeniería. Las tareas en las que no es posible un ordenamiento puramente secuencial ni paralelo están acopladas de tal manera que se debe utilizar algún proceso alternativo para resolver las interacciones como: la iteración. Por esta razón, la iteración es una herramienta típica de los proyectos de diseño de ingeniería.

La sub-matriz 4 x 4 de la Imagen 4-9 representa un problema de diseño de ingeniería definido de tal manera que las tareas son tan complejas e interrelacionadas que será necesaria la iteración para completarlas.

Es importante conocer el conjunto ya establecido de modelos que permiten realizar bucles dentro de un marco del modelo PERT. Este conjunto de modelos es conocido como **GERT** (Técnica de Evaluación y Revisión General) (Taylor & Moore, 1980) (Neumann & Steinhardt, 1979). Sin embargo, el análisis directo de cualquier red GERT es difícil, por lo que normalmente se utiliza la simulación para evaluar los proyectos.

#### 4.5.4.1 Resolución de problemas con las MED

Para poder resolver problemas complejos representados con las MED generalmente es necesario utilizar primero los algoritmos de modificación de matrices que hemos visto en el apartado correspondiente a resolución de Sistemas Lineales, para reordenar los elementos de la matriz. Existen muchos algoritmos para reordenar la estructura global de las relaciones dentro de una MED. Algunos de los más usados son por ejemplo: el rasgado, la lateralización y la partición.

Las MED estáticas se analizan usualmente con algoritmos de reagrupamiento (es decir, reordenando los elementos de la matriz para agrupar los elementos relacionados). Los resultados de reagrupación normalmente muestran grupos (también llamados clústeres) de elementos estrechamente relacionados y grupos de elementos o elementos que no están conectados o están conectados a muchos otros elementos y por lo tanto no forman parte de un grupo.

Las MED temporales se analizan normalmente utilizando algoritmos de partición, rasgado y secuenciación. Los de partición dividen la matriz, los de rasgado llevan a los bordes los elementos no interesantes y los métodos de secuenciación intentan ordenar los elementos de la matriz de manera que no queden marcas de retroalimentación. En el caso de actividades acopladas (actividades que tienen enlaces cíclicos, por ejemplo, la actividad A está vinculada a B, que está vinculada a C, que está vinculada a A) los resultados son un bloque de MED en diagonal (es decir, bloques o grupos de actividades acopladas a lo largo de la diagonal).

Los métodos de partición incluyen la búsqueda de caminos: la matriz de alcance, los algoritmos de triangulación y la matriz de adyacencia.

El rasgado es la eliminación de elementos de retroalimentación (en la MED binaria) o asignación de una prioridad inferior a la que tenía (MED numérica). El rasgado de una MED basada en componentes puede implicar modularización (el diseño del componente no está influyendo en otros componentes) o estandarización (el diseño del componente no está influyendo y no es influido por otros componentes). Después de rasgar se aplica un algoritmo de partición. Al minimizar los bucles de retroalimentación se obtienen los mejores resultados para las MED binarias, pero no siempre para las MED numéricas o las MED de probabilidad.

Los algoritmos de secuenciación suelen tratar de minimizar el número de bucles de retroalimentación y también de reordenar las actividades acopladas (con bucle cíclico) intentando tener los elementos de retroalimentación cerca de

la diagonal. Sin embargo, a veces el algoritmo trata de minimizar un criterio (donde las iteraciones mínimas no son los resultados óptimos).

#### 4.5.4.2 Extensión del concepto de la MED

Las interacciones entre varios aspectos (personas, actividades y componentes) se estudian usando matrices de enlace adicionales (que no son siempre cuadradas). La matriz de dominios múltiples (MDM) es una extensión de la estructura básica de la MED. Una MDM incluye: varias MED (ordenadas como matrices diagonales de bloques) que representan las relaciones entre elementos del mismo dominio y las matrices de mapeo de dominio (MMD) correspondientes, que representan relaciones entre elementos de diferentes dominios.

El uso de la MED se ha extendido para visualizar y optimizar el flujo de información, que de otro modo sería invisible y las interacciones asociadas con el trabajo de ingeniería de organización. Esta visualización a través de la MED permite que el Cuerpo de Conocimientos de Producción Ligera o Aligerada (Lean Body of Knowledge en inglés) se aplique a flujos de trabajo de ingeniería y a flujos de información. El método de la MED se aplicó como un marco para analizar la propagación de la reelaboración en los procesos de desarrollo de productos y el problema asociado de la convergencia (o divergencia), pudiendo utilizar así para la resolución del problema la teoría de los sistemas lineales.

	task 1	task 2	task 3	task 4	task 5	task 6
task 1	X				X	
task 2		X	X			
task 3	X		X			X
task 4				X		X
task 5				X	X	
task 6						X

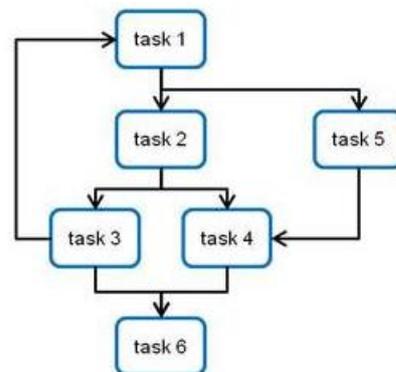


Imagen 4-10; Matriz MED dirigida.

Fuente: [www.dsmweb.org](http://www.dsmweb.org)

Las MED no pueden ser reflexivas, es decir, una relación entre un elemento y él mismo no conduce a nada. La Imagen 4-10 muestra un proceso simple que consta de seis tareas que se muestran como un diagrama de flujo y una MED que representa ese proceso.

#### 4.6 Aplicación de la MED con Lógica difusa

En la práctica, los directivos de las organizaciones suelen tomar decisiones rápidas, cuando se enfrentan a cambios rápidos de objetivos y/o a plazos muy justos. Cuando las situaciones exigen soluciones rápidas suelen tener poco tiempo para evaluar correctamente todas las opciones y, por ello, es muy importante describir antes las relaciones mutuas entre KPI interdependientes y tratar de optimizar sus valores objetivo, teniendo en cuenta su interdependencia, antes de llegar a un momento en el que tomar decisiones.

Un método para la cuantificación de las relaciones entre los indicadores y que también nos servirá para distinguir que indicadores son más importantes que otros en la mejora de la eficiencia global se basa en el uso de las herramientas de Lógica Difusa, una teoría que se basa en el uso de información imprecisa o incompleta para tomar decisiones o para la resolución de problemas (Dweiri, 2006).

Aunque se ha presentado alguna aplicación de las herramientas de Lógica Difusa para tomar decisiones en los Sistemas de Medición Jerárquica de Indicadores en empresas, ha habido pocos estudios sobre el uso de estas herramientas en la gestión de la eficiencia empresarial, en comparación con otras áreas como la ingeniería de diseño y la gestión de proyectos.

Por ahora, la mayoría de las investigaciones realizadas no utilizan procedimientos diseñados específicamente para analizar cómo mejorar la eficiencia general cuando se intentan mejorar a la vez KPI interdependientes.

Existen trabajos que estudian la interdependencia de los Indicadores Clave de Eficiencia (KPI) en empresas comerciales y utilizan la Lógica Difusa (Cai, Liu, Xiao, & Liu, 2009). Esos trabajos proponen estrategias de mejora de la eficiencia general de la empresa. Para hacerlo, utilizan una variante de la Matriz de la Estructura de Diseño, creada por Smith y Eppinger (Smith & Eppinger, 1997) y estiman la importancia de la interdependencia entre los indicadores clave de eficiencia mediante un método matemático. Estos trabajos utilizan los métodos de resolución de sistemas lineales, ya existentes, pero les dan más alcance utilizando herramientas de lógica difusa y los aplican a la gestión de la eficiencia empresarial.

El enfoque y el método de análisis sirven como herramientas de análisis y resolución de problemas de mejora de la eficiencia en modelos de CMI que utilizan indicadores clave de eficiencia (KPI) interdependientes.

En esta Tesis aplicaremos el sistema anterior a la mejora de la eficiencia de las empresas de transporte urbano, teniendo en cuenta los pros y los contras del método y basándonos en un enfoque sistemático para analizar la mejora de los KPI.

#### **4.6.1 Matriz de transformación de los trabajos (MTT)**

El siguiente problema de ingeniería de gestión de la empresa en el que se han utilizado matrices es el de la Matriz de Transformación de los Trabajos.

Los modelos de iteración de procesos pueden proporcionar información valiosa sobre cualquier proceso iterativo. El modelo de iteración paralelo proporciona a los administradores información sobre qué actividades pueden estar contribuyendo más al proceso de ingeniería iterativo en un proceso complejo y acoplado.

Las soluciones al problema de la iteración también se pueden desarrollar usando estos modelos. Las soluciones pueden incluir la adición de recursos, la

reestructuración del proceso, el añadido de nuevas herramientas de automatización de procesos de ingeniería, la redefinición de los problemas, la limitación del alcance del proceso de ingeniería, la reasignación de tareas, etc.

Hay varios investigadores que han desarrollado modelos de iteración de procesos. Por ejemplo: (Ha & Porteus, 1995) presentaron un modelo de coordinación entre dos actividades acopladas.

En 1997, Smith y Eppinger (Smith & Eppinger, 1997) desarrollaron un modelo diferente de iteración secuencial de procesos de ingeniería. Ese modelo de iteración secuencial permitió el cálculo del tiempo de espera total para un grupo de tareas en las que cada tarea tenía una probabilidad distinta de crear nuevo trabajo para las otras tareas.

Cada uno de estos esfuerzos de modelado ha sido una contribución importante en la ciencia de gestión porque cada modelo explora una faceta diferente de la iteración de procesos de ingeniería. La complejidad de la iteración de procesos de ingeniería impide que un sólo modelo pueda captar todos los comportamientos observados ni responder a todas las cuestiones de interés de la ciencia de gestión.

El modelo MTT complementó la investigación realizada hasta el momento, explorando el proceso de iteración de los procesos de ingeniería con mayor detalle.

El MTT estudia las "iteraciones paralelas", un caso extremo en el que una serie de actividades de ingeniería se ponen en marcha a la vez. Cada actividad genera información que puede hacer que los demás repitan todo o parte de su propio trabajo.

Si suponemos que la repetición de actividades es determinista y que todo el conjunto de actividades converge a la solución del proceso, podemos analizar un gran número de subprocesos de ingeniería y determinar qué subconjuntos de tareas requerirán la mayor parte del esfuerzo durante el proceso de iteración.

Comenzamos partiendo del concepto de la Matriz de Estructura de Diseño o MED, que hemos visto antes. Ésta nos muestra cómo se puede modelar la iteración extendiendo esta representación y desarrollando una interpretación analítica del modelo matricial. La filosofía del método de la MED es dividir en tareas individuales el proyecto de diseño de ingeniería y analizar las relaciones entre estas tareas para identificar la estructura subyacente de las tareas del proyecto.

Se ha demostrado que el estudio de las relaciones entre las tareas individuales de diseño de ingeniería puede mejorar el proceso general de diseño y es una buena forma de analizar estrategias alternativas de diseño de ingeniería.

#### 4.6.1.1 El modelo de la MTT

El modelo MTT proporciona un modelo manejable de los procesos de iteración de ingeniería, válido también para grandes proyectos. Al preservar la trazabilidad, normalmente se puede ver la relación entre la estructura del problema y el tiempo de desarrollo del proyecto.

Debido a que la Técnica de evaluación gráfica y revisión (GERT)<sup>12</sup> se basa en la simulación, es difícil encontrar esa relación para grandes proyectos (Neumann & Steinhardt, 1979). Normalmente las empresas competidoras que se enfrentan al mismo problema de ingeniería pueden elegir diferentes estrategias de abordarlo, lo que implica una matriz de estructura de diseño subyacente diferente. Si una empresa elige trabajar más en tareas secuenciales (en serie) en vez de en tareas superpuestas (en paralelo) puede afectar significativamente el tiempo de desarrollo (Clark & Fujimoto, 1991). Además, la forma en que una empresa descompone el problema en problemas

---

<sup>12</sup> Técnica de evaluación gráfica y revisión, comúnmente conocida como GERT, es una técnica de análisis de red utilizada en la gestión de proyectos que permite el tratamiento probabilístico de la lógica de red y la estimación de la duración de la actividad. La técnica se describió por primera vez en 1966 por el Dr. Alan B. Pritsker de la Universidad de Purdue y W. W. Happ., El GERT se utiliza rara vez en sistemas complejos, en comparación con otras técnicas. Sin embargo, el enfoque GERT aborda la mayoría de las limitaciones asociadas con la técnica PERT / CPM. El GERT permite los bucles entre tareas. El inconveniente fundamental asociado con la técnica GERT es el complejo programa (simulación Monte Carlo) necesario para modelar el sistema GERT. El desarrollo en GERT incluye Q-GERTS - que permite al usuario considerar las colas dentro del sistema.

más pequeños tiene un impacto importante en el proceso y, por lo tanto, cambia la matriz MED (Von Hippel, 1990).

Dado que cada modelo de MED es específico para el proceso de ingeniería de cada empresa, puede ser una herramienta poderosa en los proyectos de ingeniería actuales.

Para el propósito estudiado en este método, se supone que las tareas y las interrelaciones de un problema de ingeniería son conocidas e inalterables durante el transcurso del proyecto. Esta suposición es razonable para una empresa que está trabajando en un proyecto de ingeniería en un área en la que tienen un alto grado de práctica y es menos cierta para una empresa que realiza cierto tipo de proyecto por primera vez o que desarrolla una tecnología que es completamente nueva o que evoluciona rápidamente.

El tiempo de desarrollo es muy importante en la gestión de procesos de ingeniería y las iteraciones complejas son una fuente importante de incremento del tiempo de desarrollo.

Mientras que el método de la MED es una herramienta útil para identificar los bloques que están acoplados en los que se producen iteraciones complejas, el análisis de la Matriz de Transformación del Trabajos pretende caracterizar cómo se producen dichas iteraciones.

Si se incluyen en la MED las duraciones de tareas, podemos usar este método para estimar la duración total del proyecto. Las tareas en serie pueden evaluarse sumando sus tiempos individuales y las tareas en paralelo pueden evaluarse encontrando el máximo de esos tiempos de tarea. Para el proyecto caracterizado por la MED de la Imagen 4-9, si los tiempos estimados de cada tarea son  $a, b, c, \dots, h$ , el tiempo del proyecto de ingeniería será  $a + b + \max\{f(c, d, e, f), g + h\}$  donde  $f(x)$  es una función desconocida que corresponde al tiempo de desarrollo (Adler, Nguyen, & Schwerer, 1995) para el bloque de tareas acopladas. El modelo de análisis de la Matriz de Transformación del Trabajos ilustra cómo se puede evaluar el tiempo de iteración para dicho bloque de tareas acoplado y cómo identificar qué aspectos del problema de

ingeniería contribuyen más al tiempo total de iteración. El modelo MTT se basa en resultados de álgebra lineal estándar, pero la interpretación de la relación entre la estructura de la matriz y el tiempo de desarrollo fue realizada por (Smith & Eppinger, 1997).

#### 4.6.1.2 Modelo de Iteración

Para modelar las iteraciones de los procesos de ingeniería se usa una MED llamada Matriz de Transformación del Trabajos (**MTT**) (Smith & Eppinger, 1997). En una Matriz de Transformación de Trabajos hay dos tipos de información: los elementos fuera de la diagonal representan la importancia de la dependencia entre las tareas, dando lugar a transferencia de trabajo o a nuevo trabajo implicado en las iteraciones (Imagen 4-11 a), como se define en la siguiente sección. Los elementos diagonales en la MTT representan el tiempo que se tarda en completar cada tarea durante la primera iteración, (Imagen 4-11 b).

Se supone que habrá múltiples iteraciones y que el tiempo requerido por una tarea para cada etapa posterior es una función de la cantidad de tiempo dedicado a trabajar en las tareas que proporcionan su entrada en la etapa anterior. Con estas condiciones, se calcula la suma de los tiempos de todas las etapas. Se supone que cada tarea crea una cantidad determinada de trabajo nuevo para las otras tareas.

Se llama “nuevo trabajo” a la repetición de una tarea porque se intentó originalmente con información imperfecta (con suposiciones, algunas de las cuales resultaron no ser 100% correctas). Por lo tanto, el “nuevo trabajo” adapta la solución en evolución para tener en cuenta la información modificada.

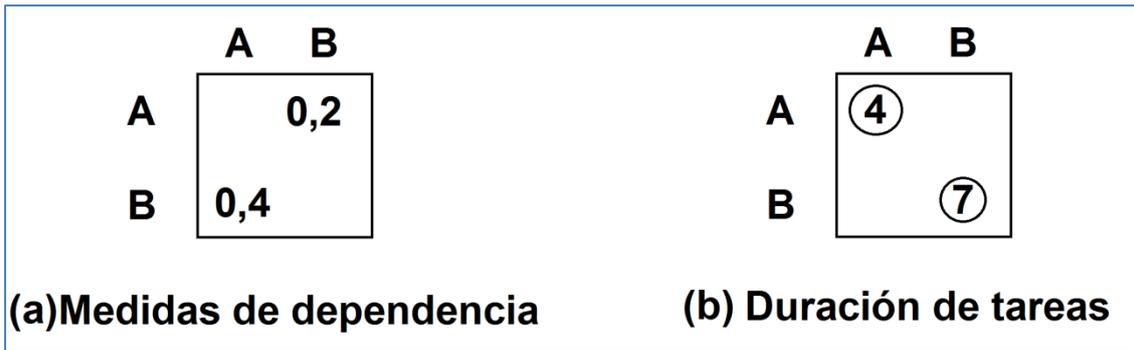


Imagen 4-11; Matriz de Transformación del Trabajos.

Fuente: (Smith & Eppinger, 1997)

#### 4.6.1.3 Supuestos

El modelo de la matriz de transformación de Trabajos (MTT) hace tres supuestos que nos permiten realizar el análisis algebraico lineal de la matriz MTT:

- En cada etapa / iteración paralela se realizan completamente todas las tareas.
- El “nuevo trabajo” realizado es una función del trabajo realizado en la anterior etapa de iteración.
- Los parámetros de transformación de trabajos en la matriz no varían con el tiempo.

La primera suposición de que todas las tareas acopladas se realizan en cada etapa es una idealización que se cumple en muchos proyectos de diseño. La suposición se cumple en una situación en la que hay un equipo de trabajo cuya composición es fija, que están geográficamente cerca y que están trabajando en un conjunto de cuestiones relacionadas entre sí simultáneamente. Esta situación se da y se recomienda en la ingeniería concurrente. En ese entorno, nos interesan las tareas de diseño fuertemente acopladas (no las secuenciales o desacopladas) para las cuales la suposición de iteración completamente paralela parece razonable. Es importante señalar que esta parte estrechamente acoplada del proceso de desarrollo puede no incluir todo el proceso de desarrollo del producto, sino sólo un subconjunto iterativo del proceso. Si hay

barreras organizacionales o temporales que no permiten el trabajo simultáneo en estrecha cooperación, entonces esta suposición probablemente no se mantendría. Para una extensión de la suposición de que son completamente paralelas, también se consideró un modelo de iteración en el que las tareas se ejecutan en múltiples fases. (Smith & Eppinger, 1997)

El segundo y el tercer supuestos, “que el nuevo trabajo es una función lineal del trabajo en la iteración anterior” y que “los parámetros de transformación del trabajo no varían con el tiempo”, son muy necesarios desde un punto de vista matemático, pero hay que estudiar si se pueden cumplir. Se ha observado, que la cantidad de tiempo por cada iteración disminuye en la práctica (los procesos de ingeniería convergen con el tiempo) (Smith & Tjandra, Experimental observation of iteration in engineering design, 1998). Además, si el número de iteraciones es relativamente pequeño, la mayor parte del nuevo trabajo se completa en las primeras iteraciones. Por lo tanto, supondremos que si los parámetros de partida cambiaran con el tiempo, los cambios afectarían principalmente a la cantidad de trabajo en iteraciones del final, que no contribuyen demasiado al tiempo total. Dadas estas observaciones, la segunda y tercera suposiciones parecen razonablemente posibles de cumplir. Para describir el modelo, se introduce primero el concepto del vector de trabajo  $u_t$ , que es un vector de dimensión  $n$ , donde  $n$  es el número de tareas de diseño acoplado por realizar. Cada elemento del vector de trabajo contiene la cantidad de trabajo a realizar en cada tarea después de la etapa de iteración  $t$ . El vector de trabajo inicial  $u_0$  es un vector de unos, porque todo el trabajo está por realizarse en cada tarea al principio del proceso de iteración.

Durante cada iteración, en todas las tareas de diseño se completa todo el trabajo. Sin embargo, el fin del trabajo en cada tarea hará que se produzca una cierta reelaboración para todas las otras tareas, que dependen de la tarea completada para obtener información. La matriz de transformación de trabajo documenta dicha dependencia de la información. Cada etapa de iteración produce un cambio en el vector de trabajo de acuerdo con:  $u_{(t+1)} = A^t u_t$ , donde cada una de las entradas  $a_{ij}$  de  $A$  implica que hacer una unidad de trabajo en la tarea de diseño  $j$  crea  $a_{ij}$  unidades de nuevo trabajo para la tarea

de diseño  $i$ . Entonces la matriz  $A$  representa la porción de la fuerza de las dependencias de la matriz MTT (Imagen 4-11 a). Las entradas diagonales de  $A$  son ceros. Dado que el proceso es iterativo, el vector de trabajo  $u_t$  también puede expresarse como:  $u_t = A^t u_0$ . La suma de todos los vectores de trabajo es el vector de trabajo total  $U$ , que representa el número total de veces que se intenta cada una de las tareas durante el total de  $M$  etapas de iteración del proceso de diseño:

$$U = \sum_{t=0}^M u_t = \sum_{t=0}^M A^t u_0 = \left( \sum_{t=0}^M A^t \right) u_0$$

El resultado del modelo  $U$  está, por lo tanto, en las unidades de la cantidad original de trabajo realizada en cada tarea en la primera etapa de iteración. (Por ejemplo, si el elemento  $i$  en el vector  $U$  es 1,6 entonces ingeniería habrá realizado un total de 60% de reelaboración en la tarea  $i$  en las etapas posteriores). Por ahora, escalamos  $U$  con las duraciones de tarea para obtener unidades de tiempos de tarea. Si  $W$  es una matriz que contiene los tiempos de las tareas a lo largo de su diagonal (Imagen 4-11 b), entonces  $WU$  es un vector que contiene la cantidad de tiempo que cada tarea requerirá durante las  $M$  etapas de iteración.

#### 4.6.2 Definición del concepto de Matriz de Transformación de los Costes de Mejora de Indicadores

Basándose en los conceptos anteriores, (Cai, Liu, Xiao, & Liu, 2009) definen la Matriz de Transformación de los Costes de Mejora de los KPI. En ella simplemente se cambian los vectores de trabajo de la MTT por vectores de coste. En vez de poner en cada lugar de la matriz el coeficiente de repetición del trabajo que hay entre cada dos tareas relacionadas, ponemos el coeficiente de ponderación del cambio de eficiencia en cada una de las relaciones de los KPI, suponiendo que el coste total es uno.

Para referirnos a estos procesos que sirven para alcanzar los objetivos propuestos para cada uno de los KPI que conectarán la planificación con la ejecución y definirán los pasos necesarios para la consecución de los objetivos de eficiencia, los llamaremos, a partir de ahora, procesos de mejora de los KPI.

Para derivar la nueva medida de complejidad en una forma explícita simple en la sección 3 se introduce un modelo de dinámica de proyecto.

Retomando el trabajo fundamental de (Smith & Eppinger, 1997) sobre la dinámica de proyectos deterministas reconsideramos y ampliamos el concepto a través de las variables aleatorias multivalentes para modelar las variaciones de la eficiencia.

Según (Smith & Eppinger, 1997) la dinámica de un proyecto de ingeniería en paralelo con  $p$  tareas completamente concurrentes puede ser modelada por una ecuación de diferencias lineales de primer orden:

$$X_t = A_0 \cdot x_{t-1}, \forall t \geq 1.$$

La matriz  $A_0$  es la matriz  $p \times p$  de transformación de trabajos (MTT) (Schlick, Duckwitz, Gärtner, & Schmidt, 2008) y en este caso haciendo abstracción a la mejora de los KPI será la matriz MTCMI.

El vector de estado de columna  $x_t$  representa aquí el coste restante de todas las mejoras  $p$  en el intervalo de tiempo  $t$ . La MTCMI no varía con el tiempo y se dice que la ecuación de estado es autónoma.

En este trabajo se utiliza el concepto mejorado de MTT de (Huberman & Wilkinson, 2005). Por lo tanto, las entradas  $a_{ii}$  ( $i = 1 \dots p$ ) en la diagonal principal de la MTCMI representan diferentes incrementos de coste en diferentes indicadores y pueden considerarse como tasas de incremento de costes de KPI autónomos cuando no se producen interacciones entre los costes de mejora de los KPI. Ésto es así en contraste con el modelo original de MTT donde las tareas se realizan a la misma velocidad. Para ser exactos,  $a_{ii}$  indica la parte de coste que queda por efectuar después de un elemento de tiempo para el indicador  $i$  y por lo tanto debe ser un número real positivo, que

en proyectos bien planificados es menor que 1. Las entradas fuera de la diagonal  $a_{ij}$  ( $i \neq j$ ) son números reales arbitrarios del intervalo  $[-1;1]$  y tienen tres significados diferentes:

- 1) una entrada positiva indica que una unidad de coste en el indicador  $j$  en el intervalo de tiempo  $t$  causa  $a_{ij}$  unidades de aumento de coste en la tarea  $i$  en el intervalo de tiempo  $t+1$ ;
- 2) una entrada cero significa que el coste de la mejora del indicador  $j$  no tiene efecto directo sobre el coste de la mejora del indicador  $i$ ;
- 3) una entrada negativa modeliza que la mejora del coste en el indicador  $j$  en el intervalo de tiempo  $t$  baja el coste de la mejora del indicador  $i$  en el próximo intervalo. En el primer intervalo de tiempo se asume generalmente que todos los costes  $p$  están sin desembolsar al 100% y hay  $x_0 = [1, 1, \dots, 1]T$ .

La MTCMI se puede crear para un conjunto particular de KPI, asignando valores numéricos a la matriz de interacciones de la métrica a evaluar.

La debilidad fundamental del modelo de proyecto determinista es asumir una predictibilidad perfecta del coste de mejora de indicadores e ignorar la cantidad significativa de "ruido" que hay en los procesos de mejora reales (Huberman & Wilkinson, 2005). Este ruido permite diferentes interpretaciones. Cuando se mira desde fuera del proyecto, el ruido refleja los límites de capacidad de la Directiva y de los ingenieros participantes al procesar grandes cantidades de información de mejora de la eficiencia y, por lo tanto, puede considerarse como un efecto de la incapacidad para conocer completamente el complejísimo proceso.

Al mirar hacia fuera desde el interior del proceso, el ruido refleja fluctuaciones exógenas no predecibles del entorno empresarial, por ejemplo, cambios en los requisitos de los stakeholders, un cambio en la prioridad de los objetivos de eficiencia, etc. Es razonable modelizar los procesos de mejora de eficiencia como un sistema abierto. Para ello, un desarrollo algebraicamente simple pero

conceptualmente importante del modelo determinista viene dado por la ecuación en diferencias lineales estocásticas

$$X_t = A_0 \cdot X_{t-1} + S_t ; \forall t \geq 1.$$

$A_0$  es la MTCMI. Los  $p$  componentes del vector de estado del proyecto  $X_0$  en el intervalo de tiempo cero, no están típicamente sujetos a fluctuaciones aleatorias. En su lugar, se establecen como números reales positivos para representar el porcentaje de trabajo restante según el estado inicial del proyecto. A pesar del inicio determinista del proyecto, el régimen en los siguientes intervalos de tiempo es estocástico y se añade una secuencia de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (iid) multivariantes ( $S_t$ ) al estado del proyecto para modelar las fluctuaciones. En proyectos reales de ingeniería concurrente existen muchas influencias estocásticas que actúan sobre el progreso del trabajo. Aunque no conocemos su número exacto ni su distribución, el Teorema del límite central multivariante nos dice que, para una buena aproximación, una suma de vectores aleatorios (iid) puede ser representada por un vector normalmente distribuido.

En otras palabras, si en cada instante de tiempo la suma de muchas influencias fluctuantes actúa sobre un proyecto de mejora de la eficiencia, el efecto total en cada instante de tiempo puede considerarse como un vector aleatorio gaussiano. Suponemos que el ruido no tiene un componente sistemático que influye en la dinámica media del proyecto y los vectores aleatorios  $S_t$  siguen la distribución Gaussiana multivariante con medios cero y una matriz de covarianza  $\Sigma_S$ :  $S_t \sim N(0, \Sigma_S)$ ,  $t \geq 1$ . La matriz de covarianza  $\Sigma_S$  es la generalización natural de la varianza de una variable aleatoria valorada escalarmente a dimensiones más altas. Las  $\sigma_{ii}$  entradas en la diagonal principal de  $\Sigma_S$  denotan la varianza de las fluctuaciones del indicador  $i$ . Si  $\sigma_{ii}$  es grande, el indicador  $i$  está muy perturbado.

### **4.6.3 Revisión de los métodos de resolución de Sistemas lineales aplicables a matrices**

### 4.6.3.1 Definición

Un sistema lineal (o sistema de ecuaciones lineales) es una colección de dos o más ecuaciones lineales que implican el mismo conjunto de variables.

Una solución a un sistema lineal es una asignación de valores a las variables de manera que todas las ecuaciones se satisfacen simultáneamente, ya que hace que las ecuaciones sean válidas.

La teoría de los sistemas lineales es la base y una parte fundamental del álgebra lineal que se utiliza en la mayoría de la matemática moderna. Los algoritmos de ordenador para encontrar las soluciones son una parte importante del álgebra lineal numérica y desempeñan un papel prominente en la ingeniería, la física, la química, la informática y la economía.

Normalmente se puede aproximar un sistema de ecuaciones no lineales mediante un sistema lineal (linealización) que es muy útil cuando se hace un modelo matemático o una simulación por ordenador de un sistema complejo.

Los coeficientes de las ecuaciones son números reales o complejos y las soluciones se buscan en el mismo conjunto de números, pero la teoría y los algoritmos se aplican a coeficientes y soluciones en cualquier campo.

### 4.6.3.2 Forma general

Un sistema general de  $m$  ecuaciones lineales con  $n$  incógnitas puede escribirse como

$$\begin{array}{rcl} a_{11}x_1 + & + a_{1n}x_n & = b_1 \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1}x_1 + & + a_{mn}x_n & = b_m \end{array}$$

donde:

$x_1, x_2, \dots, x_n$  son las incógnitas

$a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}; a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n}; \dots; a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mn}$  son los coeficientes y

$b_1 b_2 \dots b_m$  son los términos constantes.

Los coeficientes y las incógnitas son números reales o complejos pero también pueden ser enteros, racionales, polinomios o elementos de una estructura algebraica abstracta.

#### 4.6.3.3 Ecuación vectorial

Un enfoque muy útil es aquel en el que se supone que cada incógnita representa un peso para un vector de columna en una combinación lineal.

$$x_1 \begin{bmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{bmatrix} + x_2 \begin{bmatrix} a_{12} \\ \vdots \\ a_{m2} \end{bmatrix} + \dots + x_n \begin{bmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}$$

Este enfoque permite que se apliquen todo el lenguaje y la teoría de los espacios vectoriales. La colección de todas las posibles combinaciones lineales de esos  $n$  vectores, se denomina su espacio generado y las ecuaciones tienen una solución sólo cuando el vector  $b$  de la derecha del igual está dentro de ese espacio generado. Si cada vector dentro de ese espacio generado tiene exactamente una expresión como combinación lineal de los vectores dados a la izquierda del igual, entonces cualquier solución es única. En cualquier caso, la extensión tiene una base de vectores linealmente independientes que garantizan exactamente una expresión y el número de vectores en esa base (su dimensión) no puede ser mayor que  $m$  o  $n$ , pero puede ser menor. Esto es importante porque si tenemos vectores independientes, se garantiza una solución independientemente del lado derecho y, si no, no está garantizada.

#### 4.6.3.4 Ecuación matricial

La ecuación vectorial es equivalente a una ecuación matricial de la forma

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$$

donde  $\mathbf{A}$  es una matriz  $m \times n$ ,  $\mathbf{x}$  es un vector de columna con  $n$  filas y  $\mathbf{b}$  es un vector de columna con  $m$  filas.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}; \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}$$

El número de vectores en una base para el espacio generado se expresa ahora como el rango de la matriz.

#### 4.6.3.5 Conjunto de soluciones

Una solución de un sistema lineal es una asignación de valores a las variables  $x_1, \dots, x_n$  tales que se satisface cada una de las ecuaciones. El conjunto de todas las soluciones posibles se llama conjunto de soluciones.

Un sistema lineal puede:

- Tener infinitas soluciones
- Tener una solución única
- No tener solución.

#### 4.6.3.6 Interpretación geométrica

Para  $n$  variables, cada ecuación lineal determina un hiperplano en el espacio  $n$ -dimensional. El conjunto de soluciones es la intersección de estos hiperplanos, que puede ser un plano de cualquier dimensión.

#### 4.6.3.7 Comportamiento general

En general, el comportamiento de un sistema lineal está determinado por la relación entre el número de ecuaciones y el número de incógnitas:

Un sistema con menos ecuaciones que incógnitas suele tener infinitas soluciones, pero puede no tener solución.

Un sistema con el mismo número de ecuaciones e incógnitas tiene una solución única.

Un sistema con más ecuaciones que incógnitas no tiene solución. En el primer caso, la dimensión del conjunto de soluciones es usualmente igual a  $n - m$ , donde  $n$  es el número de variables y  $m$  es el número de ecuaciones.

En general, un sistema de ecuaciones lineales puede comportarse de forma diferente a lo esperado si las ecuaciones son linealmente dependientes, o si dos o más de las ecuaciones son inconsistentes.

#### 4.6.3.8 Propiedades

##### 4.6.3.8.1 Independencia

Las ecuaciones de un sistema lineal son independientes si ninguna de las ecuaciones puede derivarse algebraicamente de las otras. Cuando las ecuaciones son independientes, cada ecuación contiene nueva información sobre las variables y la eliminación de cualquiera de las ecuaciones aumenta el tamaño del conjunto de soluciones. Para las ecuaciones lineales, la independencia lógica es igual a independencia lineal (Householder, 1975).

##### 4.6.3.8.2 Consistencia

Un sistema lineal es inconsistente si no tiene solución y si la tiene se le llama consistente. Cuando el sistema es inconsistente, es posible hallar una contradicción en las ecuaciones, que puede ser siempre reescrita como  $0 = 1$ . Es posible que  $n$  ecuaciones lineales sean inconsistentes, aunque  $n-1$  de ellas sean consistentes entre sí porque dos de estas ecuaciones tengan una

solución común. El mismo fenómeno puede ocurrir para cualquier número de ecuaciones.

En general, las inconsistencias ocurren si los lados izquierdos de las ecuaciones en un sistema son linealmente dependientes y los términos constantes no satisfacen la relación de dependencia.

Un sistema de ecuaciones cuyos lados izquierdos son linealmente independientes es siempre consistente. Poniéndolo de otra manera, según el Teorema de Rouché-Capelli, cualquier sistema de ecuaciones es inconsistente si el rango de la matriz aumentada es mayor que el rango de la matriz de coeficientes.

Si las filas de dos matrices son iguales, el sistema debe tener al menos una solución. La solución es única si y sólo si el rango es igual al número de variables. De lo contrario, la solución general tiene  $k$  parámetros libres donde  $k$  es la diferencia entre el número de variables y el rango. En ese caso hay una infinidad de soluciones.

El rango de un sistema de ecuaciones nunca puede ser mayor que [el número de variables] + 1, lo que significa que un sistema con cualquier número de ecuaciones siempre se puede reducir a un sistema que tiene un número de ecuaciones independientes que es como máximo igual a [el número de variables] + 1.

#### 4.6.3.8.3 Equivalencia

Dos sistemas lineales que utilizan el mismo conjunto de variables son equivalentes si cada una de las ecuaciones del segundo sistema puede derivarse algebraicamente de las ecuaciones del primer sistema y viceversa. Dos sistemas son equivalentes si ambos son inconsistentes o cada ecuación de cada uno de ellos es una combinación lineal de las ecuaciones del otro. Se sigue que dos sistemas lineales son equivalentes si y sólo si tienen el mismo conjunto de soluciones.

### 4.6.3.9 Metodologías de resolución de sistemas lineales

#### 4.6.3.9.1 Soluciones de un sistema lineal

Cuando el conjunto de soluciones es finito, se reduce a un solo elemento. En este caso, la solución única se describe por una secuencia de ecuaciones cuyos lados izquierdos son los nombres de las incógnitas y los lados derechos son los valores correspondientes.

Cuando se ha fijado un orden sobre las incógnitas, por ejemplo el orden alfabético, la solución puede ser descrita como un vector de valores. Puede ser difícil describir un conjunto con soluciones infinitas. Normalmente, algunas de las variables se designan como libres (o independientes, o como parámetros), lo que significa que se les permite tomar cualquier valor, mientras que las variables restantes dependen de los valores de las variables libres.

Cada variable libre da al espacio de solución un grado de libertad, cuyo número es igual a la dimensión del conjunto de soluciones. Una solución infinita de orden superior puede describir un plano o un conjunto de dimensiones superiores. Las diferentes opciones para las variables libres pueden conducir a diferentes descripciones del mismo conjunto de soluciones.

#### 4.6.3.9.2 Eliminación de variables

El método más sencillo es eliminar variables. Este método consiste en:

En la primera ecuación, se despeja una de las variables en función de las otras. Se sustituye esta expresión en las ecuaciones restantes. Ésto produce un sistema de ecuaciones con una ecuación y una incógnita menos.

Se repite hasta que el sistema se reduce a una sola ecuación lineal. Se resuelve esta ecuación y se halla el valor de esa última incógnita.

Se sustituye esa incógnita en la ecuación anterior y se halla el valor de la incógnita anterior y así se repite este paso hasta que se encuentra la solución completa.

#### 4.6.3.9.3 Reducción de filas o eliminación gaussiana

En la reducción de filas (también conocida como eliminación gaussiana) el sistema lineal se representa como una matriz aumentada: la matriz se modifica usando operaciones elementales de fila hasta que la matriz reducida alcanza la forma de matriz triangular o diagonal. Hay tres tipos de operaciones elementales de fila:

- Intercambiar las posiciones de dos filas.
- Multiplicar una fila por un escalar diferente de cero.
- Agregar a una fila, otra fila multiplicada por un escalar.

Debido a que estas operaciones son reversibles, la matriz aumentada obtenida siempre representa un sistema lineal equivalente al original. Existen varios algoritmos específicos para filtrar y reducir una matriz aumentada, los más simples de los cuales son:

- eliminación gaussiana
- eliminación de Gauss-Jordan.

Estos dos métodos son de hecho el mismo. La diferencia reside en cómo se escriben los cálculos.

#### 4.6.3.9.4 Regla de Cramer

La regla de Cramer es una fórmula explícita para la solución de un sistema de ecuaciones lineales, con cada variable dada por un cociente de dos determinantes.

Para cada variable, el denominador es el determinante de la matriz de coeficientes, mientras que el numerador es el determinante de una matriz en la que una columna ha sido reemplazada por el vector (la columna) de términos independientes.

Aunque la regla de Cramer es importante teóricamente, tiene poco valor práctico para matrices grandes, puesto que en ellas el cálculo de determinantes es muy incómodo.

Además, la regla de Cramer tiene problemas en cuanto a la exactitud, lo que la hace inadecuada para resolver incluso pequeños sistemas confiablemente, a menos que las operaciones se realicen en aritmética racional con demasiada precisión.

#### 4.6.3.9.5 Solución matricial

Si la ecuación se expresa en la forma matricial  $A x = b$ , el conjunto de soluciones completo también se puede expresar en forma de matriz. Si la matriz  $A$  es cuadrada (tiene  $m$  filas y  $m$  columnas) y tiene rango completo (todas las  $m$  filas son independientes), entonces el sistema tiene una solución única dada por:

$$x = A^{-1} b$$

donde  $A^{-1}$  es la inversa de  $A$ .

De manera más general, independientemente de si  $m = n$  o no, e independientemente del rango de  $A$ , todas las soluciones (si las hay) se hallan usando la pseudo-inversa de Moore-Penrose de  $A$  (Hopcroft, 1974), llamada  $A^\dagger$ , como sigue:

$$x = A^\dagger b + (I - A^\dagger A)w$$

donde  $w$  es un vector paramétrico libre que se extiende sobre todos los  $n \times 1$  vectores posibles. Una condición necesaria y suficiente para que exista alguna

solución es que la solución potencial obtenida usando  $w = 0$  satisfaga  $Ax = b$ , o sea, que  $AA^{\dagger}b = b$

Si esta condición no se cumple, el sistema de ecuaciones es inconsistente y no tiene solución. Si la condición se mantiene, el sistema es consistente y al menos existe una solución. Por ejemplo, en el caso mencionado anteriormente en el que  $A$  es cuadrada y de rango completo,  $A^{\dagger} = A^{-1}$  y la ecuación de solución general se simplifica a:

$$x = A^{-1}b + (I - A^{-1}A)w - A^{-1}b + (I - I)w = A^{-1}b$$

como se ha indicado anteriormente, donde  $w$  ha abandonado completamente la solución, dejando sólo una solución. En otros casos, sin embargo,  $w$  permanece y, por lo tanto, los infinitos valores potenciales del vector paramétrico libre  $w$ , dan infinitas soluciones de la ecuación.

#### 4.6.3.10 Metodologías de resolución para usar con ordenadores

Para resolver sistemas lineales grandes (con un número de variables mayor de 10) se utilizan siempre ordenadores. El algoritmo estándar para resolver un sistema de ecuaciones lineales se basa en la eliminación de Gauss con algunas modificaciones (Okunev & Johnson, 1997). Es esencial evitar la división por números pequeños, pues puede conducir a resultados inexactos. Se evita reordenando las ecuaciones, por un proceso llamado pivotamiento.

El algoritmo estándar utilizado no realiza exactamente la eliminación gaussiana, sino que calcula la descomposición LU de la matriz. Ésta es sobre todo una herramienta de reorganización, pero es mucho más rápida si hay que resolver varios sistemas con la misma matriz  $A$  y diferentes vectores  $b$ .

Si la matriz  $A$  tiene alguna estructura especial, ésta se puede utilizar para obtener algoritmos más rápidos o más precisos. Por ejemplo, los sistemas con una matriz definida positiva simétrica se pueden resolver dos veces más rápido utilizando la descomposición de Cholesky (Loan, 1996).

Existen métodos especiales también para matrices con muchos elementos cero (denominadas matrices escasas) que aparecen con frecuencia en muchas aplicaciones (Marcus & Mine, 1964.).

#### 4.6.3.10.1 Métodos iterativos.

Para sistemas muy grandes, que con otros métodos llevarían demasiado tiempo u ocuparían demasiada memoria, se suele usar un enfoque completamente diferente. Se comienza con una aproximación inicial a la solución y se van aplicando las fórmulas una y otra vez hallando aproximaciones sucesivas que, si convergen, nos acercan a la solución. Una vez que una aproximación es lo suficientemente precisa, se toma como la solución al sistema (Hopcroft, 1974).

#### 4.6.3.10.2 Sistemas homogéneos

Un sistema de ecuaciones lineales es homogéneo si todos los términos constantes son cero. Un sistema homogéneo es equivalente a una ecuación matricial de la forma  $Ax = 0$  donde  $A$  es una matriz  $m \times n$ ,  $X$  es un vector de columna con  $n$  entradas y  $0$  es el vector cero con  $m$  entradas.

#### 4.6.3.10.3 Conjunto de Soluciones

El sistema homogéneo tiene al menos una solución, conocida como solución cero (o solución trivial), que se obtiene asignando el valor de cero a cada una de las variables. Si el sistema tiene una matriz no singular ( $\det(A) \neq 0$ ) entonces también es la única solución. Si el sistema tiene una matriz singular entonces hay un conjunto de soluciones con un número infinito de soluciones. Este conjunto de soluciones tiene las siguientes propiedades adicionales:

- Si  $u$  y  $v$  son dos vectores que representan soluciones a un sistema homogéneo, entonces la suma vectorial  $u + v$  es también una solución al sistema.
- Si  $u$  es un vector que representa una solución a un sistema homogéneo y  $r$  es cualquier escalar, entonces  $ru$  es también una solución al sistema.

Estas son exactamente las propiedades requeridas para que la solución sea un sub-espacio lineal de  $\mathbb{R}^n$ . En particular, el conjunto de soluciones a un sistema homogéneo es lo mismo que el espacio nulo de la matriz  $A$  correspondiente. Las soluciones numéricas a un sistema homogéneo se pueden encontrar con una descomposición de valor singular.

#### 4.6.3.10.4 Relación con sistemas no homogéneos

Existe una estrecha relación entre las soluciones a un sistema lineal y las soluciones al sistema homogéneo correspondiente:  $Ax = b$  y  $Ax = 0$ . Específicamente, si  $p$  es una solución específica al sistema lineal  $Ax = b$ , entonces todo el conjunto de soluciones puede ser descrito como:

$$Ax = b \text{ y a la vez } Ax = 0$$

Específicamente, si  $p$  es una solución específica al sistema lineal  $Ax = b$ , entonces todo el conjunto de soluciones se puede describir como

$$\{p + v: v \text{ es una solución de } Ax = 0\}$$

Geoméricamente, ésto dice que la solución establecida para  $Ax = b$  es una traslación de la solución establecida para  $Ax = 0$ . Específicamente, el hiperplano para el primer sistema se puede obtener traduciendo el sub-espacio lineal del sistema homogéneo el vector  $p$ .

Este razonamiento sólo se aplica si el sistema  $Ax = b$  tiene al menos una solución. Esto ocurre si y sólo si, el vector  $b$  se encuentra en la imagen de la transformación lineal  $A$ .

#### 4.6.3.10.5 Descomposición LU

En el análisis numérico y el álgebra lineal, la descomposición LU (donde 'LU' significa 'inferior superior' y también denominada factorización LU) descompone o factoriza una matriz como el producto de una matriz triangular inferior y una matriz triangular superior (Okunev & Johnson, 1997). El producto a veces también incluye una matriz de permutación. La descomposición LU es similar a la eliminación gaussiana en matrices. Los ordenadores suelen resolver sistemas de ecuaciones lineales cuadradas utilizando la descomposición LU y también es un paso clave cuando se invierte una matriz, o se calcula el determinante de una matriz. La descomposición LU fue introducida por el matemático Banachiewicz en 1938. (Schwarzenberg-Czerny, 1995)

##### 4.6.3.10.5.1 Definiciones

Sea A una matriz cuadrada. Una factorización LU se refiere a la factorización de A, con ordenamientos y permutaciones de filas y / o columnas, en dos factores, una matriz triangular inferior L y una matriz triangular superior U, tales que  $A = L U$ .

En la matriz triangular inferior todos los elementos por encima de la diagonal son cero, en la matriz triangular superior, todos los elementos por debajo de la diagonal son cero. Por ejemplo, para una matriz A de 3 x 3, su descomposición LU tiene este aspecto:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & 0 & 0 \\ l_{21} & l_{22} & 0 \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ 0 & u_{22} & u_{23} \\ 0 & 0 & u_{33} \end{bmatrix}.$$

Sin un ordenamiento o permutaciones adecuados en la matriz, puede no llegar a materializarse la factorización.

Por ejemplo, es fácil verificar (expandiendo la multiplicación matricial) que

$$a_{11} = l_{11}u_{11}$$

Si,  $a_{11} = 0$  entonces al menos uno de  $l_{11}$  y  $u_{11}$  tiene que ser cero, lo que implica L o U es singular. Esto es imposible si A es no singular. Este problema puede eliminarse simplemente reordenando las filas de A de manera que el primer elemento de la matriz permutada no sea cero. El mismo problema puede ser eliminado de la misma manera en las etapas de factorización siguientes; Vea el procedimiento básico a continuación.

#### *4.6.3.10.5.2 Factorización LU con pivotamiento parcial*

Para realizar la factorización LU es suficiente hacer antes una adecuada permutación en filas (o columnas). La factorización de LU con Pivotamiento Parcial (LUP) se refiere a la factorización LU realizando sólo permutaciones de fila,

$$P A = L U,$$

donde L y U son de nuevo matrices triangulares inferiores y superiores y P es una matriz de permutación que, cuando se multiplica a la izquierda por A, reordena las filas de A. Resulta que todas las matrices cuadradas pueden ser factorizadas de esta forma, (Okunev & Johnson, 1997) y la factorización es numéricamente estable en la práctica (Trefethen & Bau, 1997). Esto hace que la descomposición LUP sea una técnica muy útil en la práctica.

#### *4.6.3.10.5.3 Factorización LU con pivotamiento completo*

Una factorización LU con pivotamiento completo implica tanto permutaciones de fila como de columna,

$$P A Q = LU$$

donde L, U y P se definen como antes y Q es una matriz de permutación que reordena las columnas de A (Trefethen & Bau, 1997).

#### 4.6.3.10.5.4 Descomposición LDU

Una descomposición LDU es una descomposición de la forma

$$A = L D U,$$

donde D es una matriz diagonal y L y U son matrices triangulares unitarias, lo que significa que todos los elementos en las diagonales de L y U son unos.

Arriba se requería que A fuese una matriz cuadrada, pero estas descomposiciones pueden generalizarse también a matrices rectangulares. En este caso, L y D son matrices cuadradas que tienen el mismo número de filas que A y U tiene exactamente las mismas dimensiones que A. El triángulo superior debe ser interpretado como teniendo solamente cero entradas debajo de la diagonal principal, que comienza en la esquina superior izquierda.

Ejemplo:

Factorizamos la siguiente matriz de 2 x 2:

$$\begin{bmatrix} 4 & 3 \\ 6 & 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & 0 \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ 0 & u_{22} \end{bmatrix}$$

Una manera de encontrar la descomposición LU de esta matriz simple sería simplemente resolver las ecuaciones lineales mediante inspección. La expansión de la multiplicación matricial da

$$l_{11} \cdot u_{11} + 0 \cdot 0 = 4$$

$$l_{11} \cdot u_{12} + 0 \cdot u_{22} = 3$$

$$l_{21} \cdot u_{11} + l_{22} \cdot 0 = 6$$

$$l_{21} \cdot u_{12} + l_{22} \cdot u_{22} = 3$$

Este sistema de ecuaciones es indeterminado. En este caso, cualquier par de elementos distintos de cero, de las matrices L y U, son parámetros de la solución y se pueden ajustar arbitrariamente a cualquier valor distinto de cero. Por lo tanto, para encontrar la única descomposición LU, es necesario poner alguna restricción en las matrices L y U. Por ejemplo, podemos hacer que la matriz triangular inferior L sea una matriz triangular unitaria (es decir, establecer todos los elementos de su diagonal principal como unos). Entonces el sistema de ecuaciones tiene la siguiente solución:

$$l_{21} = 1,5$$

$$u_{11} = 4$$

$$u_{12} = 3$$

$$u_{22} = -1,5$$

Sustituyendo estos valores en la descomposición LU de arriba nos da:

$$\begin{bmatrix} 4 & 3 \\ 6 & 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1,5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 & 3 \\ 0 & -1,5 \end{bmatrix}$$

#### 4.6.3.10.6 Existencia y singularidad

##### 4.6.3.10.6.1 Matrices cuadradas

Cualquier matriz cuadrada A admite una factorización LUP (Okunev & Johnson, 1997). Si A es invertible, entonces admite una factorización LU (o LDU) si y sólo si todos sus iniciales menores principales no son cero. (Horn & Johnson, 1985). Si A es una matriz singular de rango k, entonces admite una factorización LU si los primeros k menores principales son distintos de cero, aunque la afirmación contraria no es cierta (Horn & Johnson, 1985).

Si una matriz cuadrada invertible tiene una factorización LDU con todas las entradas diagonales de L y U iguales a 1, entonces la factorización es única

(Horn & Johnson, 1985). En ese caso, la factorización LU también es única si se requiere que la diagonal de L (o U) conste de unos.

#### *4.6.3.10.6.2 Matrices definidas positivas simétricas; descomposición de Cholesky*

Si A es una matriz definida simétrica (o Hermítica, si A es compleja) podemos ordenarla de modo que U es la transpuesta conjugada de L. Ésto es, podemos escribir A como  $A = LL^*$ . Esta descomposición se llama la descomposición de Cholesky. La descomposición de Cholesky siempre existe y es única, siempre que la matriz sea definida positiva. Además, el cálculo de la descomposición de Cholesky es más eficiente y numéricamente más estable que el cálculo de algunas otras descomposiciones LU.

#### *4.6.3.10.6.3 Matrices generales*

Dada una matriz (no necesariamente invertible) definida sobre cualquier campo, son perfectamente conocidas las condiciones necesarias y suficientes con las cuales existe una factorización LU para la matriz. Las condiciones se expresan en términos de las filas de ciertas submatrices. El algoritmo de eliminación gaussiana para obtener la descomposición LU también se ha extendido a este caso más general (Okunev & Johnson, 1997).

#### *4.6.3.10.6.4 Algoritmos*

La descomposición LU es básicamente una forma modificada de eliminación gaussiana. Transformamos la matriz A en una matriz triangular superior U eliminando las entradas bajo la diagonal principal. El algoritmo de Doolittle realiza la eliminación columna por columna a partir de la izquierda, multiplicando A por la izquierda con matrices triangulares inferiores atómicas (una matriz triangular atómica (superior o inferior) es una forma especial de matriz triangular, donde todos los elementos fuera de la diagonal son cero,

excepto los elementos de una columna. Se denominan también de Frobenius, de Gauss o de transformación de Gauss). Se obtiene una matriz triangular inferior unitaria y una matriz triangular superior. El algoritmo de Crout es ligeramente diferente y construye una matriz triangular inferior y una matriz triangular superior unitaria. La descomposición de LU usando cualquiera de estos algoritmos requiere operaciones de punto flotante  $2n^3 / 3$ , ignorando los términos de orden inferior. El pivotamiento parcial añade sólo un término cuadrático (Golub & Van Loan, 1996).

#### 4.6.3.10.6.5 Fórmula cerrada

Cuando existe una factorización LDU, y es única, existe una fórmula cerrada (explícita) para los elementos de L, D y U en términos de divisiones de determinantes de ciertas submatrices de la matriz original A (Householder, 1975). En particular,  $D_1 = A_{1,1}$  y para  $i = 2, 3, \dots, n$ , D es la relación entre la  $i$ -ésima submatriz principal con la submatriz principal  $(i - 1)$ -ésima.

#### 4.6.3.10.6.6 Algoritmo Doolittle

Dada una matriz  $N \times N$ :

$$A = (a_{i,j})_{1 \leq i,j \leq N}$$

se define:

$$A^{(0)} := A$$

Eliminamos los elementos de la matriz debajo de la diagonal principal en la  $n$ -ésima columna de  $A^{(n-1)}$  añadiendo a la  $i$ -ésima fila de esta matriz la  $n$ -ésima multiplicada por:

$$-l_{i,n} := -\frac{a_{i,n}^{(n-1)}}{a_{n,n}^{(n-1)}}$$

para  $i = n + 1, \dots, N$ . Ésto puede hacerse multiplicando  $A^{(n-1)}$  a la izquierda por la matriz triangular inferior atómica.

$$L_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & & \dots & & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & & & \\ & & 1 & & & \\ \vdots & & -l_{n+1,n} & & & \vdots \\ & & \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & & -l_{N,n} & & & 1 \end{pmatrix}.$$

Establecemos:

$$A^{(n)} := L_n A^{(n-1)}$$

después de  $N - 1$  pasos y eliminamos todos los elementos de la matriz debajo de la diagonal principal, por lo que obtenemos una matriz triangular superior  $A^{(N-1)}$ . Encontramos que la composición:

$$A = L_1^{-1} L_1 A^{(0)} = L_1^{-1} A^{(1)} = L_1^{-1} L_2^{-1} L_2 A^{(1)} = L_1^{-1} L_2^{-1} A^{(2)} = \dots = L_1^{-1} \dots L_{N-1}^{-1} A^{(N-1)}$$

denota la matriz triangular superior  $A^{(N-1)}$  por  $U$ , y  $L = L_1^{-1} \dots L_{N-1}^{-1}$ .

Como la inversa de una matriz triangular inferior  $L_n$  es de nuevo una matriz triangular inferior y la multiplicación de dos matrices triangulares inferiores es de nuevo una matriz triangular inferior, se deduce que  $L$  es una matriz triangular inferior. Por otra parte, se puede ver que:

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & & & 0 \\ l_{2,1} & \ddots & \ddots & & & \\ & & 1 & & & \\ \vdots & & l_{n+1,n} & \ddots & & \vdots \\ & & \vdots & & 1 & 0 \\ l_{N,1} & & l_{N,n} & & l_{N,N-1} & 1 \end{pmatrix}.$$

obtenemos:

$$A = LU$$

está claro que por lo que la descomposición LU en general se parece a

$$P^{-1}A = LU$$

#### 4.6.3.10.7 Algoritmos de Crout, LUP y Cormen

El algoritmo de descomposición LUP realizado por Cormen y al. (Cormen, Leiserson, Rivest, & Stein, 2009) generaliza la descomposición de la matriz de Crout y puede describirse de la siguiente manera:

- Si  $A$  tiene una entrada no nula en su primera fila, entonces toma una matriz de permutación  $P_1$  tal que  $AP_1$  tiene una entrada no nula en su esquina superior izquierda. Si no es así, tomar para  $P_1$  la matriz identidad. Sea  $A_1 = AP_1$
- Sea  $A_2$  la matriz que se obtiene de  $A_1$  eliminando la primera fila y la primera columna. Descomponer  $A_2 = L_2U_2P_2$  repetidamente. Hacer  $L$  a partir de  $L_2$  añadiendo primero una fila de ceros arriba y luego añadiendo la primera columna de  $A_1$  a la izquierda.
- Hacer  $U_3$  añadiendo primero una fila de ceros arriba y un columna de ceros a la izquierda y luego reemplazando la entrada izquierda superior (que es 0 en este punto) por 1. Hacer  $P_3$  de una manera similar y definir  $A_3 = A_1 / P_3 = AP_1 / P_3$ . Sea  $P$  el inverso de  $P_1 / P_3$ .
- En este punto,  $A_3$  es el mismo que  $LU_3$ , excepto (posiblemente) en la primera fila. Si la primera fila de  $A$  es cero, entonces  $A_3 = LU_3$ , ya que ambos tienen la primera fila cero y  $A = LU_3P$  sigue, como se desea. De lo contrario,  $A_3$  y  $LU_3$  tienen la misma entrada diferente de cero en la esquina superior izquierda y  $A_3 = LU_3U_1$  para una matriz cuadrada triangular superior  $U_1$  con unos en la diagonal ( $U_1$  borra las entradas de  $LU_3$  y añade las entradas de  $A_3$  por la parte de la esquina superior izquierda).

Ahora  $A = LU_3U_1P$  ya es una descomposición de la forma deseada.

#### 4.6.3.10.8 Algoritmo aleatorizado

Es posible encontrar una aproximación de rango bajo a la descomposición LU utilizando un algoritmo aleatorio. Dada una matriz de entrada  $A$  y un rango bajo deseado  $k$ , la LU aleatorizada devuelve matrices de permutación  $P$ ,  $Q$  y matrices trapezoidales superiores / inferiores:  $L$ ,  $U$ , de tamaño  $m \times k$  y  $k \times n$ , respectivamente, de tal manera que con mucha probabilidad

$$\|PAQ - LU\|_2 \leq C\sigma_{k+1},$$

donde  $C$  es una constante que depende de los parámetros del algoritmo y  $\sigma_{k+1}$  es el  $(k+1)$ ésimo valor singular de la matriz de entrada  $A$ . (Shabat, Shmueli, Aizenbud, & Averbuch, 2016) .

#### 4.6.3.10.9 Algoritmos basados en Coppersmith-Winograd

Si dos matrices de orden  $n$  se pueden multiplicar en el tiempo  $M(n)$ , donde  $M(n) \geq n^a$  para  $a > 2$ , entonces la descomposición LU se puede calcular en el tiempo  $O(M(n))$  (vease “notación  $O$  mayúscula” o de Landau) (Bunch & Hopcroft, 1974). Ésto significa, por ejemplo, que existe un algoritmo que multiplica matrices  $n \times n$  en un tiempo  $O(n^{2.375477})$ , basado en el algoritmo Coppersmith-Winograd.

#### 4.6.3.10.10 Descomposición de matrices dispersas

Se han desarrollado algoritmos especiales de descomposición de matrices para factorizar grandes matrices dispersas. Estos algoritmos intentan encontrar los factores dispersos  $L$  y  $U$ . Idealmente, el tiempo de computación está determinado por el número de entradas no nulas, en lugar del tamaño de la matriz. Estos algoritmos usan la posibilidad de intercambiar filas y columnas para minimizar las entradas que cambian de un valor inicial de cero a un valor distinto de cero durante la ejecución de un algoritmo. El tratamiento general de

los algoritmos de ordenación que minimizan esto se puede resolver utilizando la teoría de los grafos.

#### 4.6.3.10.11 Aplicaciones de los métodos anteriores

##### 4.6.3.10.11.1 Resolución de ecuaciones lineales

Dado un sistema de ecuaciones lineales en forma de matriz  $Ax = b$  queremos resolver la ecuación de  $x$ , dados  $A$  y  $b$ . Supongamos que ya hemos obtenido la descomposición LUP de  $A$ , tal que  $PA = LU$ , por lo que  $LUx = Pb$ . En este caso, la solución se realiza en dos pasos lógicos:

- 1. Primero, resolvemos la ecuación  $Ly = Pb$  para  $y$ ;
- 2. En segundo lugar, resolvemos la ecuación  $Ux = y$  para  $x$ .

Nótese que en ambos casos se trata de matrices triangulares ( $L$  y  $U$ ) que pueden resolverse directamente por sustitución directa y por retroceso, sin utilizar el proceso de eliminación gaussiana (sin embargo necesitamos este proceso o uno equivalente para calcular la propia descomposición LU). El procedimiento anterior puede aplicarse repetidamente para resolver la ecuación varias veces para diferentes  $b$ . En este caso, es más rápido (y más conveniente) hacer una descomposición LU de la matriz  $A$  una vez y luego resolver las matrices triangulares para los diferentes  $b$ , en lugar de utilizar la eliminación gaussiana cada vez. Se podría decir que las matrices  $L$  y  $U$  han "mecanizado" el proceso de eliminación gaussiana.

El costo de resolver un sistema de ecuaciones lineales es de aproximadamente  $2n^3/3$  operaciones de coma flotante si la matriz  $A$  tiene tamaño  $n$ . Esto hace que sea dos veces más rápido que los algoritmos basados en la descomposición QR, que tardan alrededor de  $4n^3 / 3$  operaciones de coma flotante (Trefethen & Bau, 1997).

#### 4.6.3.10.11.2 Inversa de una matriz

Al resolver sistemas de ecuaciones,  $b$  se suele tratar como un vector con una longitud igual a la altura de la matriz  $A$ . En lugar del vector  $b$ , tenemos la matriz  $B$ , donde  $B$  es una matriz  $n \times p$ , por lo que estamos tratando de encontrar una matriz  $X$  (también una matriz  $n \times p$ ) tal que

$$AX = LUX = B.$$

Podemos utilizar el mismo algoritmo presentado anteriormente para resolver cada columna de matriz  $X$ .

Supongamos ahora que  $B$  es la matriz de identidad de tamaño  $n$ . Resultaría que el resultado  $X$  debe ser la inversa de  $A$  (Golub & Van Loan, 1996).

#### 4.6.3.10.11.3 Cálculo del determinante de la descomposición

Dada la descomposición LUP:

$$A = P^{-1}LU$$

de una matriz cuadrada  $A$ , el determinante de  $A$  se puede calcular directamente como

$$\begin{aligned} \det(A) &= \det(P^{-1}) \det(L) \det(U) = \\ &= (-1)^S \left( \prod_{i=1}^n l_{ii} \right) \left( \prod_{i=1}^n u_{ii} \right) \end{aligned}$$

La segunda ecuación se deriva de que el determinante de una matriz triangular es simplemente el producto de su(s) matriz(es) diagonal(es) y que el determinante de una matriz de permutación es igual a  $(-1)^S$  donde  $S$  es el número de intercambios de filas en la descomposición. En el caso de la descomposición LU con pivotamiento completo,  $\det(A)$  también es igual a la segunda parte de la ecuación anterior, si  $S$  es el número total de intercambios de filas y columnas.

El mismo método se aplica fácilmente a la descomposición de LU al establecer P igual a la matriz de identidad.

#### 4.6.3.10.12 Análisis de la autoestructura

##### 4.6.3.10.12.1 Autovectores y autovalores de una matriz

Un vector  $\mathbf{v}$  de dimensión  $n$  (no nulo) se llama vector propio o autovector de una transformación lineal, definida por una matriz cuadrada  $A$  ( $n \times n$ ), si satisface la ecuación lineal

$$A \mathbf{v} = \lambda \mathbf{v}$$

donde  $\lambda$  es un escalar, denominado el autovalor correspondiente a  $\mathbf{v}$ . Es decir, los autovectores son los vectores a los que la transformación lineal  $A$  solo modifica su módulo pero no su dirección y la cantidad que se modifica es el valor propio o autovalor.

De la definición obtenemos:

$$A \mathbf{v} - \lambda \mathbf{v} = [A - \lambda I] \mathbf{v} = 0$$

Ésto nos da una ecuación para hallar los autovalores

$$P(\lambda) = \det(A - \lambda I) = 0$$

$P(\lambda)$  se llama polinomio característico; la ecuación al igualarlo a cero se llama ecuación característica y es una ecuación polinómica de orden  $n$ . Esta ecuación tiene  $N_\lambda$  soluciones distintas, donde  $1 \leq N_\lambda \leq n$ . El conjunto de soluciones, es decir, los autovalores, se llama el espectro de  $A$  (Golub & Van Loan, 1996).

Podemos factorizar  $P$  como:

$$P(\lambda) = (\lambda - \lambda_1)^{n_1} (\lambda - \lambda_2)^{n_2} \dots (\lambda - \lambda_k)^{n_k} = 0$$

El número entero  $n_i$  se denomina multiplicidad algebraica del autovalor  $\lambda_i$ .

Las multiplicidades algebraicas siempre suman  $n$ :

$$\sum_{i=1}^{N_\lambda} n_i = n$$

Para cada autovalor,  $\lambda_i$ , tenemos una ecuación de autovalor específica:

$$(A - \lambda_i I) v = 0$$

Siempre hay  $1 \leq m_i \leq n_i$  soluciones linealmente independientes para cada ecuación de autovalores. Las soluciones  $m_i$  son los autovectores asociados con el autovalor  $\lambda_i$ . El número entero  $m_i$  se denomina multiplicidad geométrica de  $\lambda_i$ . La multiplicidad algebraica  $n_i$  y la multiplicidad geométrica  $m_i$  pueden no ser iguales, pero siempre se cumple  $m_i \leq n_i$ . El caso más simple es, por supuesto, cuando  $m_i = n_i = 1$ . El número total de autovectores linealmente independientes,  $N_v$ , se calcula sumando las multiplicidades geométricas:

$$\sum_{i=1}^{N_\lambda} m_i = n_v$$

Los autovectores pueden ser indexados por autovalores, utilizando un índice doble, con  $v_{i,j}$  siendo el  $j$ -ésimo autovector para el  $i$ -ésimo autovalor. Los autovectores también pueden indexarse utilizando una notación de índice único  $v_k$ , con  $k = 1, 2, \dots, n_v$ .

#### 4.6.3.10.12.2 Descomposición Propia de una matriz

Si  $A$  es una matriz cuadrada ( $n \times n$ ) con  $n$  autovectores linealmente independientes,  $A$  puede factorizarse como:

$$A = Q\Lambda Q^{-1}$$

donde Q es la matriz cuadrada ( $n \times n$ ) cuya  $i$ -ésima columna es el autovector  $q_i$  de A y  $\Lambda$  es la matriz diagonal cuyos elementos diagonales son los correspondientes autovalores, es decir,

$$\Lambda_{ii} = \lambda_i$$

Sólo las matrices diagonalizables pueden factorizarse de esta manera.

Los autovectores  $q_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) normalmente son normalizados, pero no siempre lo son. Un conjunto no normalizado de autovectores,  $v_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), también puede ser utilizado como columnas de Q. Eso se puede entender señalando que la magnitud de los autovectores en Q se anula en la descomposición por la presencia de  $Q^{-1}$ .

La descomposición puede deducirse de la definición de los autovectores:

$$A v = \lambda v$$

y

$$AQ = Q\Lambda$$

que da:

$$A = Q\Lambda Q^{-1}$$

Si cogemos una matriz real:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \end{bmatrix}$$

para descomponerla en una matriz diagonal mediante la multiplicación por una matriz no singular

$$B = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

entonces

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 \\ 0 & y \end{bmatrix}$$

se cumplirá para alguna matriz diagonal real como:

$$\begin{bmatrix} x & 0 \\ 0 & y \end{bmatrix}$$

Multiplicando por la izquierda por B, desplazamos B hacia la derecha de la igualdad:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x & 0 \\ 0 & y \end{bmatrix}$$

La ecuación anterior se puede descomponer en 2 ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ax \\ cx \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} by \\ dy \end{bmatrix} \quad (2)$$

Factorizando x e y

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ c \end{bmatrix} = x \begin{bmatrix} a \\ c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ d \end{bmatrix} = y \begin{bmatrix} b \\ d \end{bmatrix}$$

siendo,

$$\vec{a} = \begin{bmatrix} a \\ c \end{bmatrix}, \vec{b} = \begin{bmatrix} b \\ d \end{bmatrix},$$

nos dan dos ecuaciones vectoriales:

$$A\vec{a} = x\vec{a}$$

$$A\vec{b} = y\vec{b}$$

que pueden ser representadas por una ecuación vectorial única que tiene 2 soluciones

$$A\mathbf{u} = \lambda\mathbf{u}$$

Donde  $\lambda$  representa los dos autovalores  $x$  e  $y$ , y  $\mathbf{u}$  representa los vectores  $\mathbf{a}$  y  $\mathbf{b}$ .

Dado que B no es singular,  $\mathbf{u}$  no puede ser cero. Por eso:

$$(A - \lambda I) = 0$$

Considerando el determinante de  $(A - \lambda I)$  igual a cero

$$\begin{vmatrix} 1 - \lambda & 0 \\ 1 & 3 - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

y así queda:

$$(1 - \lambda)(3 - \lambda) = 0$$

Dando las soluciones de los autovalores de la matriz A:

$$\lambda = 1 \text{ y } \lambda = 3$$

y la matriz diagonal resultante a partir de la descomposición propia de A es

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$$

Poniendo las soluciones en las ecuaciones anteriores queda:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ c \end{bmatrix} = 1 \begin{bmatrix} a \\ c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ d \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} b \\ d \end{bmatrix}$$

Resolviendo las ecuaciones, tenemos:

$$a = -2c, \forall a \in \mathbb{R}$$

y

$$b = 0, \forall d \in \mathbb{R}$$

Así, la matriz B necesaria para la descomposición propia de A es:

$$\begin{bmatrix} -2c & 0 \\ c & d \end{bmatrix} \quad / \quad [c, d] \in \mathbb{R}$$

Por ejemplo:

$$\begin{bmatrix} -2c & 0 \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2c & 0 \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \quad / [c, d] \in \mathbb{R}$$

#### 4.6.3.10.12.2.1 *Matriz inversa mediante la descomposición propia*

Si la matriz A puede ser descompuesta en su estructura propia y si ninguno de sus autovalores es cero, entonces A es no singular y su inversa está dada por:

$$A^{-1} = Q\Lambda^{-1}Q^{-1}$$

Como  $\Lambda$  es una matriz diagonal, su inversa es:

$$[\Lambda^{-1}]_{ii} = \frac{1}{\lambda_i}$$

Cuando la descomposición propia se utiliza sobre una matriz de datos reales y todos los autovalores se utilizan sin modificar en la forma anterior, la inversa puede ser menos válida. Ésto se debe a que a medida que los autovalores se hacen relativamente pequeños, su contribución a la inversión es grande (Throne & Olson, 1994). Aquellos que están cerca de cero o del nivel del "ruido" del sistema de medición tienen una influencia indebida y pueden invalidar las soluciones usando la inversa (Hayde, Twede, & Shen, 2002).

Hay dos soluciones a este problema:

- Eliminar los autovalores que sean próximos a cero o cero.
- Sustituir por el autovalor confiable más bajo aquellos que están por debajo de él.

El primer método es como utilizar una versión dispersa de la matriz original, eliminando los componentes que no se consideran valiosos. Sin embargo, si la solución o el nivel de error del proceso de toma de datos están cerca del nivel de ruido, el truncamiento puede eliminar componentes que influyen en la solución deseada.

El segundo método extiende el autovalor confiable más bajo a los que están por debajo de él, de modo que los valores inferiores tienen mucha menos influencia sobre la inversión, pero todavía contribuyen, de tal manera que las soluciones que están cerca del ruido todavía se pueden hallar.

El valor propio confiable más bajo se puede encontrar suponiendo que los autovalores de valor bajo y muy similar son el ruido de la medida (que se asume bajo para la mayoría de los sistemas). Si los autovalores se ordenan por sus valores, se puede encontrar el autovalor confiable más bajo minimizando el Laplaciano de los autovalores clasificados (Twede & Hayden, 2004):

$$\min |\nabla^2 \lambda_s|$$

donde los autovalores tienen subíndice con una 's' para denotar que son ordenados. La posición de la minimización es el autovalor confiable más bajo. La raíz cuadrada de este autovalor confiable es el ruido medio sobre los componentes del sistema.

#### 4.6.3.10.12.3 Series de potencias de matrices

La descomposición propia permite un cómputo mucho más fácil de las series de potencias de matrices.

Si  $f(x)$  es:

$$f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots$$

entonces sabemos que,

$$f(A) = Q f(\Lambda) Q^{-1}$$

Al ser  $\Lambda$  una matriz diagonal, las funciones de  $\Lambda$  son fáciles de calcular:

$$[f(\Lambda)]_{ii} = f(\lambda_i)$$

Los elementos fuera de la diagonal de  $f(\Lambda)$  son cero, o sea, es también una matriz diagonal. Por lo tanto, el cálculo de  $f(A)$  se reduce a calcular la función para cada uno de los autovalores.

De forma más general, una técnica similar funciona con el cálculo funcional holomorfo, usando:

$$A^{-1} = Q \Lambda^{-1} Q^{-1}$$

Una vez más, encontramos que:

$$[f(\Lambda)]_{ii} = f(\lambda_i)$$

Para  $A^2$  es:

$$A^2 = (Q\Lambda Q^{-1})(Q\Lambda Q^{-1}) = Q\Lambda(Q^{-1}Q)\Lambda Q^{-1} = Q\Lambda^2 Q^{-1}$$

Para  $A^n$  es:

$$A^n = Q\Lambda^n Q^{-1}$$

#### 4.6.3.10.12.3.1 *Descomposición para matrices especiales*

##### 4.6.3.10.12.3.1.1 Matrices normales

Una matriz normal compleja ( $A^* A = A A^*$ ) tiene una base de autovectores ortogonales, por lo que una matriz normal se puede descomponer como:

$$A = U\Lambda U^*$$

donde  $U$  es una matriz unitaria. Además, si  $A$  es Hermítica ( $A = A^*$ ), lo que implica que también es normal compleja, la matriz diagonal  $\Lambda$  sólo tiene valores reales y si  $A$  es unitaria,  $\Lambda$  toma todos sus valores en el círculo unitario complejo.

##### 4.6.3.10.12.3.1.2 Matrices simétricas reales

Para una matriz real simétrica  $n \times n$ , los autovalores son reales y los autovectores se pueden elegir de tal manera que sean ortogonales entre sí. Así, una matriz simétrica real  $A$  puede descomponerse de la forma:

$$A = Q\Lambda Q^T$$

en la que  $Q$  es una matriz ortogonal y  $\Lambda$  es una matriz diagonal cuyos elementos son los autovalores de  $A$ .

#### 4.6.3.10.12.3.2 Propiedades

##### 4.6.3.10.12.3.2.1 Propiedades de los autovalores

El producto de los autovalores es igual al determinante de A

$$\det(A) = \prod_{i=1}^{N_\lambda} \lambda_i^{n_i}$$

Cada autovalor se eleva a la potencia  $n_i$ , (su multiplicidad algebraica).

La suma de los autovalores es igual a la traza de A:

$$\text{tr}(A) = \sum_{i=1}^{N_\lambda} n_i \lambda_i$$

Cada autovalor se multiplica por  $n_i$ , (su multiplicidad algebraica)

- Si los autovalores de A son  $\lambda_i$ , y A es invertible, entonces los autovalores de  $A^{-1}$  son simplemente  $\lambda_i^{-1}$
- Si los autovalores de A son  $\lambda_i$ , entonces los autovalores de  $f(A)$  son simplemente  $f(\lambda_i)$  para cualquier función holomorfa f.

##### 4.6.3.10.12.3.2.2 Propiedades de los autovectores

- Si A es Hermítica y su rango es el mayor posible, la base de los autovectores puede ser elegida para que sean mutuamente ortogonales. Los autovalores son reales.
- Los autovectores de  $A^{-1}$  son los mismos que los autovectores de A.
- Los autovectores se definen hasta una fase, es decir, si también es un autovector, y específicamente también lo es  $-v$
- En el caso de autovalores degenerados (los autovalores que aparecen más de una vez), los autovectores tienen una libertad adicional de rotación, es decir, cualquier combinación lineal (ortonormal) de

autovectores que comparten un autovalor (es decir, en el sub-espacio degenerado) son ellos mismos autovectores (es decir, en el sub-espacio).

#### 4.6.3.10.12.3.2.3 Propiedades de la descomposición propia

- A puede ser descompuesta en su estructura propia, si y sólo si,  $N_v = N$ .
- Si  $p(\lambda)$  no tiene raíces repetidas, es decir  $N_\lambda = N$ , entonces A puede ser descompuesta en su estructura propia.
- La afirmación "A puede ser descompuesta en su estructura propia" no implica que A tenga una inversa.
- La afirmación "A tiene una inversa" no implica que A pueda ser descompuesta en su estructura propia.

#### 4.6.3.10.12.3.2.4 Propiedades de la matriz inversa

A se puede invertir, si y sólo si,  $\lambda_i \neq 0 \forall i$

Si  $\lambda_i \neq 0 \forall i$  y  $N_v = N$ , la inversa se halla con  $A^{-1} = Q\Lambda^{-1}Q^{-1}$

#### 4.6.3.10.12.4 Cálculos numéricos de autovalores

Para calcular los autovalores de una matriz, si la matriz es pequeña, podemos calcularla usando el polinomio característico. Para matrices más grandes, se utiliza un método numérico.

Los autovalores de matrices grandes no se calculan usando el polinomio característico. El cálculo del polinomio característico es costoso y las raíces exactas de un polinomio de grado alto son difíciles de calcular y expresar:

El teorema de Abel-Ruffini dice que las raíces de polinomios de grado alto (5 o más) no pueden expresarse, en general, simplemente usando

n-ésimas raíces. Por lo tanto, los algoritmos para encontrar autovectores y autovalores son iterativos.

Existen algoritmos numéricos de aproximación para aproximar raíces de polinomios, como el método de Newton, pero en general es poco práctico calcular el polinomio característico y luego aplicar estos métodos. La razón es que los pequeños errores de redondeo en los coeficientes del polinomio característico pueden conducir a errores grandes en los autovalores y autovectores pues las raíces son una función extremadamente mal condicionada de los coeficientes (Trefethen & Bau, 1997).

Un método iterativo simple y preciso es el método de las potencias: se elige un vector aleatorio y se calcula una secuencia de vectores unitarios.

$$\frac{Av}{\|Av\|}, \frac{A^2v}{\|A^2v\|}, \frac{A^3v}{\|A^3v\|}, \dots$$

Esta secuencia converge generalmente a un autovector correspondiente al autovalor de mayor magnitud, siempre que  $v$  tenga una componente no nula de este autovector en la base del autovector (y también siempre que sólo haya un autovalor más grande).

Este algoritmo simple es muy útil en aplicaciones prácticas: Por ejemplo, Google lo utiliza para calcular el rango de la página de los documentos en su motor de búsqueda (Ipsen & Wills, 2005). Además, el método de las potencias es el punto de partida para muchos algoritmos más sofisticados.

Si no sólo miramos el último vector de la secuencia sino a la amplitud de todos los vectores de la secuencia, se puede obtener una aproximación mejor (de más rápida convergencia) para el autovector y esta idea es la base de la iteración de Arnoldi (Trefethen & Bau, 1997).

El algoritmo QR, muy importante, también se basa en una transformación del método de las potencias (Trefethen & Bau, 1997).

#### 4.6.3.10.12.5 *Cálculo numérico de autovectores*

Una vez calculados los autovalores, los autovectores se pueden calcular resolviendo la ecuación:

$$(A - \lambda_i I) v_{i,j} = 0$$

usando la eliminación gaussiana o cualquier otro método para resolver ecuaciones matriciales.

Sin embargo, en los métodos de cálculo de autovalores prácticos, a gran escala, los autovectores se calculan normalmente como un producto derivado del cálculo del autovalor.

En la iteración de las potencias, por ejemplo, el autovector se calcula antes que el autovalor (que se calcula normalmente por el cociente de Rayleigh del autovector) (Trefethen & Bau, 1997).

En el algoritmo QR para matrices Hermíticas (o cualquier matriz normal), los autovectores ortonormales se obtienen como un producto de las matrices Q a partir de los pasos del algoritmo (Horn & Johnson, 1985). Para matrices más generales, el algoritmo QR produce primero la descomposición de Schur, a partir de la cual se pueden obtener los autovectores por un procedimiento de sustitución posterior.

Para matrices Hermíticas, el algoritmo divide y vencerás de autovalores es más eficiente que el Algoritmo QR si queremos tanto los autovectores como los autovalores (Trefethen & Bau, 1997).

#### 4.6.3.10.12.5.1 *Autoespacios generalizados*

Recordando que la multiplicidad geométrica de un autovalor se puede describir como la dimensión del autoespacio asociado -el espacio nulo de  $(\lambda I - A)$ -, la multiplicidad algebraica también puede ser asimilada a una dimensión: es la

dimensión del autoespacio generalizado asociado (1er sentido), que es el espacio nulo de la matriz  $(\lambda I - A)$  para cualquier  $\lambda$  suficientemente grande. Es decir, es el espacio de autovectores generalizados (1er sentido), donde un autovector generalizado es cualquier vector que finalmente se convierte en 0 si se le aplica  $(\lambda I - A)$  suficientes veces. Cualquier autovector es un autovector generalizado, por lo que cada autoespacio está contenido en el autoespacio generalizado asociado. Ésto proporciona una prueba fácil de que la multiplicidad geométrica es siempre menor o igual a la multiplicidad algebraica.

Este uso no debe confundirse con el problema del autovalor generalizado que se describe a continuación.

#### 4.6.3.10.12.5.2 *Autovector conjugado*

Un autovector conjugado es un vector enviado después de la transformación a un múltiplo escalar de su conjugado, donde el escalar se denomina autovalor conjugado de la transformación lineal. Los autovectores conjugados y los autovalores conjugados representan esencialmente la misma información y significado que los vectores y autovalores regulares, pero surgen cuando se utiliza un sistema de coordenadas alternativo. La ecuación correspondiente es:

$$Av = \lambda v^*$$

Por ejemplo, en la teoría de dispersión electromagnética coherente, si la transformación lineal  $A$  representa la acción realizada por el objeto de dispersión, los autovectores representan los estados de polarización de la onda electromagnética. En óptica, el sistema de coordenadas se define desde el punto de vista de la onda, conocido como Alineación de dispersión hacia delante y da lugar a una ecuación de autovalores regular, mientras que en radar, el sistema de coordenadas se define desde el punto de vista del radar, conocido como Alineación de dispersión posterior (BSA) y da lugar a una ecuación de autovalores conjugados.

4.6.3.10.12.5.3 *Problema de autovalor generalizado*

Un problema de autovalor generalizado (2do sentido) es un problema en el que hay que encontrar un vector  $v$  que cumple:

$$A v = \lambda B v$$

donde  $A$  y  $B$  son matrices. Si  $v$  cumple esta ecuación, con algunos  $\lambda$ , entonces llamamos a  $v$  el autovector generalizado de  $A$  y  $B$  (en el segundo sentido) y a  $\lambda$  se le llama el autovalor generalizado de  $A$  y  $B$  (en el segundo sentido) que corresponde al autovector generalizado  $v$ . Los valores posibles de  $\lambda$  deben cumplir la siguiente ecuación:

$$\det (A - \lambda B) = 0$$

En el caso en que podamos encontrar  $n \in \mathbb{N}$  vectores linealmente independientes  $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  de modo que para cada  $i \in \{1, \dots, n\}$ ,  $Av_i = \lambda_i v_i$ , donde  $\lambda_i \in F$  entonces definimos las matrices  $P$  y  $D$  tales que:

$$P = \begin{bmatrix} | & & | \\ v_1 & \dots & v_n \\ | & & | \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} (v_1)_1 & \dots & (v_n)_1 \\ \vdots & & \vdots \\ (v_1)_n & \dots & (v_n)_n \end{bmatrix}$$

$$(D)_{ij} = \begin{cases} \lambda_i & \text{si } i = j \\ 0 & \text{resto de casos} \end{cases}$$

Entonces tenemos la siguiente igualdad:

$$A = B P D P^{-1}$$

Y la prueba es:

$$AP = A \begin{bmatrix} | & & | \\ v_1 & \dots & v_n \\ | & & | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} | & & | \\ Av_1 & \dots & Av_n \\ | & & | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} | & & | \\ \lambda_1 Bv_1 & \dots & \lambda_n Bv_n \\ | & & | \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} | & & | \\ Bv_1 & \dots & Bv_n \\ | & & | \end{bmatrix} D = B P D$$

Y, ya que  $P$  es invertible, multiplicamos la ecuación de la derecha por su inversa, terminando la prueba.

Si  $B$  es invertible, entonces el problema original puede escribirse en la forma:

$$B^{-1}Av = \lambda v$$

que es un problema de autovalor estándar. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones es preferible no realizar la inversión, sino más bien resolver el problema del autovalor generalizado tal como se indicó originalmente. Ésto es especialmente importante si  $A$  y  $B$  son matrices Hermíticas, ya que en este caso  $B^{-1}A$  no es normalmente Hermítica y ya no se cumplen propiedades importantes de la solución.

Si  $A$  y  $B$  son Hermíticas y  $B$  es una matriz positiva definida, los autovalores  $\lambda$  son reales y los autovectores  $v_1$  y  $v_2$  con autovalores distintos son  $B$ -ortogonales ( $v_1^* B v_2 = 0$ ), (Parlett, 1998). Además, en este caso se garantiza que existe una base de autovectores generalizados (no es un problema defectuoso) (Bai, Demmel, Dongarra, Ruhe, & Van Der Vorst, 2000).



## 5. SELECCIÓN DE UN MÉTODO DE RESOLUCIÓN DE LA MTCMI: ANÁLISIS DE LA AUTOESTRUCTURA

Una vez revisados de forma sistemática los anteriores métodos para resolución de sistemas lineales con muchas variables interrelacionadas, para mejorar la eficiencia de la gestión de la empresa de transporte urbano, se presenta el siguiente cuadro de métodos de resolución de sistemas lineales con el resumen y sus ventajas e inconvenientes:

Método	Ventajas o inconvenientes para este caso
Eliminación de variables	Cálculo muy incómodo en matrices grandes
Eliminación gaussiana	Cálculo muy incómodo en matrices grandes
Regla de Cramer	Cálculo muy incómodo y poca exactitud en matrices grandes
Solución matricial	Si $AA^+b = b$ no se cumple, el sistema de ecuaciones es inconsistente y no tiene solución.
Descomposición LU	No siempre es posible. A debe ser invertible.
Descomposición de Cholesky	Sólo vale cuando la matriz es definida positiva simétrica.
Descomposición LDU	Si A es invertible, entonces admite una factorización LDU si y sólo si todos sus menores principales no son cero.
Descomposición LUP	Cualquier matriz cuadrada A admite una factorización LUP.
Algoritmo de Doolittle para LUP	Para que este algoritmo funcione, se necesita tener $a_{n,n}^{(n-1)} \neq 0$ en cada paso (véase la definición de $l_{i,n}$ ). Si esta suposición falla en algún punto, es necesario intercambiar la n-ésima fila con otra fila debajo de ella antes de continuar.
Algoritmo de Crout / Cormen	Funciona bien pero engorroso.
Algoritmo aleatorio	No vale siempre, sólo cuando $\ PAQ - LU\ _2 \leq C\sigma_{k+1}$
Algoritmos basados en Coppersmith-Winograd	Vale siempre pero se necesita disponer de programas de ordenador caros

Algoritmos para matrices dispersas	Estos algoritmos intentan encontrar los factores dispersos L y U. El tiempo de computación está determinado por el número de entradas no nulas, en lugar del tamaño de la matriz.
Descomposición QR	Demasiado lento para matrices grandes.
Métodos iterativos	Válidos pero a veces tardan en converger a una solución aceptable.
Determinante descomposición LUP	Un poco tedioso pero válido.
Análisis de la autoestructura	Complejo pero posible en todas las circunstancias.

**Tabla 5-1; Métodos de resolución de SL**

**Fuente; Elaboración propia**

Los métodos que se exponen en el cuadro, son todos útiles, en una o en otra circunstancia, pero por el condicionamiento del problema, y el tipo de KPI escogidos y sus relaciones, la matriz resultante no siempre tendrá las mismas propiedades. Por ello, hemos preferido describir todos los métodos de resolución y de análisis de las soluciones que se pueden necesitar en este tipo de problema, dependiendo de si la matriz es invertible o no, Hermítica o no, etc. De esta forma aunque nos salga en un problema una matriz no invertible hemos descrito las herramientas matemáticas que nos permiten su análisis.

De igual forma, las herramientas matemáticas que se describen inicialmente para modificar la matriz y hacerla descomponible en multiplicación de 2 o 3 matrices, se derivan de los métodos descritos inicialmente como la eliminación Gaussiana, etc.

Para el problema más típico, en el que la matriz es descomponible en su estructura propia, escogeremos siempre la metodología de Descomposición propia de la Matriz con la cual se realizará el Análisis de la Matriz de Transformación de los Costes de Mejora de los KPI, por las siguientes razones:

- En primer lugar, por su rapidez (Cai, Liu, Xiao, & Liu, 2009).
- En segundo lugar, porque ha sido probada en muchas áreas con resultados excelentes, Eppinger (1996) .

- En tercer lugar, porque es un método que, si bien no da una solución exacta del problema como otros métodos de resolución de sistemas lineales, si nos permite muy fácilmente ver cuáles son los elementos que más contribuyen a la solución y cuales los que influyen más en ellos.

Esta metodología se debería aplicar idealmente, dada su rapidez, en un bucle de realimentación entre los tres pasos del ciclo ampliado de gestión de la eficiencia, es decir, entre establecer objetivos, modelizar y planificar (Cai, Liu, Xiao, & Liu, 2009).

El sistema consta de los siguientes pasos:

- Primero, los directivos escogen los KPI a utilizar y definen las relaciones entre ellos.
- A continuación, se estiman los costes de mejora de cada uno de estos KPI y se estudian sus interdependencias.
- Luego, se utiliza una herramienta de cálculo algebraico para la optimización (simulación con ordenador del análisis de la estructura de autovalores de la matriz) para estimar la convergencia del coste total de la Mejora de los objetivos de los KPI y para encontrar los KPI críticos y sus patrones de mejora.
- Por último, mediante la interpretación de los resultados del análisis se ajusta la estrategia de gestión de la eficiencia.

Los siguientes puntos tratan los detalles de esta metodología.

## **5.1 Identificación de los KPI y modelización de sus relaciones**

Los directivos de las empresas de transporte urbano identifican los KPI por su experiencia práctica y para obtener una medición sistemática o equilibrada de la eficiencia; a menudo recurren a modelos desarrollados por Observatorios de Transporte o por Proyectos de Benchmarking y los utilizan en sistemas equilibrados de gestión como el Cuadro de Mando Integral.

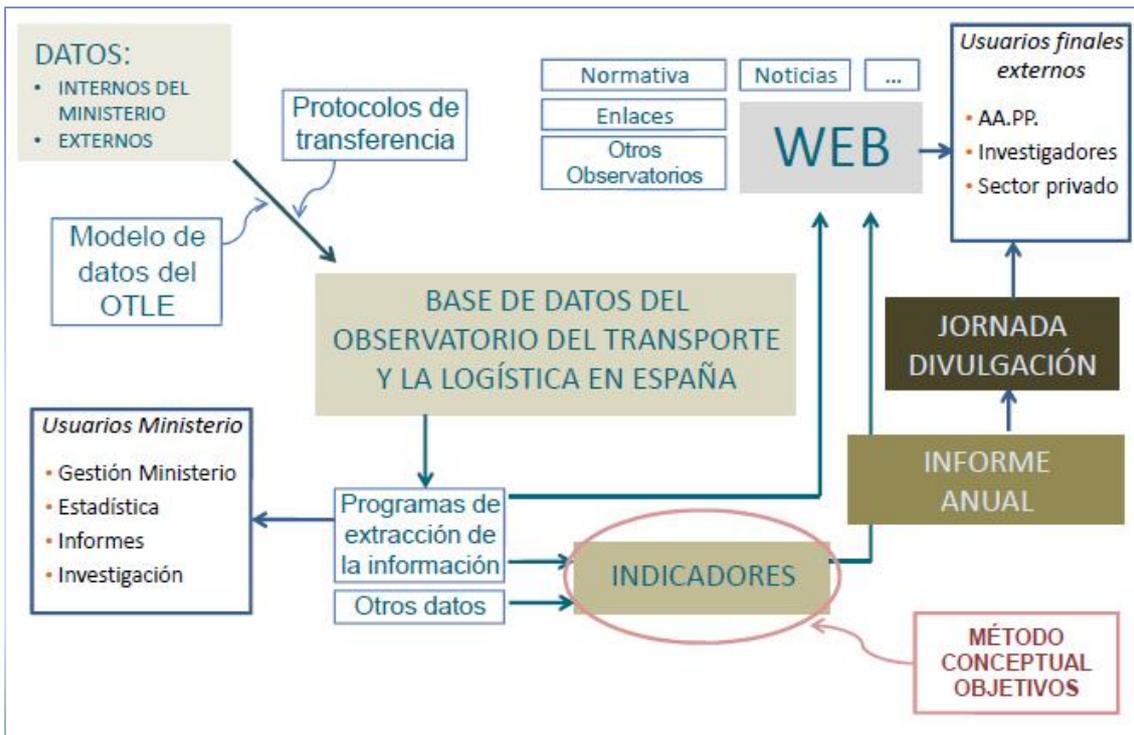


Imagen 5-1; Los KPI del Observatorio del Transporte y la Logística.

Fuente: Iglesias Pérez, Casimiro (2014)

Debido a las características intrínsecas de las empresas de transporte urbano, los KPI que utilizaremos son el conjunto de KPI desarrollados anteriormente, que recoge las métricas más usadas en las mayores empresas de transporte urbano, para identificar las medidas básicas de eficiencia y los KPI.

El sistema de medición propuesto incluye las 6 categorías de KPI:

- Crecimiento y Aprendizaje
- Cliente
- Procesos Internos
- Seguridad
- Financieros
- Medio Ambientales

En la Tabla 4-20 se dan los KPI que se han identificado y seleccionan como KPI básicos por (Randall, Condry, & Trompet, 2007).

En la práctica, la mayoría de los KPI en una empresa de transporte urbano están correlacionados y tienen interacciones causa-efecto. Ésto implica que la mejora de los objetivos de los KPI es un proceso muy complejo e interactivo. Como ya dijimos, es normal que el intento de mejora del objetivo de un KPI cause un coste o esfuerzo adicional para otros KPI, debido a varias razones tales como: que su definición los hace opuestos, que la información manejada por los departamentos sea incompleta, que los recursos sean limitados o que haya problemas de comunicación.

Para representar correctamente las relaciones entre los KPI, hay que identificar primero el tipo de relación y el nivel de correlación entre ellos.

<b>KPI correlacionados</b>	
Coste total / km u horas vehículos totales reales	Porcentaje de paradas de autobús con la información del cliente
Coste total de operación / km u horas vehículos comerciales reales	Porcentaje de la flota que cumple los estándares de emisiones EURO
Coste total de operación / km u horas vehículos comerciales reales	Número de horas de formación de conductores por horas de conductor
Coste total de mantenimiento / km u horas vehículos comerciales reales	Porcentaje de incremento en los km comerciales
Tasa de absentismo de conductores	Coste total de administración / horas vehículos comerciales reales
Ingresos por tarifa por embarque de pasajeros	Km de pasajeros / ingresos reales por km de vehículos
Coste total de administración / horas vehículos comerciales reales	Grado de implementación de las normas medioambientales EMAS o ISO 14.000 en la empresa
Número de accidentes por cada 10.000 horas totales de trabajo de los vehículos	Horas de conducción reales totales / horas totales de conductor
Ingresos comerciales totales (categorías) / coste total de la operación	Vehículos con estándar de emisiones más elevada de lo exigido por la ley

Porcentaje de variación en los km comerciales	Ingresos comerciales totales / coste total de la operación
---	--

Tabla 5-2; KPI correlacionados en empresas de transporte urbano.

Fuente: Elaboración propia

El tipo de relación entre los KPI puede ser de tres categorías: paralela, secuencial y acoplada.

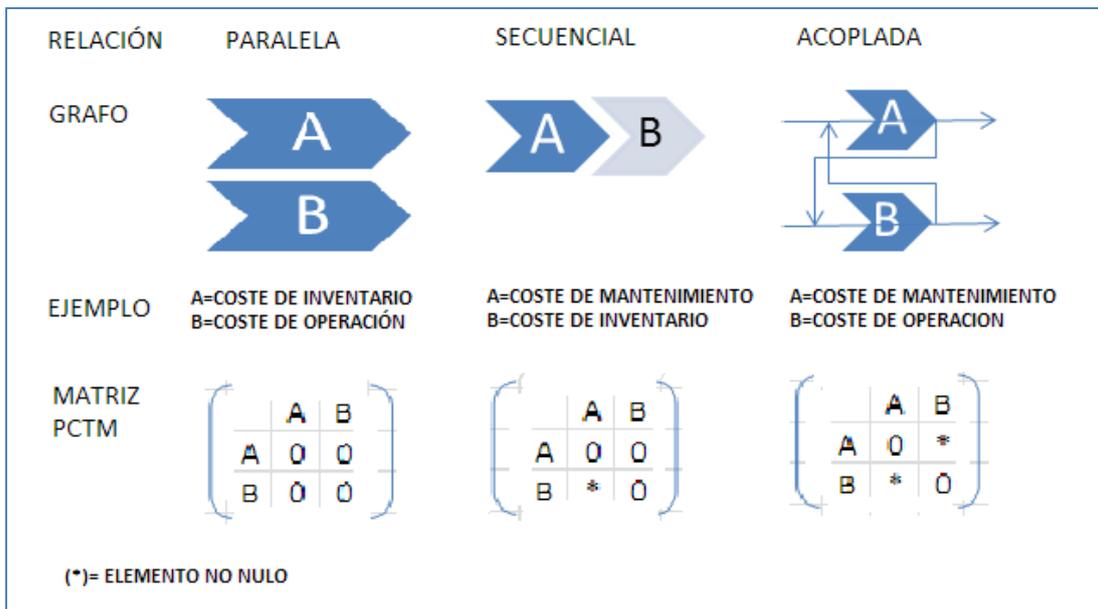


Imagen 5-2; Relaciones entre esfuerzos de mejora de los KPI.

Fuente: Smith y Eppinger (1991)

Una **relación paralela** es una relación en la que dos KPI son independientes entre sí, es decir, los esfuerzos de mejora de estos KPI no están relacionados, como los costes de inventario y los costes de operación.

Una **relación secuencial** implica una relación causa-efecto. El esfuerzo de mejora de un KPI causa un coste extra para el otro. Por ejemplo, los esfuerzos realizados para alcanzar el KPI objetivo de "costes de inventario" generalmente llevarán a esfuerzos y/o gastos adicionales para lograr el KPI "coste de mantenimiento" pues los vehículos más baratos se estropearán más. La dependencia inversa no se da siempre.

En una **relación acoplada** los esfuerzos de mejora del objetivo de un KPI dependen de los esfuerzos de mejora del objetivo de otro. Un ejemplo es la relación entre los esfuerzos de mejora del "coste de mantenimiento" y del "coste de operación" en una empresa de transporte urbano. Si intentamos bajar el coste de mantenimiento cuando ya está en el mínimo, vamos a tener más averías en la calle y tendremos que poner más conductores con autobuses extra para suplir a los que se averíen, con lo que aumentará el coste de operación, y viceversa, cuando aumentamos/disminuimos el coste de operación bien aumentando/disminuyendo el número de kilómetros o el número de autobuses operativos, nos aumenta/disminuye el coste de mantenimiento.

Si por ejemplo usamos para una empresa los siguientes KPI:

- A: coste de inventario
- B: coste de operación
- C: flexibilidad de compras
- D: flexibilidad de operación

La matriz de relación sería

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & X & X \\ X & 0 & X & X \\ X & X & 0 & X \\ X & 0 & X & 0 \end{bmatrix}$$

a la que se le pueden agregar coeficientes en vez de X para denotar la fuerza de la relación. Los coeficientes pueden ser del valor que se desee, pero para facilitar la convergencia luego deben de pasarse a coeficientes entre 0 y 1.

## 5.2 Uso de lógica difusa. Aplicación de coeficientes de ponderación a la matriz.

La Matriz de Transformación de Costes de Mejora de cada KPI (o MTCMI) representa las dependencias entre los esfuerzos de mejora de los objetivos de cada uno de los KPI de una manera estructurada.

Mejorar el objetivo de un KPI en una columna provoca un coste adicional para la mejora de un objetivo de un KPI en una fila. Todos los elementos no nulos de la matriz representan el grado de dependencia entre los costes de mejora de los objetivos de los KPI, tal como se define más adelante.

Hay muchas maneras de obtener los coeficientes de ponderación de la influencia de un KPI en otro para generar la MTCMI de una empresa. Aquí es donde se introduce la lógica difusa que hemos visto antes. Para manejar datos que no son completamente conocidos, debemos usar herramientas de lógica difusa que nos permiten trabajar con probabilidades o datos no conocidos perfectamente. En este caso, los coeficientes de ponderación los estimaremos usando un conjunto de datos y conocimientos que nos permitan trabajar; por ejemplo, utilizaremos una tormenta de ideas, los datos históricos, el método Delphi (técnica desarrollada como un método de predicción sistemático interactivo, que se basa en un panel de expertos.), herramientas basadas en encuestas, etc. Cualquiera que sea el medio que se adopte, debemos esforzarnos para definir lo mejor posible las relaciones entre los KPI. Una matriz hecha con KPI mal interdependientes es más difícil de calcular y da resultados sin mucho sentido.

Operativa:

Se predefine una escala y se asigna un valor dado a cada relación por parejas (Imagen 5-2). Por ejemplo:

- 0 a 'no' dependencia
- 0,05 a 'baja' dependencia (5% de coste adicional)
- 0,10 a 'media' dependencia (10% de coste adicional)
- 0,25 a 'alta' dependencia (10% de coste adicional)
- 1 a "completa" dependencia (100% de coste adicional).

Haciéndolo así queda una matriz como la siguiente:

		A	B	C	D	
M=	A	COSTES DE INVENTARIO	0	0	0,25	0,1
	B	COSTE DE OPERACIÓN	0,1	0	0,1	0,05
	C	FLEXIBILIDAD DE COMPRAS	0,05	0,05	0	0,25
	D	FLEXIBILIDAD DE OPERACIÓN	0,1	0	0,1	0

Tabla 5-3; Matriz de transformación del coste de la mejora de los KPI.

Fuente: elaboración propia.

La siguiente matriz usada en esta metodología es la Matriz de los Costes de Mejora de los objetivos de los KPI o abreviadamente: Matriz de Costes de KPI (o MCI) que cuantifica los costes de tiempo, dinero y otros recursos necesarios para la mejora de los objetivos de los KPI.

Cada elemento en la matriz define el coste unitario para la mejora de un determinado KPI (Tabla 5-4).

		A	B	C	D
M =	A	INDICADOR DE COSTES DE INVENTARIO	1		
	B	INDICADOR DE COSTE DE OPERACIÓN		0,8	
	C	INDICADOR DE FLEXIBILIDAD DE COMPRAS			0,7
	D	INDICADOR DE FLEXIBILIDAD DE OPERACIÓN			

Tabla 5-4; Matriz de coste de mejora de los KPI (PCM).

Fuente: elaboración propia.

Los elementos de la Matriz de Costes de Mejora de los objetivos de los KPI (MCI) se pueden obtener mediante el método del Coste Basado en la Actividad (o CBA) que establece el coste de cada actividad relacionada con la producción de un servicio concreto y se lo imputa a ese servicio, en vez de distribuir los gastos generales de la empresa uniformemente entre todos los servicios prestados.

Este enfoque trata, fundamentalmente, a los KPI como objetos de coste. Utiliza los costes de las actividades como base para asignar los costes a los otros sujetos de coste, como los servicios (productos en otras empresas).

### 5.3 Mejora de los Objetivos de los KPI

Una vez que se identifican las relaciones entre los costes de Mejora de los objetivos de los KPI y se codifican en la matriz, el siguiente paso es simular el proceso de Mejora de los KPI y estimar el coste total.

A continuación, se podrán identificar aquellos KPI que son más importantes para la mejora de la eficiencia general.

El algoritmo que utilizaremos para el “Análisis de la MTCMI” es el LUP junto con el análisis de la estructura de autovalores de la matriz MTCMI. Este método permite observar el comportamiento de un sistema complejo y se utiliza en muchos otros campos.

Por ejemplo, el método de la Matriz de Estructura de Diseño (o MED), que fue desarrollado para simular la influencia de cada una de las mejoras en el total de los procesos de ingeniería de diseño en el sector del diseño y fabricación de automóviles, utiliza el análisis de la estructura de autovalores de la matriz para obtener el tiempo total del proceso de diseño para los proyectos de diseño en ingeniería del automóvil (Thomas, 1990).

El análisis de la matriz MTCMI modela la mejora de los KPI mediante un proceso iterativo de varias etapas con estructura matemática similar a la del modelo de la MED.

En el modelo MTCMI, los costes de mejora de los objetivos de todos los KPI se obtienen en cada iteración y los costes adicionales en la siguiente iteración.

Dicha metodología de análisis, que desarrollaron Smith y Eppinger (Smith & Eppinger, 1997) para la MED, hace tres suposiciones que nos permiten realizar el análisis algebraico lineal de la matriz MTCMI:

- Las dependencias de costes de los KPI en la MTCMI no cambian con el tiempo.
- Cada coste ocurre sólo una vez, en cada iteración.
- En cada iteración, el coste adicional de la mejora del objetivo de un KPI es una función del coste de la iteración anterior.

Durante cada iteración, todo el trabajo de mejora de los objetivos de los KPI implica un coste. Sin embargo, el coste de mejorar cada KPI causará que se incurra en algún coste extra para todos los KPI que dependen de ese KPI conseguido.

## 5.4 Costes de mejora de los objetivos

Si llamamos  $\vec{c}_{r_i}$  al coste de mejora del objetivo  $r$  en la iteración  $i$  y dado que cada etapa de iteración produce un cambio en el vector de coste según la fórmula:

$$\vec{c}_{r_{(t+1)}} = M \cdot \vec{c}_{r_t} = [M]^{t+1} \cdot \vec{c}_{r_0}$$

donde el vector  $\vec{c}_{r_t}$  describe el incremento de coste en la etapa  $t$ , y  $M$  representa la matriz MTCMI.

El incremento del coste en la etapa inicial,  $\vec{c}_{r_0}$ , para  $(t = 0)$  es 1 para todos los KPI, porque todos los costes se incurren en su totalidad.

El incremento de coste total  $\vec{C}_r$ , de  $r$  durante el total de iteraciones desde  $t = 0$  hasta  $t = T$  se puede calcular sumando los vectores  $\vec{c}_{r_t}$  de todas las etapas:

$$\vec{C} = \sum_{t=0}^T \vec{c}_{r_t} = \sum_{t=0}^T M^t \vec{c}_{r_0} = \left( \sum_{t=0}^T M^t \right) \vec{c}_{r_0}$$

El vector incremento total de coste de  $\vec{C}$  se puede multiplicar por el coste real de cada KPI, es decir, los costes en la matriz diagonal, que es la Matriz de Coste de los KPI (o MCI). Así, el vector de coste total CR sería:

$$\overline{MCI} \cdot \vec{C} = \overline{MCI} \cdot \left( \sum_{t=0}^T M^t \right) \vec{r}_0$$

Y el coste total T será la suma de todos los elementos del vector incremento total de coste:

$$T = \sum_{i=1}^n (\overline{MCI} \cdot \vec{C})_i$$

Si comparamos T con el coste objetivo total tendremos una estimación de la factibilidad de mejorar los KPI y los pasos requeridos para conseguirlo.

## 5.5 Estudio de la Autoestructura de la Matriz

El análisis de la matriz MTCMI utiliza la estructura de autovectores y autovalores para averiguar donde podrían tener el efecto máximo las mejoras potenciales de la mejora de los KPI.

Podemos utilizar el siguiente cálculo para analizar aún más.

Como sabemos, en toda transformación M que transforma un vector o una serie de vectores en otros, si M tiene autovectores linealmente independientes la matriz de los autovectores es invertible y la matriz M se puede descomponer en:

$$M = V\Lambda V^{-1}$$

donde:

$\Lambda$  es la matriz de los autovalores de M

V es la matriz de autovectores de M

Como, si los autovalores de la matriz M son  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$  la matriz  $M^k$  tendrá por autovalores  $\lambda_1^k, \lambda_2^k, \dots, \lambda_r^k$  (siendo k un número natural no nulo), también podremos descomponer  $M^t$  de la misma forma:

$$M^t = V \Lambda^t V^{-1}$$

y como el incremento de coste total C, durante el total de iteraciones desde  $t=0$  hasta  $t=T$  es:

$$C = V \left( \sum_{t=0}^T \Lambda^t \right) V^{-1} c_{r0}$$

*Nota:*

*La suma de los términos de una progresión geométrica de razón r menor que 1 es:*

$$S_{\infty} = \frac{a_1}{1-r}$$

y en el caso de  $a_1 = 1$ :

$$S_{\infty} = \frac{1}{1-r} = (1-r)^{-1}$$

Similarmente, si lo aplicamos a matrices sería:

$$(I - \Lambda)^{-1} = \sum_1^{\infty} \Lambda^t =$$

que se demuestra que es válido cuando la parte derecha converge y eso pasa cuando todos los autovalores de  $\Lambda$  tienen valor absoluto menor a 1 o  $|\Lambda x| < 1$  para todo x tal que  $|x| = 1$  pues es:

$$\begin{aligned}
&= (\lim_{n \rightarrow \infty} (\Lambda^0 + \Lambda^1 + \Lambda^2 + \dots + \Lambda^n))(I - \Lambda) = \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} ((I + \Lambda + \Lambda^2 + \dots + \Lambda^n)(I - \Lambda)) = I
\end{aligned}$$

lo que implica que  $(I - \Lambda)$  es invertible y que la inversa es esa serie.

Por eso, y dado que  $\Lambda$  es una matriz diagonal, cuando  $M$  tiende a infinito se puede usar la fórmula:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{t=0}^T \Lambda^t = (I - \Lambda)^{-1}$$

y podemos calcular el incremento total de coste  $C$  con la siguiente fórmula:

$$C = V (I - \Lambda)^{-1} V^{-1} c_{r_0}$$

Analizando los autovalores de  $C$  en  $\Lambda$  y los autovectores en  $V$ , podemos encontrar los KPI críticos que afectan sustancialmente el coste total e identificar los mejores patrones de mejora posibles.

## 5.6 Estudio de las soluciones. Interpretación de la autoestructura. Identificación de los KPI más críticos y sus patrones de mejora

La interpretación de los autovalores y autovectores para este problema es similar al análisis de la estructura de autovalores y autovectores utilizada para examinar el movimiento dinámico de un sistema físico. Cada autovalor de la matriz MTCMI representa la velocidad de convergencia para un posible modo de iteración en el proceso.

El uso del análisis de la estructura de autovalores y autovectores para observar el comportamiento primario de un sistema complejo también se utiliza en muchos otros campos, como la medicina, la biología, la química, la ingeniería de diseño y la economía.

Strang (1980) demostró matemáticamente que el modo de iteración con la tasa de convergencia más lenta tiene el mayor autovalor, que siempre es positivo y real. Como vamos a ver, los KPI críticos son aquellos que tienen un valor relativo mayor en el autovector correspondiente a los autovalores reales relativamente mayores.

Basándonos en la definición de la Matriz de Transformación del Coste de mejora de Indicadores (MTCMI) sabemos que la matriz será acoplada y no negativa.

Por el Teorema de Perron-Frobenius, sabemos que el mayor autovalor de una matriz acoplada no negativa será real y positivo (Marcus & Mine, 1964.).

### **Teorema de Perron-Frobenius**

*Dada A una matriz cuadrada,  $n \times n$ , con elementos no negativos, si A no es reducible (a una matriz triangular superior a través de permutaciones de fila y columna) entonces siempre tiene un autovalor positivo de módulo máximo que lleva asociado un único autovector positivo. Si hay  $k$  autovalores de módulo máximo, entonces son las soluciones de la ecuación:*

$$x^k - \lambda^k = 0$$

El autovector asociado con este autovalor tendrá elementos positivos.

El KPI que contribuye más a la eficiencia de la empresa (autovalor más alto) tendrá por tanto un autovector que será estrictamente positivo. Este modo de mejora nos da pocos problemas con la interpretación. Cuanto mayor sea el elemento en su autovector, más contribuye ese elemento a ese modo. Los otros modos de mejora son menos evidentes.

También por el Teorema de Perron-Frobenius, sabemos que sólo hay un autovector que sea estrictamente positivo. Por lo tanto, debemos ser capaces de interpretar números negativos y complejos en los autovectores así como autovalores negativos y complejos.

### 5.6.1 Estudio de los Autovalores

$(I - \Lambda)^{-1}$  es una matriz diagonal donde cada término de la diagonal corresponde a uno de los autovalores y tiene la forma  $1 / (1 - \lambda)$ , siendo  $\lambda$  un autovalor de  $\Lambda$ . Para interpretar los autovalores reales, vemos que la función  $1 / (1 - \lambda)$  es estrictamente creciente en el intervalo  $[-1, 1]$ . En la Imagen 5-3 vemos la gráfica de dicha función.

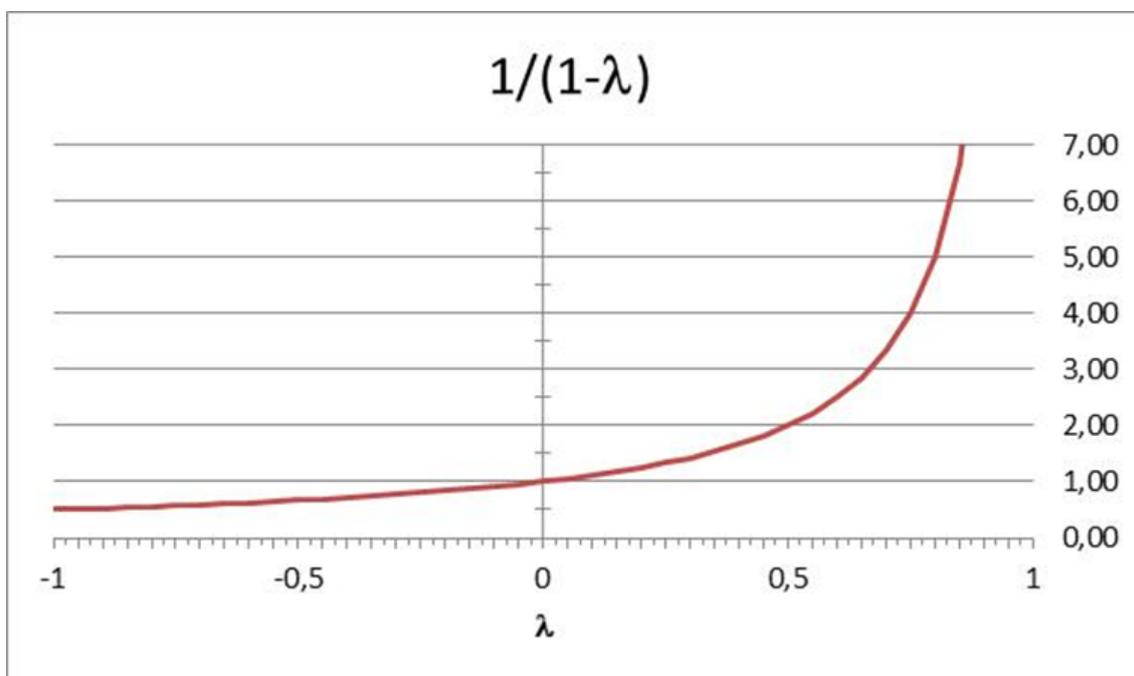


Imagen 5-3; Gráfica de  $1 / (1 - \lambda)$  para autovalores.

Fuente: Smith y Eppinger (1997)

Los modos con autovalores positivos más grandes tienen mayor contribución al trabajo total que los modos con autovalores más pequeños y negativos. Por lo tanto, cuando se buscan cuáles son los modos de diseño más importantes, hay que centrarse en los autovalores reales y de ellos en los mayores autovalores positivos.

Para los autovalores complejos, también podemos encontrar el valor de  $1 / (1 - \lambda)$ . Si el autovalor es complejo entonces es  $\lambda = \alpha + \beta i$ , por ello tenemos:

$$\left| \frac{1}{1 - (\alpha + \beta i)} \right| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \alpha)^2 + \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2\alpha + \alpha^2 + \beta^2}}$$

Cuando  $\beta \neq 0$ , el límite superior será menor que:

$$\left| \frac{1}{1 - (\alpha + \beta i)} \right| < \frac{1}{1 - \alpha}$$

También, se puede encontrar un límite inferior basándose en que  $\alpha^2 + \beta^2 < 1$

$$\left| \frac{1}{1 - (\alpha + \beta i)} \right| > \frac{1}{\sqrt{2 - 2\alpha}}$$

La gráfica de estos límites superior e inferior se muestra en la Imagen 5-4.

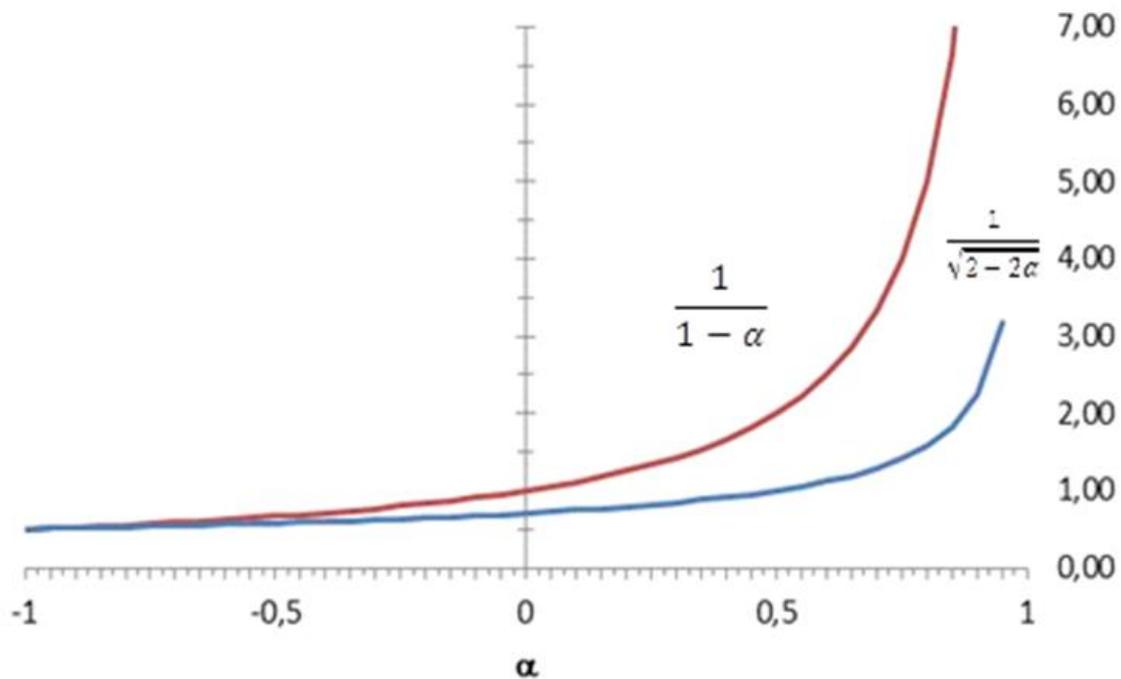


Imagen 5-4; Gráficos de límites de  $1/(1 - \lambda)$  para autovalores complejos.

Fuente: Smith y Eppinger (1997)

Vemos que la parte real de los autovalores complejos pone límites a la magnitud del término  $1 / (1 - \lambda)$  correspondiente a ese autovalor. También vemos que los autovalores complejos con parte real negativa no contribuyen mucho a la suma y, por lo tanto, pueden ignorarse. Sólo necesitamos considerar los autovalores que tienen una componente real positiva relativamente grande, ya sean reales o complejos.

Los autovalores reales positivos corresponden a modos de diseño no oscilatorios.

Los autovalores negativos y complejos describen oscilaciones amortiguadas (Ogata, 1967).

Los modos de convergencia oscilatorios indican que el coste del incremento de eficiencia de los KPI no está disminuyendo para todas los KPI a la misma velocidad y el coste cambia entre los KPI durante las iteraciones. La magnitud de la variabilidad en el coste entre los distintos KPI no es tan importante como la magnitud del coste total. Los detalles de la variabilidad serían útiles si estuviéramos observando la información del coste de los KPI individuales pero ahora estamos considerando la suma total, por lo que la variabilidad individual (que nos indica la no positividad del autovector o del autovalor) es menos importante.

### 5.6.2 Estudio de los Autovectores

Vamos a ver aquí la importancia relativa de cada KPI en un autovector, conociendo el autovalor correspondiente a ese grupo de KPI interrelacionados.

Los dos últimos términos de la fórmula del coste total son  $V^{-1} c_{r_0}$ . Estos términos se combinan en un vector, cuyos elementos proporcionan (junto con el término  $(I - \Lambda)^{-1}$  descrito anteriormente) otra ponderación para cada autovector que es a la vez una magnitud y una dirección.

Como las filas de  $V^{-1}$  correspondientes a los autovalores reales son reales, cada coeficiente de ponderación para un autovector real es también real, por lo tanto, su dirección será positiva o negativa. Luego, las cantidades importantes en un autovector real serán los valores positivos grandes si el coeficiente de ponderación es positivo y los valores negativos grandes si el coeficiente de ponderación es negativo.

Los autovalores complejos tienen autovectores complejos y coeficientes de ponderación complejos. Determinar cómo interactúan, la dirección del coeficiente de ponderación y la dirección del autovector es bastante difícil.

Se puede estudiar la interacción calculando la contribución del modo al vector de coste total  $\vec{C}$  y ver cuáles de los KPI aportan más contribución al coste total.

Podemos calcular la participación del grupo de KPI,  $i$ -ésimo mirando al vector:

$$\Lambda_{.j} \frac{1}{1 - \lambda_i} \sum_{j=1}^n \Lambda_{ij}^{-1}$$

donde  $\Lambda_{.i}$  es la columna  $i$ -ésima de  $\Lambda$  (hay que recordar que  $c_{r_0}$  es un vector de unos). Este vector muestra la contribución de coste del grupo de KPI,  $i$ , al vector de coste total  $\vec{C}$ , (este vector es una ampliación del autovector  $i$ -ésimo cuando el autovalor  $i$ -ésimo es real y por ello es una ampliación y un cambio de dirección cuando los autovalores son complejos). Analizar este vector es una forma más compleja de analizar los grupos de KPI debido a las dificultades de análisis de  $\Lambda$  con autovalores complejos, sin embargo, nos es útil en el análisis de autovectores complejos cuando el autovalor asociado tiene una gran parte positiva real.

### 5.6.3 Formas de clasificar los KPI

Se pueden clasificar los grupos de KPI más interrelacionados utilizando estas tres medidas:

- la magnitud de los términos de  $(I - \Lambda)^{-1}$
- los términos de  $(I - \Lambda)^{-1}V^{-1} c_{r_0}$
- la estimación de cuánto participa realmente cada grupo de KPI más interrelacionados en el vector de coste total  $\vec{C}$

Estas tres medidas pueden determinar la importancia relativa de cada grupo de KPI interrelacionados y de cada KPI dentro de cada grupo.

Pero puede suceder que, incluso, siendo  $V$  invertible puede estar mal condicionada<sup>13</sup>. El estar mal condicionada puede conducir a interpretaciones erróneas de los modos que no contribuyen de forma importante al vector de trabajo total  $\vec{C}$ ; por eso se sugiere la clasificación de los KPI usando  $(I - \Lambda)^{-1}$  y dentro de ella mirar específicamente:

$$\frac{1}{1 - Re(\lambda)}$$

Por ejemplo, los autovectores y los autovalores de la matriz de la tabla 4-22 son los que siguen:

$$V(\text{autovectores}) = \begin{bmatrix} -0.8364 & 0.6336 & 0.8111 & -0.8065 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.3840 \\ 0.3875 & 0.5470 & -0.3244 & -0.1536 \\ 0.3875 & 0.5470 & -0.4867 & 0.4225 \end{bmatrix}$$

$$\Lambda(\text{autovalores}) = \begin{bmatrix} 0,1158 & & & \\ & 0,2158 & & \\ & & -0,1 & \\ & & & 0 \end{bmatrix}$$

El primer autovector (es decir, la columna de  $V$  correspondiente al autovalor más grande en  $\Lambda$ ) implica que el KPI correspondiente es un KPI crítico que se puede mejorar. Los KPI críticos, que tienen autovectores más grandes, se

---

<sup>13</sup> En análisis numérico, el número de condición de una función respecto de su argumento mide cuánto se modifica el valor de salida si se realiza un cambio en el valor de entrada. Es decir, cuánto cambia  $f(x,y)$  si se modifica  $x$ . El número de condición se utiliza para medir cuán sensible resulta una función a cambios o errores en el valor de entrada, y cuál será el error en el valor de salida debido a este. Aplicando este concepto a matrices, una matriz  $A$  se dice bien condicionada si su número de condición  $\kappa(A)$  está cerca de 1 y se dice mal condicionada si  $\kappa(A)$  es significativamente mayor que 1.

mejoran con poca influencia negativa en los otros KPI y consiguen la minimización del coste total de mejora iterativa de los objetivos de los KPI.

#### 5.6.4 Mejoras de los KPI

Después de identificar los KPI críticos, hay dos maneras de mejorarlos. La primera es disminuyendo sus costes de mejora (los valores en la matriz PCM), sin afectar a los costes de mejora de otros KPI. Y la segunda es reduciendo la dependencia entre ese KPI y los otros KPI y viceversa.

El autovector correspondiente a cada autovalor caracteriza la contribución relativa de cada uno de los diferentes KPI a la mejora del objetivo total, que converge a una velocidad dada.

Los resultados del análisis de la estructura de autovalores pueden utilizarse no sólo para seleccionar KPI críticos sino también para obtener patrones de mejora óptimos, de acuerdo a los objetivos específicos de la empresa.

De esta forma, se consigue un sistema de soporte de decisión que usa un algoritmo optimizado para definir el conjunto de los KPI más importantes e identificar los patrones de mejora. Con él, los directivos pueden seleccionar el conjunto de los KPI más importantes e identificar los patrones de mejora de los mismos que se alineen con las estrategias de su empresa.

Si por ejemplo, una empresa de transporte urbano se centra en maximizar la eficiencia operativa, el patrón de mejora debe incluirá los grupos de KPI que reflejen esos indicadores. Si otra empresa de transporte urbano hace hincapié en la respuesta rápida o flexibilidad a los cambios de la demanda, el patrón de mejora incluirá los KPI relacionados con la capacidad de respuesta o flexibilidad.

Con los patrones de mejora, se pueden ajustar los objetivos de eficiencia y se pueden aplicar diversas estrategias basadas en los métodos existentes, adecuadas para la mejora de los objetivos de los KPI.

Por lo tanto, este enfoque analítico nos permite plantear proposiciones factibles para las mejoras de eficiencia general de la empresa.

El diagrama de la Imagen 5-5 nos muestra el proceso a seguir:

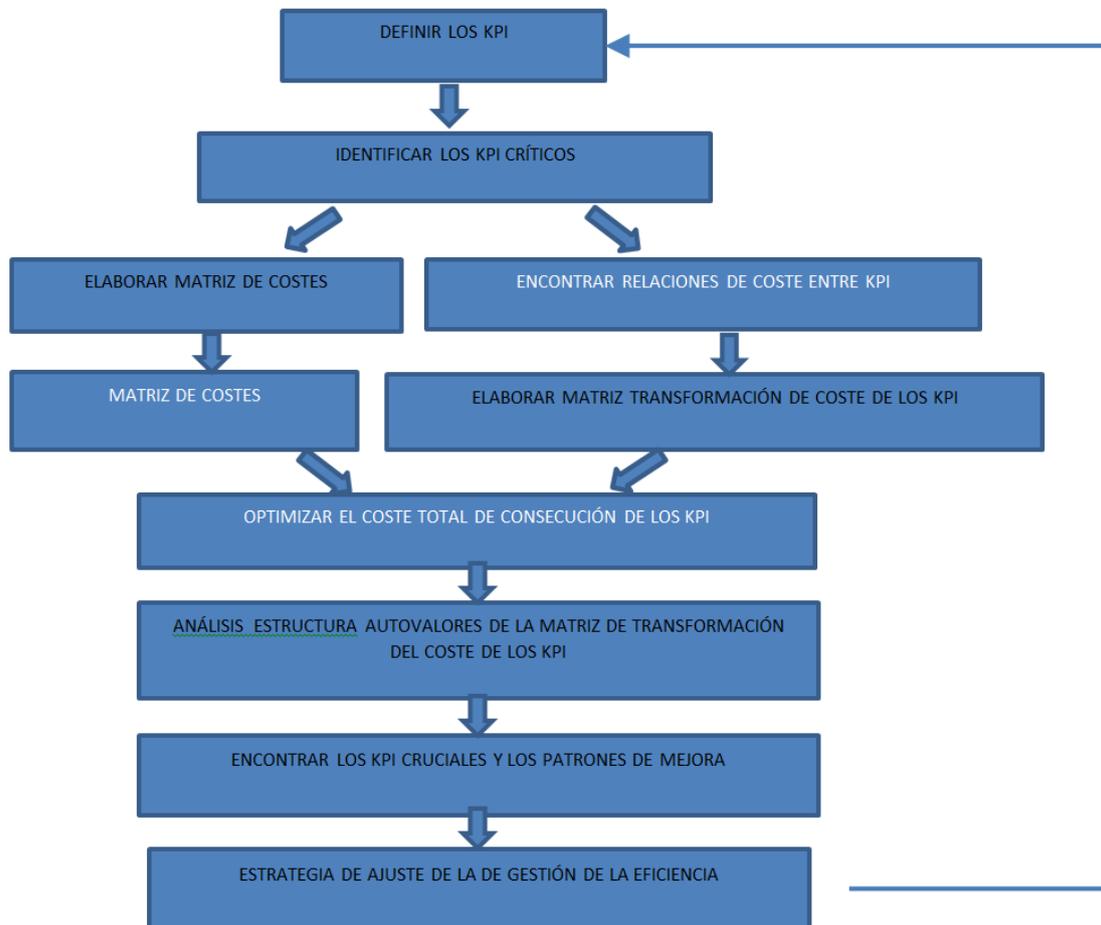


Imagen 5-5; Análisis de la Autoestructura de la MTCMI.

Fuente: Cai et al (2012)

## 6. APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO

A partir del método desarrollado a lo largo del capítulo anterior para analizar los posibles pasos de mejora de la eficiencia. En este capítulo, se aplica el análisis de la MTCMI para mejorar la gestión a la empresa de transporte urbano, EMT de Madrid, La EMT constituye un caso de estudio perfecto ya que es una de las más grandes de Europa (la segunda desde la fragmentación de la de Londres) y sus complejidades son difíciles de encontrar en otras empresas mucho más pequeñas, representando por tanto, la mayor parte de la casuística que se pueda dar en este tipo de empresas. Además, se dispone de información directa de toda la empresa por ser un miembro de ella.

Para la realización de este apartado, primero caracterizaremos la EMT para que se puedan conocer los datos de los que vamos a partir y luego construiremos una MTCMI y se analizará.

Para ello se utilizarán los KPI actuales del Cuadro de Mando de Gerencia de la EMT de Madrid y construiremos la matriz de interacciones entre los mismos. Estimaremos las relaciones entre los KPI y sus coeficientes de peso y construiremos la matriz MCI. Se estimarán los costes de mejora de los objetivos de los KPI e introduciremos los coeficientes de ponderación en la matriz MTCMI. Se identificarán cuál es el orden de prioridad de los KPI y que patrón de mejora tendrán utilizando el análisis de la estructura de autovalores y autovectores y propondremos estrategias de mejora de los KPI seleccionados.

### 6.1 Caracterización de la EMT de Madrid

La empresa de transporte público, EMT de Madrid, tiene más de 200 líneas en la ciudad y presta servicio con 1900 autobuses y más de 8.000 empleados. EMT tiene una gran ventaja en eficiencia con respecto a muchas otras empresas de transporte público más pequeñas y es la que le dan sus avanzados sistemas de información y telecomunicaciones.

En 2015 EMT Madrid transportó un total de 405.923.047 viajeros, lo que representó un incremento del 0,92% respecto al año 2014.

El total de kilómetros recorridos en línea fue de 87.759.611.

La velocidad en línea pasó de 13,39 km/h en 2014 a 13,36 en 2015.

El coste medio por kilómetro fue de 5,19 euros.

	Número de líneas	Longitud total de las líneas (ida y vuelta)	Nº de autobuses en Parque Móvil de Explotación a 31 de diciembre	Antigüedad del Parque (años)	Media diaria de autobuses	
					En servicio	En parque
2015	204	3.577,09	1.908	8,66	1.388,93	1.905,42
2014	203	3.566,28	1.907	7,65	1.395,58	1.905,06
Δ	1	10,81	1	1,01	-6,65	0,36
%	0,49	0,30	0,05	13,20	-0,48	0,02

	Kilómetros recorridos				Horas-vehículo en línea	Velocidad en línea
	En línea	En salida y encierro	Comerciales	Totales		
2015	87.759.611	6.296.816	94.056.427	95.381.438	6.569.245	13,36
2014	88.892.615	6.246.561	95.139.175	96.486.110	6.636.817	13,39
Δ	-1.133.004	50.255	-1.082.749	-1.104.672	-67.572	-0,03
%	-1,27	0,80	-1,14	-1,14	-1,02	-0,22

	Viajeros transportados			Ingresos servicio de transportes		
	Totales	Promedio diario	Por vehículo-km en línea	Totales	Tarifa técnica por kilómetro (1)	Por viajero
2015	405.923.047	1.112.118	4,6254	440.350.185	5,02	1,0848
2014	402.241.055	1.102.030	4,5250	444.646.274	5,00	1,1054
Δ	3.681.992	10.088	0,1004	-4.296.089	0,02	-0,0206
%	0,92	0,92	2,22	-0,97	0,40	-1,86

	Consumos por 100 km (expresados en energía kWh)				Viajes diarios por vehículo	Índice de ocupación
	Diésel	Gas natural (2)	Eléctrico	Híbrido		
2015	569,81	725,45	90,96	573,55	20,11	48,11
2014	565,43	717,48	89,35	541,37	20,30	48,59
Δ	4,38	7,97	1,61	32,18	-0,19	-0,48
%	0,77	1,11	1,80	5,94	-0,94	-0,99

	Plantilla total a 31 de diciembre	Personal adscrito al Servicio de Transporte Urbano			
		A 31 de diciembre	Media anual	Media por vehículo en servicio	Media por vehículo en parque
2015	8.569	7.853	7.807	5,621	4,097
2014	8.542	7.811	7.823	5,606	4,106
Δ	27	42	-16	0,015	-0,009
%	0,32	0,54	-0,20	0,27	-0,22

	Kilómetros en línea por empleado y año (3)	Viajeros por empleado y año (3)	Horas-vehículo en línea por empleado y año (3)	Plazas ofertadas por empleado y año (3)	Plazas ofertadas por vehículo-km en línea	Plazas ofertadas por día en servicio
2015	12.183,76	56.354,72	912,02	117.131	9,614	2.311.495
2014	12.182,08	55.124,17	909,53	113.455	9,313	2.268.162
Δ	1,68	1.230,55	2,49	3.676	0,301	43.333
%	0,01	2,23	0,27	3,24	3,23	1,91

(1) Calculada sobre los kilómetros en línea.

(2) En 2015, se define un nuevo factor de conversión, por lo que, para permitir su comparación, los consumos del año 2014 han sido reconstruidos.

(3) Ratios calculados con los datos de plantilla efectiva adscrita al servicio de Transporte Urbano, en función de los contratos de jornada reducida.

**Tabla 6-1; Datos Generales EMT Madrid.**

**Fuente: Informe de Gestión 2015**

Año	Número de habitantes (1)	Kilómetros recorridos (2)	Media diaria de autobuses en servicio	Plazas de la media diaria de autobuses en servicio	Consumo expresado en energía (3) (4)							Viajeros totales (6)		
					Energía eléctrica (kWh)	Casóleo (kWh)	Gas Natural (kWh) (5)	Hidrógeno (kWh)	Biodiésel (kWh)	Biocombustible (kWh)	Bioetanol (kWh)		Híbrido (kWh)	
1948	1.413.707	15.876.529	198,4	16.488	22.184.500	6.927.065								190.777.367
1950	1.527.894	22.861.928	328,2	22.250	26.613.400	24.249.898								278.262.676
1952	1.555.760	29.347.701	413,6	29.672	39.713.609	26.095.825								311.437.084
1954	1.645.082	31.775.674	454,3	35.837	41.807.348	43.110.466								354.287.358
1956	1.757.148	35.364.310	478,8	38.194	43.479.382	55.830.669								383.359.782
1958	1.866.507	42.910.331	599,5	49.881	45.086.129	84.742.545								418.004.761
1960	2.177.123	41.936.186	606,9	52.675	47.484.762	85.987.037								380.083.693
1962	2.293.972	47.414.236	649,3	62.143	45.187.407	118.666.668								414.904.805
1964	2.418.532	56.712.215	761,9	76.637	35.986.234	184.484.691								458.298.011
1966	2.712.641	61.684.064	865,9	93.730	21.595.510	240.365.961								471.854.995
1968	2.870.849	66.179.566	906,1	101.581	13.602.163	275.798.852								378.825.628
1970	3.120.941	58.412.506	836,6	95.042	8.974.779	253.099.536								357.347.700
1972	3.209.246	63.021.245	849,5	99.870	2.591.799	295.457.492								369.118.926
1974	3.274.043	70.993.153	937,9	100.562		335.763.289								424.516.132
1976	3.322.460	88.817.988	1.209,6	1.209,6		85.950								421.245.900
1978	3.367.438	87.890.694	1.179,7	82.345		407.843.141								427.524.887
1980	3.357.903	93.438.590	1.232,4	85.805		426.682.540								467.277.355
1981	3.158.818	99.334.974	1.301,6	82.449		446.781.368								490.090.068
1982	3.194.067	98.536.146	1.282,4	79.665		445.378.054								478.526.665
1983	3.194.067	96.392.359	1.263,8	77.536		429.767.534								474.976.590
1984	3.200.234	94.277.592	1.235,9	75.775		414.380.053								464.322.238
1985	3.208.843	93.902.285	1.243,5	76.447		415.430.241								459.877.259
1986	3.058.182	94.025.127	1.249,3	77.237		414.749.056								446.711.920
1987	3.100.507	90.491.765	1.212,0	77.359		409.765.454								453.485.835
1988	3.102.846	89.373.428	1.207,2	78.243		407.969.411								457.571.418
1989	3.108.463	88.306.948	1.234,9	82.320		403.544.480								456.230.495
1990	3.120.732	79.567.644	1.271,1	99.033		402.587.343								440.035.735
1991	3.010.492	86.211.993	1.320,3	104.407		460.509.217								498.059.041
1992	3.017.439	76.949.217	1.277,9	101.526		411.286.534								440.756.740
1993	3.037.977	88.277.188	1.317,5	104.807		474.897.920								512.174.742
1994	3.041.101	88.734.047	1.323,3	105.276		483.656.074	240.944							522.938.432
1995	3.029.734	89.542.281	1.330,8	105.721		485.050.036	2.855.687							529.538.082
1996	2.866.850	91.708.726	1.352,8	107.196		499.179.340	7.996.186							550.811.884
1997	2.899.091	93.873.734	1.386,1	110.207		516.309.111	16.495.693							555.017.061
1998	2.905.136	94.645.751	1.399,4	112.194		533.999.282	15.111.131							553.494.691
1999	2.903.903	94.438.663	1.399,9	111.836		525.249.722	23.708.692							528.642.978
2000	2.998.686	94.178.279	1.402,3	111.904		527.983.065	20.986.814							531.207.270
2001	3.043.535	95.912.143	1.436,1	114.512		535.720.835	30.906.667							501.561.095
2002	3.124.892	96.154.099	1.454,7	115.922		530.628.707	43.139.846							482.363.396
2003	3.162.304	96.737.494	1.464,3	116.596		536.629.568	47.430.947	133.300						470.711.450
2004	3.167.424	96.779.128	1.477,1	117.691		536.874.277	53.569.882	451.015	1.087.660					475.597.104
2005	3.205.334	97.535.659	1.491,8	119.111		538.221.623	65.767.116	282.284	998.640	888.760				473.568.409
2006	3.187.062	99.930.793	1.543,0	123.655		534.519.961	68.890.786	480.519	17.139.540	1.109.890				490.611.432
2007	3.238.208	97.106.114	1.524,3	122.245		370.814.327	117.667.897		132.582.830		994.630			455.393.081
2008	3.255.944	95.535.968	1.509,2	120.915	156.671	222.001.995	167.571.515		247.240.150		1.219.491			425.552.861
2009	3.284.110	100.409.955	1.530,3	125.394	241.431	12.300.189	176.610.258		484.260.430		1.418.848			426.424.713
2010	3.269.861	100.017.242	1.553,7	125.459	251.370		179.978.595		492.179.710		1.397.829			423.409.691
2011	3.237.937	95.454.060	1.502,0	120.975	233.043		229.236.311		421.359.240		695.234			426.586.901
2012	3.215.633	93.096.839	1.451,5	116.159	237.275		247.706.341		366.325.055			816.578		405.485.897
2013	3.176.508	91.262.015	1.422,0	113.674	241.178	322.125.083	285.518.446					3.780.491		404.102.366
2014	3.149.991	88.892.615	1.395,6	111.744	225.389	305.758.419	297.283.563					3.919.181		402.241.055
2015	3.174.945	87.759.611	1.388,9	114.936	219.674	305.844.025	295.389.009					4.287.985		405.923.047

\* Excluidos los días de huelga

(1) Población de derecho a 31 de diciembre (cifras provisionales en 2015).

(2) A partir del año 1990, se consignan solamente kilómetros en línea, excluyendo los correspondientes a salida y encierro.

(3) A partir del año 1990, se expresa el consumo total, incluyendo el correspondiente a kilómetros internos.

(4) A partir de 2012, el consumo se expresa en energía (kWh), por lo que, para permitir su comparación, los datos de los años anteriores se han convertido a kWh.

(5) En 2015, se define un nuevo factor de conversión, por lo que, para permitir su comparación, los consumos de los años 2012, 2013 y 2014 han sido reconstruidos.

(6) A partir del año 2001, los viajeros totales se corresponden con los registrados por las máquinas expendedoras, canceladoras y validadoras.

## Tabla 6-2; Evolución Datos Generales desde 1948.

Fuente: Informe de Gestión 2015

## 6.1.1 Oferta de servicio

### 6.1.1.1 Kilómetros recorridos

En la Tabla 6-3 se recogen los kilómetros en línea recorridos en el último trienio.

2013		2014		2015		Δ % en el periodo 2012/15
Kilómetros en línea	% (1)	Kilómetros en línea	% (1)	Kilómetros en línea	% (1)	
91.262.015	-1,97	88.892.615	-2,60	87.759.611	-1,27	-5,73

(1) Desviación porcentual con respecto al año precedente

Tabla 6-3; Kilómetros recorridos en línea.

Fuente: Informe de Gestión 2015 EMT Madrid

El gráfico siguiente representa los kilómetros en línea mensuales recorridos durante 2015.

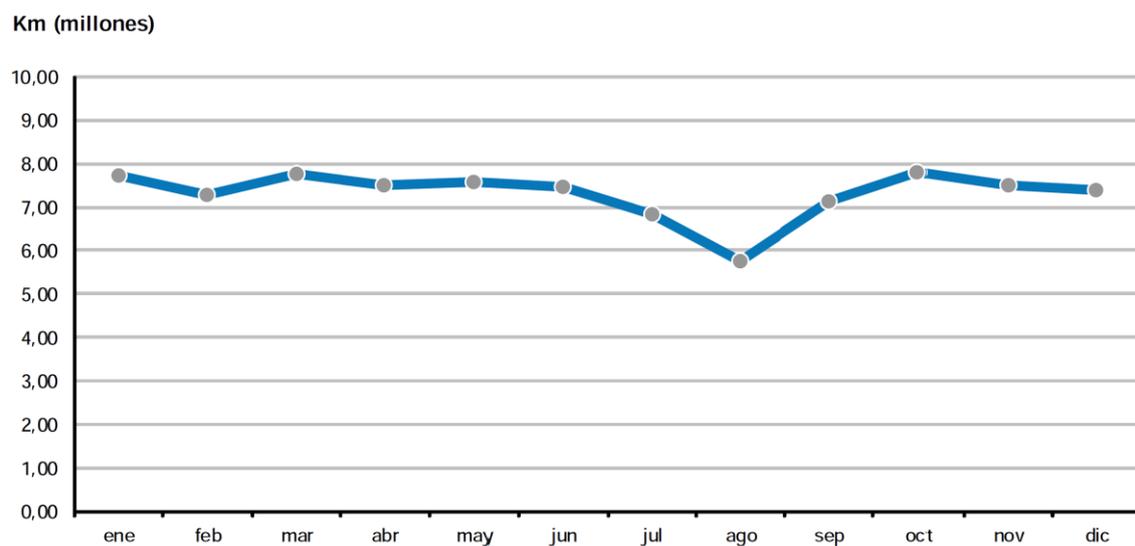
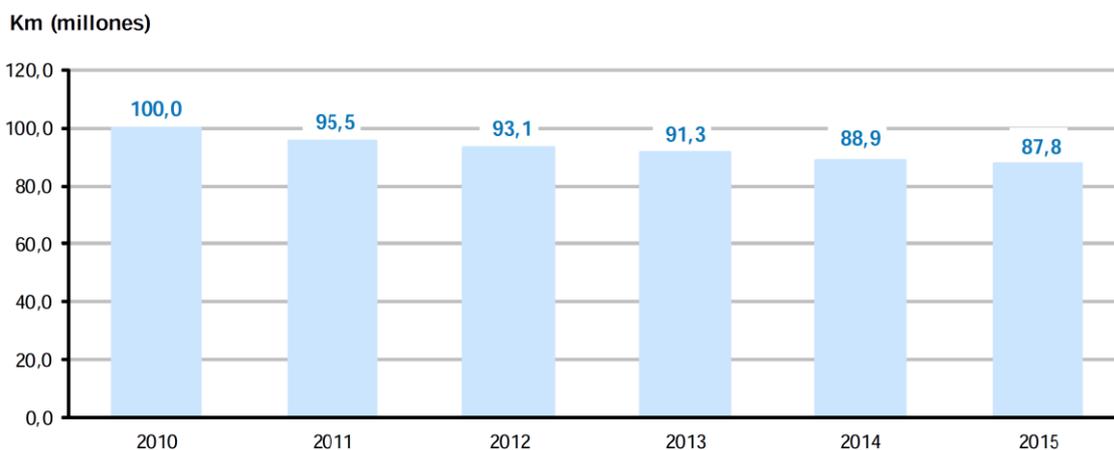


Imagen 6-1; Evolución Km en línea mensuales.

Fuente: Informe gestión 2015

A continuación, se muestra la evolución anual de los kilómetros recorridos en línea durante los años 2009-2015.



- (1) En 2010, 1 día de Huelga General  
 En 2012, 2 días de Huelga General y 9 días de paros parciales  
 En 2013, 4 días de paros parciales

**Imagen 6-2; Evolución anual de los km en línea años 2009-2015.**

**Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015.**

### 6.1.1.2 Viajes y Autobuses en servicio

La tabla siguiente incluye el total de viajes realizados en línea por los autobuses en servicio en el periodo 2013-2015.

2013		2014		2015		Δ % en el periodo 2012/15
Viajes en línea	% (1)	Viajes en línea	% (1)	Viajes en línea	% (1)	
10.581.819	-2,04	10.339.437	-2,29	10.195.569	-1,39	-5,61

(1) Desviación porcentual con respecto al año precedente

**Tabla 6-4; Viajes en línea en 2013-2015.**

**Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015**

En la tabla siguiente se ve la evolución de los autobuses en servicio (suma del número de autobuses en cada línea durante todos los días del año).

2013		2014		2015		Δ % en el periodo 2012/15
Autobuses en servicio	% (1)	Autobuses en servicio	% (1)	Autobuses en servicio	% (1)	
519.012	-2,30	509.387	-1,85	506.959	-0,48	-4,57

(1) Desviación porcentual con respecto al año precedente

**Tabla 6-5; Evolución de los autobuses en servicio.**

**Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015**

## 6.1.2 Velocidad en línea

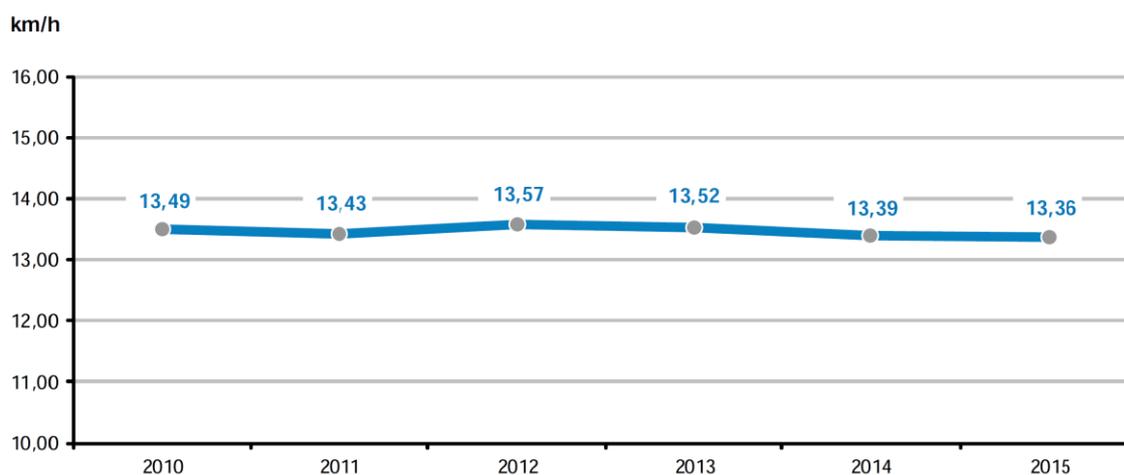
En la tabla y el gráfico siguientes se detallan los datos relativos a la velocidad en línea registrada en el último trienio.

2013		2014		2015		Δ % en el periodo 2012/15
Velocidad en línea	% (1)	Velocidad en línea	% (1)	Velocidad en línea	% (1)	
13,52	-0,37	13,39	-0,96	13,36	-0,22	-1,55

(1) Desviación porcentual con respecto al año precedente

**Tabla 6-6; Velocidad en línea en último trienio.**

**Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015**



**Imagen 6-3; Evolución velocidad en línea.**

**Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015**

### 6.1.3 Viajeros transportados

En la tabla siguiente figuran los valores totales y promedio de viajeros transportados en 2015 comparados con los mismos datos relativos al año 2014.

	Viajeros transportados	Promedio diario	Promedio diario por vehículo	Promedio por vehículo-km en línea
2015	405.923.047	1.112.118	801	4,6254
2014	402.241.055	1.102.030	790	4,5250
Δ	3.681.992	10.088	11	0,1004
%	0,92	0,92	1,39	2,22

Tabla 6-7; Viajeros transportados en 2015 y 2014.

Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015

En 2015, se produjo un crecimiento de la demanda del 0,92% consecuencia, por un lado, del aumento de la movilidad obligada que derivó del repunte de la actividad económica y, por otro, de la entrada en vigor de nuevos títulos, como el Abono Joven tarifa plana, que incrementó la movilidad de este colectivo.

En la tabla siguiente se recogen los viajeros transportados en el último trienio, detallando los grandes grupos en los que se distribuye la demanda de la EMT (Títulos EMT y Metrobús, Abono Transportes y Otros. En este último, se incluyen los procedentes de Servicios Especiales y refuerzos de líneas compensados por tarifa técnica). En el grupo de Servicios Especiales, se presentan los viajeros transportados en aquéllos cuya compensación económica es diferente.

	2013			2014			2015			Δ % en el período 2012/15
	Viajeros	% (1)	% (2)	Viajeros	% (1)	% (2)	Viajeros	% (1)	% (2)	
Títulos EMT y Metrobús	86.296.621	-4,28	21,36	86.004.454	-0,34	21,38	81.131.186	-5,67	19,99	-10,01
Abono Transportes	317.753.942	0,85	78,63	315.513.639	-0,71	78,43	321.965.861	2,04	79,32	2,19
Otros	--	--	--	671.778	--	0,17	2.775.705	313,19	0,68	2.124,92
<b>Total Viajeros</b>	<b>404.050.563</b>	<b>-0,32</b>	<b>99,99</b>	<b>402.189.871</b>	<b>-0,46</b>	<b>99,98</b>	<b>405.872.752</b>	<b>0,92</b>	<b>99,99</b>	<b>0,13</b>
Servicios Especiales	51.803	-60,87	0,01	51.184	-1,19	0,02	50.295	-1,74	0,01	-62,01
<b>Viajeros Registrados</b>	<b>404.102.366</b>	<b>-0,34</b>	<b>100,00</b>	<b>402.241.055</b>	<b>-0,46</b>	<b>100,00</b>	<b>405.923.047</b>	<b>0,92</b>	<b>100,00</b>	<b>0,11</b>

(1) Desviación porcentual con respecto al año precedente

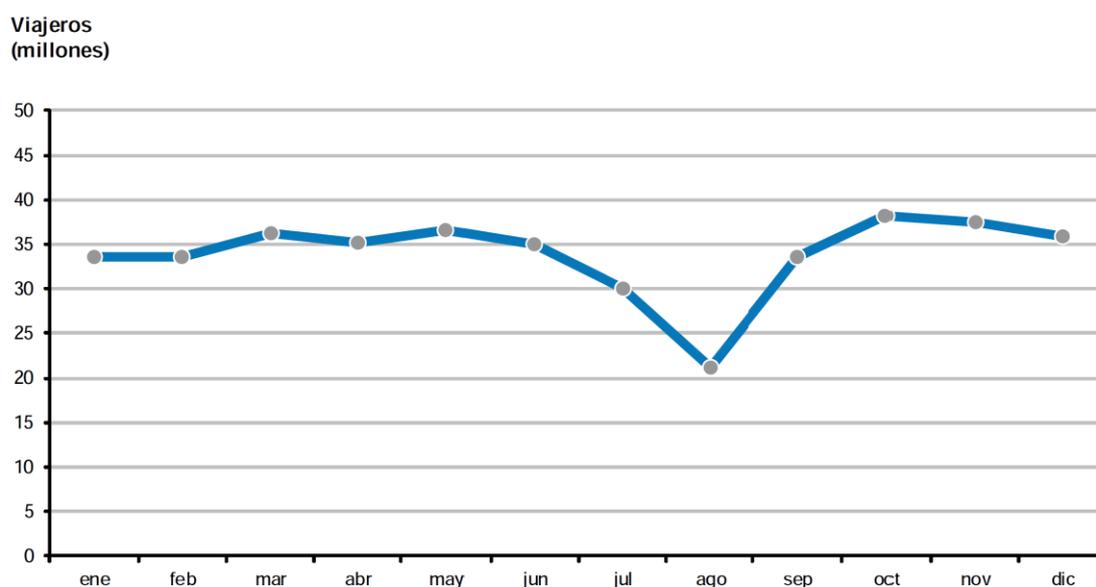
(2) Distribución porcentual por tipo de título

**Tabla 6-8; Viajeros transportados en el último trienio.**

**Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015**

La distribución porcentual de la demanda presenta un desplazamiento hacia el grupo de Títulos Abono Transportes, relacionado con la mayor actividad económica y con la puesta en marcha de los nuevos títulos del mismo.

En el gráfico siguiente, se representa la evolución mensual de viajeros transportados por la EMT en 2015.

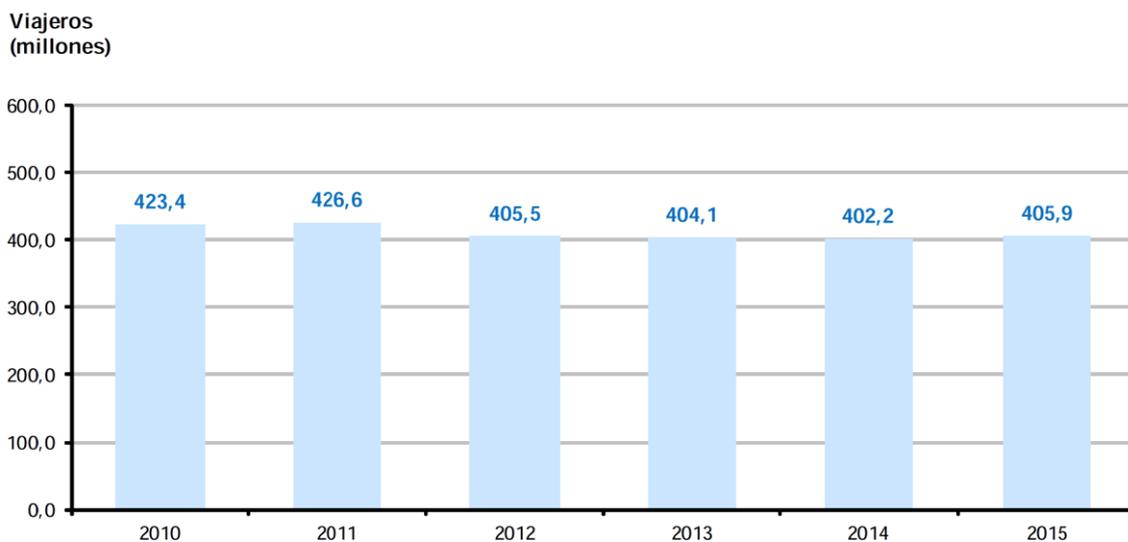


**Imagen 6-4; Evolución mensual de viajeros transportados en 2015.**

**Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015.**

A continuación, se incluyen dos gráficos en los que se representa la evolución

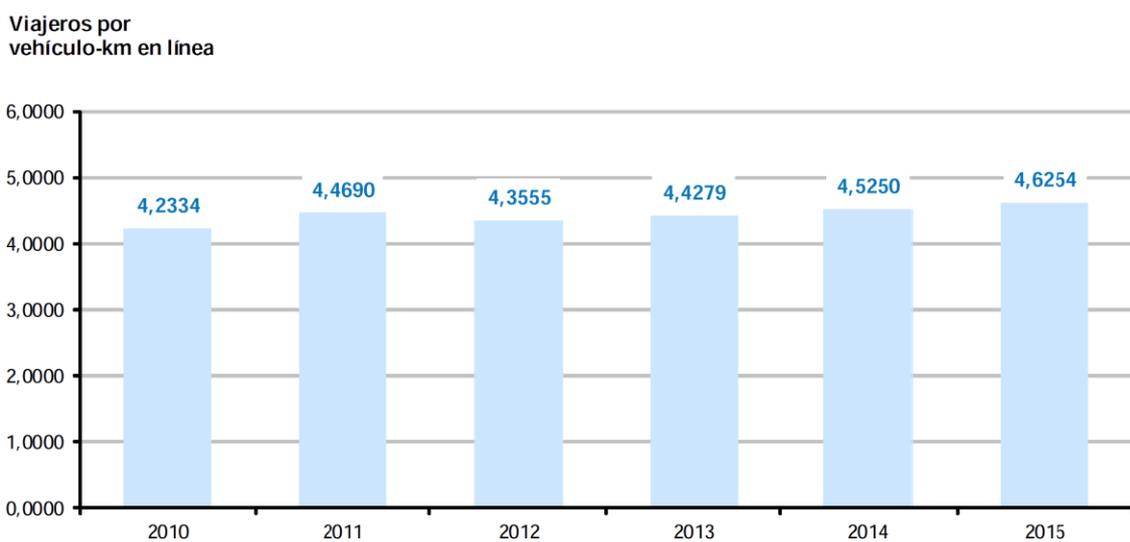
en los últimos seis años de los viajeros transportados, totales y por vehículo-km.



- (1) En 2010, 1 día de Huelga General  
 En 2012, 2 días de Huelga General y 9 días de paros parciales  
 En 2013, 4 días de paros parciales

**Imagen 6-5; Evolución de los viajeros transportados.**

**Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015**



- (1) En 2010, 1 día de Huelga General  
 En 2012, 2 días de Huelga General y 9 días de paros parciales  
 En 2013, 4 días de paros parciales

**Imagen 6-6; Evolución de los viajeros por vehículo-km.**

**Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015.**

## 6.1.4 Títulos de transporte

La distribución de viajeros transportados según el título de transporte utilizado se refleja en la tabla siguiente.

Título	Viajeros Registrados
Billete Sencillo	22.846.534
Billete Aeropuerto	1.031.639
Metrobús	53.151.842
Bus+Bus	200.311
Bonotet	2.967
Pase Familiar	3.862.001
Justificante H1	35.892
<b>Títulos EMT y Metrobús</b>	<b>81.131.186</b>
30 días Normal	150.268.432
30 días Joven	49.375.165
Anual Normal	11.287.711
Anual Joven	83.029
Tercera Edad	90.936.786
Tarjeta Azul	17.164.716
Turístico	481.662
Infantil	2.362.889
30 días Desempleados	5.471
<b>Abono Transportes</b>	<b>321.965.861</b>
Otros	2.775.705
<b>Viajeros totales</b>	<b>405.872.752</b>
Servicios Especiales	50.295
<b>Viajeros Registrados</b>	<b>405.923.047</b>

Tabla 6-9; Viajeros por título de transporte.

Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015

### 6.1.4.1 Títulos EMT y Metrobús

La Tabla 6-10 muestra la evolución trienal de los Títulos EMT y Metrobús. Tras el incremento de tarifa que entró en vigor el 1 de mayo de 2012, el Metrobús siguió presentando cifras de descenso por el traspaso de usuarios al Abono Transportes. Estas cifras se incrementaron en el último trimestre del ejercicio por la entrada en vigor de los nuevos títulos del Abono Transportes.

El billete Aeropuerto, sin embargo, presentó valores positivos, relacionados con

la recuperación de actividad en el aeropuerto “Adolfo Suárez - Madrid-Barajas”.

En cuanto al billete de 10 viajes (Bus+Bus), específico para la EMT, que permite el transbordo entre dos líneas diferentes en el periodo máximo de una hora, tras los dos primeros años de funcionamiento con resultados positivos, en 2015 presentó un significativo descenso por las mismas razones que el Metrobús.

	2013			2014			2015			Δ % en el periodo 2012/15
	Viajeros	% (1)	% (2)	Viajeros	% (1)	% (2)	Viajeros	% (1)	% (2)	
Sencillo	22.658.208	3,64	5,61	23.193.477	2,36	5,77	22.846.534	-1,50	5,63	4,50
Metrobús	59.162.118	-7,79	14,64	57.255.234	-3,22	14,23	53.151.842	-7,17	13,09	-17,16
Bonotet	12.019	-88,98	--	6.103	-49,22	--	2.967	-51,38	--	-97,28
Aeropuerto	953.042	-18,63	0,24	986.314	3,49	0,25	1.031.639	4,60	0,25	-11,92
Bus+Bus	248.979	177,05	0,06	253.758	1,92	0,06	200.311	-21,06	0,05	122,89
Pase Familiar	3.262.255	18,21	0,81	4.309.568	32,10	1,07	3.862.001	-10,39	0,96	39,94
Justificante H1							35.892		0,01	
<b>Total</b>	<b>86.296.621</b>	<b>-4,28</b>	<b>21,36</b>	<b>86.004.454</b>	<b>-0,34</b>	<b>21,38</b>	<b>81.131.186</b>	<b>-5,67</b>	<b>19,99</b>	<b>-10,01</b>

(1) Desviación porcentual con respecto al año precedente

(2) Grado de penetración sobre el total de viajeros transportados

**Tabla 6-10; Evolución trienal Títulos EMT y Metrobús.**

**Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015**

#### 6.1.4.2 Abono Transportes

En la Tabla 6-11 se muestra la evolución, en el último trienio, de los viajeros de Abono Transportes distribuidos según el tipo de Abono. En el ejercicio 2015, hay que destacar la entrada en vigor, entre otros, de los Abonos Infantil, Joven Tarifa Plana y para Desempleados, que repercutió en un crecimiento del 2,04% en el número de usuarios de Abono Transportes.

El Abono Joven (con tarifa plana de 20 euros para todas las zonas y validez hasta los 26 años a partir del mes de octubre) incrementó su demanda en un 13,65%, por un lado, por la mayor movilidad por abono vendido y, por otro, por el traspaso de usuarios del Abono 30 días Normal y el billete Metrobús.

	2013			2014			2015			Δ % en el periodo 2012/15
	Viajeros	% (1)	% (2)	Viajeros	% (1)	% (2)	Viajeros	% (1)	% (2)	
30 días Normal	157.316.207	-2,35	38,93	152.872.311	-2,82	38,00	150.268.432	-1,70	37,02	-6,72
30 días Joven	42.827.618	4,77	10,60	43.444.295	1,44	10,80	49.375.165	13,65	12,17	20,78
Anual Normal	11.316.832	1,71	2,80	11.501.710	1,63	2,86	11.287.711	-1,86	2,78	1,45
Anual Joven				21.592		--	83.029		0,02	
Tercera Edad	89.554.360	3,87	22,16	90.914.490	1,52	22,60	90.936.786	0,02	22,40	5,47
Tarjeta Azul	16.219.935	7,34	4,01	16.249.715	0,18	4,04	17.164.716	5,63	4,23	2.577,06
Turístico	518.990	-19,06	0,13	509.526	-1,82	0,13	481.662	-5,47	0,12	-96,81
Infantil							2.362.889		0,58	
30 días Desempleados							5.471			
<b>Total</b>	<b>317.753.942</b>	<b>0,85</b>	<b>78,63</b>	<b>315.513.639</b>	<b>-0,71</b>	<b>78,43</b>	<b>321.965.861</b>	<b>2,04</b>	<b>79,32</b>	<b>2,19</b>

(1) Desviación porcentual con respecto al año precedente

(2) Grado de penetración sobre el total de viajeros transportados

Tabla 6-11; Evolución, de los viajeros de Abono Transportes, por tipo de Abono.

Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015

## 6.1.5 Ingresos

Se especifican a continuación los ingresos generados por la actividad de transporte de viajeros propiamente dicha.

2013		2014		2015		Δ % en el periodo 2012/15
Ingresos	% (2)	Ingresos	% (2)	Ingresos	% (2)	
454.916.670	-1,17	444.646.274	-2,26	440.350.185	-0,97	-4,34

(1) Expresados en euros, IVA excluido

(2) Desviación porcentual con respecto al año precedente

Tabla 6-12; ingresos generados por la actividad de transporte de viajeros.

Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015

El 2015, continuó vigente el Convenio Específico entre el Consorcio Regional de Transportes de Madrid (CRTM) y la EMT donde se define una tarifa técnica que, a diferencia de Convenios anteriores, está referida a la producción, es decir, a los kilómetros realizados, pero que, en términos absolutos, está limitada a la aportación máxima.

## 6.1.6 Accidentes de circulación

A continuación, se muestra la evolución mensual comparativa del índice de colisiones por millón de kilómetros totales registrado en el último trienio así como la representación gráfica de dicho índice en valores medios anuales.

	2013	2014	2015
Enero	34,50	40,57	43,31
Febrero	37,95	44,23	49,77
Marzo	37,29	40,82	42,70
Abril	43,10	42,58	39,72
Mayo	41,86	44,45	45,40
Junio	37,01	39,75	43,72
Julio	32,11	37,49	37,33
Agosto	20,33	24,20	29,16
Septiembre	37,35	39,65	44,28
Octubre	43,33	47,43	43,36
Noviembre	46,64	41,35	48,71
Diciembre	44,42	47,85	48,19
<b>Media Anual</b>	<b>38,43</b>	<b>41,27</b>	<b>43,27</b>

Tabla 6-13; Evolución mensual comparativa del índice de colisiones por millón de kilómetros totales registrado en el último trienio

Fuente: Informe de gestión EMT de Madrid 2015

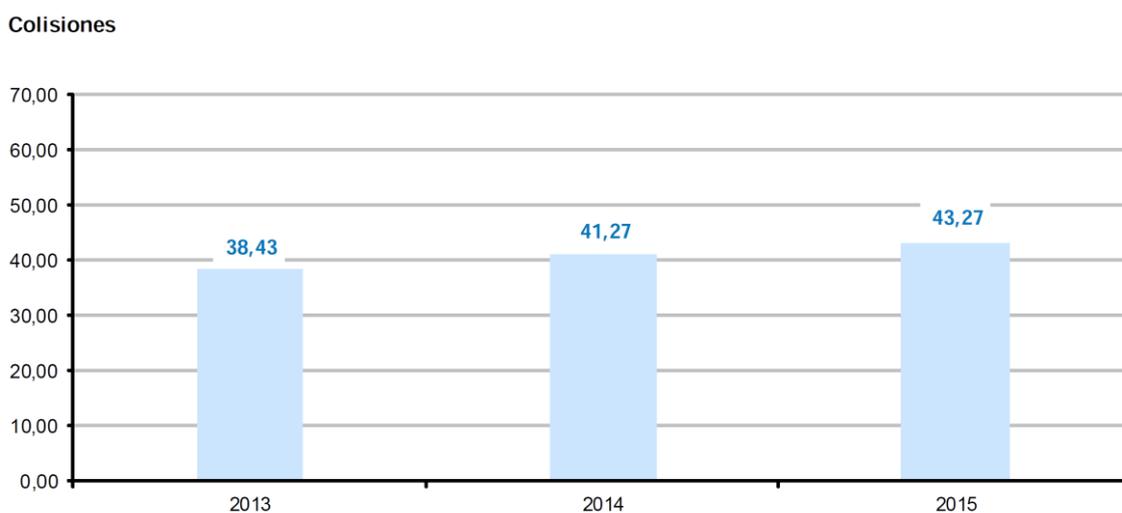


Tabla 6-14; Colisiones por millón de kilómetros en el último trienio.

Fuente: Informe de Gestión 2015

En la Tabla 6-15 se reseña el número de accidentes con daños materiales y personales registrados en 2015, comparados con los ocurridos en 2014. En el año 2015, se produjo un incremento general en los accidentes con daños materiales del 5,23%, con una incidencia en dicho incremento del 4,72% en los accidentes con repercusión económica en póliza y del 6,73% en los accidentes que no la tienen. En consonancia con este incremento, el número de lesionados aumentó en un 3,54%.

	2015	2014	Δ	%
<b>Accidentes con daños materiales</b>				
Con repercusión económica en póliza	3.440	3.285	155	4,72
Sin repercusión económica en póliza	1.206	1.130	76	6,73
<b>Total Accidentes con daños materiales</b>	<b>4.646</b>	<b>4.415</b>	<b>231</b>	<b>5,23</b>
<b>Daños a personas</b>				
Lesionados	1.727	1.668	59	3,54
Fallecidos	1	--	1	--

Tabla 6-15; Número de accidentes con daños materiales y personales registrados en 2015 y 2014.

Fuente: Informe de Gestión 2015

### 6.1.7 Ratios de Explotación

	2013	2014	2015
Velocidad en línea (km/h)	13,52	13,39	13,36
Tarifa de equilibrio por viajero (euros)	1,118016	--	--
Tarifa técnica por kilómetro (euros)	--	5,1825	5,1497
Viajeros día medio (millones)	1,11	1,10	1,11
Viajes por habitante y año	127,22	127,70	127,85
Viajeros por vehículo-km en línea	4,4279	4,5250	4,6254
Kilómetros en línea día medio (miles)	250,03	243,54	240,44
Consumo de gasóleo por 100 kilómetros (kWh)	561,30	565,43	569,81
Consumo de gas natural por 100 kilómetros (kWh) (1)	702,33	717,48	725,45
Consumo de eléctrico por 100 kilómetros (kWh)	94,29	89,35	90,96
Consumo de híbrido por 100 kilómetros (kWh) (1)	544,00	541,37	573,55

(1) En 2015, se define un nuevo factor de conversión, por lo que, para permitir su comparación, los consumos de los años 2013 y 2014 han sido reconstruidos.

Tabla 6-16; Ratios de Explotación.

Fuente: Informe de Gestión 2015

### 6.1.8 Media anual móvil de viajeros, kilómetros y plantilla

Como resumen de los datos que se han comentado, se muestra la evolución de la Media Anual Móvil, es decir, la variación a lo largo del tiempo del valor medio diario, calculado por periodos de doce meses, de las cifras relativas a viajeros y kilómetros así como la de la plantilla efectiva de personal adscrito a la actividad de Transporte Urbano (expresada en media mensual).

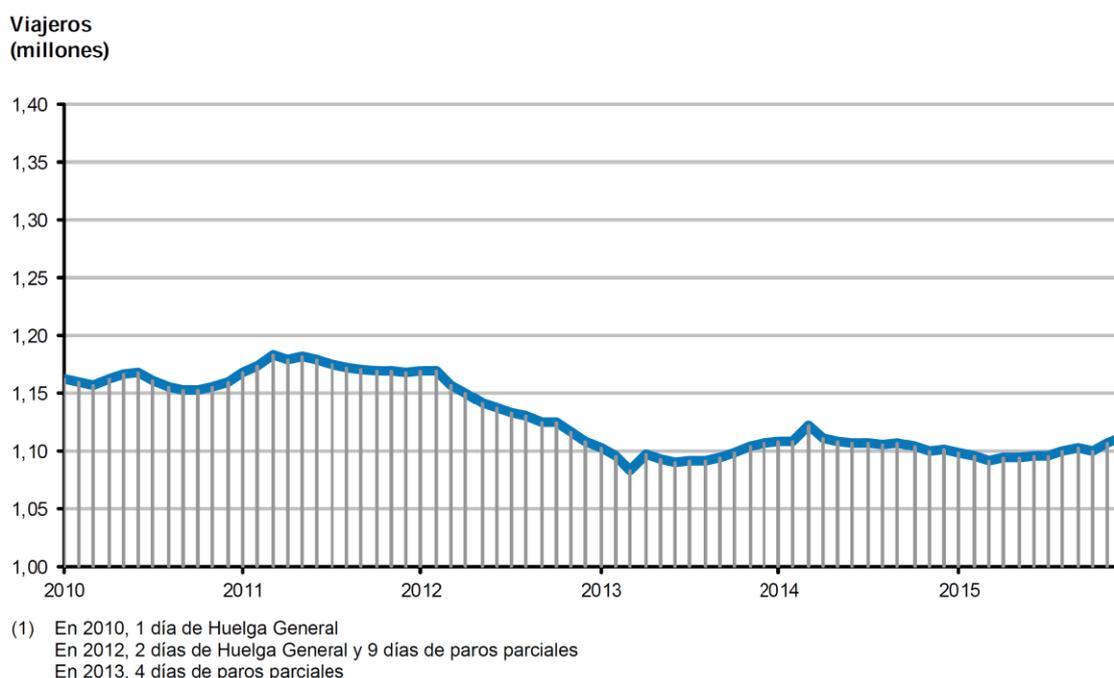
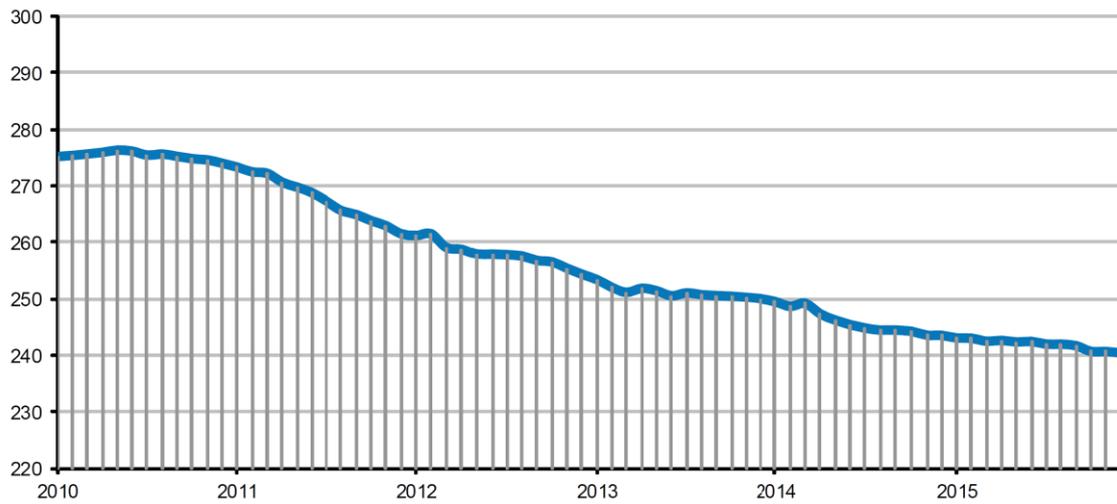


Imagen 6-7 Evolución de la Media Anual Móvil de viajeros.

Fuente: Informe de Gestión 2015

**Km en línea  
(miles)**

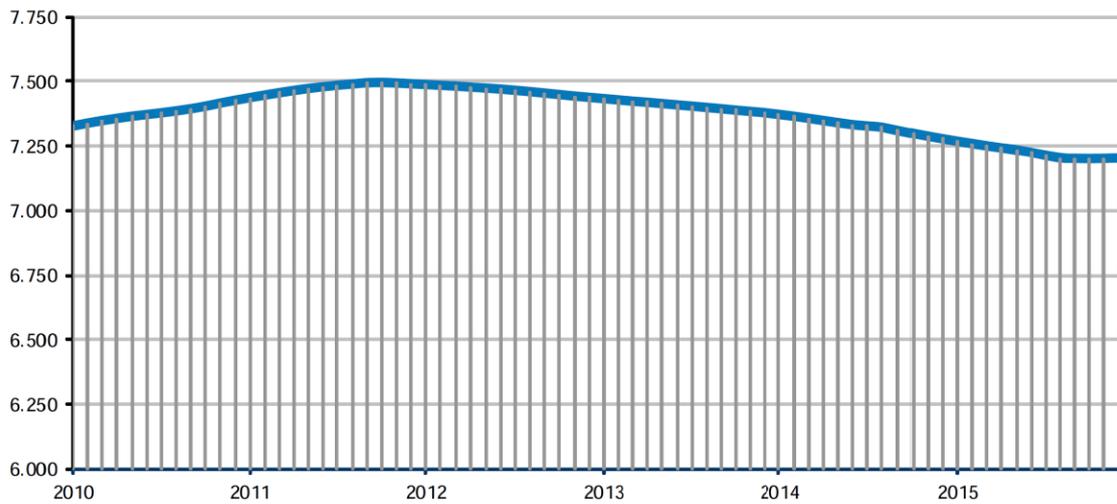


- (1) En 2010, 1 día de Huelga General  
En 2012, 2 días de Huelga General y 9 días de paros parciales  
En 2013, 4 días de paros parciales

**Imagen 6-8; Evolución de la media anual móvil de km en línea.**

**Fuente: Informe de Gestión 2015**

**Número de  
empleados**



- (1) La representación refleja la evolución de la plantilla efectiva adscrita al Transporte Urbano (teniendo en cuenta jubilados parciales y personal con jornada reducida)

**Imagen 6-9; Evolución de la media anual móvil de personal.**

**Fuente: Informe de Gestión 2015**

## 6.1.9 Cumplimiento del servicio

		Total SAE
Horas Servicio	Programadas	6.664.043
	Reales	6.569.245
	Cumplimiento	98,58%
Viajes en línea	Programados	10.336.882
	Reales	10.195.569
	Cumplimiento	98,63%
Kilómetros en línea	Programados	88.965.850
	Reales	87.759.611
	Cumplimiento	98,64%

Tabla 6-17; Cumplimiento del servicio.

Fuente: Informe de Gestión 2015

Los valores de regularidad del ejercicio 2015 conforme a los criterios de cálculo de la misma –buena (B), regular (R), o mala (M), según la desviación de sus frecuencias sea inferior al 20%, entre el 20% y el 50% y superior al 50%, respectivamente– obtenidos de las aplicaciones informáticas que se utilizan en el Centro de Control, son los siguientes:

	% Prestación						Incidencias de Regulación (%)
	Mañana			Tarde			
	B	R	M	B	R	M	
2014	87,44	3,97	8,58	84,57	5,43	10,00	1,77
2015	88,07	3,68	8,25	84,67	5,12	10,21	1,65

Tabla 6-18; Regularidad del servicio.

Fuente: Informe de Gestión 2015

## 6.1.10 Líneas en operación

El número de líneas en operación a 31 de Diciembre de 2015 es de 204, siendo su detalle el que se relaciona seguidamente, con expresión de su longitud total (ida y vuelta) en kilómetros.

Línea	Denominación (cabeceras)	Longitud
<b>RED DIURNA CONVENCIONAL</b>		
1	Plaza de Cristo Rey - Prosperidad	17.573
2	Plaza de Manuel Becerra - Avenida de la Reina Victoria	17.270
3	Puerta de Toledo - Plaza de San Amaro	16.685
4	Plaza de Ciudad Lineal - Puerta de Arganda	16.776
5	Puerta del Sol/Sevilla - Estación de Chamartín	17.080
6	Plaza de Jacinto Benavente - Orcasitas	16.494
7	Plaza de Alonso Martínez - Manoteras	19.061
8	Plaza de Legazpi - Valdebernardo	22.574
9	Sevilla - Hortaleza	20.001
10	Plaza de Cibeles - Palomeras	17.853
11	Marqués de Viana - Barrio Blanco	13.575
12	Plaza de Cristo Rey - Paseo del Marqués de Zafra	12.347
14	Plaza del Conde de Casal - Avenida de Pío XII	20.313
15	Puerta del Sol/Sevilla - La Elipa	12.482
16	Moncloa - Avenida de Pío XII	15.622
17	Plaza Mayor - Colonia Parque de Europa	20.849
18	Plaza Mayor - Villaverde Cruce	19.062
19	Plaza de Cataluña - Plaza de Legazpi	15.198
20	Puerta del Sol/Sevilla - Pavones	18.863
21	Paseo del Pintor Rosales - Barrio de El Salvador	18.414
22	Plaza de Legazpi - Villaverde Alto	16.142
23	Plaza Mayor - El Espinillo	18.564
24	Atocha RENFE - Pozo del Tío Raimundo	13.234
25	Opera - Casa de Campo	20.377
26	Plaza de Tirso de Molina - Diego de León	11.905
27	Glorieta de Embajadores - Plaza de Castilla	15.999
28	Puerta de Alcalá - Barrio de Canillejas	17.557
29	Avenida de Felipe II - Manoteras	17.525
30	Avenida de Felipe II - Pavones	18.027
31	Plaza Mayor - Aluche	16.277
32	Plaza de Jacinto Benavente - Pavones	18.221
33	Príncipe Pío - Casa de Campo	13.247
34	Plaza de Cibeles - Las Águilas	24.357
35	Plaza Mayor - Carabanchel Alto	22.329
36	Atocha - Campamento	19.572
37	Glorieta de Cuatro Caminos - Puente de Vallecas	14.587
38	Plaza de Manuel Becerra - Las Rosas	20.188
39	Opera - Colonia San Ignacio de Loyola	22.304
40	Tribunal - Alfonso XIII	16.142
41	Atocha - Colonia d l Manzanares	13.129
42	Plaza de Castilla - Barrio de Peñagrande	12.049
43	Avenida de Felipe II - Estrecho	15.433
44	Plaza del Callao - Marqués de Viana	13.586
45	Plaza de Legazpi - Avenida de la Reina Victoria	17.011
46	Sevilla - Moncloa	13.300
47	Atocha - Carabanchel Alto	20.452
48	Plaza de Manuel Becerra - Barrio de Canillejas	19.889
49	Plaza de Castilla - Arroyo del Fresno	18.926
50	Puerta del Sol - Avenida del Manzanares	8.724

<b>Línea</b>	<b>Denominación (cabeceras)</b>	<b>Longitud</b>
51	Puerta del Sol - Plaza del Perú	12.715
52	Puerta del Sol/Sevilla - Santamarca	14.108
53	Puerta del Sol/Sevilla - Arturo Soria	16.673
54	Atocha RENFE - Congosto	20.531
55	Atocha - Batán	19.240
56	Diego de León - Puente de Vallecas	9.440
57	Atocha RENFE - Alto del Arenal	15.102
58	Puente de Vallecas - Barrio de Santa Eugenia	15.329
59	Atocha RENFE - Colonia San Cristóbal de los Angeles	18.100
60	Plaza de la Cebada - Orcasitas	16.848
61	Moncloa - Narváez	12.465
62	Príncipe Pío - Los Puertos	15.350
63	Avenida de Felipe II - Barrio de Santa Eugenia	23.217
64	Glorieta de Cuatro Caminos - Arroyo del Fresno	17.227
65	Plaza de Jacinto Benavente - Colonia Gran Capitán	17.804
66	Glorieta de Cuatro Caminos - Fuencarral	18.083
67	Plaza de Castilla - Barrio de Peñagrande	16.258
68	Cuatro Caminos-Embajadores-Plaza de España-Cuatro Caminos	17.862
69	Cuatro Caminos-Plaza de España-Embajadores-Cuatro Caminos	17.980
70	Plaza de Castilla - Alsacia	19.476
71	Plaza de Manuel Becerra - Puerta de Arganda	25.438
72	Diego de León - Hortaleza	15.322
73	Diego de León - Canillas	15.819
74	Paseo del Pintor Rosales - Parque de las Avenidas	17.080
75	Plaza del Callao - Colonia del Manzanares	7.442
76	Plaza de la Beata María Ana de Jesús - Villaverde Alto	14.017
77	Plaza de Ciudad Lineal - Colonia Fin de Semana	17.922
78	Glorieta de Embajadores - Barrio de San Fermín	20.262
79	Plaza de Legazpi - Villaverde Alto	24.635
81	Oporto - Hospital 12 de Octubre	12.662
82	Moncloa - Barrio de Peñagrande	19.018
83	Moncloa - Barrio del Pilar	24.773
85	Atocha RENFE - Barrio Los Rosales	21.549
86	Atocha RENFE - Villaverde Alto	18.336
87	Plaza de la República Dominicana - Las Cárcavas	14.081
100	Mortalaz - Valderribas	16.568
101	Canillejas - Barajas	17.202
102	Atocha RENFE - Estación El Pozo	16.714
103	Estación El Pozo - Ecobulevar	20.688
104	Plaza de Ciudad Lineal - Mar de Cristal	13.228
105	Plaza de Ciudad Lineal - Barajas	24.396
106	Plaza de Manuel Becerra - Vicálvaro	21.984
107	Plaza de Castilla - Hortaleza	13.049
108	Oporto - Cementerio de Carabanchel	11.062
109	Plaza de Ciudad Lineal - Castillo de Uclés	9.969
110	Plaza de Manuel Becerra - Cementerio de La Almudena	12.890
111	Puente de Vallecas - Entrevías	9.226
112	Mar de Cristal - Barrio del Aeropuerto	24.613
113	Méndez Alvaro - Plaza de Ciudad Lineal	14.875
114	Avenida de América - Barrio del Aeropuerto	27.017

Línea	Denominación (cabeceras)	Longitud
115	Avenida de América - Pueblo de Barajas	26.809
116	Glorieta de Embajadores - Villaverde cruce	25.319
117	Aluche - Colonia San Ignacio de Loyola	5.110
118	Glorieta de Embajadores - Avenida de la Peseta	20.217
119	Atocha - Barrio de Goya	15.936
120	Plaza de Lima - Hortaleza	16.402
121	Campamento - Hospital 12 de Octubre	19.328
122	Avenida de América - Campo de las Naciones	19.113
123	Plaza de Legazpi - Villaverde Bajo	14.819
124	Glorieta de Cuatro Caminos - Lacoma	20.348
125	Mar de Cristal - Hospital Ramón y Cajal	16.253
126	Nuevos Ministerios - Barrio del Pilar	14.054
127	Glorieta de Cuatro Caminos - Ciudad de los Periodistas	13.749
128	Glorieta de Cuatro Caminos - Barrio del Pilar	10.442
129	Plaza de Castilla - Manoteras	12.458
130	Villaverde Alto - Vicálvaro	33.329
131	Campamento - Villaverde Alto	20.837
132	Moncloa - Hospital La Paz	23.305
133	Plaza del Callao - Mirasierra	29.355
134	Plaza de Castilla - Montecarmelo	19.776
135	Plaza de Castilla - Hospital Ramón y Cajal	6.409
136	Pacífico - Madrid Sur	9.753
137	Ciudad Puerta de Hierro - Fuencarral	22.369
138	Plaza de España - Aluche	15.277
139	Dehesa del Príncipe - Carabanchel Alto	15.679
140	Pavones - Canillejas	17.501
141	Atocha RENFE - Buenos Aires	12.025
142	Pavones - Ensanche de Vallecas	21.830
143	Plaza de Manuel Becerra - Villa de Vallecas	18.409
144	Pavones - Entrevías	12.370
145	Plaza del Conde de Casal - Ensanche de Vallecas	23.411
146	Plaza del Callao - Los Molinos	17.941
147	Plaza del Callao - Barrio del Pilar	21.097
148	Plaza del Callao - Puente de Vallecas	17.211
149	Tribunal - Plaza de Castilla	11.915
150	Puerta del Sol/Sevilla - Virgen del Cortijo	25.775
151	Canillejas - Barajas	13.174
152	Avenida de Felipe II - Méndez Alvaro	8.801
153	Las Rosas - Mar de Cristal	20.629
155	Plaza Elíptica - Aluche	19.121
156	Plaza de Manuel Becerra - Plaza de Legazpi	12.336
160	Moncloa - Aravaca	22.370
161	Moncloa - Estación de Aravaca	26.358
162	Moncloa - El Barrial	28.472
172 (1)	Mar de Cristal - Telefónica	26.180
173	Plaza de Castilla - Sanchinarro	13.024
174	Plaza de Castilla - Sanchinarro Este	14.330
176	Plaza de Castilla - Las Tablas	19.937
177	Plaza de Castilla - Marqués de Viana	6.384
178	Plaza de Castilla - Montecarmelo	15.594

Línea	Denominación (cabeceras)	Longitud
180	Plaza de Legazpi - Caja Mágica	5.864
200	Avenida de América - Aeropuerto	35.576
210	Plaza de Manuel Becerra - La Elipa	8.668
215	Avenida de Felipe II - Parque de Roma	5.362
247	Atocha - Colonia San José Obrero	11.739
310	Pacífico - El Pozo	10.482
E1	Atocha - Plaza Elíptica	10.127
E2	Avenida de Felipe II - Las Rosas	17.094
E3	Avenida de Felipe II - Puerta de Arganda	16.147
T11	Mar de Cristal - Parque empresarial Cristalia	5.179
T23	Puerta de Arganda - Polígono industrial de Vicálvaro	3.885
T31	El Pozo - Sierra de Guadalupe	8.014
T32	Plaza de Legazpi - Mercamadrid	14.454
T41	Estación de Cercanías Villaverde Alto - Polígono industrial La Resina	7.710
T61	Estación de Cercanías Fuencarral - Las Tablas	14.875
T62	Plaza de Castilla - Estación de Chamartín	4.546
H1	Sierra de Guadalupe - Hospital Infanta Leonor	3.643
M1	Puerta del Sol/Sevilla - Glorieta de Embajadores	4.715
M2	Sevilla - Argüelles	6.253
702	Plaza Elíptica - Cementerio Sur	7.022
704	Plaza de Castilla - Cementerio de Fuencarral	11.976
799	Mar de Cristal - Valdebebas	13.625
<b>RED UNIVERSITARIA</b>		
A	Moncloa - Campus de Somosaguas	17.850
E	Plaza del Conde de Casal - Sierra de Guadalupe	13.612
F	Glorieta de Cuatro Caminos - Ciudad Universitaria	7.584
G	Moncloa - Ciudad Universitaria	6.667
H	Aluche - Campus de Somosaguas	15.505
U	Avenida de Séneca - Paraninfo	6.612
<b>RED NOCTURNA CONVENCIONAL (Búhos)</b>		
N1	Plaza de Cibeles - Sanchinarro	27.516
N2	Plaza de Cibeles - Hortaleza	22.502
N3	Plaza de Cibeles - Canillas	22.030
N4	Plaza de Cibeles - Barajas	33.138
N5	Plaza de Cibeles - Colonia Fin de Semana	31.934
N6	Plaza de Cibeles - Las Rosas	20.838
N7	Plaza de Cibeles - Vicálvaro	28.068
N8	Plaza de Cibeles - Valdebernardo	20.613
N9	Plaza de Cibeles - Ensanche de Vallecas	36.284
N10	Plaza de Cibeles - Palomeras	15.799
N11	Plaza de Cibeles - Madrid Sur	18.638
N12	Plaza de Cibeles - Barrio de los Rosales	25.404
N13	Plaza de Cibeles - Colonia San Cristóbal de los Angeles	21.285
N14	Plaza de Cibeles - Villaverde Alto	27.538
N15	Plaza de Cibeles - Orcasur	20.075
N16	Plaza de Cibeles - Avenida de la Peseta	28.368
N17	Plaza de Cibeles - Carabanchel Alto	25.028

Línea	Denominación (cabeceras)	Longitud
N18	Plaza de Cibeles - Aluche	19.268
N19	Plaza de Cibeles - Colonia San Ignacio de Loyola	25.967
N20	Plaza de Cibeles - Barrio de Peñagrande	27.790
N21	Plaza de Cibeles - Arroyo del Fresno	23.860
N22	Plaza de Cibeles - Barrio del Pilar	20.717
N23	Plaza de Cibeles - Montecarmelo	29.795
N24	Plaza de Cibeles - Las Tablas	34.845
N25	Plaza de Alonso Martínez - Villa de Vallecas	20.606
N26	Plaza de Alonso Martínez - Aluche	22.236
<b>LINEA EXPRES AEROPUERTO</b>		
203	Atocha RENFE - Aeropuerto	46.730
<b>RESUMEN</b>		
Número de líneas		204
Longitud total de las líneas		3,577089
Longitud media de las líneas		17.535
(1) En sábados y festivos, se pone en funcionamiento una línea alternativa a la 172 denominada 372 "Mar de Cristal - Las Tablas", con una longitud de 23,678 km.		

Tabla 6-19; Líneas en explotación a 31 de diciembre de 2015, con longitud total (ida y vuelta) en kilómetros.

Fuente: Informe de Gestión 2015

### 6.1.11 Antigüedad del parque

Marca	Modelo	Número de unidades	Año de alta en servicio	Parque Total	% del Parque
<b>BREDA MENARINI BUS</b>	Avancity GNC	39	2011	39	2,04
	Vivacity GNC	15	2011	30	1,57
		15	2012		
<b>CASTROSÚA</b>	Tempus GNC	13	2012	13	0,68
<b>IVECO</b>	Cityclass GNC	19	2002	276	4,47
		10	2003		
		29	2004		
		25	2005		
		53	2006		
		80	2007		
		29	2008		
		31	2009		
		Cityclass	49		
	33		2003		
	40		2004		
	96		2005		
	61		2006		
	1		2007		
	51	2008			
38	2009				

Marca	Modelo	Número de unidades	Año de alta en servicio	Parque Total	% del Parque
	Citelis	24 12	2010 2011	36	1,89
	Citelis GNC	34 68 50 24	2010 2011 2012 2013	176	9,22
	Citelis Aeropuerto GNC	12	2011	12	0,63
<b>MAN</b>	NL/263-F	42 62 26 15 18	2001 2002 2003 2004 2005	163	854
	NL/273-F	1 36 40	2006 2008 2009	77	404
	NL/313-F GNC	20 5 35 26 58 19 2	2002 2003 2007 2010 2011 2012 2013	165	865
	NG/313-F GNC Articulado	14 18	2012 2013	32	168
	NG/313-F Articulado	2 38 9	2001 2002 2004	49	257
	NG Lion Articulado	4	2008	4	21
	NL/283-F	24	2010	24	126
<b>MERCEDES</b>	O/530 Citaro	6 22 12 49	2002 2003 2008 2009	89	466
	O/530 Cit-GNC	35	2007	35	183
<b>SCANIA</b>	N-94/UB Omnicity	24 40 19 30 35 31	2001 2002 2003 2004 2005 2006	179	938
	N270 Omnicity	52 58	2008 2009	110	577
<b>TATA HISPANO</b>	TML Híbrido GNC	5 5	2008 2009	10	52
<b>TECNOBÚS</b>	Gulliver	8	2007	20	105
<b>TOTAL PARQUE</b>		<b>12</b>	<b>2008</b>	<b>1,908</b>	<b>10.000</b>

Tabla 6-20; Antigüedad material móvil.

Fuente: Informe de Gestión 2015

Centro de Operaciones	2013	2014	2015
Fuencarral	5,76	6,72	7,98
Carabanchel	7,27	8,30	9,21
La Elipa	8,07	9,08	9,80
Entrevías	6,53	7,58	8,64
Sanchinarro	5,96	6,96	7,95
<b>Total Parque</b>	<b>6,64</b>	<b>7,65</b>	<b>8,66</b>

Tabla 6-21; Antigüedad media del parque por centros de operaciones.

Fuente: Informe de Gestión 2015

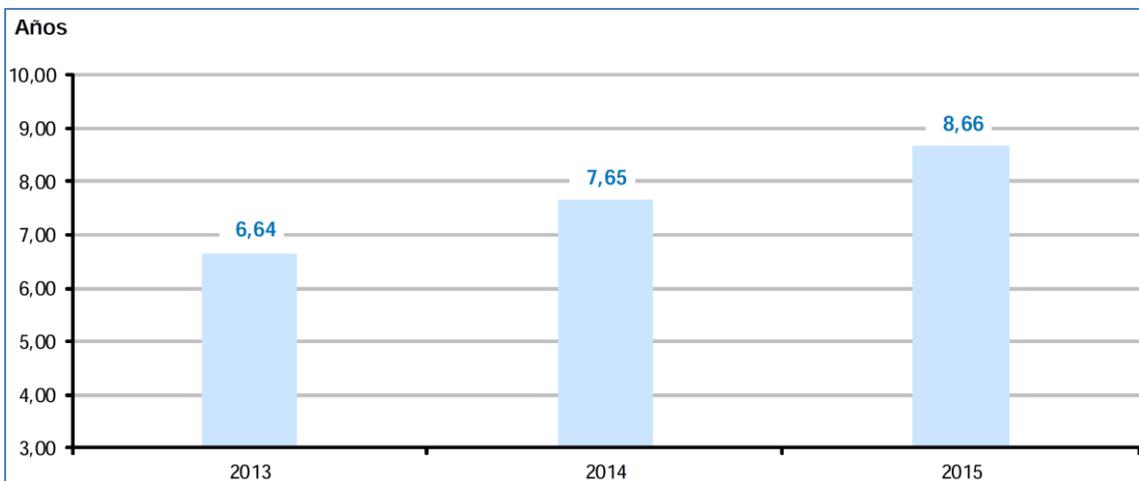


Imagen 6-10; Antigüedad media del parque años 2013-15.

Fuente: Informe de Gestión 2015

## 6.1.12 Consumo de energía

		2013		2014		2015		Δ % en el periodo 2012/15
		Total	% (1)	Total	% (1)	Total	% (1)	
Gasóleo	Total kw/h	322.125.083		305.758.419	-5,08	305.844.025	0,03	
	kWh/100 Km	561,30		565,43	0,74	569,81	0,77	
Gas natural (2)	Total kw/h	285.518.446	15,26	297.283.563	4,12	295.389.009	-0,64	19,25
	kWh/100 Km	702,33	2,54	717,48	2,16	725,45	1,11	5,92
Eléctrico	Total kw/h	241.178	1,65	225.389	-6,55	219.674	-2,54	-7,42
	kWh/100 Km	94,29	5,47	89,35	-5,24	90,96	1,80	1,74
Híbrido (3)	Total kw/h	3.780.491	362,97	3.919.182	3,67	4.287.984	9,41	425,12
	kWh/100 Km	544,00	4,14	541,37	-0,48	573,55	5,94	9,80
TOTAL	Total kw/h	611.665.198	-0,56	607.186.553	-0,73	605.740.693	-0,24	-1,52
	kWh/100 Km	617,88	1,58	629,30	1,85	635,07	0,92	4,40

Tabla 6-22; Consumo de energía por combustible y año.

Fuente: Informe de Gestión 2015

## 6.1.13 Indicadores de mantenimiento

Concepto	2015	2014	Δ %
Kilómetros recorridos (en línea)	87.759.611	88.892.615	-1,27
Plantilla media anual del personal de Talleres y Material Móvil	1.164	1.190	-2,18
Parque medio anual (valores diarios)	1.905	1.905	--
Plantilla media anual del personal de Talleres y Material Móvil/Parque medio anual de autobuses	0,61	0,62	-1,61
Parque medio anual al servicio (media mensual de salidas totales diarias)	1.389	1.396	-0,50
Parque medio anual al servicio en días laborables (excluidos sábados, domingos, festivos y mes de agosto, en salidas totales diarias)	1.703	1.705	-0,12
Plantilla media anual del personal de Talleres y Material Móvil/Parque medio anual al servicio (en todos los días del año)	0,84	0,85	-1,18
Plantilla media anual del personal de Talleres y Material Móvil/Parque medio anual al servicio en días laborables (excluidos sábados, domingos, festivos y mes de agosto)	0,68	0,70	-2,86

Tabla 6-23; Indicadores de mantenimiento 2015 y 2014.

Fuente: Informe de Gestión 2015

	Euros/Km		Δ %
	2015	2014	
Del personal de Talleres y Material Móvil	0,48870	0,48321	1,14
Del material y utillaje fungible para conservación y reparación del material móvil	0,11365	0,09269	22,61
De neumáticos	0,01385	0,01166	18,75
De lubricantes (incluido aceite motor y anticongelante)	0,00852	0,00817	4,27
De reparaciones por terceros	0,01102	0,00715	54,19

**Tabla 6-24; Indicadores costes mantenimiento.**

**Fuente: Informe de Gestión 2015**

## 6.2 Aplicación de la metodología de mejora de la eficiencia mediante el Análisis de la Autoestructura de la MTCMI a la EMT de Madrid

Para la aplicación del análisis de la MTCMI para mejorar la gestión de la eficiencia en la EMT de Madrid, se parte del Cuadro de Mando Integral y los KPI incluidos en éste, que ya utiliza la empresa para analizar su gestión, y que es similar al definido de forma genérica en los apartados anteriores.

El análisis de la MTCMI se presenta como una forma de facilitar la gestión en la empresa, ya que los directivos de la EMT, al igual que en las demás operadoras de transporte, se enfrentan al reto de mejorar la eficiencia manejando KPI interdependientes sin tener la medida exacta de la influencia de los esfuerzos de mejora de un KPI en todos los demás.

Sin embargo, y teniendo EMT tiene a su cabeza un grupo de directores que tienen mucha experiencia en planificación, ejecución y optimización de las operaciones de las empresas de transporte urbano. Teniendo en cuenta, la experiencia de planificación, ejecución y optimización que los directores de la empresa tienen, podemos estar seguros de que, tanto la gestión de la empresa, como la MTCMI correspondiente a sus KPI actuales, no cambiarán ni fluctuarán demasiado en el entorno de tiempo a considerar. Los procesos de planificación y optimización son muy estables, que es uno de los supuestos requeridos para poder efectuar el análisis de la MTCMI usando el método desarrollado.

Utilizando el método propuesto, para analizar los posibles pasos de mejora de la eficiencia y cumpliendo los principios de simplificación y optimización propuestos para él, daremos los siguientes pasos para construir la MTCMI:

- Utilizaremos los KPI actuales del Cuadro de Mando de Gerencia de la EMT de Madrid y construiremos la matriz de interacciones entre los mismos.
- Estimaremos cuáles y cuán fuertes son las relaciones entre los KPI y construiremos la matriz MCI.
- Estimaremos los costes de mejora de los objetivos de esos KPI escogidos e introduciremos los coeficientes de ponderación en la matriz MTCMI.

- Optimizaremos el total de costes de mejora de los objetivos de los KPI identificados, sobre la base de su matriz de costes usando la MED.
- Identificaremos cuál es el orden de prioridad de los KPI seleccionados y que patrón de mejora tendrán, utilizando el análisis de la estructura de autovalores y autovectores.
- Propondremos estrategias de mejora de los KPI seleccionados siguiendo el orden de prioridad del punto anterior.

### 6.2.1 KPI actuales del Cuadro de Mando Integral de Gerencia

Desde hace unos años, la EMT de Madrid utiliza los siguientes KPI en su Cuadro de Mando de Gerencia:

CUMPLIMIENTO DEL SERVICIO	CS1	% CUMPLIMIENTO HORAS-COCHE EN LÍNEA
	CS2	% CUMPLIMIENTO VIAJES EN LÍNEA
REGULARIDAD DEL SERVICIO	R1	EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD EN LÍNEA
	R2	% REGULARIDAD HORA PUNTA MAÑANA
EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA	D1	EVOLUCIÓN DE LOS VIAJEROS
	D2	VIAJEROS VEHÍCULO - KM EN LÍNEA
CLIENTES	C1	RECLAMACIONES POR MILLÓN DE VIAJEROS
RENDIMIENTO DE CONDUCTORES	RC1	% RENDIMIENTO DE CONDUCTORES
	RC2	ABSENTISMO TOTAL DE CONDUCTORES
	RC3	ABSENTISMO PARA CONDUCIR
	RC4	KM EN LÍNEA CONDUCTOR / AÑO
ACTIVIDAD Y ABSENTISMO	AA1	PLANTILLA EFECTIVA
	AA2	% ABSENTISMO TOTAL EMPRESA
FINANCIEROS	F1	COEFICIENTE DE COBERTURA TARIFARIA
	F2	NIVEL DE ENDEUDAMIENTO *
	F3	COSTE POR KILÓMETRO
	F4	CUMPLIMIENTO DE PRESUPUESTO
MANTENIMIENTO	M1	CONSUMO EXPRESADO EN ENERGÍA DE TRACCIÓN (kWh/100 km)
	M2	INTERVENCIONES DE MANTENIMIENTO POR 1000 KILÓMETROS
	M3	COSTE TRACCIÓN POR 100 KM
	M4	COSTE MANTENIMIENTO POR 100 KM
SEGURIDAD	S1	INCIDENCIAS DE SEGURIDAD POR MILLÓN DE VIAJEROS
	S2	INCIDENCIAS DE SEGURIDAD POR 1000 HORAS-COCHE EN LÍNEA

Tabla 6-25; KPI de CMI actuales de la EMT de Madrid.

Fuente: EMT de Madrid.

## 6.2.2 Matriz de interacciones

Una vez definidos los KPI utilizados por la empresa, se va a realizar la matriz de interacciones, dónde utilizando la notación normal, pondremos una cruz en cada casilla de una fila en la que el KPI de la fila influya en el KPI de la columna .

Más adelante estimaremos los coeficientes de ponderación.

	CS1	CS2	R1	R2	D1	D2	C1	RC1	RC2	RC3	RC4	AA1	AA2	F1	F2	F3	F4	M1	M2	M3	M4	S1	S2
CS1		X	X	X	X	X	X		X	X	X		X			X	X	X			X	X	X
CS2	X		X	X	X	X	X		X	X	X		X			X	X	X			X	X	X
R1	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
R2	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X		
D1	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X		X
D2	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C1	X	X	X	X	X	X		X						X	X		X						
RC1	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X
RC2	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X						
RC3	X	X		X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X						
RC4	X	X			X		X	X	X			X	X	X	X	X	X						
AA1	X	X		X	X	X	X		X	X			X	X	X	X							
AA2	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X				X		
F1												X			X		X						
F2												X					X						
F3														X	X		X						
F4												X			X								
M1														X	X	X	X			X			
M2	X	X		X	X	X	X	X			X	X		X	X	X	X			X	X	X	X
M3														X	X	X	X						
M4														X	X	X	X			X		X	X
S1	X	X		X			X	X	X	X	X		X			X	X						X
S2	X	X		X			X	X	X	X	X		X			X	X					X	

Imagen 6-11; Matriz de relación.

Fuente: DSMweb

### 6.2.3 Matriz de costes de mejora de los KPI (MCMi)

Realizada la matriz de interacciones se calcula la matriz de costes de mejora de los KPI ( MCMi) en este matriz, representada en la figura 5.11, vemos las influencias en el incremento/ decremento de un KPI sobre los demás KPI. Vemos si un incremento de uno nos implica un incremento o decremento de otro en función de su signo. Cuando el signo es negativo indica que un incremento del de la fila conlleva un decremento del de la columna.

	CS1	CS2	R1	R2	D1	D2	C1	RC1	RC2	RC3	RC4	AA1	AA2	F1	F2	F3	F4	M1	M2	M3	M4	S1	S2
CS1		5	-5	5	4	4	-4		1	2	5		1			1	1	1			1	1	1
CS2	5		-5	5	4	4	-4		1	2	5		1			1	1	1			1	1	1
R1	4	4		5	4	4	-1	3	3	3	5	4	3	4		5	1	-5	-1	-5	-3		
R2	5	5			5	5	-4	1	-1	-2	3	-3	-1	2		-3	3	-3		1	-1		
D1	-3	-3	-2	-2		5		4	3	3	-2	2	3	5	5		3	1		1	1		1
D2	2	2	-1	-1	5		2	2	3	3	2	4	3	5	5	1	3	1	1	1	1	1	1
C1	1	1	1	1	-5	-5		1						-1	1		-1						
RC1	5	5	3	-5	-5	-5	5		5	5	5	-5	5	3	2	-5	5					4	4
RC2	-5	-5		-4	-3	-3	5	-5		5	-5	5	5	-5	2	4	-5						
RC3	-5	-5		-4	-3	-3	5	-5	5		-5	5	5	-5	2	4	-5						
RC4	5	4			1			5	-5	-5		-5	-4	3	3	2	2						
AA1	3	3		1	4	1	2		-1	-1			1	-5	5	5							
AA2	-5	-5		-4	-3	-4	5	-4	5	4	-4	5		-4	3	1	1				4		
F1												-4			-5		5						
F2												-4					2						
F3														-4	3		-4						
F4												-3			-3								
M1														-3	1	4	-2			4			
M2	-4	-4		-4	-2	-2	3	-3			-3	2		-1	2	4	-3			4	1	1	1
M3														-3	4	4	4						
M4														-1	1	4	-3			5		1	1
S1	1	1		1			2	2	2	2	-1		2			1	1						5
S2	1	1		1			2	2	2	2	-1		2			1	1						5

Imagen 6-12; Matriz de pesos de interacciones.

Fuente: Elaboración propia

Esta matriz hay que pasarla a otra con coeficientes menores que la unidad para facilitar la convergencia de la serie.

Sustituiremos:

- los 5 con 1
- los 4 con 0,25

- los 3 con 0,10
- los 2 con 0,05
- los 1 con 0,025
- los blancos con 0

Con esos cambios la matriz que queda es la siguiente:

	CS1	CS2	R1	R2	D1	D2	C1	RC1	RC2	RC3	RC4	AA1	AA2	F1	F2	F3	F4	M1	M2	M3	M4	S1	S2
CS1	0,000	1,000	-1,000	1,000	0,250	0,250	-0,250	0,000	0,025	0,050	1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025
CS2	1,000	0,000	-1,000	1,000	0,250	0,250	-0,250	0,000	0,025	0,050	1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025
R1	0,250	0,250	0,000	1,000	0,250	0,250	-0,025	0,100	0,100	0,100	1,000	0,250	0,100	0,250	0,000	1,000	0,025	-1,000	-0,025	-1,000	-0,100	0,000	0,000
R2	1,000	1,000	0,000	0,000	1,000	1,000	-0,250	0,025	-0,025	-0,050	0,100	-0,100	-0,025	0,050	0,000	-0,100	0,100	-0,100	0,000	0,025	-0,025	0,000	0,000
D1	-0,100	-0,100	-0,050	-0,050	0,000	1,000	0,000	0,250	0,100	0,100	-0,050	0,050	0,100	1,000	1,000	0,000	0,100	0,025	0,000	0,025	0,025	0,000	0,025
D2	0,050	0,050	-0,025	-0,025	1,000	0,000	0,050	0,050	0,100	0,100	0,050	0,250	0,100	1,000	1,000	0,025	0,100	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
C1	0,025	0,025	0,025	0,025	-1,000	-1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,025	0,025	0,000	-0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC1	1,000	1,000	0,100	-1,000	-1,000	-1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	-1,000	1,000	0,100	0,050	-1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,250
RC2	-1,000	-1,000	0,000	-0,250	-0,100	-0,100	1,000	-1,000	0,000	1,000	-1,000	1,000	1,000	-1,000	0,050	0,250	-1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC3	-1,000	-1,000	0,000	-0,250	-0,100	-0,100	1,000	-1,000	1,000	0,000	-1,000	1,000	1,000	-1,000	0,050	0,250	-1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC4	1,000	0,250	0,000	0,000	0,025	0,000	0,000	1,000	-1,000	-1,000	0,000	-1,000	-0,250	0,100	0,100	0,050	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AA1	0,100	0,100	0,000	0,025	0,250	0,025	0,050	0,000	-0,025	-0,025	0,000	0,000	0,025	-1,000	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AA2	-1,000	-1,000	0,000	-0,250	-0,100	-0,250	1,000	-0,250	1,000	0,250	-0,250	1,000	0,000	-0,250	0,100	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000
F1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,250	0,000	0,000	-1,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,250	0,100	0,000	-0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,100	0,000	0,000	-0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,100	0,025	0,250	-0,050	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000
M2	-0,250	-0,250	0,000	-0,250	-0,050	-0,050	0,100	-0,100	0,000	0,000	-0,100	0,050	0,000	-0,025	0,050	0,250	-0,100	0,000	0,000	0,250	1,000	0,025	0,025
M3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,100	0,250	0,250	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,025	0,025	0,250	-0,100	0,000	0,000	1,000	0,000	0,025	0,025
S1	0,025	0,025	0,000	0,025	0,000	0,000	0,050	0,050	0,050	0,050	-0,025	0,000	0,050	0,000	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
S2	0,025	0,025	0,000	0,025	0,000	0,000	0,050	0,050	0,050	0,050	-0,025	0,000	0,050	0,000	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000

Imagen 6-13; Matriz de pesos de interacciones.

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado los cambios oportunos, vamos a hacer primero el cálculo de los autovectores y autovalores cambiando los signos de las interacciones negativas y pasándolas a positivas.

La matriz queda así:

	CS1	CS2	R1	R2	D1	D2	C1	RC1	RC2	RC3	RC4	AA1	AA2	F1	F2	F3	F4	M1	M2	M3	M4	S1	S2
CS1	0,000	1,000	1,000	1,000	0,250	0,250	0,250	0,000	0,025	0,050	1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025
CS2	1,000	0,000	1,000	1,000	0,250	0,250	0,250	0,000	0,025	0,050	1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025
R1	0,250	0,250	0,000	1,000	0,250	0,250	0,025	0,100	0,100	0,100	1,000	0,250	0,100	0,250	0,000	1,000	0,025	1,000	0,025	1,000	0,100	0,000	0,000
R2	1,000	1,000	0,000	0,000	1,000	1,000	0,250	0,025	0,025	0,050	0,100	0,100	0,025	0,050	0,000	0,100	0,100	0,100	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000
D1	0,100	0,100	0,050	0,050	0,000	1,000	0,000	0,250	0,100	0,100	0,050	0,050	0,100	1,000	1,000	0,000	0,100	0,025	0,000	0,025	0,025	0,000	0,025
D2	0,050	0,050	0,025	0,025	1,000	0,000	0,050	0,050	0,100	0,100	0,050	0,250	0,100	1,000	1,000	0,025	0,100	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
C1	0,025	0,025	0,025	0,025	1,000	1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,025	0,000	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC1	1,000	1,000	0,100	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,100	0,050	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,250
RC2	1,000	1,000	0,000	0,250	0,100	0,100	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,050	0,250	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC3	1,000	1,000	0,000	0,250	0,100	0,100	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,050	0,250	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC4	1,000	0,250	0,000	0,000	0,025	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	0,250	0,100	0,100	0,050	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AA1	0,100	0,100	0,000	0,025	0,250	0,025	0,050	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000	0,025	1,000	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AA2	1,000	1,000	0,000	0,250	0,100	0,250	1,000	0,250	1,000	0,250	1,000	0,000	0,250	0,100	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000
F1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,100	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	0,000	0,000	0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	0,025	0,250	0,050	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000
M2	0,250	0,250	0,000	0,250	0,050	0,050	0,100	0,100	0,000	0,000	0,100	0,050	0,000	0,025	0,050	0,250	0,100	0,000	0,000	0,250	1,000	0,025	0,025
M3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	0,250	0,250	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,025	0,250	0,100	0,000	0,000	1,000	0,000	0,025	0,025
S1	0,025	0,025	0,000	0,025	0,000	0,000	0,050	0,050	0,050	0,050	0,025	0,000	0,050	0,000	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
S2	0,025	0,025	0,000	0,025	0,000	0,000	0,050	0,050	0,050	0,050	0,025	0,000	0,050	0,000	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000

Imagen 6-14; Matriz de coeficientes de ponderación positivos.

Fuente: Elaboración propia

## 6.2.4 Cálculo de Autovalores y Autovectores con coeficientes positivos

Una vez realizada la matriz de coeficientes de ponderación positivos, se iguala a cero el determinante de la matriz  $[[MTCMI] - \lambda I]$  obteniendo la ecuación característica:

$$p(\lambda) = |[MTCMI] - \lambda I| = 0$$

siendo  $MTCMI = [a_{ij}]$  una matriz  $m \times m$ , cuyas soluciones son los autovalores

$$= \begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{12} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2m} \\ | & | & \ddots & | \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} - \lambda \end{vmatrix} =$$

$$= (-1)^m \lambda^m + c_{m-1} \lambda^{m-1} + \dots + c_0$$

Los autovalores serán reales y complejos, como hemos visto.

Haciendo el cálculo del sistema sale la siguiente matriz de autovalores (se presenta partida en dos):

	CS1	CS2	R1	R2	D1	D2	C1	RC1	RC2	RC3	RC4	AA1
CS1	4,7134											
CS2		1,1723										
R1			1,0200									
R2				0,9307								
D1					0,2613+0,6002*i							
D2						0,2613-0,6002*i						
C1							-1,2060					
RC1								-0,7879+0,3044*i				
RC2									-0,7879-0,3044*i			
RC3										-1		
RC4											-0,3756+0,4683*i	
AA1												-0,3756-0,4683*i
AA2												
F1												
F2												
F3												
F4												
M1												
M2												
M3												
M4												
S1												
S2												

	AA2	F1	F2	F3	F4	M1	M2	M3	M4	S1	S2
CS1											
CS2											
R1											
R2											
D1											
D2											
C1											
RC1											
RC2											
RC3											
RC4											
AA1											
AA2	0,2182+0,2252*i										
F1		0,2182-0,2252*i									
F2			-0,4049+0,1630*i								
F3				-0,4049-0,1630*i							
F4					-0,1520+0,1438*i						
M1						-0,1520-0,1438*i					
M2							0,0013				
M3								-0			
M4									-1		
S1										-1	
S2											-1

Imagen 6-15; Matriz de autovalores

Fuente: Elaboración propia

Y la siguiente matriz de autovectores (se presenta partida en dos):

	CS1	CS2	R1	R2	D1	D2	C1	RC1	RC2	RC3	RC4	AA1
CS1	0,2062	-0,3463	-0,1893	-0,327	0,1352+0,0671*i	0,1352-0,0671*i	-0,0838	-0,0594-0,0864*i	-0,0594+0,0864*i	-0,0381	-0,0879+0,1154*i	-0,0879-0,1154*i
CS2	0,2062	-0,3463	-0,1893	-0,327	0,1352+0,0671*i	0,1352-0,0671*i	-0,0838	-0,0594-0,0864*i	-0,0594+0,0864*i	-0,0381	-0,0879+0,1154*i	-0,0879-0,1154*i
R1	0,1736	-0,1178	-0,0885	-0,0935	-0,0808+0,0359*i	-0,0808-0,0359*i	-0,4954	0,4487-0,1277*i	0,4487+0,1277*i	-0,0463	-0,0014-0,2445*i	-0,0014+0,2445*i
R2	0,1385	0,0886	-0,0946	-0,2071	0,5079-0,0642*i	0,5079+0,0642*i	0,0661	0,1756+0,2755*i	0,1756-0,2755*i	0,0628	0,5163+0,0000*i	0,5163+0,0000*i
D1	0,0804	0,3221	0,1133	0,1705	-0,0352+0,0553*i	-0,0352-0,0553*i	0,2316	0,0382-0,1503*i	0,0382+0,1503*i	0,5343	0,0058-0,0405*i	0,0058+0,0405*i
D2	0,0596	0,3503	0,1103	0,1723	-0,0344+0,0768*i	-0,0344-0,0768*i	-0,1831	-0,1176+0,1504*i	-0,1176-0,1504*i	-0,5271	0,0046+0,0665*i	0,0046-0,0665*i
C1	0,0362	0,5637	0,2109	0,3468	0,1509+0,1525*i	0,1509-0,1525*i	-0,0203	0,0579+0,0235*i	0,0579-0,0235*i	0,0048	-0,0040-0,0494*i	-0,0040+0,0494*i
RC1	0,4912	0,1542	0,2543	0,1687	0,0212-0,1518*i	0,0212+0,1518*i	-0,372	0,5561+0,0000*i	0,5561+0,0000*i	-0,4706	0,3059-0,3836*i	0,3059+0,3836*i
RC2	0,4456	-0,1281	0,0352	0,1966	-0,2077-0,1168*i	-0,2077+0,1168*i	-0,1528	-0,0462-0,0559*i	-0,0462+0,0559*i	0,3025	-0,1079+0,0023*i	-0,1079-0,0023*i
RC3	0,4456	-0,1281	0,0352	0,1966	-0,2077-0,1168*i	-0,2077+0,1168*i	-0,1528	-0,0462-0,0559*i	-0,0462+0,0559*i	0,3025	-0,1079+0,0023*i	-0,1079-0,0023*i
RC4	0,3676	-0,3308	0,0387	0,1571	-0,5769+0,0000*i	-0,5769-0,0000*i	0,6108	-0,4849-0,0161*i	-0,4849+0,0161*i	0,0362	-0,4484+0,0496*i	-0,4484-0,0496*i
AA1	0,0212	0,1345	-0,0317	-0,0118	0,0177-0,0071*i	0,0177+0,0071*i	-0,0354	-0,0255+0,0576*i	-0,0255-0,0576*i	-0,1424	0,1007-0,0088*i	0,1007+0,0088*i
AA2	0,2757	-0,0263	-0,0662	0,008	0,2387-0,1478*i	0,2387+0,1478*i	0,2983	0,0870+0,1298*i	0,0870-0,1298*i	0,0031	0,2770+0,0507*i	0,2770-0,0507*i
F1	0,0083-0,0492*i	0,0733	-0,3069	0,0083+0,0492*i	-0,0153-0,0124*i	-0,0153+0,0124*i	-0,0006	-0,0121-0,0009*i	-0,0121+0,0009*i	-0,0071	-0,0312+0,0422*i	-0,0312-0,0422*i
F2	0,0011	0,0293	-0,008	-0,0033	-0,0000-0,0073*i	-0,0000+0,0073*i	0,0072	0,0129-0,0130*i	0,0129+0,0130*i	0,0329	-0,0288-0,0294*i	-0,0288+0,0294*i
F3	0,0001	0,0195	-0,0065	-0,003	-0,0090+0,0028*i	-0,0090-0,0028*i	-0,001	-0,0001+0,0033*i	-0,0001-0,0033*i	-0,0038	0,0281+0,0069*i	0,0281-0,0069*i
F4	0,0005	0,014	-0,0039	-0,0016	-0,0009-0,0033*i	-0,0009+0,0033*i	0,0023	0,0033-0,0044*i	0,0033+0,0044*i	0,0103	-0,0125-0,0054*i	-0,0125+0,0054*i
M1	0,0001	0,0155	-0,0049	-0,0034	-0,0027+0,0081*i	-0,0027-0,0081*i	0,0003	0,0023-0,0002*i	0,0023+0,0002*i	0,0021	0,0067-0,0140*i	0,0067+0,0140*i
M2	0,0507	0,05	0,0733	-0,3069	0,2423-0,1335*i	0,2423+0,1335*i	-0,0026	-0,0479-0,0507*i	-0,0479+0,0507*i	0,0151	-0,2359-0,0422*i	-0,2359+0,0422*i
M3	0,0001	0,019	-0,0064	-0,003	-0,0069+0,0037*i	-0,0069-0,0037*i	-0,0017	-0,0047+0,0028*i	-0,0047-0,0028*i	-0,0086	0,0054+0,0094*i	0,0054-0,0094*i
M4	0,0004	0,0233	0,0213	-0,0264	-0,0006+0,0171*i	-0,0006-0,0171*i	0,0012	0,0065-0,0008*i	0,0065+0,0008*i	0,0076	0,0056-0,0237*i	0,0056+0,0237*i
S1	0,029	-0,0044	0,6171	-0,406	-0,0152+0,0111*i	-0,0152-0,0111*i	0,0033	-0,0104-0,0041*i	-0,0104+0,0041*i	-0,0038	-0,0129+0,0042*i	-0,0129-0,0042*i
S2	0,029	-0,0044	0,6171	-0,406	-0,0152+0,0111*i	-0,0152-0,0111*i	0,0033	-0,0104-0,0041*i	-0,0104+0,0041*i	-0,0038	-0,0129+0,0042*i	-0,0129-0,0042*i

	AA2	F1	F2	F3	F4	M1	M2	M3	M4	S1	S2
CS1	-0,0606+0,0215*i	-0,0606-0,0215*i	0,0658-0,0296*i	0,0658+0,0296*i	0,0154-0,0051*i	0,0154+0,0051*i	0,0209	0,0057	0,3979	0,4795	0,2902
CS2	-0,0606+0,0215*i	-0,0606-0,0215*i	0,0658-0,0296*i	0,0658+0,0296*i	0,0154-0,0051*i	0,0154+0,0051*i	0,0209	0,0057	-0,4318	-0,492	-0,336
R1	0,0083-0,0492*i	0,0083+0,0492*i	-0,0676+0,0970*i	-0,0676-0,0970*i	0,0089+0,0005*i	0,0089-0,0005*i	-0,2125	0,018	-0,2512	-0,0846	-0,3371
R2	-0,2703+0,2514*i	-0,2703-0,2514*i	-0,5417+0,0000*i	-0,5417-0,0000*i	-0,1045-0,2092*i	-0,1045+0,2092*i	0,1707	0,4553	0,0094	0,0043	0,0128
D1	-0,0014-0,0031*i	-0,0014+0,0031*i	-0,0462+0,0135*i	-0,0462-0,0135*i	-0,0207-0,0034*i	-0,0207+0,0034*i	-0,0032	0,0079	0,2503	0,0783	0,3346
D2	-0,0100-0,0221*i	-0,0100+0,0221*i	0,1169-0,0476*i	0,1169+0,0476*i	0,0298+0,0174*i	0,0298-0,0174*i	0,0013	-0,0334	-0,234	-0,0737	-0,3129
C1	-0,0854+0,0115*i	-0,0854-0,0115*i	-0,1256+0,0246*i	-0,1256-0,0246*i	0,0010-0,0384*i	0,0010+0,0384*i	-0,0673	0,092	-0,0091	-0,0017	-0,0119
RC1	-0,0241+0,0928*i	-0,0241-0,0928*i	-0,4744+0,0958*i	-0,4744-0,0958*i	-0,0764-0,1021*i	-0,0764+0,1021*i	0,0704	0,2325	-0,0254	-0,0253	-0,0378
RC2	0,1248-0,0607*i	0,1248+0,0607*i	0,0928+0,0261*i	0,0928-0,0261*i	0,0093+0,0524*i	0,0093-0,0524*i	-0,0355	-0,1204	-0,3059	-0,4499	-0,167
RC3	0,1248-0,0607*i	0,1248+0,0607*i	0,0928+0,0261*i	0,0928-0,0261*i	0,0093+0,0524*i	0,0093-0,0524*i	-0,0355	-0,1204	-0,3059	-0,0842	-0,4063
RC4	0,3228-0,2248*i	0,3228+0,2248*i	0,5302-0,0419*i	0,5302+0,0419*i	0,0761+0,2199*i	0,0761-0,2199*i	0,0496	-0,4904	0,2855	0,0951	0,3829
AA1	0,0001+0,0024*i	0,0001-0,0024*i	0,0251+0,0073*i	0,0251-0,0073*i	0,0007+0,0021*i	0,0007-0,0021*i	0	0,0015	-0,0576	-0,0182	-0,077
AA2	-0,1218+0,0936*i	-0,1218-0,0936*i	-0,1010-0,0648*i	-0,1010+0,0648*i	-0,0179-0,0855*i	-0,0179+0,0855*i	-0,1015	0,1686	0,4478	0,4951	0,3569
F1	0,0115-0,0017*i	0,0115+0,0017*i	0,0107+0,0241*i	0,0107-0,0241*i	-0,0096+0,0056*i	-0,0096-0,0056*i	0	-0,0076	-0,0041	-0,0013	-0,0055
F2	0,0016+0,0012*i	0,0016-0,0012*i	-0,0115-0,0090*i	-0,0115+0,0090*i	0,0012-0,0022*i	0,0012+0,0022*i	0	-0,0111	0,0142	0,0045	0,019
F3	0,0069-0,0081*i	0,0069+0,0081*i	0,0026-0,0111*i	0,0026+0,0111*i	0,0120+0,0045*i	0,0120-0,0045*i	0	0,0021	-0,0015	-0,0005	-0,002
F4	0,0012+0,0004*i	0,0012-0,0004*i	-0,0030-0,0008*i	-0,0030+0,0008*i	-0,0007-0,0006*i	-0,0007+0,0006*i	0	0,0113	0,0043	0,0014	0,0058
M1	-0,0069-0,0220*i	-0,0069+0,0220*i	-0,0027-0,0034*i	-0,0027+0,0034*i	-0,0016-0,0007*i	-0,0016+0,0007*i	-0,2404	0,0026	0,0011	0,0003	0,0015
M2	-0,7844+0,0000*i	-0,7844+0,0000*i	0,1707+0,2564*i	0,1707-0,2564*i	0,9249+0,0000*i	0,9249-0,0000*i	0,9177	0,655	-0,0339	-0,0095	-0,0451
M3	0,0039-0,0122*i	0,0039+0,0122*i	0,0017+0,0077*i	0,0017-0,0077*i	-0,0042-0,0105*i	-0,0042+0,0105*i	-0,0001	0,002	-0,0039	-0,0012	-0,0052
M4	-0,0195-0,0463*i	-0,0195+0,0463*i	-0,0015-0,0134*i	-0,0015+0,0134*i	-0,0249+0,0361*i	-0,0249-0,0361*i	-0,0114	-0,031	0,0034	0,0011	0,0046
S1	0,0025-0,0061*i	0,0025+0,0061*i	0,0162+0,0001*i	0,0162-0,0001*i	0,0023+0,0054*i	0,0023-0,0054*i	0,0019	-0,0114	0,0017	-0,1487	-0,0312
S2	0,0025-0,0061*i	0,0025+0,0061*i	0,0162+0,0001*i	0,0162-0,0001*i	0,0023+0,0054*i	0,0023-0,0054*i	0,0019	-0,0114	0,0017	0,1498	0,0356

Imagen 6-16; matriz de autovectores.

Fuente: Elaboración propia



Haciendo el análisis de los autovalores podemos extraer la siguiente información:

Los KPI más importantes en su contribución a la eficiencia global son, como dijimos antes, los que tienen un modo de convergencia más lento, que coincide con los que tienen los autovalores reales positivos más altos.

En este caso son:

$$CS1= 4,7134$$

$$CS2=1,1723.$$

Sabemos que los autovectores en la matriz de autovectores son los vectores unitarios de cada dirección. Por ello, todos los componentes de cada autovector en esta matriz son más pequeños que uno.

Mirando los autovectores de CS1 y CS2 , que son las dos primeras columnas de la matriz de autovectores, vemos que los KPI que más contribuyen a cada uno de ellos son (contando solo los mayores de 0,1):

A CS1:

1. RC1	0,4912
2. RC2	0,4456
3. RC3	0,4456
4. RC4	0,3676
5. AA2	0,2757
6. CS1	0,2062
7. CS2	0,2062
8. R1	0,1736
9. R2	0,1385

A CS2:

1. C1	0,5637
2. D2	0,3503
3. D1	0,3221
4. RC1	0,1542
5. AA1	0,1345

Al calcular los primeros vectores de trabajo veremos si se confirma:

$$\vec{c}_{r(t+1)} = MTCMI \cdot \vec{c}_{r_t}$$

$$\vec{c}_{r_1} = MTCMI \cdot \vec{c}_{r_0}$$

Como MTCMI era:

	CS1	CS2	R1	R2	D1	D2	C1	RC1	RC2	RC3	RC4	AA1	AA2	F1	F2	F3	F4	M1	M2	M3	M4	S1	S2
CS1	0,000	1,000	1,000	1,000	0,250	0,250	0,250	0,000	0,025	0,050	1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025
CS2	1,000	0,000	1,000	1,000	0,250	0,250	0,250	0,000	0,025	0,050	1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025
R1	0,250	0,250	0,000	1,000	0,250	0,250	0,025	0,100	0,100	0,100	1,000	0,250	0,100	0,250	0,000	1,000	0,025	1,000	0,025	1,000	0,100	0,000	0,000
R2	1,000	1,000	0,000	0,000	1,000	1,000	0,250	0,025	0,025	0,050	0,100	0,100	0,025	0,050	0,000	0,100	0,100	0,100	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000
D1	0,100	0,100	0,050	0,050	0,000	1,000	0,000	0,250	0,100	0,100	0,050	0,050	0,100	1,000	1,000	0,000	0,100	0,025	0,000	0,025	0,025	0,000	0,025
D2	0,050	0,050	0,025	0,025	1,000	0,000	0,050	0,050	0,100	0,100	0,050	0,250	0,100	1,000	1,000	0,025	0,100	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
C1	0,025	0,025	0,025	0,025	1,000	1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,025	0,000	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC1	1,000	1,000	0,100	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,100	0,050	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,250
RC2	1,000	1,000	0,000	0,250	0,100	0,100	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,050	0,250	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC3	1,000	1,000	0,000	0,250	0,100	0,100	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,050	0,250	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC4	1,000	0,250	0,000	0,000	0,025	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000	1,000	0,250	0,100	0,050	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AA1	0,100	0,100	0,000	0,025	0,250	0,025	0,050	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000	0,025	1,000	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AA2	1,000	1,000	0,000	0,250	0,100	0,250	1,000	0,250	1,000	0,250	0,250	1,000	0,000	0,250	0,100	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000
F1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,100	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	0,000	0,000	0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	0,025	0,250	0,050	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000
M2	0,250	0,250	0,000	0,250	0,050	0,050	0,100	0,100	0,000	0,000	0,100	0,050	0,000	0,025	0,050	0,250	0,100	0,000	0,000	0,250	1,000	0,025	0,025
M3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	0,250	0,250	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,025	0,250	0,100	0,000	0,000	1,000	0,000	0,025	0,025	0,025
S1	0,025	0,025	0,000	0,025	0,000	0,000	0,050	0,050	0,050	0,050	0,025	0,000	0,050	0,000	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
S2	0,025	0,025	0,000	0,025	0,000	0,000	0,050	0,050	0,050	0,050	0,025	0,000	0,050	0,000	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000

Imagen 6-19; Matriz MTCMI.

Fuente: Elaboración propia

y

$$\vec{c}_{r_0} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

al multiplicarlas obtenemos los cuatro primeros vectores de coste cri:

CS1		1		5,00		26,62		133,74		636,82
CS2		1		5,00		26,62		133,74		636,82
R1		1		7,08		23,59		115,31		536,12
R2		1		4,98		21,42		95,97		437,13
D1		1		4,15		15,17		57,28		256,39
D2		1		4,13		12,70		44,98		191,66
C1		1		2,20		9,24		32,04		122,47
RC1		1		13,75		65,85		324,42		1523,99
RC2		1		10,75		57,84		287,64		1378,07
RC3		1		10,75		57,84		287,64		1378,07
RC4	Cr <sub>0</sub> =	1	Cr <sub>1</sub> =	5,83	Cr <sub>2</sub> =	47,27	Cr <sub>3</sub> =	231,15	Cr <sub>4</sub> =	1131,07
AA1		1		3,63		6,24		17,23		70,07
AA2		1		7,00		37,82		180,09		857,30
F1		1		2,25		1,41		2,87		6,60
F2		1		0,30		0,92		1,58		4,34
F3		1		0,60		0,64		0,54		1,05
F4		1		0,20		0,39		0,72		1,88
M1		1		0,70		0,64		0,50		0,68
M2		1		6,93		14,29		38,99		161,88
M3		1		0,85		0,50		0,63		1,00
M4		1		1,45		1,15		0,97		1,88
S1		1		4,40		4,16		18,67		89,15
S2		1		1,40		4,16		18,67		89,15

en los que se han marcado en amarillo, en cada uno de ellos, los nueve componentes más altos.

A partir del segundo se comprueba que los más altos son siempre los mismos y son:

1. RC1
2. RC2
3. RC3
4. RC4
5. AA2
6. CS1
7. CS2
8. R1
9. R2

que podemos comprobar que son los mismos que aportan más al autovector CS1 o más atrás.

De lo anterior podemos deducir que:

- CS1 (% de cumplimiento de horas de autobuses en la línea)
- CS2 (% de cumplimiento de viajes de autobuses en la línea)

serían los KPI que más contribuyen a la mejora de la eficiencia de la EMT de Madrid con esa matriz de relaciones entre KPI.

Que a CS1 los KPI que más le influyen son por orden los siguientes:

- |   |        |
|---|--------|
| 1. RC1: (% de rendimiento de conductores)                 | 0,4912 |
| 2. RC2: (Absentismo total de conductores)                 | 0,4456 |
| 3. RC3: (Absentismo para conducir)                        | 0,4456 |
| 4. RC4: (Kilómetros en línea por conductor y año)         | 0,3676 |
| 5. AA2: (Absentismo total de la empresa)                  | 0,2757 |
| 6. R1: (Evolución de la velocidad en línea)               | 0,1736 |
| 7. R2: (% de regularidad en las horas punta de la mañana) | 0,1385 |

Que a CS2 los KPI que más le influyen son por orden los siguientes:

1. C1: (Reclamaciones por millón de viajeros) 0,5637
2. D2: (Viajeros por vehículo y kilómetro en línea) 0,3503
3. D1: (Evolución de los viajeros) 0,3221
4. RC1: (Rendimiento de los Conductores) 0,1542
5. AA1: (Plantilla efectiva) 0,1345

Con estos resultados ya tenemos claro cuáles son los principales KPI a mejorar (CS1 y CS2) y como se pueden mejorar con más fuerza cada uno de ellos.

## 6.2.5 Cálculo de autovalores y autovectores con los coeficientes de ponderación positivos y negativos.

Ahora podemos hacer el análisis de la matriz de ponderación de relaciones con los coeficientes de ponderación positivos y negativos, lo que nos dirá si el resultado es parecido al de haber tomado los valores absolutos.

Al tomar los coeficientes tanto positivos como negativos, resolviendo la ecuación característica y calculando los autovalores, nos salen:

La matriz de autovalores:

	CS1	CS2	R1	R2	D1	D2	C1	RC1	RC2	RC3	RC4
CS1	2,5655										
CS2		-1,6512									
R1			1,2449+0,8701*i								
R2				1,2449-0,8701*i							
D1					-0,6956+0,9084*i						
D2						-0,6956-0,9084*i					
C1							0,7511+0,4790*i				
RC1								0,7511+0,4790*i			
RC2									0,7511-0,4790*i		
RC3										0,3831+0,4246*i	
RC4											0,3831-0,4246*i
AA1											
AA2											
F1											
F2											
F3											
F4											
M1											
M2											
M3											
M4											
S1											
S2											



La matriz de autovalores:

	CS1	CS2	R1	R2	D1	D2	C1	RC1	RC2	RC3	RC4	AA1	AA2	F1	F2	F3	F4	M1	M2	M3	M4	S1	S2	
CS1	2,3655																							
CS2		-1,6512																						
R1			1,2449+0,8701*i																					
R2				1,2449-0,8701*i																				
D1					-0,6956+0,9084*i																			
D2						-0,6956-0,9084*i																		
C1							0,7511+0,4790*i																	
RC1								0,7511+0,4790*i																
RC2									0,7511+0,4790*i															
RC3										0,3831+0,4246*i														
RC4											0,3831-0,4246*i													
AA1												-0,9796												
AA2													-0,5353											
F1														-0,3410-0,2833*i										
F2															-0,3410-0,2833*i									
F3																0,0944								
F4																	-0,0504+0,1408*i							
M1																		-0,0504-0,1408*i						
M2																			0,0004					
M3																					0,114			
M4																						-1		
S1																							-1	
S2																								-1

Imagen 6-22; matriz de autovalores

Fuente elaboración propia

y la de autovectores:

	CS1	CS2	R1	R2	D1	D2	C1	RC1	RC2	RC3	RC4	AA1	AA2	F1	F2	F3	F4	M1	M2	M3	M4	S1	S2
CS1	0,1454	-0,3037	-0,1951+0,0022*i	-0,1951-0,0022*i	-0,0156+0,1767*i	-0,0156-0,1767*i	0,1014	0,2633+0,0240*i	0,2633+0,0240*i	0,0614-0,1195*i	0,0614+0,1195*i	-0,0602	0,0312	-0,0189+0,0056*i	-0,0189-0,0056*i	-0,0051	-0,0005-0,0009*i	-0,0005+0,0009*i	0,0045	-0,0193	-0,0848	0,2227	-0,0732
CS2	0,1454	-0,3037	-0,1951+0,0022*i	-0,1951-0,0022*i	-0,0156+0,1767*i	-0,0156-0,1767*i	0,1014	0,2633+0,0240*i	0,2633+0,0240*i	0,0614-0,1195*i	0,0614+0,1195*i	-0,0602	0,0312	-0,0189+0,0056*i	-0,0189-0,0056*i	-0,0051	-0,0005-0,0009*i	-0,0005+0,0009*i	0,0045	-0,0193	0,0057	-0,2827	0,0322
R1	0,1397	-0,2705	-0,1536-0,0096*i	-0,1536+0,0096*i	-0,0240+0,1175*i	-0,0240-0,1175*i	0,0767	-0,0220-0,2133*i	-0,0220+0,2133*i	-0,0118-0,0589*i	-0,0118+0,0589*i	-0,0167	0,0289	-0,0419+0,0485*i	-0,0419-0,0485*i	-0,0467	-0,0178-0,0110*i	-0,0178+0,0110*i	0,0705	0,1992	0,0021	-0,0022	0,0095
R2	0,0501	0,4097	-0,3565+0,1086*i	-0,3565-0,1086*i	0,2569+0,0461*i	0,2569-0,0461*i	0,3008	0,4227-0,1436*i	0,4227+0,1436*i	0,0310-0,3501*i	0,0310+0,3501*i	0,0078	-0,3265	0,2544-0,0363*i	0,2544+0,0363*i	-0,0275	0,0003-0,0141*i	0,0003+0,0141*i	0,0427	0,2113	-0,0496	-0,0236	-0,0549
D1	-0,1316	-0,1824	0,0598+0,2226*i	0,0598-0,2226*i	-0,0254+0,1338*i	-0,0254-0,1338*i	0,0526	-0,0519+0,0494*i	-0,0519-0,0494*i	0,0171+0,0508*i	0,0171-0,0508*i	0,6797	0,0189	0,0851-0,0196*i	0,0851+0,0196*i	0,0189	0,0199-0,0028*i	0,0199+0,0028*i	-0,0205	0,0052	0,6923	0,5237	0,4934
D2	-0,0956	0,0839	-0,0363+0,1920*i	-0,0363-0,1920*i	-0,0476+0,0527*i	-0,0476-0,0527*i	0,0768	-0,0116+0,0549*i	-0,0116-0,0549*i	0,0236+0,0291*i	0,0236-0,0291*i	-0,5736	0,2608	-0,1436+0,0912*i	-0,1436-0,0912*i	-0,0174	-0,0184+0,0054*i	-0,0184-0,0054*i	0,0225	0,0052	-0,3532	-0,4326	-0,3905
C1	0,0917	-0,0608	0,1218+0,2440*i	0,1218-0,2440*i	0,0130+0,1148*i	0,0130-0,1148*i	-0,1142	0,0060-0,1648*i	0,0060+0,1648*i	-0,1564+0,0586*i	-0,1564-0,0586*i	0,1297	0,327	-0,2353+0,0096*i	-0,2353-0,0096*i	-0,0287	-0,0223+0,0088*i	-0,0223-0,0088*i	0,0419	-0,0312	0,1444	0,0943	0,1075
RC1	-0,1582	0,5491	0,6136+0,0000*i	0,6136-0,0000*i	0,6843+0,0000*i	0,6843-0,0000*i	-0,1332	-0,1322-0,2691*i	-0,1322+0,2691*i	0,1168+0,1978*i	0,1168-0,1978*i	-0,0266	-0,5923	0,5476+0,0000*i	0,5476-0,0000*i	0,0381	0,0371-0,0112*i	0,0371+0,0112*i	-0,0426	0,1301	-0,1242	-0,065	-0,1256
RC2	-0,5234	0,1991	0,1112-0,1122*i	0,1112+0,1122*i	0,1317+0,2208*i	0,1317-0,2208*i	0,1608	0,2784-0,0193*i	0,2784+0,0193*i	0,1125-0,1140*i	0,1125+0,1140*i	0,1124	-0,1423	0,2216+0,0539*i	0,2216-0,0539*i	0,0155	0,0159-0,0026*i	0,0159+0,0026*i	-0,017	0,0267	0,1167	0,3433	0,0783
RC3	-0,5234	0,1991	0,1112-0,1122*i	0,1112+0,1122*i	0,1317+0,2208*i	0,1317-0,2208*i	0,1608	0,2784-0,0193*i	0,2784+0,0193*i	0,1125-0,1140*i	0,1125+0,1140*i	0,1124	-0,1423	0,2216+0,0539*i	0,2216-0,0539*i	0,0155	0,0159-0,0026*i	0,0159+0,0026*i	-0,017	0,0267	0,0389	0,0504	0,0019
RC4	0,4473	0,1285	0,1536+0,1076*i	0,1536-0,1076*i	-0,3991-0,1739*i	-0,3991+0,1739*i	-0,3215	-0,4947+0,0000*i	-0,4947-0,0000*i	-0,0920+0,3584*i	-0,0920-0,3584*i	0,0965	0,3675	-0,3360+0,0557*i	-0,3360-0,0557*i	-0,0227	-0,0248+0,0068*i	-0,0248-0,0068*i	0,0336	-0,006	0,1351	0,0834	0,1098
AA1	0,0066	0,071	-0,0310+0,0180*i	-0,0310-0,0180*i	-0,0036+0,0166*i	-0,0036-0,0166*i	0,0229	0,0376+0,0158*i	0,0376-0,0158*i	0,1146+0,1240*i	0,1146-0,1240*i	-0,1483	0,0117	-0,0634+0,0059*i	-0,0634-0,0059*i	0	0,0001-0,0000*i	0,0001+0,0000*i	0	0,0163	-0,1503	-0,0992	-0,1097
AA2	-0,3487	-0,3573	0,3333-0,1119*i	0,3333+0,1119*i	-0,1286+0,0051*i	-0,1286-0,0051*i	-0,07	-0,1143-0,0214*i	-0,1143+0,0214*i	0,1301+0,1913*i	0,1301-0,1913*i	-0,3094	-0,3378	0,1536+0,0102*i	0,1536-0,0102*i	0,0136	0,0185-0,0121*i	0,0185+0,0121*i	-0,0139	0,113	-0,2849	-0,4724	-0,1884
F1	-0,0005	0,0142	0,0040+0,0013*i	0,0040-0,0013*i	-0,0050+0,0010*i	-0,0050-0,0010*i	-0,0017	-0,0070+0,0002*i	-0,0070-0,0002*i	-0,0244+0,0835*i	-0,0244-0,0835*i	-0,0562	0,0093	-0,0523-0,0462*i	-0,0523+0,0462*i	0,0002	0,0009+0,0014*i	0,0009-0,0014*i	0	-0,0665	-0,0555	-0,0367	-0,0405
F2	-0,0006	0,0106	0,0059-0,0005*i	0,0059+0,0005*i	-0,0033+0,0016*i	-0,0033-0,0016*i	-0,0056	-0,0065+0,0096*i	-0,0065-0,0096*i	-0,0757+0,0017*i	-0,0757-0,0017*i	-0,0369	0,0052	-0,0295-0,0179*i	-0,0295+0,0179*i	0	0,0002+0,0002*i	0,0002-0,0002*i	0	0,0212	-0,0366	-0,0242	-0,0267
F3	0	0,0023	-0,0006+0,0001*i	-0,0006-0,0001*i	-0,0009+0,0008*i	-0,0009-0,0008*i	0,0003	0,0018+0,0008*i	0,0018-0,0008*i	0,0349+0,0226*i	0,0349-0,0226*i	-0,0154	0,0048	-0,0042-0,0434*i	-0,0042+0,0434*i	-0,0005	-0,0020+0,0021*i	-0,0020-0,0021*i	0	-0,0924	-0,0149	-0,0098	-0,0109
F4	-0,0002	0,0049	0,0021+0,0001*i	0,0021-0,0001*i	-0,0016+0,0005*i	-0,0016-0,0005*i	-0,0017	-0,0026+0,0025*i	-0,0026-0,0025*i	-0,0209+0,0097*i	-0,0209-0,0097*i	-0,0189	0,0032	-0,0144-0,0155*i	-0,0144+0,0155*i	0	-0,0000+0,0002*i	-0,0000-0,0002*i	0	0,0329	-0,0187	-0,0123	-0,0136
M1	0	0,0008	-0,0003+0,0000*i	-0,0003-0,0000*i	-0,0003+0,0002*i	-0,0003-0,0002*i	0,0005	0,0016+0,0000*i	0,0016-0,0000*i	0,0441+0,0117*i	0,0441-0,0117*i	-0,0047	0,0014	-0,0026+0,0083*i	-0,0026-0,0083*i	-0,011	-0,0001-0,0053*i	-0,0001+0,0053*i	0,0041	0,0992	-0,0046	-0,003	-0,0033
M2	-0,0292	0,006	0,0793-0,0171*i	0,0793+0,0171*i	0,0005-0,0020*i	0,0005+0,0020*i	0,0632	-0,1415-0,1709*i	-0,1415+0,1709*i	0,6745+0,0000*i	0,6745-0,0000*i	0,036	-0,3458	0,5212+0,0150*i	0,5212-0,0150*i	-0,9962	-0,9969+0,0000*i	-0,9969-0,0000*i	0,9924	0,9258	0,0227	0,0164	0,0138
M3	-0,0001	-0,0018	0,0007-0,0007*i	0,0007+0,0007*i	0,0007+0,0005*i	0,0007-0,0005*i	-0,0015	0,0006+0,0033*i	0,0006-0,0033*i	0,0004+0,0009*i	0,0004-0,0009*i	0,0124	-0,0044	-0,0092+0,0351*i	-0,0092-0,0351*i	-0,0016	0,0043+0,0025*i	0,0043-0,0025*i	-0,0001	-0,0256	-0,0109	0,0072	0,0081
M4	-0,001	0,0013	-0,0009+0,0018*i	-0,0009-0,0018*i	-0,0006+0,0008*i	-0,0006-0,0008*i	0,0268	-0,0020+0,0021*i	-0,0020-0,0021*i	0,0611+0,0367*i	0,0611-0,0367*i	-0,0112	0,0021	0,0554-0,0201*i	0,0554+0,0201*i	-0,0197	0,0106+0,0293*i	0,0106-0,0293*i	0,0017	-0,0058	-0,0109	0,0072	0,0081
S1	-0,0484	0,007	0,0021-0,0478*i	0,0021+0,0478*i	-0,0192+0,0271*i	-0,0192-0,0271*i	0,5824	-0,0927-0,0602*i	-0,0927+0,0602*i	-0,0383+0,0032*i	-0,0383-0,0032*i	0,0026	0,0981	-0,0417-0,0102*i	-0,0417+0,0102*i	-0,0025	-0,0037+0,0009*i	-0,0037-0,0009*i	0,002	-0,0146	-0,1071		

De la matriz de autovalores extraemos la siguiente información:

Tiene 11 autovalores reales con los valores:

CS1	2,5655
CS2	-1,6512
C1	1,0357
AA1	-0,9796
AA2	-0,5353
F3	0,0944
M2	0,0004
M3	-0,114
M4	-1
S1	-1
S2	-1

que ordenados por valor son:

CS1	2,5655
C1	1,0357
F3	0,0944
M2	0,0004
M3	- 0,114
AA2	-0,5353
AA1	- 0,9796
M4	-1
S1	-1
S2	-1
CS2	-1,6512

Como sabemos, los más importantes en su contribución a la mejora de la eficiencia general de la empresa son los positivos más grandes, (no se toman en general los menores de 1) o sea:

CS1 = 2,5655

C1 = 1,0357

Que son:

- CS1 % CUMPLIMIENTO HORAS-COCHE EN LÍNEA
- C1 RECLAMACIONES POR MILLÓN DE VIAJEROS

Ésto nos dice que al analizar la información más completa (incluyendo el signo de la interacción: que si es positivo significa que influye positivamente y si es negativo que influye negativamente) obtenemos una solución mejor que la anterior, cuando no incluimos los signos negativos.

Y es una solución mejor porque en realidad CS1 y CS2 son prácticamente el mismo indicador (hay casi dependencia lineal de los vectores y por eso se descarta) y, sin embargo, aquí vemos que si queremos mejorar la empresa los esfuerzos mayores se deben dedicar (siempre bajo el punto de vista del que ha rellenado la matriz de interacciones) a maximizar el porcentaje de cumplimiento de las horas de coche en línea y a evitar las reclamaciones de los viajeros, que al final son los que deciden si viajan en autobús o en metro.

Mirando los autovectores de CS1 y C1, que son las columnas primera y séptima de la matriz de autovectores, vemos que los KPI que más contribuyen a cada uno de ellos son:

A CS1:

	CS1
CS1	0,1454
CS2	0,1454
R1	0,1397
R2	0,0501
D1	-0,1316
D2	-0,0956
C1	0,0917
RC1	-0,1582
RC2	-0,5234
RC3	-0,5234
RC4	0,4473
AA1	0,0066
AA2	-0,3487
F1	-0,0005
F2	-0,0006
F3	0
F4	-0,0002
M1	0
M2	-0,0392
M3	-0,0001

M4	-0,001
S1	-0,0484
S2	-0,0484

donde se han marcado en amarillo las mayores de 0,1.

O por orden de magnitud:

$$RC4 = 0,4473$$

$$CS1 = 0,1454$$

$$CS2 = 0,1454$$

$$R1 = 0,1397$$

A CS2:

	C1
CS1	0,1014
CS2	0,1014
R1	0,0767
R2	0,3008
D1	0,0526
D2	0,0768
C1	-0,1142
RC1	-0,1332
RC2	0,1608
RC3	0,1608
RC4	-0,3215
AA1	0,0229
AA2	-0,07
F1	-0,0017
F2	-0,0056
F3	0,0003
F4	-0,0017
M1	0,0005

M2	0,0632
M3	-0,0015
M4	0,0268
S1	0,5824
S2	0,5824

donde se han marcado en amarillo las mayores de 0,1. O por orden de magnitud:

$$S1 = 0,5824$$

$$S2 = 0,5824$$

$$R2 = 0,3008$$

$$RC2 = 0,1608$$

$$RC3 = 0,1608$$

Contando en ambos solo los mayores de 0,1.

Al calcular los primeros vectores de trabajo veremos si se confirma:

$$\vec{c}_{r(t+1)} = MTCMI \cdot \vec{c}_{r_t}$$

$$\vec{c}_{r_1} = MTCMI \cdot \vec{c}_{r_0}$$

Como la MTCMI es:

	CS1	CS2	R1	R2	D1	D2	C1	RC1	RC2	RC3	RC4	AA1	AA2	F1	F2	F3	F4	M1	M2	M3	M4	S1	S2
CS1	0,000	1,000	-1,000	1,000	0,250	0,250	-0,250	0,000	0,025	0,050	1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025
CS2	1,000	0,000	-1,000	1,000	0,250	0,250	-0,250	0,000	0,025	0,050	1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025
R1	0,250	0,250	0,000	1,000	0,250	0,250	-0,250	0,100	0,100	0,100	1,000	0,250	0,100	0,250	0,000	1,000	0,025	-1,000	-0,025	-1,000	-0,100	0,000	0,000
R2	1,000	1,000	0,000	0,000	1,000	1,000	-0,250	0,025	-0,025	-0,050	0,100	-0,100	-0,025	0,050	0,000	-0,100	0,100	-0,100	0,000	0,025	-0,025	0,000	0,000
D1	-0,100	-0,100	-0,050	-0,050	0,000	1,000	0,000	0,250	0,100	0,100	-0,050	0,050	0,100	1,000	1,000	0,000	0,100	0,025	0,000	0,025	0,025	0,000	0,025
D2	0,050	0,050	-0,025	-0,025	1,000	0,000	0,050	0,050	0,100	0,100	0,050	0,250	0,100	1,000	1,000	0,025	0,100	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
C1	0,025	0,025	0,025	0,025	-1,000	-1,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,025	0,025	0,000	-0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC1	1,000	1,000	0,100	-1,000	-1,000	-1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	1,000	-1,000	1,000	0,100	0,050	-1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,250
RC2	-1,000	-1,000	0,000	-0,250	-0,100	-0,100	1,000	-1,000	0,000	1,000	-1,000	1,000	1,000	-1,000	0,050	0,250	-1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC3	-1,000	-1,000	0,000	-0,250	-0,100	-0,100	1,000	-1,000	1,000	0,000	-1,000	1,000	1,000	-1,000	0,050	0,250	-1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RC4	1,000	0,250	0,000	0,000	0,025	0,000	0,000	1,000	-1,000	-1,000	0,000	-1,000	-0,250	0,100	0,100	0,050	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AA1	0,100	0,100	0,000	0,025	0,250	0,025	0,050	0,000	-0,025	-0,025	0,000	0,000	0,025	-1,000	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AA2	-1,000	-1,000	0,000	-0,250	-0,100	-0,250	1,000	-0,250	1,000	0,250	-0,250	1,000	0,000	-0,250	0,100	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000
F1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,250	0,000	0,000	-1,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,250	0,100	0,000	-0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,100	0,000	0,000	-0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,100	0,025	0,250	-0,050	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000
M2	-0,250	-0,250	0,000	-0,250	-0,050	-0,050	0,100	-0,100	0,000	0,000	-0,100	0,050	0,000	-0,025	0,050	0,250	-0,100	0,000	0,000	0,250	1,000	0,025	0,025
M3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,100	0,250	0,250	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,025	0,025	0,250	-0,100	0,000	0,000	1,000	0,000	0,025	0,025
S1	0,025	0,025	0,000	0,025	0,000	0,000	0,050	0,050	0,050	0,050	-0,025	0,000	0,050	0,000	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
S2	0,025	0,025	0,000	0,025	0,000	0,000	0,050	0,050	0,050	0,050	-0,025	0,000	0,050	0,000	0,000	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000

Tabla 6-26; MTCMI coef. pos. y neg.

Fuente: Elaboración propia

Y  $c_{r0}$  es

$$\vec{c}_{r_0} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

al multiplicarlas obtenemos los cuatro primeros vectores de coste  $c_{ri}$ :

CS1		1		2,50		4,96		25,18		36,79
CS2		1		2,50		4,96		25,18		36,79
R1		1		2,78		4,72		22,38		34,51
R2		1		3,63		12,93		20,07		49,09
D1		1		3,45		3,47		-6,36		-30,42
D2		1		4,03		3,34		-0,71		-17,30
C1		1		-1,90		-7,09		-6,45		8,34
RC1		1		3,75		-13,08		-41,62		-61,73
RC2		1		-2,15		-11,61		-38,06		-106,55
RC3		1		-2,15		-11,61		-38,06		-106,55
RC4	$c_{r_0} =$	1	$c_{r_1} =$	-0,68	$c_{r_2} =$	9,59	$c_{r_3} =$	17,82	$c_{r_4} =$	71,87
AA1		1		1,53		1,22		2,31		4,49
AA2		1		0,30		-10,76		-33,62		-100,36
F1		1		-0,25		-0,38		-0,05		-0,35
F2		1		-0,20		-0,39		-0,31		-0,58
F3		1		-0,40		0,09		0,09		0,00
F4		1		-0,20		-0,13		-0,08		-0,20
M1		1		0,40		0,12		0,03		0,00
M2		1		4,58		3,20		-3,10		-15,78
M3		1		0,65		-0,18		-0,07		-0,07
M4		1		1,20		0,64		-0,07		-0,09
S1		1		1,35		1,46		-0,92		-7,49
S2		1		1,35		1,46		-0,92		-7,49

en los que se han marcado en amarillo, en cada uno de ellos, los componentes más altos.

A partir del segundo se comprueba que los más altos son siempre los mismos y son:

CS1

CS2

R1

R2

RC4

que podemos comprobar que son casi los mismos que aportaban más al mayor autovector: CS1, anteriormente.

De lo anterior podemos deducir:

Que CS1 y C1 son los KPI que más contribuyen a la mejora de la eficiencia de la EMT de Madrid.

Que a CS1 los KPI que más le influyen son por orden los siguientes:

RC4

CS1

CS2

R1

de los que, como ya hemos visto, hay que descartar CS1 por ser el mismo y CS2 por ser poco independiente de CS1. Así que quedan:

- RC4: Kilómetros en línea por conductor y año.
- R1: Evolución de la velocidad en línea.

A RC4 se le puede mejorar (sin aumentar el servicio) aumentando la regularidad de la línea, que se puede mejorar disminuyendo los encierros por averías y por conductores, teniendo algunos de repuesto y haciendo cuadros con tiempos de recuperación cada pocas paradas como hace Londres (las medidas de regulación no cuentan en realidad como tiempo en la línea).

Como a R1 sólo le influyen los kilómetros de carril bus y la regulación semafórica, aparte de la congestión del tráfico general, sólo podemos aumentar los primeros.

Y que a C1 los KPI que más le influyen son por orden los siguientes:

- S1: Incidencias de seguridad por millón de viajeros
- S2: Incidencias de seguridad por horas de coche en línea
- R2: % de Regularidad en hora punta de la mañana
- RC2: Absentismo total de conductores
- RC3: Absentismo para conducir

Con estos resultados ya tenemos claro cuáles son los principales KPI a mejorar

- CS1: % CUMPLIMIENTO HORAS-COCHE EN LÍNEA
- C1: RECLAMACIONES POR MILLÓN DE VIAJEROS

y como se pueden mejorar con más fuerza cada uno de ellos.

## 7. CONCLUSIONES

### 7.1 Conclusión

En esta tesis hemos intentado contribuir a profundizar en el estudio de la eficiencia en las empresas de transporte público mediante el desarrollo de una nueva metodología que permita interrelacionar los indicadores de gestión para mejorar la eficiencia de las empresas y que sea capaz de identificar cuáles de ellos son los indicadores o KPI claves con mayor repercusión en la mejora de la eficiencia.

- A través de una revisión bibliográfica extensa, se estudiaron los métodos y modelos de evaluación de la eficiencia existentes hoy en día para identificar el más adecuado para su aplicación en procesos complejos como es el caso de la gestión de las empresas de transporte. Siendo el método elegido la medición de la eficiencia a través de una selección de indicadores o KPI de gestión seleccionados mediante el análisis de las dimensiones o perspectivas del Cuadro de Mando Integral (OE1, OE2 y OE3).
- Una vez seleccionados los KPI de gestión apropiados para una empresa de transporte público, se volvió a realizar una revisión documental extensa que nos permitió identificar una metodología para identificar las interrelaciones entre los diferentes KPI del sistema. Siendo el método elegido la Matriz de Transformación de los costes de mejora de los KPI (MTCMI). Con este método, es posible tener una visión completa de las relaciones entre los KPI en sistemas donde el diagrama causa-efecto se vuelve demasiado complicado debido al gran número de KPI (OE4).
- Teniendo ya la selección de indicadores y su interrelación a través de la MTCMI, analizamos los diferentes métodos existentes para la resolución de sistemas lineales complejos y seleccionamos el Estudio de la Estructura Propia de la Matriz para la identificación de los KPI clave de entre el conjunto de indicadores que conforman la Matriz (OE5).

- Finalmente pudimos poner en práctica y validamos el modelo completo a través de su implantación en la EMT de Madrid (OE6). Utilizando los métodos de análisis de la MTCMI, podemos saber si el logro mejorado de cada KPI es mejor o peor que otro para la mejora del rendimiento general. El método aceptado es probar si el uso de la nueva MTCMI tiene menos bucles de iteraciones, o converge más rápido (para minimizar el trabajo de mejora o maximizar la eficiencia). Al minimizar los bucles de iteración o acelerar las iteraciones de los KPI seleccionados, se podría gestionar una empresa de transporte urbano más eficazmente y utilizando menos recursos.

Los resultados obtenidos en el análisis de la MTCMI en la EMT de Madrid sugieren que la empresa debe centrarse básicamente en mejorar los siguientes KPI en orden decreciente de importancia ya que son los que más contribuyen, según el modelo aplicado, a la mejora de la eficiencia de la empresa estudiada:

CS1: % CUMPLIMIENTO HORAS-COCHE EN LÍNEA
C1: RECLAMACIONES POR MILLÓN DE VIAJEROS

A su vez, el modelo nos ha permitido identificar los KPI que más le influyen a cada uno de los dos KPI clave en la gestión de esta empresa. Concretamente:

Para CS1:
-----------

- RC4: Kilómetros en línea por conductor y año.
- R1: Evolución de la velocidad en línea.

Para C1:
----------

- S1: Incidencias de seguridad por millón de viajeros
- S2: Incidencias de seguridad por horas de coche en línea
- R2: % de Regularidad en hora punta de la mañana
- RC2: Absentismo total de conductores
- RC3: Absentismo para conducir

Una vez que hemos logrado un orden de prioridad de KPI y escoger los más importantes, diseñamos maneras de mejorar su trabajo de realización y evaluar sus efectos (de mejora). El análisis efectuado de gestión de la eficiencia en la mejora de los objetivos de los KPI calcula el coste estimado de cada estrategia (para cada conjunto de KPI) así como la contribución de la mejora de cada uno de los objetivos de cada KPI. Para cada estrategia alternativa compara el coste con el impacto en eficiencia.

Los métodos para acelerar las iteraciones incluyen: la introducción de nuevas tecnologías y herramientas para mejorar la eficiencia de algunas actividades y la mejora de los sistemas expertos para extraer el conocimiento acumulado en las bases de datos de la empresa e integrarlo en la gestión de la misma, eliminando a la vez las actividades redundantes o que aportan poco valor y sustituyéndolas por otras más eficientes.

Para diferentes empresas de transporte urbano, las preguntas y los problemas serán distintos. Sin embargo, la aplicación del sistema y su método de resolución al problema de la mejora de la eficiencia proporcionará, probablemente, nuevas perspectivas sobre formas de mejorar la gestión de las operaciones de la empresa de transporte urbano.

El análisis de la MTCMI que se ha propuesto en esta tesis es una nueva utilización de los métodos de análisis de estructura de autovalores ya existentes (usado anteriormente en el método de la Matriz del Trabajo de Transformación (MTT) y en el modelo de la Matriz de la Estructura de Diseño (MED) que se ha trasladado desde el área de la ingeniería hasta el de la gestión de la eficiencia empresarial).

El método de optimización analítica, basado en el análisis de la estructura de autovalores de la Matriz de Transformación del Coste de Mejora de los KPI, da a los autovectores nuevas áreas de utilización en la selección y mejora de las métricas de eficiencia. Puede utilizarse para mejorar el sistema de apoyo en la toma de decisiones de la gestión de las empresas, especialmente por las empresas de software de Business Intelligence (conjunto de estrategias, aplicaciones, datos, productos, tecnologías y arquitecturas técnicas, enfocadas

a la administración y creación de conocimiento, a través del análisis de los datos existentes en una empresa) o de gestión de la eficiencia empresarial y a las empresas que utilizan estas herramientas de apoyo en la toma de decisiones para mejorar su eficiencia.

La interpretación de los autovalores y autovectores para los problemas de gestión de la eficiencia de la empresa es más intuitiva que el análisis de la estructura de autovalores utilizado para analizar los problemas de ingeniería.

## 7.2 Principales aportaciones

El método propuesto proporciona una manera efectiva de gestionar la eficiencia de la empresa de transporte urbano en un entorno cambiante y resuelve el problema de la importancia relativa de las métricas de eficiencia mediante un método sistemático. El propósito de este nuevo sistema es conseguir compensar esta falta de tiempo haciendo las tareas de evaluación y modificación de objetivos de los indicadores más automatizadas e identificando más fácilmente los factores críticos de control en cada momento, para apoyar la toma de decisiones.

El método y la metodología ayudan a las empresas a mejorar su eficiencia de manera sistemática a través del uso de lógica difusa y métodos de resolución de sistemas lineales para estudiar las complejas relaciones entrelazadas entre los diferentes KPI y priorizar la obtención de los objetivos establecidos para dichos KPI.

Este modelo puede resolver problemas de eficiencia en la mejora de los objetivos de los KPI interdependientes y proporcionan una buena visión para poder seguir mejorando. El método propuesto proporciona un buen sistema de implementación que convierte la compleja resolución del problema en un ejercicio más operativo.

### 7.3 Limitaciones

Lógicamente, hay algunas limitaciones y problemas sin resolver para algunas aplicaciones de la MTCMI. Si el entorno cambia rápidamente y con frecuencia, las relaciones entrelazadas de la mejora de los objetivos de los diferentes KPI pueden cambiar demasiado e influir en la exactitud de la MTCMI. Por ello, debemos usar el método de la MTCMI solo en situaciones ligeramente cambiantes.

Por otra parte, el método de análisis de la MTCMI se puede aplicar solamente en empresas en las que ya se ha implementado un método contrastado de gestión de la eficiencia. Si la empresa abandonase el método de gestión de la eficiencia o prestase poca atención al mismo, el método definido en esta tesis no podría utilizarse eficazmente pues los técnicos y directivos no tendrían los suficientes conocimientos sobre las relaciones entre indicadores como para montar un enunciado y posteriormente un desarrollo suficientemente aceptable del problema.

Como ya se ha dicho anteriormente, los análisis usando la matriz de transformación de coste de mejora de los indicadores no deben dar lugar a la adopción de decisiones directas, sino que deben usarse como información de apoyo para la toma de decisiones. Esto es así porque los diferentes expertos pueden tener diferentes opiniones sobre los indicadores críticos y sobre las diferentes soluciones posibles; cada experto o directivo puede dar lugar a una MTCMI ligeramente diferente. Por ello, no existe una solución estándar que sea infalible y pueda aceptarse por unanimidad. Por eso, la decisión final siempre debe quedar en manos de los directivos que deben contrapesar los resultados del análisis con su experiencia e intuición (Cronemyr, Öhrwall Rönnbäck, & Eppinger, 2001).

Por último, hay que recordar que este método sólo puede simular los costes de las iteraciones en la mejora de los objetivos de los KPI críticos en la gestión de las empresas de transporte y señalar las fuentes de los costes de mejora de los

objetivos de dichos KPI. No puede utilizarse para mejorar los mecanismos de mejora de los objetivos de los KPI.

## 7.4 Futuras líneas de investigación

Además de lo ya estudiado, se pueden ampliar los supuestos iniciales y usar este modelo con elementos estocásticos. Se han realizado ya algunos ensayos con la MED en este campo. También se pueden introducir en la MTCMI elementos aleatorios para analizar contextos más complicados (Eppinger, Nukala, & Whitney, 1996) (Adler, Nguyen, & Schwerer, 1995) (Smith R. P., *Managing Risk Through Reordering Decisions in Engineering Design*, 1995). La ampliación de los usos del análisis de la MTCMI sigue abierta para futuros estudios.

El marco y el método de análisis de la MTCMI pueden servir como una herramienta de modelado útil en el análisis de problemas de mejora con variables interdependientes. Una vez que se dibuja el mapa de las relaciones, las posibilidades para la mejora de las consecuciones iterativas de los objetivos de los KPI mediante el uso de ordenadores en la MTCMI se multiplican.

En general, la descripción de las relaciones entre los KPI proporciona una información que ayudará a los directivos de las empresas de transporte urbano a captar mejor los principales puntos de mejora de la eficiencia de la empresa y a tomar las decisiones más adecuadas para mejorar la eficiencia general. Este método, no sólo ayudará a las empresas a responder a los cambios mucho más rápidamente sino que también permitirá a los equipos directivos tomar las decisiones con más confianza.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- The Low Emission Development Strategies Global Partnership. (2016). *LEDS in Practice: Create jobs*. Obtenido de [http://ledsgp.org/wp-content/uploads/2016/05/LEDS-GP\\_Create-Jobs\\_final\\_web\\_May15.pdf](http://ledsgp.org/wp-content/uploads/2016/05/LEDS-GP_Create-Jobs_final_web_May15.pdf)
- Adler, P. S., Nguyen, V., & Schwerer, E. (1995). Del Proyecto a la Gestión de Procesos: Un Marco Empíricamente Basado para Analizar el Tiempo de Desarrollo de Productos. *Management Sci.*, 458-484.
- Administración de Tránsito Federal (FTA). (2014). Base de Datos Nacional de Tránsito. EE.UU.
- Ahn, H. (2001). "Applying the Balanced Scorecard concept: An experience report". *Long Range Planning*, Vol. 34, N° 4, 441- 461.
- Aigner, D., Lovell, C., & Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of Stochastic Frontier Production Function Models. *Journal of Econometrics*, 6(1), 21-37.
- Alexander, C. (1964). *Notas sobre la Síntesis de Forma*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Alexander, E. R. (1982). Design in the decision making process. *Policy Sciences*, 14(3), 279-292.
- Amat, O., & de Falguera, J. (1999). *Nuevas tendencias en la utilización de indicadores para la gestión, la evaluación y el control de la actividad hospitalaria: el cuadro de mando integral. La contratación de servicios sanitarios*. Barcelona: Servei Català de la Salut.
- Amat, O., & Dowds, J. (1998). Qué es y cómo se construye el cuadro de mando integral. *Finanzas y Contabilidad*. N. ° 22, Marzo-Abril, 22-26.
- Amat, O., & Soldevilla, P. (1999). "La aplicación del Cuadro de Mando Integral - Un ejemplo en la Unidad de Relaciones Internacionales de una universidad pública". *Auditoría Pública*. N. ° 17, junio, 40-45.
- Anton, H. (2005). *Álgebra lineal elemental (Versión Aplicaciones)* (9ª ed.). Wiley International.
- Aparisi, J., & Ripoll, V. M. (2000). "El Cuadro de Mando Integral: Una herramienta para el control de gestión". *Partida Doble*. N. ° 114, septiembre, pp. , 54-63.

- Askarany, D., Smith, M., & Yazdifar, H. (2007). Innovaciones tecnológicas, coste y satisfacción basados en la actividad. *Revista de Contabilidad - Negocios y Gestión*, 14.
- Avkiran, N. (2009). "Removing the impact of environment with units-invariant efficient frontier analysis: An illustrative case study with intertemporal panel data". *Omega*, 37, 535-544.
- Avkiran, N., & Rowlands, T. (2008). How to better identify the true managerial performance: State of the art using DEA. *Omega*, Vol. 36,, 317-324.
- Axler, S. J. (1997). *Linear Algebra Done Right* (2<sup>a</sup> ed.). Springer-Verlag.
- Bai, Z., Demmel, J., Dongarra, J., Ruhe, A., & Van Der Vorst, H. (2000). *Generalized Hermitian Eigenvalue Problems". Templates for the Solution of Algebraic Eigenvalue Problems: A Practical Guide*. Philadelphia: SIAM.
- Balanced Scorecard Collaborative, Inc. (2000.). *Balanced Scorecard Functional Standards™. Release 1.0a*. Lincoln, MA: Balanced Scorecard Collaborative, Inc.
- Battese, G., & Corra, G. (1977). Estimation of a production frontier model: with application to the pastoral zone of Eastern Australia. *Australian Journal of Agricultural Economics*, 21(3), 169-179.
- Berger, A. (1993). "Distribution-free" estimates of efficiency in the U.S. banking industry and tests of the standard distributional assumptions. *J. Productivity Analysis*, 4(3), 261-292.
- Berger, A. N., & Humphrey, D. B. (1992). Measurement and Efficiency Issues in Commercial Banking. *National Bureau of Economic Research*, 245 - 300.
- Black, T. A., Fine, C. H., & Sachs, E. M. (1990). *A Method for Systems Design Using Precedence Relationships: An Application to Automotive Brake Systems*. (M. S. Management, Ed.) Cambridge, MA.
- Brimson, J. A. (1991). *Contabilidad de actividades: un enfoque de costes basado en actividades*. Nueva York: Wiley.
- Brons, M., Nijkamp, P., & Pels, E. R. (2005). Efficiency of urban public transit: A meta analysis. *Transportation*, 32, 1–21.
- Bryson, J. M. (1995). *"Strategic Planning for Public and Non profit Organizations (A Guide to Strengthening and Sustaining Organizational Achievement)"*. San Francisco: Jossey–Bass Publishers.

- Buehler, R., & Pucher, J. .. (2011). "Sustainable Transport in Freiburg: Lessons from Germany's Environmental Capital". *International Journal of Sustainable Transportation*. (5), 43–70.
- Bunch, J. R., & Hopcroft, J. E. (1974). Triangular Factorization and Inversion by Fast Matrix Multiplication. *Mathematics of computation*, 28(125).
- Cai, J., Liu, X., Xiao, Z., & Liu, J. (2009). Mejora de la gestión del rendimiento de la cadena de suministro: Un enfoque sistemático para analizar los logros del KPI iterativo. *Sistemas de Apoyo a la Decisión*(46).
- Camaleño, M. (1998). " Efecto multiplicador del Cuadro de Mando Integral" . *Estrategia Financiera*. N. ° 140, Mayo, 45-54.
- Cao, D., Leung, L., & Ley, J. (2008). Modificación de la matriz de comparación inconsistente en el proceso de jerarquía analítica: Un enfoque heurístico. *Sistemas de Soporte a la Decisión*, 44.
- CE . (2008). *Stakeholder consultation report. Green paper on Urban Mobility* . Brussels: Commission of the European Communities.
- CE . (2011). *Libro Blanco. Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible*. Comisión de las comunidades europeas. Bruselas.
- CE. (2007). *Libro Verde; Hacia una nueva cultura de la movilidad urbana*. Bruselas: Comisión de las comunidades europeas.
- CE. (2009). *A sustainable future for transport: Towards an integrated, technology-led and users-friendly system*. Luxembourg: Commission of the European Communities.
- CE. (2011). *Libro Blanco. Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible*. Bruselas: Comisión de las comunidades europeas.
- CEOE. (2009). *Memorandum: El sector del transporte en España*. Madrid: Confederación Española de Organizaciones Empresariales.
- Chan, W., & Tong, T. (2007). Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: Grey relational analysis approach,. *Materials & Design*, 28(5), 1539-1546.
- Charnes, A., Cooper, W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *EJOR* 2:, 429-444.
- Chestnut, H. (1965). *Systems Engineering Tools*. Wiley.
- Chestnut, H. (1967). *Systems Engineering Methods*. Wiley.

- Clark, K. B., & Fujimoto, T. (1991). *Eficiencia de Desarrollo de Producto: Estrategia, Organización y Administración en la Industria Mundial del Automóvil*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Cobb, C. W., & Douglas, P. H. (1928). A Theory of Production. (A. E. Association, Ed.) *The American Economic Review*, 18(1, Supplement), 139-165.
- Coelli, T., Perelman, S., & Romano, E. (1999). Accounting for environmental influences in Stochastic Frontier Models: With application to international airlines. *Journal of Productivity Analysis*, 11, 251-273.
- Comité Europeo de Normalización. (2002). Norma Europea EN 13.816. Definición de calidad de servicio, objetivación y medición. Bruselas.
- Consejo Danés de Transporte. (2000). Benchmarking de transporte público en autobús en 4 importantes ciudades danesas.
- Coopers&Lybrand. (1997). *“Los nuevos conceptos del control interno (Informe COSO)”*. Madrid: Ed. Díaz de Santos.
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms*.
- Cronemyr, P., Öhrwall Rönnbäck, A., & Eppinger, S. (2001). Herramienta de apoyo a la decisión para predecir el impacto de las mejoras en los procesos de desarrollo. *Diario de Diseño de Ingeniería*, 12(3).
- Cullen, C. G. (1990). *Matrices y transformaciones lineales*. (Courier Corporation, Ed.)
- Cullinane, K., Teng-Fei, W., Dong-Wook, S., & Ping, J. (2006). The technical efficiency of container ports: Comparing data envelopment analysis and stochastic frontier analysis. *Transportation Research*, A-40, 354-374.
- Cummins, J., & Zi, H. (1998). Comparison of frontier efficiency methods: An application to the U.S. life insurance industry. *Journal of Productivity Analysis*, 10, 131-152.
- Dávila, A. (1999). “Nuevas Herramientas de Control: El Cuadro de Mando Integral”. *IESE. Revista de antiguos alumnos*.
- Davis, S., & Albright, T. (2004). “An investigation of the effect of Balanced Scorecard implementation on financial performance”. *Management Accounting Research*, N.º 15, 135-153.
- De Borger, B., Kerstens, K., & Costas, A. (2002). Public transport performance: what does one learn from frontier studies?”. *Transport Reviews*, 22(1), 1-38.

- Debreu, G. (1951). The coefficient of resource utilization. *Econometrica*, 19(3), 273-292.
- Departamento de Transportes del Reino Unido. (2013). *Indicadores de Calidad para el transporte en autobús*. Obtenido de Departamento de Transportes del Reino Unido: <https://www.gov.uk/government/collections/bus-statistics>
- Dweiri, F. K. (2006). Utilizando la toma de decisiones difusa para la evaluación de la eficiencia interna de la gestión del proyecto. *Sistemas de Apoyo a la Decisión*, 42.
- EMT de Madrid. ( enero de 1971). 100 años de transporte público de superficie en Madrid. *Folleto*. Madrid: EMT de Madrid.
- Eppinger, S. D., Nukala, M. Y., & Whitney, D. E. (1996). *Modelos Generalizados de Iteración de Diseño Utilizando Gráficos de Flujo de Señal*. Documento de Trabajo # 3866, MIT Sloan School of Management, Diseño de ingeniería., Cambridge, MA.
- Escobar, T. (2002). "El Cuadro de Mando Integral como Herramienta para el Control de Gestión: el estudio de un caso". *Revista Española de Financiación y Contabilidad*. Vol.XXXI. Nº 113, 905-940.
- Farrell, M. (1957). The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)*, 120(3), 253-290.
- Federación Nacional de Usuarios de autobús U.K. (2014). Obtenido de Bus users: <http://bususers.org/>
- Fedra, K. (2004). Sustainable urban transportation: a model-based approach. *Cybernetics and Systems: An International Journal*, 35, 455-485.
- Fernández, A. (2002). "Claves para la implementación del cuadro de mando Integral". *Harvard Deusto, Finanzas & Contabilidad*. Mar./Abr., 10-16.
- Fielding, G. J., Babitsky, T. T., & Brenner, M. E. (1985). Evaluación de la eficiencia empresarial para Transporte en Autobús. *Investigación del Transporte Parte A.*, 19 A(1), 73/82.
- Fitzgerald, L., Johnston, R., Brignall, T., Sivestro, R., & Voss, C. (1991). Performance Measurement in Service Businesses. *CIMA*.
- Flores, S. (2012). El Cuadro de Mando Integral: una aplicación en las empresas municipales de transporte. Tesis doctoral. Madrid.
- Freitas, A. (2002). *Minería de datos y descubrimiento del conocimiento con algoritmos evolutivos*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag.

- Fried, H., Lovell, C., Schmidt, S., & Yaisawarng, S. (2002). Accounting for Environmental Effects and Statistical Noise in Data Envelopment Analysis. *Journal of Productivity*, 17, 157-174.
- Fried, H., Schmidt, S., & Yaisawarng, S. (1999). Incorporating the operational environment into a nonparametric measure of technical efficiency. *Journal of Productivity Analysis*, 12, 249-267.
- Fundación CETMO. (2006). *Anexo: Indicadores de calidad. Manual de apoyo para la implantación de la gestión de la calidad según norma UNE-EN 13816.*
- Gebala, D. A., & Eppinger, S. D. (1991). Métodos para analizar procedimientos de diseño. *ASME Design Theory and Methodology Conference*, (págs. 227-233). Miami, FL.
- Goldman, T., & Gorham, R. (2006). Sustainable urban transport: Four innovative directions. *Technology in Society*, 28, 261-273.
- Golub, G. H., & Van Loan, C. F. (1996). *Matrix Computations* (3<sup>a</sup> ed.). Baltimore, MA: Johns Hopkins.
- Ha, A. Y., & Porteus, E. L. (1995). Optimal Timing of Reviews in Concurrent Design for Manufacturability. *Management Sci.*, 41(9), 1431-1447.
- Hall, A. D. (1962). *A Methodology for Systems Engineering*. Van Nostrand Reinhold.
- Hanson, J., & Towle, J. (2000). "The Balanced Scorecard: Not just another fad". *Credit Union Executive. Journal*, Vol. 40, No. 1, 12-16.
- Hayde, A. F., Twede, D. R., & Shen, S. S. (2002). *Observations on relationship between eigenvalues, instrument noise and detection performance". Imaging Spectrometry VIII. Imaging Spectrometry VIII. 4816: 355.*
- Headley, J. (1998). "Aspectos prácticos de la implementación del cuadro de mando Integral". *Finanzas y Contabilidad*, N. °22, marzo-abril, 35-41.
- Hensher, D. A., & Daniels, R. (1995). Medida de la productividad en el sector del autobús urbano. *Política de transportes*, 2(3), 179-194.
- Hensher, D. A., Stopher, P., & Bullock, P. (2003). Calidad del servicio - desarrollo de un índice de calidad de servicio en la prestación de los contratos comerciales de autobuses. *Investigación del Transporte*, A 37, 499/517.
- Hicks, D. T. (1997). *El sistema de costes basado en las actividades (ABC): guía para su implantación en pequeñas y medianas empresas*. Marcombo,.

- Hipp, J., Güntzer, U., & Nakhaeizaeh, G. (2000). Algorithms for Association Rule Mining. A General Survey and Comparison. *Association for Computing Machinery's Special Interest Group for Knowledge Discovery and Data Mining*.
- Hopcroft, B. &. (1974). Triangular Factorization and Inversion by Fast Matrix Multiplication. *Mathematics of computation*, 28(125).
- Horn, R. A., & Johnson, C. R. (1985). *Matrix Analysis* (XIII ed.). Cambridge University Press.
- Horvarth, & Partners. (2004). "*Dominar el Cuadro de Mando Integral*". Gestión 2000.
- Householder, A. S. (1975). *The Theory of Matrices in Numerical Analysis*. New York: Dover Publications.
- Huberman, B., & Wilkinson, D. (2005). Performance Variability and Project Dynamics. *Computational & Mathematical Organization Theory*, 307-332.
- Hubka, V. (1980). *Principios de Diseño de Ingeniería*. Londres: Butterworth Scientific.
- Iglesias Pérez, C. (2014). El sistema de indicadores del Observatorio del Transporte y la Logística en España. *Presentación en la Inauguración del OTLE Madrid*.
- Ipsen, I., & Wills, R. M. (2005). Analysis and Computation of Google's PageRank. *7th IMACS International Symposium on Iterative Methods in Scientific Computing*. Toronto: Fields Institute.
- Jordà, P. (2012). Metodología de evaluación de la eficiencia de los servicios de autobús urbano; Aplicación a las grandes ciudades españolas en el periodo 2004-2009. Madrid.
- Jorgensen, F., Pedersen, P., & Volden, R. (1997). Estimating the inefficiency in the Norwegian bus industry from stochastic cost frontier models. *Transportation*, 24, 421-433.
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2014). *El cuadro de mando integral: The balanced scorecard*. Grupo Planeta .
- Keegan, D. P., Eiler, R. G., & Jones, C. R. (1989). Are Your Performance Measures Obsolete? *Management Accounting* , 45–50.
- Khoo-Fazari, K., Yang, Z., & Paradi, J. C. (2013). A Distribution-Free Approach to Stochastic Efficiency Measurement with Inclusion of Expert Knowledge. *Journal of Applied Mathematics Volume*, 21 pages.

- Kittelsohn & Associates Inc. et al. (2003). *A Guidebook for Developing a Transit Performance-Measurement System*. Transportation Research Board, Transit Cooperative Research Program .
- Král, P., & Roháčová, V. (2013). Medición de la eficiencia de las empresas de transporte público por carretera en la República Eslovaca utilizando DEA y SFA. *Statistika*, 93, 76–85.
- Kraus, K., & Lind, J. (2010). “The impact of the corporate balanced scorecard on corporate control – a research note”. *Management Accounting Research*, 4, 265.
- Kumbhakar, S. C., & Knox Lovell, C. A. (2003). *Stochastic Frontier Analysis*. Cambridge U.K.: CUP.
- Kung, C., & Wen, K. (2007). Aplicando el Análisis Relacional Gris y la Toma de Decisiones Gris para evaluar la relación entre los atributos de la empresa y su eficiencia financiera -estudio de un caso de las empresas de capital de riesgo en Taiwán,. *Sistemas de Apoyo a la Decisión*, 43.
- Lauzel, P., & Cibert, A. (1973). *“Des ratios an tableau de bord”*. . Paris: Enterprise Moderne D'edition.
- Lay, D. C. (2005). *Álgebra lineal y sus aplicaciones* (3ª ed.). Addison Wesley.
- Leon, S. J. (2006). *Álgebra lineal con aplicaciones* (7ª ed.). Pearson Prentice Hall.
- Liberatore, M., & Miller, T. (1998). Marco para integrar el cálculo de costes basado en actividades y el cuadro de mando integral en el proceso de desarrollo y monitorización de la estrategia logística. *Revista de logística de negocios*, 19(2).
- Liu, E., Wu, J., & Lee, J. (1996). *Seguimiento de Servicios de Transporte en Autobús en ciudades extranjeras*. Gobierno Central de Hong Kong, .
- Loan, G. &. (1996). *Matrix Computations* . (J. H. Press, Ed.)
- Macario, R. (2001). Upgrading quality in urban mobility systems. *Managing Service Quality*, Vol. 11, No. 2, pp. 93-98.
- Mackie, P., & Nash, C. (1982). Efficiency and performance indicators: The case of the bus industry. *Public Money*, 2(3), 41-44.
- Malmi, T. (2001). “Balanced scorecards in Finnish companies: a research note”. *Management Accounting Research* 12, 207–220.
- Marcus, M., & Mine, H. (1964.). *A Survey of Matrix Theory and Matrix Inequalities*. Boston, MA: Allyn y Bacon, , .

- Martínez, D., & Milla, A. (2005). *La Elaboración del Plan Estratégico y su Implantación a Través del Cuadro de Mando Integral*. Madrid: Díaz de Santos, S.A.
- Martinsons, M., Davison, R., & Tse, D. (1999). El cuadro de mando integral: una base para la gestión estratégica de los sistemas de información. *Sistemas de Apoyo a la Decisión*, 25(1).
- McMullen, S., & Lee, M. (1999). Cost efficiency in the US motor carrier industry before and after deregulation. A Stochastic Frontier Approach. *Journal of Transport Economics and Policy*, 33(3), 303-318.
- McNair, C., Lynch, R., & Cross, K. (1990). Do financial and non-financial measures have to agree? *Management Account.*, 28-36.
- Meeusen, W., & van Den Broeck, J. (1977). Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. *International Economic Review*, 18(2), 435-444.
- Meyer, C. D. (2001). *Análisis de Matrices y Algebra Lineal Aplicada*. Sociedad para la Matemática Industrial y Aplicada (SIAM).
- Ministerio de la Presidencia. (2007). *Estrategia Española de Desarrollo Sostenible*. Madrid: Ministerio de la Presidencia.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2009). *Estrategia Española de Movilidad Sostenible*. Madrid: Ministerios de Fomento y Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Monzón, A., Cascajo, R., Jordá, P., Pérez, P., & Rojo, I. (2008). *Informe 2006 del Observatorio de la Movilidad Metropolitana*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y Ministerio de Fomento.
- Mora, A., & Vivas, C. (2001). *“Nuevas herramientas de gestión pública: el cuadro de mando integral”*. Madrid: AECA.
- Morris, C. W. (1970). *Foundations of the Theory of Signs*. Chicago: Chicago University Press.
- Murillo-Zamorano, L. R. (2004). Economic Efficiency and Frontier Techniques. *Journal of Economic Surveys*, 18, 33–77.
- Murillo-Zamorano, L., & Vega-Cervera, J. (2001). The use of parametric and non-parametric frontier methods to measure the productive efficiency in the industrial sector: A comparative study. *International Journal of Production economics*, 69.
- Neely, A. (2005). Evolución de la investigación en medición de la eficiencia: desarrollos en la última década y una agenda de investigación para la

próxima. *Revista Internacional de Operaciones y Gestión de la Producción* 25 (12), 1264-1277.

Nemhauser, G. L., Rinnooy Kan, A. H., & Todd, M. J. (1989). *Optimization. Handbooks in Operations Research and Management Science*. Amsterdam:: North-Holland Publishing Co.

Neumann, K., & Steinhardt, U. (1979). *Redes GERT y la Evaluación Orientada en el Tiempo de Proyectos*, . Nueva York: Springer Verlag.

Nijkamp, P., & Vleugel, J. (1995). *In search of sustainable transport system*. Amsterdam: Amsterdam Vrije Universiteit, Serie research memoranda.

Niven, P. (2003). *“El cuadro de mando integral paso a paso”*. Barcelona: Editorial Gestión 2000.

Novales, M., Orro, A., Conles, E., & Anta, J. (2012). Autobús de alto nivel de servicio o metro ligero. Reflexiones sobre los criterios de decisión. *Actas del X Congreso de Ingeniería del Transporte 2012*. Granada.

Odeck, J., & Alkadi, A. (2001). Evaluating efficiency in the Norwegian bus industry using data envelopment analysis. *Transportation*, 28, 211-232.

Ogata, K. (1967). *Análisis del Estado del Espacio de Sistemas de Control*. Englewood Cliffs, NJ,: Prentice Hall.

Okunev, P., & Johnson, C. R. (1997). *Necessary and sufficient conditions for existence of the LU Factorization of an arbitrary matrix*. (C. University, Ed.) Obtenido de <https://arxiv.org/abs/math/0506382>

Olve, N.-G., Roy, J., & Wetter, M. (1999). *Performance Drivers: A Practical Guide to Using the Balanced Scorecard* . Wiley ISBN: 978-0-471-98623-2.

ONU. (2015). <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>. Obtenido de <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

Osborne, S. M. (1993.). *Ciclo de desarrollo del producto Caracterización a través del modelado de Iteración de procesos*. Cambridge, MA: MIT.

Palazzolo, C., & Smack, K. (2002). *Four Steps to BSC Software Selection*. HBR.

Papayanis, N. (1997). *Les transports à Paris avant le métropolitain*. Paris: Paris musées.

- Parkinson, A., Balling, R., & Hedengren, J. (2013). *Optimization Methods for Engineering Design*. Provo, UT: Brigham Young University.
- Parlett, B. N. (1998). *The symmetric eigenvalue problem (Reprint. ed.)*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Pérez-Arriaga, I. J., Verghese, G. C., Pagola, F. L., Sancha, J. L., & Schweppe, F. C. (1990). Desarrollos en el Análisis Modal Selectivo de la Estabilidad de Pequeña Señal en Sistemas de Energía Eléctrica. *Automatica*, 26(2), 215 - 231.
- Pestana, C., & Peypoch, N. (2010). Productivity changes in Portuguese bus companies. *Transport Policy*, 17, 295-302.
- Poole, D. (2006). *Álgebra Lineal: Una Introducción Moderna (2ª ed.)*. Brooks.
- Porter, M. E. (1987. Rev. 2002). “*Ventaja Competitiva: creación y sostenimiento de un desempeño superior*”. Méjico: Editorial CECSA.
- Prior, D. (1989). El control de gestión en empresas reguladas: el caso del Transporte Público Urbano. *Revista Española de Financiación y Contabilidad*, XIX( 59 ), 429-455.
- Proyecto EQUIP . (2000). *Manual de Benchmarking Ampliando la Calidad del Transporte Público*. Recuperado el 2014, de [www.transport-research.info/sites/default/files /project/equip.pdf](http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/equip.pdf)
- Proyecto ISOTOPE. (1995/1997). *Improved Structure and Organization of urban Transport Operations and Passengers in Europe*. EC- DG VII, 4th RTD program. Urban Transport 1995/1997 (EC, TIS, 1997,b).
- Proyecto MARETOPE. (2014). *Manual Gestión y evaluación de la evolución normativa en las operaciones locales de transporte público de Europa*. Obtenido de <http://www.transport-research.info/project/managing-and-assessing-regulatory-evolution-local-public-transport-operations-europe>
- Proyectos CoMET y Nova Key. (2014). *Sistemas de Indicadores clave de eficiencia CoMET y Nova Key*. Obtenido de <http://cometandnova.org/benchmarking/>
- Quinlivan, D. (2000). “Rescaling the Balanced Scorecard for Local Government” . *Australian Journal of Public Administration*, Volume 59 .Nº4, 36-41.
- Rahman, S.-u. (2002). The theory of constraints’ thinking process approach to developing strategies in supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 32(10), 809-828.
- Randall, E., Condry, B., & Trompet, M. (2007). International Bus System Benchmarking: Performance Measurement Development, Challenges,

and Lessons Learned. *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*.

Rodríguez Rodríguez, R., Alfaro Saiz, J. J., & Ortiz Bas, Á. (2009). Relaciones cuantitativas entre indicadores clave de eficiencia para apoyar los procesos de toma de decisiones. *Informática en la Industria*, 60, 104-113.

Rogers, J. L., & Padula, S. L. (1989). *Asesor Inteligente para el Gerente de Diseño*. Technical Memorandum, NASA, Langley Research Center, Hampton, VA.

Roy, W., & Yvrande-Billon, A. (2007). Ownership, contractual practices and technical efficiency: The case of urban public transport in France. *Journal of Transport Economics and Policy*, 41(2), 257-282.

Saaty, T. L. (1999). *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. Pittsburgh: RWS Publications.

Sánchez Toledano, D., Carrasco Díaz, D., & Sánchez Toledano, J. (2014). Observatorio de Costes y Financiación del Transporte Urbano Colectivo: un programa de investigación. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 20.

Sayers, T., Jessop, A., & Hills, P. (2003). Multi-criteria evaluation of transport options; flexible, transparent and user-friendly? *Transport Policy*, Vol. 10, , 95-105.

Schlager, K. J. (1956). Systems engineering: key to modern development. *IRE Transactions on Engineering Management*, 64–66.

Schlick, C. M., Duckwitz, S., Gärtner, T., & Schmidt, T. (2008). A complexity measure for concurrent engineering projects based on the DSM. *10th international Design Structure Matrix conference*. Stockholm: Institute of Industrial Engineering and Ergonomics (IAW), RWTH Aachen University.

Schwarzenberg-Czerny, A. (1995). On matrix factorization and efficient least squares solution. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 110, 405.

Servicio de la Industria del Ferrocarril del Reino Unido. (2014). *Medición de la Eficiencia del Ferrocarril del Reino Unido*.

Shabat, G., Shmueli, Y., Aizenbud, Y., & Averbuch, A. (2016). Randomized LU Decomposition. *Applied and Computational Harmonic Analysis*.

Shewhart, W. A. (1931). *Economic control of quality of manufactured product*. Nueva York: Van Nostrand Company.

- Smith, P. G., & Reinertsen, D. G. (1991). *Developing Products in half the time*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Smith, R. (1992). *Desarrollo y Verificación de Modelos de Iteración de Diseño en Ingeniería*. Cambridge, MA: MIT Sloan School of Management.
- Smith, R. P. (septiembre de 1995). Gestión del riesgo a través de decisiones de reordenación en el diseño de ingeniería. En ASME (Ed.), *ASME Conferencia de Teoría de Diseño y Metodología*, (págs. 585-591). Boston, MA.
- Smith, R. P. (1995). Managing Risk Through Reordering Decisions in Engineering Design. *ASME Design Theory and Methodology Conference*, , (págs. 585-591). Boston, MA.
- Smith, R. P., & Eppinger, S. D. (1997). Un modelo predictivo de iteración secuencial en diseño de ingeniería. *Management Sci.*, 43(8), 1104-1120.
- Smith, R. P., & Tjandra, P. (1998). Experimental observation of iteration in engineering design. *Research in Engineering Design* 10, 107–117.
- Smith, R., & Eppinger, S. (1997). Identificando las características de control de la iteración de diseño en ingeniería. *Ciencias de la Gestión* , 43 (3).
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (2003). Modeling urban sustainability". *International Journal of Urban Sciences*,, 7(1), 47-64.
- Steward, D. V. (1981). El Sistema de Estructura de Diseño: Un Método para Gestionar el Diseño de Sistemas Complejos. *IEEE Trans. Engineering Management*, 28(3), 71-74.
- Strang, G. (1980). *Álgebra lineal y sus aplicaciones* (2ª ed.). Nueva York: Harcourt Brace Jovanovich.
- Talley, W. (1986). A comparison of two methodologies for selecting transit performance indicators. *Transportation*, 13, 201-210.
- Taylor, B. W., & Moore, L. J. (1980). Planificación de proyectos de I + D con Q-GERT Network Modeling. *Management Sci.*, 26(1), 44-59.
- The Balanced Scorecard Institute. (2014). Recuperado el 2014, de The Balanced Scorecard: <http://www.balancedscorecard.org>
- Thomas, A. (1990). Una metodología de diseño de sistemas aplicada al diseño de sistemas de frenos para automóviles. (D. d. MIT, Ed.) Cambridge, MA.

- Thompson, K., & Mathys, N. (2008). The aligned Balanced Scorecard: An Improved Tool for Building high performance organizations. *Organizational Dynamics*, Vol.37, N° 4, 378 -393.
- Throne, R. R., & Olson, L. G. (1994). Un enfoque de Estructura Propia generalizado para el problema inverso de la electrocardiografía. *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, 41(6 ), 592 - 600.
- Transport for London (TfL). (2003). *Strategic Review - Comparable Cities Study*. London.
- Transport for London (TfL). (2013). *Estudio Internacional de Benchmarking*. Obtenido de <https://tfl.gov.uk>
- Treacy, M., & Wiersema, F. (1999). *"The discipline of market Readers"*. Perseus Publishing.
- Trefethen, L. N., & Bau, D. (1997). *NUMERICAL LINEAR ALGEBRA* (Vol. III). SIAM.
- Trompet, M. (2010). *The Development of a Performance Indicator to Compare Regularity of Service between Urban Bus Operators*. Imperial College, Centre for Transport Studies, London.
- Twede, D. R., & Hayden, A. F. (2004). Refinement and generalization of the extension method of covariance matrix inversion by regularization for spectral filtering optimization. (Proc. SPIE 5159, Ed.) *Imaging Spectrometry IX*(299 ).
- Tzeng, G., Lin, C., & Opricovic, S. (2005). "Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation". *Energy Policy*, Vol. 33, 1373–1383.
- U.S. Federal Transportation Research Board. (1999). *Manual para la Medición de la Satisfacción del Cliente y Calidad de Servicio*. Washington DC.
- United Nations. (1987). *Our common future: Report of the world commission on environment and development*. United Nations.
- Valdés, C., & López-Lambas, M. (2010). Del BRT al BHLS: un enfoque europeo de los sistemas de transporte masivo en autobús. *Actas del IX Congreso de Ingeniería del Transporte 2010*. Madrid.
- Vassallo, J. M., & Pérez, P. (2008). Equidad y eficiencia del transporte público en Madrid. *Revista de las Obras Públicas*(3.494), 41-58.
- Viswanathan, K., & Eppinger, S. D. (1997). Marco basado en modelos para superponer las actividades de desarrollo de productos. *Management Sci.*, 43, 4 .

- Viton, P. A. (1986). The question of efficiency in urban bus transportation.
- Von Hippel, E. (1990). "Partición de Tareas: Una variable de Proceso de Innovación",. *Res. Policy*, 19, 407 - 418.
- Wey, W., & Chang, Y. (2009, pp.). "A comparative location study for the joint development station of a mass rapid transit system: a case in Taichung City in Taiwan". *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 36, 573-587.
- Wheelwright, S. C., & Clark, K. B. (1992). *Revolucionando el desarrollo de productos: saltos cuánticos en velocidad, eficiencia y calidad*. Nueva York: Free Press.
- Witten, H., & Eibe, F. (1999). *Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations*. Burlington, Ma: Morgan Kaufmann.
- Yedla, S., & Shrestha, R. ( 2003). "Multi-criteria approach for the selection of alternatives options for environmentally sustainable transport system in Delhi". *Transportation Research Part A*, Vol. 37, 717-729.

## 9. APÉNDICES

En estos apéndices se detallan las metodologías de la Matriz de la Estructura de Diseño

### 9.1 Apéndice 1. Metodología de la MED

#### 9.1.1 Introducción

La matriz de estructura de diseño (MED), también conocida como:

- Matriz de la estructura de dependencia
- Matriz de la fuente de dependencia
- Matriz de mapa de dependencias
- Matriz de precedencias de diseño
- Matriz de resolución de problemas
- Matriz de incidencias
- Matriz N2
- Matriz de interacciones

Es una representación simple, compacta y visual de un sistema o proyecto en forma de matriz cuadrada.

Es el equivalente de una matriz de adyacencia en la teoría de grafos, y se utiliza en ingeniería de sistemas y gestión de proyectos para:

- modelar la estructura de sistemas o procesos complejos,
- realizar análisis de sistemas,
- planificación de proyectos
- diseño de organizaciones.

Don Steward acuñó el término "Matriz de Estructura de Diseño" en la década de 1960, utilizando las matrices para resolver sistemas matemáticos de ecuaciones (Steward, 1981).

Una matriz de estructura de diseño recoge todos los subsistemas o actividades constituyentes, el intercambio de información correspondiente y las interacciones y patrones de dependencia.

Cuando los elementos de la matriz representan actividades, la matriz detalla qué información se necesita para iniciar una actividad en particular y muestra dónde se encuentra la información generada por esa actividad. De esta manera, se pueden reconocer rápidamente cuáles otras actividades dependen de los resultados de información generados por cada actividad.

El uso de las MED en la investigación y en la práctica industrial aumentó considerablemente en los años noventa. Las MED se han aplicado por ahora en la construcción de edificios, en desarrollo de construcciones, de semiconductores, de componentes de automoción, en fotografía, en tecnología aeroespacial, en telecomunicaciones, en fabricación a pequeña escala, en desarrollo de equipos de fábrica y en industrias electrónicas, por nombrar algunos (Viswanathan & Eppinger, 1997) (Wheelwright & Clark, 1992).

La representación en forma de matriz tiene varias ventajas:

- La matriz puede representar un gran número de elementos del sistema y sus relaciones de una forma compacta y resalta patrones importantes (como bucles de realimentación).
- Con la MED se pueden usar las técnicas de análisis basadas en matrices para mejorar la estructura del sistema.
- En la modelización de prioridades de actividades, permite representar vínculos de realimentación que no pueden ser modelizados por las técnicas de modelado Gantt / PERT

El análisis de la MED proporciona información sobre cómo administrar sistemas o proyectos complejos, destacando los flujos de información, las secuencias de tareas o actividades y las iteraciones. Puede ayudar a los equipos a racionalizar sus procesos basados en el flujo de información entre diferentes actividades interdependientes.

También se puede utilizar para administrar los efectos de un cambio. Por ejemplo, si se tuviera que cambiar la especificación de un componente, sería posible identificar rápidamente todos los procesos o actividades que dependían de esa especificación, reduciendo el riesgo de que el trabajo continúe basándose en información obsoleta.

### 9.1.2 Estructura de la MED

Una MED es una matriz cuadrada que representa los vínculos entre los elementos del sistema. Los elementos del sistema se etiquetan a menudo en las filas a la izquierda de la matriz y / o en las columnas por encima de la matriz. Estos elementos pueden representar, por ejemplo, componentes del producto, equipos de organización o actividades del proyecto. Las celdas fuera de la diagonal se utilizan para indicar las relaciones entre los elementos. Una marca o número en una de esas celdas indica un enlace directo entre dos elementos y puede representar:

- relaciones de diseño o
- restricciones entre componentes de producto,
- comunicación entre equipos,
- flujo de información o
- relaciones de precedencia entre actividades.

En una convención, los elementos de una fila indican las salidas que el elemento en esa fila proporciona a los otros elementos y los de una columna las entradas que el elemento en esa columna recibe de otros elementos. Por ejemplo, en la MED que sigue, la marca en la fila A y columna B indica un enlace de A a B (salida de A, entrada a B).

Las filas y las columnas pueden intercambiarse (sin que cambie el significado). Existen las dos convenciones en la representación.

Las celdas de la diagonal se usan normalmente para representar los elementos del sistema. Además, se pueden utilizar para representar auto-iteraciones (por ejemplo, reelaboración de un trabajo). Las auto-iteraciones son necesarias cuando los elementos de la matriz representan un bloque de actividades o subsistemas que pueden detallarse, permitiendo una estructura jerárquica de la MED.

Ejemplo de una MED:

$$\begin{array}{c}
 A \\
 B \\
 C \\
 D \\
 E \\
 F \\
 G
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 A & X & & & & & X \\
 & B & & X & & & \\
 X & & C & & & & X \\
 & & & D & & & \\
 & X & & & E & X & \\
 & & X & & & F & \\
 X & & & & X & & G
 \end{bmatrix}$$

Se han propuesto dos categorías principales de MED: estáticas y temporales. Las **MED estáticas** representan sistemas en los que todos los elementos existen simultáneamente, como los componentes de una máquina o los grupos en una organización. Una MED estática es equivalente a un gráfico de N2 o una matriz de adyacencia. Los elementos en las celdas fuera de la diagonal son, a menudo, simétricos respecto a la diagonal (por ejemplo, en una MED organizacional que indica las interacciones entre los equipos, hay una marca del equipo C al equipo E y una marca del equipo E al equipo C, indicando que las interacciones son mutuas). Las MED estáticas se analizan generalmente con algoritmos de agrupamiento.

Una **MED temporal** es similar a un diagrama de precedencia o a la representación matricial de un grafo dirigido. En las MED temporales, el orden de las filas y columnas indica un flujo temporal: las actividades anteriores en un proceso aparecen en la parte superior izquierda de la MED y las actividades posteriores aparecen en la parte inferior derecha. Términos como "feed

forward" (alimentación hacia delante) y "feedback" (retroalimentación) adquieren significado cuando se hace referencia a interfaces.

Un elemento de retroalimentación es un elemento por encima de la diagonal (cuando las filas representan la salida). Las MED temporales se analizan normalmente utilizando algoritmos de secuenciación, que reordenan los elementos de la matriz para minimizar la cantidad de elementos de realimentación, y los colocan lo más cerca posible de la diagonal.

Las matrices MED también se pueden clasificar en:

- Basadas en Componentes
- Basadas en Arquitectura
- Basadas en personas (equipos)
- MED de Organización

Estas dos últimas son consideradas como Estáticas (que representan los elementos existentes).

Las MED basadas en actividades y las MED basadas en parámetros se definen como basadas en el tiempo, ya que su ordenación implica flujo temporal.

### 9.1.3 Elementos de las MED

Inicialmente, los elementos de celdas fuera de la diagonal indicaban sólo la existencia o no de una interacción entre elementos, usando una "X" o un "1". Las que son así se definen como MED binarias (Smith & Reinertsen, 1991).

Posteriormente, los elementos se han ampliado para poder indicar relaciones cuantitativas que indica la "fuerza" de la vinculación (llamadas MED numéricas) o relaciones estadísticas (MED de probabilidad) (Smith R. P., 1995).

### 9.1.4 Algoritmos de modificación de las MED

Los algoritmos de modificación en las MED se utilizan para reordenar los elementos de la matriz. Existen numerosos algoritmos para analizar la estructura global de las relaciones dentro de una MED, por ejemplo: rasgado, lateralización y partición.

Las MED estáticas se analizan usualmente con algoritmos de agrupamiento (es decir, reordenando los elementos de la matriz para agrupar los elementos relacionados). Los resultados de reagrupación normalmente muestran grupos (también llamados clústeres) de elementos estrechamente relacionados y grupos de elementos o elementos que no están conectados o están conectados a muchos otros elementos y por lo tanto no forman parte de un grupo.

Las MED temporales se analizan normalmente utilizando algoritmos de partición, rasgado y secuenciación. Los de partición dividen la matriz, los de rasgado llevan a los bordes los elementos no interesantes y los métodos de secuenciación intentan ordenar los elementos de la matriz de manera que no queden marcas de retroalimentación. En el caso de actividades acopladas (actividades que tienen enlaces cíclicos, por ejemplo, la actividad A está vinculada a B, que está vinculada a C, que está vinculada a A) los resultados son un bloque de MED en diagonal (es decir, bloques o grupos de actividades acopladas a lo largo de la diagonal).

Los métodos de partición incluyen:

- Búsqueda de ruta;
- Matriz de alcance;
- Algoritmo de triangulación;
- Matriz de adyacencia.

El rasgado es la eliminación de elementos de retroalimentación (en la MED binaria) o asignación de una prioridad inferior a la que tenía (MED numérica). El rasgado de una MED basada en componentes puede implicar modularización

(el diseño del componente no está influyendo en otros componentes) o estandarización (el diseño del componente no está influyendo y no es influido por otros componentes). Después de rasgar se aplica un algoritmo de partición. Al minimizar los bucles de retroalimentación se obtienen los mejores resultados para las MED binarias, pero no siempre para las MED numéricas o las MED de probabilidad.

Los algoritmos de secuenciación suelen tratar de minimizar el número de bucles de retroalimentación y también de reordenar las actividades acopladas (con bucle cíclico) intentando tener los elementos de retroalimentación cerca de la diagonal. Sin embargo, a veces el algoritmo trata de minimizar un criterio (donde las iteraciones mínimas no son los resultados óptimos).

### 9.1.5 Uso y extensiones

Las interacciones entre varios aspectos (personas, actividades y componentes) se estudian usando matrices de enlace adicionales (no cuadradas).

La matriz de dominios múltiples (MDM) es una extensión de la estructura básica de la MED. Una MDM incluye varias MED (ordenadas como matrices diagonales de bloques) que representan las relaciones entre elementos del mismo dominio y las matrices de mapeo de dominio (MMD) correspondientes, que representan relaciones entre elementos de diferentes dominios.

El uso de la MED se ha extendido para visualizar y optimizar el flujo de información que de otro modo sería invisible y las interacciones asociadas con el trabajo en oficina. Esta visualización a través de la MED permite que el Cuerpo de Conocimientos de Producción Ligera (o Lean Body of Knowledge) se aplique a flujos de trabajo de oficina y a información. El método de la MED se aplicó como un marco para analizar la propagación de la reelaboración en los procesos de desarrollo de productos y el problema asociado de la convergencia (o divergencia) utilizando la teoría de los sistemas dinámicos lineales.

La gestión de sistemas complejos es una competencia básica para ejecutar con éxito cualquier proyecto. La Matriz de Estructura de Diseño es una herramienta sencilla para realizar tanto el análisis como la gestión de sistemas complejos. Permite al usuario modelar, visualizar y analizar las dependencias entre las entidades de cualquier sistema y recibir sugerencias para la mejora o síntesis de un sistema. Ese sistema puede ser, por ejemplo, una arquitectura de producto o un proceso de diseño de ingeniería, la organización de una empresa o un mercado. Como herramienta para el análisis de sistemas, la MED proporciona una representación compacta y clara de un sistema complejo y un método de captura de las interacciones o interdependencias o interfaces entre los elementos del sistema. Como herramienta de gestión, la MED es más aplicada en la gestión de proyectos y proporciona una representación del proyecto que permite analizar la retroalimentación y las dependencias de tareas cíclicas. Ésto es importante ya que la mayoría de las aplicaciones de ingeniería presentan ciclos. Esta representación a menudo da como resultado una mejora del calendario de ejecución de las actividades de diseño analizadas.

La investigación sobre la gestión de la complejidad basada en matrices ha recorrido ya un largo camino. Originada desde un enfoque de proceso con la primera formulación publicada de una Matriz de Estructura de Diseño (MED) por Don Steward en 1981, alrededor de esta herramienta se ha desarrollado toda una comunidad de usuarios que la han extendido a múltiples tipos de problemas. La MED es capaz de modelar y analizar dependencias de un solo tipo dentro de un único dominio. Se puede usar también para un producto, p.ej. el dominio "componentes". Utilizando la relación tipo "cambio de componente 1 causa cambio de componente 2", se puede analizar un conjunto con respecto a los impactos globales de los cambios, para modelar posibles problemas de cambio.

Las MED pueden tener diferentes cualidades: Las MED binarias representan solamente la existencia de una relación, mientras que las MED numéricas representan un valor numérico (también llamado "peso") para representar la fuerza de una relación.

Las MED pueden ser dirigidas (como se muestra en la imagen siguiente) o no dirigidas:

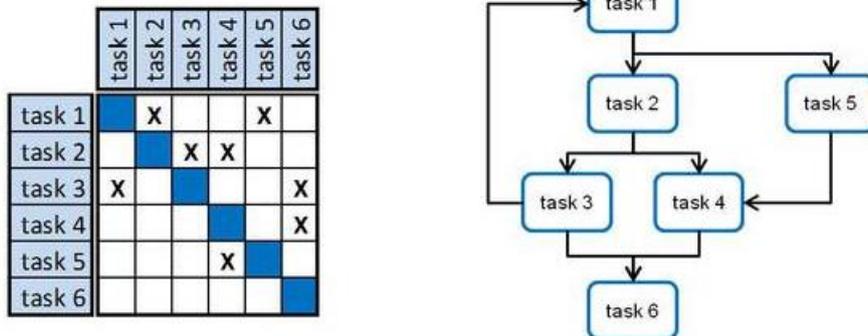


Imagen 9-1; Matriz MED dirigida.  
Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

Las MED no pueden ser reflexivas, es decir, una relación entre un elemento y él mismo no conduce a nada. La Tabla 9-1 siguiente muestra un proceso simple que consta de seis tareas que se muestran como un diagrama de flujo y una MED que representa ese proceso.

Existen numerosos algoritmos para analizar la estructura global de las relaciones dentro de una MED, por ejemplo: rasgado, lateralización y partición, o bien con el análisis de diferentes propiedades estructurales.

### 9.1.6 Matrices de mapeo de dominios (MMD)

Las MED se extendieron posteriormente a matrices de mapeo de dominio (o MMD). El objetivo era permitir que la metodología matricial incluyera no sólo un dominio a la vez sino que permitiera el mapeo entre dos dominios. Las MMD son matrices rectangulares y pueden ser binarias o numéricas. En la siguiente imagen, el ejemplo del proceso se amplía para definir quién es el responsable de cada tarea. La MMD muestra cómo las personas se pueden asignar a las tareas.

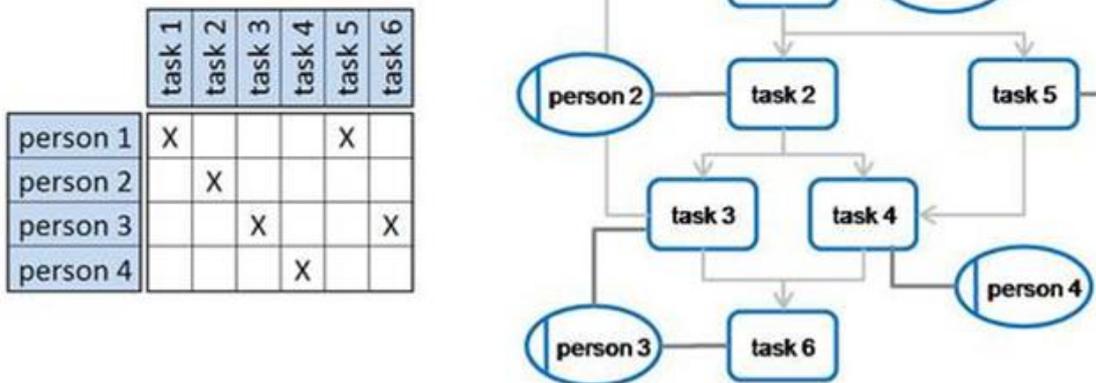


Imagen 9-2; Matriz de mapeo de dominios

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

### 9.1.7 Matriz de dominios múltiples (MDM)

La MED y la MMD pueden ser utilizadas para modelar sistemas completos que estén formadas por múltiples dominios, cada uno con múltiples elementos conectados por diversas relaciones. La matriz que se obtiene se denomina Matriz de Dominio Múltiple (o MDM). La MDM permite analizar la estructura de un sistema a través de múltiples dominios, condensando cada análisis individual en una MED que representa múltiples dominios a la vez. Como se ha demostrado en las últimas investigaciones sobre las MED, los enfoques basados en matrices que integran múltiples vistas (o dominios) son adecuados para gestionar varias perspectivas en un sistema, especialmente cuando se trata de grandes sistemas. La siguiente imagen ilustra el concepto de MDM. Muestra cómo una MDM es básicamente una MED que incluye MED más detalladas a lo largo de su diagonal y MMD fuera de la diagonal. También describe cómo varios tipos de relación crean varias representaciones de una submatriz específica de la MDM general.

El organigrama que se muestra en la imagen siguiente muestra cómo están estructuradas dentro de la empresa las personas responsables de las diferentes tareas. Dado que el equipo del proyecto difiere de la configuración

organizativa real, ambas representaciones se integran en la MDM que ahora representa todo el sistema.

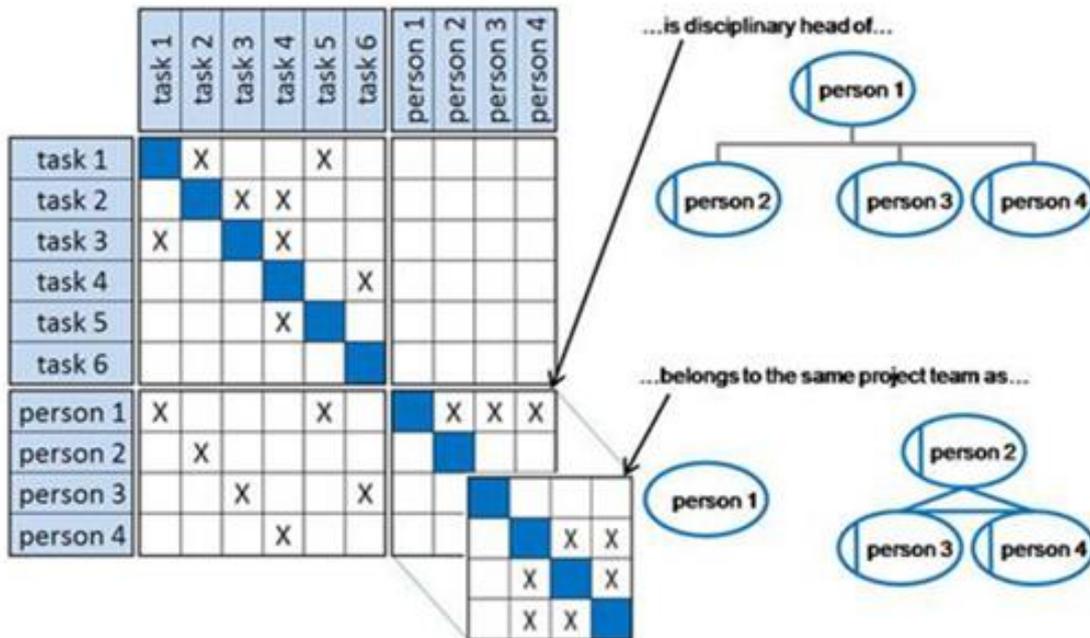


Imagen 9-3; Matriz de dominios múltiples.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

Dado que el comportamiento y el valor de muchos sistemas está determinado en gran medida por las interacciones entre sus elementos constitutivos, las MED se han vuelto cada vez más útiles e importantes en los últimos años. En relación con otros métodos de modelado de sistemas, una MED tiene dos ventajas principales:

- Proporciona una forma simple y concisa de representar un sistema complejo.
- Es susceptible de análisis detallados, como el agrupamiento (para facilitar la modularidad) y la secuenciación (para minimizar el costo y programar el riesgo en los procesos).

La MED está relacionada con otros métodos basados en la matriz cuadrada, tales como el Mapa de Dependencias, la Matriz de Precedencias, la Matriz de Contribución, la Matriz de Adyacencia, la Matriz de Alcance y un Diagrama N-cuadrado y también está relacionada con métodos no basados en matrices

tales como los Grafos Dirigidos, los Sistemas de Ecuaciones, los Diagramas de Arquitectura y otros varios modelos de dependencia.

El uso de matrices en el modelado de sistemas se remonta a los años sesenta. Sin embargo, no fue hasta la década de los 90 en la que estos métodos recibieron atención generalizada.

Algunos trabajos anteriores utilizaron grafos para el modelado de sistemas y generalmente se conoce el uso de grafos para manejar estructuras complejas.

Por ejemplo, consideremos un sistema que está compuesto de tres elementos (o subsistemas): elemento "A", elemento "B" y elemento "C". La MED trabaja bajo el supuesto de que para el propósito del modelado los tres elementos describen completamente el sistema y caracterizan su comportamiento. Se puede desarrollar un grafo para representar este sistema pictóricamente. El grafo del sistema se construye haciendo que un vértice o nodo en el grafo represente un elemento del sistema y una línea que une dos nodos represente la relación entre dos elementos del sistema. La direccionalidad de la influencia de un elemento a otro es captada por una flecha en lugar de por un simple enlace. El grafo resultante se denomina grafo dirigido o simplemente dígrafo.

La representación matricial de un dígrafo tiene las siguientes propiedades:

- es binaria (una matriz con sólo ceros y unos)
- es cuadrada (matriz con igual número de filas y columnas)
- tiene  $n$  filas y columnas ( $n$  es el número de nodos del dígrafo)
- tiene  $k$  elementos no nulos, donde  $k$  es el número de aristas en el dígrafo

El diseño de la matriz es el siguiente: los nombres de los elementos del sistema se colocan en el lado de la matriz como encabezados de fila y en la parte superior como encabezados de columna, en el mismo orden. Si existe una línea desde el nodo  $i$  al nodo  $j$  entonces el valor del elemento  $ij$  (fila  $i$ , columna  $j$ ) es la unidad (o se marca con una  $X$ ), de lo contrario el valor del elemento es cero (o se deja vacío). En la representación matricial binaria de un sistema, los

elementos diagonales de la matriz no tienen ninguna interpretación en la descripción del sistema, por lo que suelen quedar vacíos, aunque muchos encuentran intuitivo pensar en estas celdas diagonales como representativas de los nodos.

Las matrices binarias son útiles en el modelado de sistemas porque pueden representar la presencia o ausencia de una relación entre pares de elementos en un sistema.

Una ventaja importante de la representación matricial sobre el dígrafo es que su compacidad y capacidad para proporcionar un mapeo sistemático entre elementos del sistema permite un análisis detallado de un conjunto de elementos en la estructura total. Como tal, por lo tanto, proporciona un método cualitativo de modelización de la interdependencia con un enfoque formal.

Una matriz también puede representar dependencias ponderadas. Para ello se utiliza una MED numérica que en vez de x o 1 usa factores de ponderación entre 0 y 1. También se puede usar una columna adicional para representar el peso de un elemento. Si el sistema es un proyecto representado por un conjunto de tareas a realizar, los elementos o marcas fuera de la diagonal en

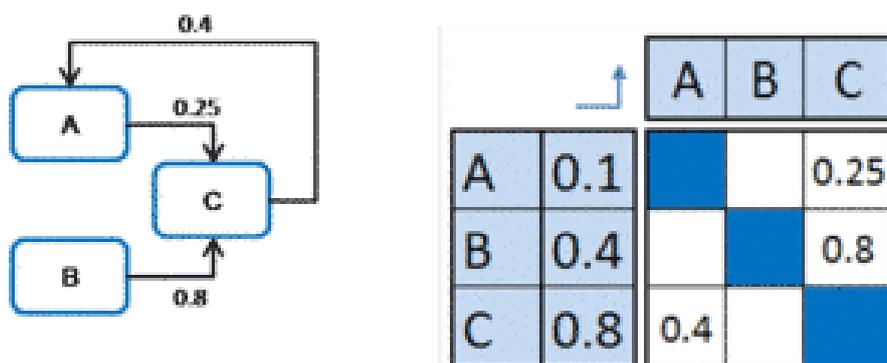


Imagen 9-4; MED numérica.  
Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

una columna de la MED representan todas las tareas cuya salida es necesaria para realizar la tarea correspondiente a esa columna (es decir, leer una columna para ver las entradas de una tarea que son las salidas de otras

tareas). De manera similar, los números a lo largo de una fila específica definen qué tareas reciben información de esa tarea (es decir, leer a lo largo de una fila para ver dónde van las salidas de esa tarea para convertirse en entradas de otras tareas). En muchos casos, las tareas tienen un orden temporal y entonces el orden de las tareas en la matriz corresponde a la línea de tiempo. En esos casos, las marcas por encima de la diagonal representan la transferencia de información hacia delante a tareas posteriores (es decir, aguas abajo). Este tipo de marca se denomina marca de avance o enlace de información hacia delante. Los elementos o marcas por debajo de la diagonal representan información dada a las tareas enumeradas anteriormente (es decir, una marca de retroalimentación) e indican que una tarea aguas arriba depende de una tarea aguas abajo. No todas las MED se construyen de esta manera; hay algunas áreas en las que prevalece la convención contraria de "columna de impactos de fila". Esta convención usa la transposición de la matriz de la primera convención. Ambas convenciones transmiten información equivalente y cualquier persona familiarizada con una convención puede adaptarse a la otra con facilidad. La razón de la existencia de dos convenciones es que los métodos de estudio de proyectos basados en la matriz cuadrada surgieron de dos fuentes distintas.

Hay tres bloques básicos para describir la relación entre los elementos del sistema:

- Relación paralela (o concurrente)
- Relación secuencial (o dependiente) y
- Relación acoplada (o interdependiente).

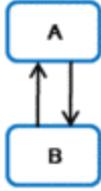
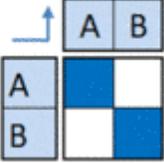
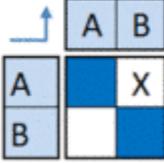
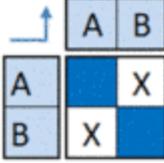
Tipos de relaciones	paralela	secuencial	acoplada
Grafo			
Representación			

Tabla 9-1; Tipos de relaciones.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

En la **relación paralela**, los elementos del sistema no interactúan (para la relación que se representa en este momento). Si el sistema es un proyecto, entonces los elementos del sistema serían las tareas del proyecto a realizar y por lo general las relaciones serían el intercambio de información entre las tareas. Se dice que la tarea B es independiente de la tarea A y no se requiere intercambio de información entre las dos actividades.

En la **relación secuencial**, un elemento influye en el comportamiento o decisión de otro elemento de forma unidireccional. Por ejemplo, los parámetros de diseño del elemento B se seleccionan basándose en los parámetros de diseño del elemento A. En términos de tareas del proyecto, la tarea A debe realizarse antes que la tarea B.

Finalmente, en la **relación acoplada**, el flujo de información o influencia está entrelazado: el elemento A influye en B y el elemento B influye en A. O sea, el parámetro A no puede ser determinado con certeza sin conocer primero el parámetro B y B no puede determinarse con certeza sin conocer A. Esta dependencia se llama "Circuito" o "Ciclo".

## 9.1.8 Diferentes tipos de MED

No hay un tipo de MED que sea útil en todas las situaciones. Hay que adaptar la MED a los tipos de elementos y relaciones que hay en el sistema que vamos a estudiar. Hay que definir con la mayor exactitud posible el tipo de elementos y dependencias para obtener mejor la estructura de la información en la MED.

<b>Términos en la Teoría de Sistemas</b>	<b>Entidad</b>	<b>Relación</b>
<b>Términos en la Teoría de Grafos</b>	<b>Nodo, vértice</b>	<b>Enlace, arco, lado</b>
<b>Términos en la MED</b>	<b>“Elemento”:</b> se utiliza para referirse a una entidad que refleja una dependencia y/o interdependencia de fila o columna.	<b>Dependencia y/o interdependencia:</b> “dependencia” implica direccionalidad, o sea, el elemento A depende del elemento B.
<b>Agrupados en un:</b>	<b>Dominio</b>	<b>Tipo de relación</b>

Tabla 9-2; Términos en Teoría de Sistemas.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

## 9.1.9 Dominios

Desde un punto de vista estructural, un sistema puede representarse como una red de entidades y sus relaciones. Estas entidades pueden ser de diferentes tipos: documentos, información, paquetes de trabajo. Si se mezclan muchos de estos tipos, la red será incoherente. Cada tipo de entidades configura una parte específica del sistema, denominada "dominio". El propósito de un dominio, que es comparable a una "clase" de objetos en programación orientados a objetos, es crear "redes homogéneas" que permitan comparar elementos durante el análisis. El término "dominio" puede definirse como una parte específica (de

entre todas las posibles) de un sistema complejo. Comprende un solo tipo de entidad que puede ser analizado por el mismo algoritmo, proporcionando un resultado significativo. Una MED siempre debe contener elementos de un sólo dominio.

### **9.1.10 Tipos de relación**

Al igual que los dominios, las relaciones dentro de un dominio deben ser uniformes para permitir un modelado sistemático y un análisis coherente. Igual que un dominio contiene sólo entidades de un tipo, un tipo de relación se refiere a un conjunto de relaciones similares. Por ello, el tipo de relación define el tipo de dependencia entre dos elementos. Se describe como "(un elemento del dominio A) está relacionado con (un elemento del dominio B), donde los dominios A y B se refieren a dos dominios que están relacionados".

### **9.1.11 Escogiendo la MED**

Para escoger mejor el tipo de MED necesaria, en primer lugar hay que clasificar los elementos. Para hacerlo, los elementos similares deben ser reagrupados y nombrados. Si la meta es la modularización, son importantes los requisitos, las funciones y los componentes. Para modularizar mejor los componentes y comprender mejor sus intercambios, se pueden seleccionar los "componentes" del dominio y configurar una MED que tenga los componentes del sistema como elementos en sus filas y columnas.

A continuación, se define el tipo de relación. Es importante que una MED contenga sólo un tipo de relación, ya que, para que los análisis tengan sentido es imprescindible.

### 9.1.12 Clasificación de las MED

Hay cuatro tipos de datos que se suelen representar en la MED:

Tipos de datos	Representación	Aplicaciones
Basadas en Componentes (Producto)	Relaciones de componentes	Arquitectura, ingeniería y diseño de Sistemas
Basada en personas (organización)	Relaciones de unidad organizativa	Diseño de Organizaciones, Gestión de Interfases, Integración de Equipos
Basadas en Actividades (Procesos)	Relaciones entrada /salida de actividades	Mejora de procesos, programación de proyectos, gestión de iteraciones, gestión de flujo de información
Basadas en Parámetros (proceso de bajo nivel)	Relaciones de parámetros de diseño	Secuenciación de actividad de bajo nivel y construcción de procesos, secuenciación de decisiones de diseño

Tabla 9-3; Tipos de datos en las MED.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

Sin embargo, también es posible cualquier otro tipo de MED.

### 9.1.13 MED basada en componentes

Una MED basada en componentes documenta las interacciones entre elementos en una arquitectura de sistemas complejos. En la MED se pueden mostrar diferentes tipos de interacciones. Los tipos de interacciones variarán de un proyecto a otro.

Se muestran en la tabla siguiente algunos tipos de interacciones representativas:

Posición	Necesidades de adyacencia u orientación entre dos elementos
Información	Necesidades de intercambio de datos entre dos elementos
Materia	Necesidades de intercambio de materia entre dos elementos

Tabla 9-4; Tipos de interacciones.

Hay también otras clasificaciones.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Radiator	A		X														
Engine Fan	B	X				X											
Heater Core	C																X
Heater Hoses	D																
Condenser	E						X		X								
Compressor	F					X			X	X							
Evaporator Case	G																X
Evaporator Core	H					X	X			X							X
Accumulator	I						X		X								
Refrigeration Controls	J																
Air Controls	K																
Sensors	L																
Command Distribution	M																
Actuators	N																
Blower Controls	O																X
Blower Monitor	P			X				X	X							X	

Imagen 9-5; Ejemplo automóvil.

Como ejemplo, consideremos la interacción material entre componentes para un sistema de control de temperatura de un vehículo. En este caso, p.ej. el ventilador del motor (B) transfiere material al condensador (E), ya que existe una "X" en la celda (B, E).

Se puede reordenar la matriz para obtener grupos de componentes muy relacionados entre ellos mientras se intentan minimizar las interacciones entre esos grupos o subconjuntos o clústeres. De esta manera, los datos no cambian, pero las filas y las columnas de la matriz se intercambian por parejas para obtener una matriz diferente. Los agrupamientos obtenidos representan un sistema útil para reorganizar la arquitectura del producto y hacer hincapié en las interfaces entre los distintos grupos. La agrupación de las "X", a lo largo de

o cercanas a la diagonal de la MED, da lugar a tres grupos o clústeres para el Sistema de Control de la Temperatura. Estos grupos representan grupos de componentes que están estrechamente interconectados. Pueden ser utilizados para definir módulos que se pueden pedir a diferentes proveedores del sistema o que se pueden utilizar a través de una serie de refrigeradores diferentes (pequeños, medianos, grandes) como módulos de transferencia con interfaces bien definidas con los otros módulos.

		D	J	K	L	M	N	A	B	E	F	I	H	C	P	O	G
Heater Hoses	D	■															
Refrigeration Controls	J		■														
Air Controls	K			■													
Sensors	L				■												
Command Distribution	M					■											
Actuators	N						■										
Radiator	A							■	X	■							
Engine Fan	B							X	■	X							
Condenser	E							■	X	■	X	■	X				
Compressor	F								X	■	■	X	X				
Accumulator	I									■	X	■	X				
Evaporator Core	H								X	X	X	■			X		
Heater Core	C												■	X			
Blower Monitor	P												X	X	■	X	X
Blower Controls	O														X	■	
Evaporator Case	G														X		■

Clúster 1	■	Aire de la zona del radiador motor
Clúster 2	■	Refrigerante del motor
Clúster 3	■	Aire del Interior

Imagen 9-6; Agrupamiento.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

### 9.1.14 MED basada en equipos

Este enfoque se utiliza para el análisis organizacional y el diseño basado en el flujo de información entre diversas entidades organizativas. Los elementos que se analizan son los individuos y grupos que participan en un proyecto (filas y columnas en la matriz). Una MED basada en equipos se construye identificando los flujos de comunicación requeridos y representándolos como conexiones entre entidades organizativas en la matriz. Para el ejercicio de modelado es importante especificar qué se entiende por flujo de información entre equipos. La siguiente tabla presenta varias formas posibles de caracterizar el flujo de información.

Tipos de flujo de información	Métricas posibles
Nivel de detalle	De bajo (e-mails) a rico (modelos)
Frecuencia	De baja (documentos impresos y distribuidos) a alta (online, real)
Dirección	De un sentido o dos sentidos
Sincronización	De temprana (modelo preliminar) a tardía (modelo final)

Tabla 9-5; Métricas posibles.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

Una vez más, la matriz puede ser reagrupada con el fin de obtener grupos de equipos e individuos altamente interactuantes (clústeres) y tratar de minimizar

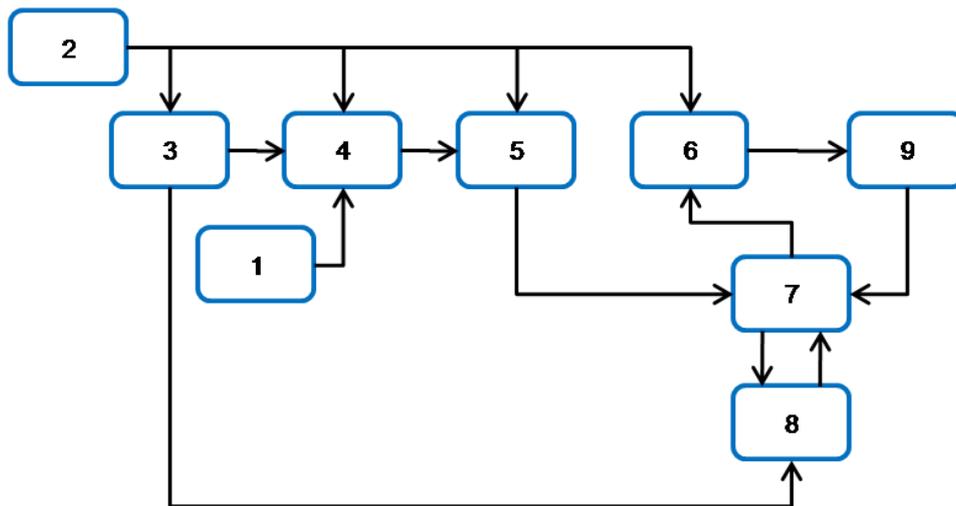


Imagen 9-7; Diagrama de relaciones.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

las interacciones entre clústeres. Los clústeres obtenidos representan un marco útil para el diseño organizacional, centrándose en las necesidades de comunicación de los diferentes participantes.

### 9.1.15 MED basada en actividades

Considérese un conjunto de tareas que componen un proceso. Estas tareas deben completarse para cumplir el objetivo del proceso global. El intercambio de información se puede representar como un dígrafo o como una MED.

Se pueden observar tres tipos de interacciones de tareas en la matriz. En la imagen siguiente las tareas 1 y 2 son "independientes", ya que no se intercambia información entre ellas; lo mismo ocurre con los elementos 4 y 8.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1				X					
2			X	X	X	X			
3				X				X	
4					X				
5							X		
6									X
7						X		X	
8							X		
9							X		

Imagen 9-8; MED basada en actividades.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

Estas tareas pueden ejecutarse simultáneamente (en paralelo). Las tareas 3, 4 y 5 están en una transferencia secuencial de información y se consideran "dependientes". Estas tareas se realizarían normalmente en serie. Sin embargo, las tareas 7 y 8 dependen mutuamente de la información de la otra. Estas son tareas "interdependientes" o "acopladas" que normalmente requieren múltiples iteraciones para completarse.

Las tareas 6, 7 y 9 están dentro de un ciclo. Las celdas marcadas debajo de la diagonal representan bucles de repetición o iteraciones potenciales en el proceso. Ésto ocurre cuando una actividad depende de la información de una tarea programada para una ejecución posterior. Tales escenarios, a menudo llevan a nuevos trabajos y son indeseables. Se han desarrollado una serie de algoritmos para minimizar esos casos de iteración (de celdas sub-diagonales marcadas) reordenando la secuencia de las tareas en el proceso. Existen métodos para manejar las iteraciones del proceso que no se pueden eliminar utilizando la re-secuenciación. Los algoritmos básicos de secuenciación se denominan de "triangularización", ya que el objetivo es obtener una "matriz

triangular superior" que preferiblemente no tenga marcas por debajo de la diagonal.

Los modelos MED que utilizan representaciones binarias simples sólo muestran la existencia de una dependencia entre dos tareas sin proporcionar información adicional sobre la naturaleza de la interacción. Otros estudios han ampliado la configuración básica de las MED mediante la introducción de factores adicionales en el proceso de desarrollo. Por ejemplo, la MED numérica reemplaza las marcas con números en las celdas fuera de la diagonal para representar el grado de dependencia entre dos tareas, lo que permite mostrar, también, la probabilidad de que haya un bucle de retroalimentación y, así, priorizar las iteraciones más importantes en la planificación del proceso.

### 9.1.16 MED basada en parámetros

Este tipo de modelado se utiliza para analizar un proceso de diseño a nivel de relaciones de parámetros.

Black (Black, Fine, & Sachs, 1990) aplicó una MED basada en parámetros a un diseño de sistema de frenos de automóviles, utilizando la MED para describir las prácticas actuales de un proveedor de componentes de sistema de frenos. La MED que se muestra a continuación se ha sacado de la MED original:

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Customer Requirements	1	■		X	X	X								
Wheel Torque	2		■			X	X		X		X			X
Pedal Mech. Advantage	3			■		X		X	X		X		X	X
System Level Parameters	4		X	X	■	X		X	X	X	X	X	X	X
Rotor Diameter	5			X		■		X				X		X
ABS Modular Display	6						■							
Front Lining Coef. of Friction	7					X		■						X
Piston-Rear Size	8			X	X		X		■		X	X		X
Caliper Compliance	9						X			■				
Piston- Front Size	10			X	X		X	X	X		■	X		X
Rear Lining Coef of Friction	11				X							■		X
Booster - Max. Stroke	12												■	
Booster Reaction Ratio	13			X	X		X	X	X		X	X		■

Imagen 9-9; MED de Black.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

Después de la secuenciación de los parámetros, en la MED resultante aparecen dos subconjuntos de determinaciones de parámetros de bajo nivel acoplados:

		1	4	2	10	8	3	11	7	13	5	12	9	6
Customer Requirements	1	X					X				X			
System Level Parameters	4		X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
Wheel Torque	2			X	X					X	X			X
Piston- Front Size	10				X	X	X	X	X	X	X			X
Piston-Rear Size	8			X		X	X	X	X	X				
Pedal Mech. Advantage	3						X	X	X	X			X	
Rear Lining Coef. of Friction	11							X	X		X	X		
Front Lining Coef. of Friction	7								X	X				
Booster Reaction Ratio	13						X	X	X		X	X	X	
Rotor Diameter	5						X	X	X	X				
Booster - Max. Stroke	12											X		
Caliper Compliance	9												X	
ABS Modular Display	6													X

Imagen 9-10; MED basada en parámetros después de la secuenciación.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

### 9.1.17 Atributos adicionales

También se pueden incluir los atributos adicionales de los propios elementos añadiendo más columnas a la izquierda de la matriz cuadrada para describir, por ejemplo, el tipo, el propietario o el estado de cada elemento. Los atributos adicionales de las interacciones, tales como sus nombres, requisitos, etc., se guardan generalmente separados, pero pueden estar vinculados a las celdas de la MED por números de identificación o índices.

### 9.1.18 Convenciones

Muchas MED utilizan la convención opuesta, la transposición de la matriz, con las entradas de un elemento mostradas en su fila y sus salidas mostradas en

su columna. Eppinger y Browning desarrollaron las siguientes notaciones para estas convenciones:

- Convención IR/FAD: Las MED tienen entradas en las filas y salidas en las columnas; por lo tanto, cualquier marca de retroalimentación aparecerá por encima de la diagonal.
- Convención IC/FBD: Las MED tienen entradas en las columnas y salidas en las filas; por lo tanto, cualquier marca de retroalimentación aparecerá por debajo de la diagonal.

Las dos convenciones transmiten la misma información; cada una es sólo la transposición de la matriz de la otra. Ambas son ampliamente utilizadas debido a las dos raíces de las herramientas basadas en matriz para sistemas de modelado (la convención IR se originó a partir del trabajo en MED de Steward (Steward, 1981), mientras que la convención IC proviene de los grafos N2, los diagramas IDEF0 y los diagramas de Gantt). El convenio IC/FBD es más intuitivo con respecto a la orientación de las regiones de entrada y salida de la MED.

## **9.1.19 Construyendo una MED**

### **9.1.19.1 Descomposición**

El éxito de la utilización de la MED está determinado por una correcta descomposición del sistema y por la precisión en el uso de relaciones de dependencia comparables. Por ello, es vital descomponer cuidadosamente el sistema en un conjunto de elementos homogéneo. Se puede hacer una descomposición correcta reuniendo un grupo de directivos y/o expertos de diferentes grupos funcionales de una organización y pidiéndoles que enumeren colectivamente los diferentes subsistemas que componen el sistema en su conjunto. La descomposición puede ser jerárquica o no jerárquica (a veces

llamada descomposición de red). En la descomposición jerárquica, el sistema puede dividirse en subsistemas o módulos. A su vez, estos módulos se dividen en componentes más pequeños, por lo que es adecuado que la descomposición sea clara y sin ambigüedades. En la descomposición de red no hay una jerarquía y se usa si no se puede idear una jerarquía o si la jerarquía es ambigua.

Una vez que se han identificado los elementos del sistema o conjunto de actividades que comprenden un proyecto, se enumeran en la MED como etiquetas de fila y columna en el mismo orden. A continuación, se identifican las relaciones entre los elementos de la matriz pidiendo al directivo o experto que identifique el conjunto mínimo de parámetros que influyen en el sistema y contribuyen a su comportamiento.

En una MED basada en tareas, éste puede ser el conjunto mínimo de actividades que deben realizarse antes de que se pueda iniciar la actividad en cuestión.

En una MED basada en parámetros, las filas y las columnas son parámetros de diseño que impulsan el diseño o definen el sistema y se puede pedir a los directivos y/o expertos que definan las relaciones de precedencia entre los parámetros listados. Estas relaciones entre tareas/parámetros/elementos se marcan en la MED con una 'X'.

Pasos posteriores:

- Recoger los comentarios que explican cada elemento y cada dependencia (para su posterior comprensión e interpretación)
- Repartir entre ingenieros y directivos para comentar / verificar la MED
- Refinar el modelo.

## **9.1.20 Criterios para construir MED útiles**

### **9.1.20.1 Definir el sistema y su alcance.**

Dado que la MED es una herramienta que estudia el proceso de diseño como un sistema con muchos elementos que interactúan, es importante definir los límites del sistema para enfocar el trabajo de investigación. Una definición diferente del sistema da lugar a resultados diferentes en la MED.

### **9.1.20.2 Listar todos los elementos del sistema.**

Inicialmente, los elementos del sistema pueden elegirse basándose en los planes de proyecto existentes, sugerencias de los ingenieros, etc. El autor de la MED generalmente define el conjunto inicial de elementos del sistema basándose en la lectura de la documentación de diseño. Sin embargo, la experiencia muestra que los elementos del sistema definidos inicialmente a menudo necesitan ser modificados en el proceso de asignarles interacciones. Por lo tanto, es necesaria una revisión crítica de la lista de elementos en colaboración con el personal de ingeniería u otros expertos.

### **9.1.20.3 Estudiar el flujo de información entre los elementos del sistema.**

Leer los documentos de diseño y entrevistar a técnicos experimentados que estén trabajando en el producto en particular. Las entrevistas son tan importantes como leer los documentos de diseño porque no todo el conocimiento es bien captado por los documentos de diseño, pues existe una gran cantidad de información en las mentes de los técnicos que no está en los documentos y es importante extraer ese conocimiento. Las entrevistas son un medio eficaz de extraer conocimiento de los técnicos comparándolas con otros métodos. Los diferentes técnicos tienen opiniones diferentes sobre cómo se

relaciona un elemento con otro y lo importante que es la relación. Las causas de estas diferencias son generalmente:

- La interacción no es directa. A veces, pueden no encontrarse las interacciones indirectas durante la entrevista. El entrevistador tiene que documentar el contenido de cada interacción y repasarlos, a solas, después de la entrevista, para identificar las relaciones indirectas. Al hacerlo, el entrevistador también puede obtener una buena visión del sistema y descubrir puntos no vistos inicialmente del flujo de información.
- Los técnicos tienen diferentes perspectivas sobre los temas debido a las diferencias de sus trabajos. En estos casos, el entrevistador debe actuar como mediador, debe tener conocimiento del sistema hasta cierto punto y ser capaz de discutir diferentes puntos de vista con los entrevistados o incluso volver atrás y preguntar de nuevo, hasta que se alcance un compromiso entre ellos.

Por las dos razones mencionadas anteriormente, es muy importante entrevistar a técnicos cara a cara y de uno en uno y en grupo para obtener información de las relaciones entre los elementos.

El problema es que las entrevistas suelen ser largas y ocupan mucho tiempo y por ello muchos investigadores han propuesto utilizar impresos de encuesta o reuniones para recabar la información. La ventaja de usar formularios es ser eficiente en cuanto al tiempo. Sin embargo, pueden perderse muchos detalles importantes ya que los formularios no dan explicaciones sobre las elecciones de los expertos. Además, las diferencias debidas a la experiencia laboral no se pueden reflejar fácilmente en un formulario.

Las reuniones abren oportunidades de discusión y comprensión que no aparecen en los formularios. Reducen la cantidad de tiempo necesaria para que el que pide la información consiga un consenso entre los ingenieros. Pero muchas veces, ésto es a costa de perder precisión: es inevitable que algunos de los ingenieros se sientan inhibidos para hablar debido a la presión ejercida por la presencia de los jefes o de compañeros a los que atañe su punto de

vista. De esta forma suelen perderse datos importantes. En todo caso, una reunión debe estar siempre bien preparada con un buen orden del día que permita que en cada fase de la reunión estén sólo las personas necesarias para su desarrollo y también debe ser perfectamente documentada, incluyendo en ella un secretario que levante el acta, que no sea parte del debate, para poder aprovechar bien los datos recogidos.

Dado que la MED es una herramienta para analizar proyectos y para buscar mejoras, es importante que los datos sean precisos. Sin embargo, cuando sea necesario, se debe buscar un compromiso entre la calidad de los datos y la velocidad de recopilación de los mismos.

Una comprensión más profunda del sistema normalmente conlleva la modificación de los elementos iniciales. Los elementos escogidos se suelen modificar muchas veces durante las entrevistas y las lecturas de la documentación, para poder representar el sistema con precisión.

#### **9.1.20.4 Completar la matriz**

Después de recoger la información sobre los elementos y las dependencias, se construye, inicialmente, una MED binaria para representar la estructura de dependencia básica y los flujos de información entre varios elementos del sistema. Esto es útil y un buen comienzo para el análisis preliminar.

Posteriormente, para una mejor comprensión del proyecto, suele necesitarse elaborar una MED numérica que nos proporcionará una mejor comprensión y permitirá un análisis más detallado del sistema.

#### **9.1.20.5 Proporcionar la matriz a los técnicos y directivos para que la revisen.**

La MED ayuda a los técnicos y a los directivos a entender mejor el proceso y mejorar los procesos de comunicación usando una técnica más sistemática.

Por ello, las MED ya construidas se reparten a los técnicos y directivos que participaron en su construcción para recabar sus comentarios. Ésto hace más patente los beneficios de la construcción de la MED, ya que el ver la imagen del proceso de diseño completa hace que muchos técnicos revisen su rutina habitual para mejorarla y, por otra parte, los comentarios que hacen pueden contribuir aún más al perfeccionamiento de la MED.

#### 9.1.20.6 Resumen

No se pueden reunir todos los datos sin hablar con todo el mundo.

La distribución de formularios estandarizados para recoger datos no es 100% fiable. Se recomiendan entrevistas cara a cara con los expertos adecuados para rellenar esos mismos formularios.

Las personas son bastante precisas en responder a las preguntas sobre qué información necesitan para hacer su trabajo y de dónde pueden obtener esta información. Pero son mucho menos precisas cuando se trata de saber hacia dónde va luego su información y quién la usa.

Es normal que los técnicos pidan tanta información como sea posible antes de tomar una decisión sobre un tema. Pero muchas veces alguna/s información/es no la/s usan y esto tiende a sobrecargar la MED con marcas innecesarias.

Es normal que los técnicos confíen en experiencias pasadas al decir qué información se necesita para determinar completamente un parámetro dado en un proyecto. Ésto puede llevar a ignorar alguna/as marca/s importante/s en la MED.

La descomposición a alto nivel de un sistema puede simplificar excesivamente el proceso de diseño y tiende a ignorar las interacciones importantes de los subsistemas que podrían ser evidentes a un nivel de abstracción más bajo. Por otro lado, con descomposiciones más detalladas del sistema corremos el riesgo de disminuir la intuitividad proporcionada por la MED, ya que cada vez es más

difícil identificar interfaces importantes de los subsistemas. Esta dificultad puede ser disminuida construyendo una jerarquía de MED a diferentes niveles de abstracción, o sea, construyendo una MED de alto nivel de abstracción primero que contenga todos los subsistemas como elementos de línea. A continuación, para cada elemento de línea de la jerarquía de la MED anterior se crea una MED independiente (que expanda cada elemento de las líneas de la MED anterior en una MED distinta). Este proceso de expansión de la MED puede hacerse en cascada las veces necesarias hasta que se detallen en el nivel más bajo las interacciones deseadas. Por último, las MED de nivel más bajo pueden agregarse para formar un sistema completo de MED.

### 9.1.21 Secuenciación de una MED

Secuenciar es la reordenación de las filas y columnas de la MED de tal manera que la nueva disposición no contenga marcas de retroalimentación, transformando así la MED en una forma triangular superior.

Para sistemas de ingeniería complejos, es altamente improbable que simples manipulaciones de fila y columna den lugar a una forma triangular superior. Por lo tanto, el objetivo cambia de eliminar las marcas de retroalimentación a moverlas lo más cerca posible de la diagonal, haciendo un bloque triangular. Es posible entonces ver qué elementos del sistema tendrían que ser modificados (divididos o eliminados) para lograr una mejor arquitectura de proceso.

Hay varios enfoques utilizados en la secuenciación de las MED. Sin embargo, son todos similares con la diferencia de cómo identifican los ciclos (lazos o circuitos) entre elementos acoplados.

Todos los algoritmos de secuenciación actúan de la siguiente manera:

1. Identifican elementos del sistema que se pueden determinar sin entradas del resto de los elementos de la matriz. Pueden identificarse fácilmente

observando columnas vacías en la MED. Se colocan esos elementos a la izquierda de la MED. Una vez que un elemento es reorganizado, se elimina de la MED (con sus marcas correspondientes) y se repite el paso 1 sobre los elementos restantes.

2. Identifican elementos del sistema que no pasen información a otros elementos de la matriz. Pueden identificarse, fácilmente, observando filas vacías en la MED. Luego se colocan esos elementos a la derecha de la MED y, una vez reorganizados, se eliminan de la MED con sus marcas correspondientes.
3. Se repite el paso 2 sobre los elementos restantes.
4. Si después de los pasos 1 y 2 ya no hay elementos restantes en la MED, entonces la matriz está completamente secuenciada; en caso contrario, los elementos restantes contienen un/os circuito/s de información.
5. Se identifican esos circuitos por uno de los siguientes métodos:
  1. Búsqueda del camino
  2. Método de la Matriz Adyacente
  3. Método de Matriz de Alcance
  4. Algoritmos de Triangularización
6. Se contraen los elementos de cada circuito identificado en el punto 4, en un elemento representativo y se repiten los pasos 1, 2 y 3.

### **9.1.22 Método de búsqueda de caminos.**

En la búsqueda de caminos, el flujo de información se rastrea hacia atrás o hacia adelante hasta que una tarea se encuentra dos veces. Todas las tareas

encontradas entre la primera y segunda ocurrencia de una tarea constituyen un bucle en el flujo de información. Cuando han sido identificados todos los bucles y, programadas todas las tareas, la secuenciación está completa y la matriz será un bloque triangular.

En el ejemplo que sigue la partición de búsqueda de camino continúa así:

1. La matriz entera está en su orden original. La tarea F no depende de la información de ninguna otra tarea como se indica por su columna vacía. Hay que programar la tarea F la primera y eliminarla de consideraciones adicionales.
2. La tarea E no da información a ninguna otra tarea, como se ve por su fila vacía. Se programa la tarea E la última en la matriz y se olvida.
3. Ahora, ninguna tarea tiene filas o columnas vacías. Existe un bucle y se puede rastrear a partir de cualquiera de las tareas restantes. En este caso, seleccionamos la tarea A (arbitrariamente) y trazamos su dependencia de la tarea C. La tarea C depende simultáneamente de la información de la tarea A. Dado que la tarea A y la tarea C están en un bucle, hay que unir una con la otra y representarlas en una sola tarea compuesta (tarea CA).

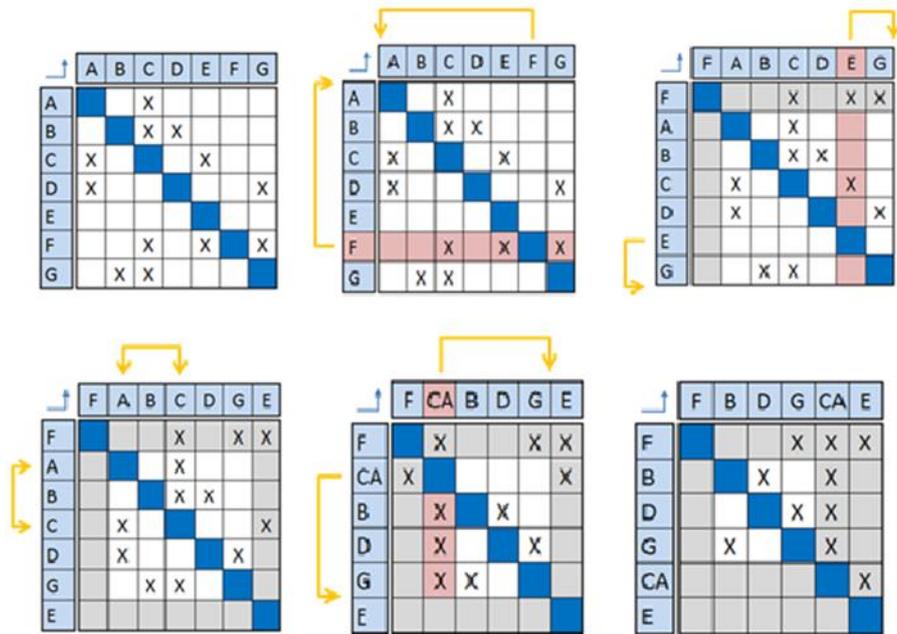


Imagen 9-11; Ejemplo búsqueda caminos.  
Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

4. La tarea CA tiene una columna vacía que indica que no forma parte de ningún otro bucle. Programarla la última y olvidarla.
5. Rastrear la dependencia comenzando con cualquier tarea no programada: la tarea B depende de la tarea G que depende de la tarea D que depende de la tarea B. Este bucle final incluye todas las tareas restantes no programadas.
6. Obtenemos la matriz final ya dividida.

	F	B	D	G	CA	E
F				X	X	X
B		X			X	
D			X		X	
G		X		X		
CA					X	X
A					X	
E						

Imagen 9-12; .Matriz final búsqueda caminos.  
Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

### 9.1.23 Método de la Matriz Adyacente

La matriz Adyacente es una MED binaria en la que una celda vacía se reemplaza por un "cero" y una celda no vacía se reemplaza por un "uno".

Elevar la MED a la  $n$ -ésima potencia muestra qué elemento se puede alcanzar desde sí mismo en  $n$  pasos, observando una entrada no nula para esa tarea a lo largo de la diagonal de la matriz.



Imagen 9-13; Ejemplo Matriz adyacente.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

Por ejemplo, al elevar al cuadrado la MED de arriba nos muestra que las tareas A y C están incluidas en un bucle de dos pasos. Obsérvese que en la matriz cuadrada resultante, las celdas con un valor mayor que uno han sido reemplazadas por un uno. De manera similar, al elevar al cubo la MED, como se muestra a continuación, nos muestra que las tareas B, D y E están incluidas en un bucle de tres pasos. Las potencias superiores a 3 de la MED no revelan otros bucles en el sistema.

El siguiente ejemplo muestra, sin embargo, que este método tiene algunos límites. La matriz cuadrada resultante de la MED original (lado izquierdo) posee dos entradas en la diagonal, que indican que los elementos A y B forman un lazo de realimentación.

	A	B	C	D
A	0	1	0	0
B	1	0	1	0
C	1	0	0	1
D	1	0	0	0

**DSM**

	A	B	C	D
A	1	0	1	0
B	1	1	0	1
C	1	1	0	0
D	0	1	0	0

**AL CUADRADO**

	A	B	C	D
A	1	1	0	1
B	2	1	1	0
C	1	1	1	0
D	1	0	1	0

**AL CUBO**

	A	B	C	D
A	2	1	1	0
B	2	2	1	1
C	2	1	1	1
D	1	1	0	1

**A LA CUARTA**

Imagen 9-14; Ejemplo de las limitaciones.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

Elevar al cubo la matriz da como resultado tres entradas en la diagonal que muestran que los elementos A, B y C forman otro bucle de retroalimentación. La deficiencia de este enfoque se puede ver si se calcula la cuarta potencia de la matriz. Debido a un bucle de retroalimentación que incluye los cuatro elementos de la estructura inicial (A, B, C y D), todas las celdas diagonales muestran entradas no vacías; sin embargo, las celdas diagonales de los elementos A y B contienen cada una el valor "2". Este resultado se obtiene porque estos elementos forman su propio bucle de retroalimentación que se ejecuta dos veces en la cuarta potencia de la matriz. Ésto muestra que los lazos de realimentación completos de las estructuras más grandes no pueden ser analizados con este enfoque, porque los bucles de retroalimentación que contienen los mismos elementos no se pueden seguir de forma clara a sus elementos iniciales.

El método sólo permite la determinación de la existencia, pero no la identificación detallada de bucles de retroalimentación.

Además, este enfoque no siempre permite conocer la longitud y cantidad de los bucles de retroalimentación existentes. Si en una matriz hay que identificar

bucles de retroalimentación que abarquen seis elementos, los bucles de retroalimentación que comprenden dos elementos se procesan tres veces y los bucles de retroalimentación que comprenden tres elementos se procesan dos veces cuando la matriz se eleva a la sexta potencia. Todos estos bucles de retroalimentación se añaden a los valores resultantes en las células diagonales de la MED, haciendo casi imposible la identificación de un bucle de retroalimentación específico.

### 9.1.24 Método de la Matriz de Alcance

La Matriz de Alcance es una MED binaria con los elementos diagonales iguales a "uno". El método de la Matriz de Alcance requiere encontrar una descomposición jerárquica multinivel para la matriz. El nivel superior de esta jerarquía está compuesto por todos los elementos que no requieren entrada previa para ejecutarse o son independientes de todos los demás elementos de la matriz. Dos elementos cualesquiera en el mismo nivel de jerarquía no están conectados entre sí o forman parte del mismo circuito en ese nivel. Una vez que se ha identificado el conjunto de elementos de nivel superior, los elementos del conjunto de nivel superior y sus correspondientes conexiones se eliminan de la matriz, lo que nos deja con una sub-matriz que tiene su propio conjunto de nivel superior. El conjunto de nivel superior de esta sub-matriz será el segundo nivel de la matriz original. Procediendo de esta manera, se pueden identificar todos los niveles de la matriz.

Los pasos del método son:

1. Construir una tabla con cuatro columnas:

- En la primera columna, listar todos los elementos de la matriz.
- En la segunda columna, listar el conjunto de todos los elementos de entrada para cada fila de la tabla. Este conjunto se puede identificar fácilmente observando una entrada de "unos" en la columna

correspondiente de la MED (incluir el propio elemento como una entrada).

- En la tercera columna, enumerar el conjunto de todos los elementos de salida para cada fila de la tabla. Este conjunto se puede identificar fácilmente observando una entrada de "unos" en la fila correspondiente en la MED (inclúyase el propio elemento como una salida).
- En la cuarta columna, enumerar la intersección de los conjuntos de entrada y salida para cada elemento de la tabla.

2. Identificar los elementos de nivel superior y elimínense de la tabla. Un elemento está en la jerarquía de nivel superior de la matriz si su conjunto de entrada es igual al conjunto de intersección.

3. Volver al paso 1.

### 9.1.25 Rasgado de una MED

Una vez que ha sido identificado un subconjunto de elementos acoplados en una MED rasgarla es una manera de tratar de determinar una secuencia de elementos en este subconjunto. El rasgado es el proceso de elegir el conjunto de marcas de retroalimentación que, si se retira de la matriz (y luego la matriz es re-particionada), hará que la matriz sea triangular superior. Las marcas que quitamos de la matriz se llaman "rasgados".

Identificando esos "rasgados" que conducen a una matriz triangular superior habremos identificado el conjunto de suposiciones que se deben hacer para iniciar las iteraciones del proceso de diseño cuando se encuentran tareas acopladas en el proceso. Una vez hechas estas suposiciones, no hay que hacer estimaciones adicionales.

No existe un método óptimo para el rasgado, pero se recomienda el uso de dos criterios para tomar decisiones de rasgado:

- Mínimo número de rasgaduras: el motivo es que las rasgaduras representan una aproximación o una conjetura inicial.
- Confinar las rasgaduras a los bloques más pequeños a lo largo de la diagonal: la razón de este criterio es que, si debe haber iteraciones dentro de iteraciones (es decir, bloques dentro de bloques) estas iteraciones internas se hacen más a menudo. Por lo tanto, es deseable limitar las iteraciones internas a un pequeño número de tareas. Bandas de MED.

### 9.1.26 Dibujo de franjas

El Dibujo de franjas consiste en el coloreado de franjas claras y oscuras alternas en una MED, para marcar actividades independientes (es decir, paralelas o concurrentes) (o elementos del sistema). El Dibujo de franjas es similar a particionar la MED usando el método de la Matriz de Alcance cuando se ignoran las marcas de retroalimentación (una franja corresponde a un nivel).

La colección de franjas dentro de una MED constituye el camino crítico del sistema o proyecto. Además, un elemento o actividad dentro de cada franja es la actividad crítica o de cuello de botella. Por lo tanto, se prefieren las menos franjas posibles, ya que mejoran la concurrencia del sistema o proyecto.

Por ejemplo, en la MED que se muestra a continuación, las tareas 4 y 5 no dependen entre sí para obtener información, por lo tanto, pertenecen a la misma franja.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	X			X	X	X	X		X			X	X	X
2		X	X											X
3			X	X					X					X
4				X					X	X				X
5					X	X								X
6					X	X	X		X	X	X			X
7							X		X	X	X			X
8					X			X	X	X				X
9		X							X					X
10										X	X			X
11									X	X	X			X
12					X		X				X	X		X
13					X							X		X
14														X

Imagen 9-15; Ejemplo de Dibujo de franjas.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

Obsérvese que en el procedimiento de dibujar franjas, como se ha descrito anteriormente, no se consideran las marcas de retroalimentación (es decir, se ignoran en el proceso de determinación de las franjas).

### 9.1.27 Agrupación de una MED

Cuando los elementos de una MED representan componentes de diseño (es decir, MED basadas en componentes) o equipos dentro de un proyecto de desarrollo (es decir, MED basados en personas), el objetivo de la manipulación de la matriz es significativamente distinto del de los algoritmos de secuenciación. El nuevo objetivo se convierte en la búsqueda de subconjuntos de elementos de la MED (es decir, grupos o módulos) que son mutuamente excluyentes o que minimizan la interacción de subconjuntos, es decir, los grupos como grupos de elementos que están interconectados entre sí en una medida importante y poco conectados al resto del sistema. Este proceso se conoce como **agrupamiento**. En otras palabras, los clústeres absorben

internamente la mayor parte de las interacciones (marcas de la MED) y se minimizan las interacciones o enlaces entre clústeres separados.

Como ejemplo, considérese un proceso de desarrollo que incluye siete participantes como se muestra en la MED siguiente. Obsérvese que también se muestran en la MED las interacciones entre los diferentes participantes. Si se forman varios equipos de desarrollo dentro del proyecto, podemos intentar encontrar el número de equipos necesarios y la composición de cada equipo.

	1	2	3	4	5	6	7
1						X	
2	X		X	X			X
3				X			X
4		X	X		X		X
5	X			X		X	
6	X				X		
7		X	X	X			

Imagen 9-16; Proceso de desarrollo.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

La agrupación de las MED para este proyecto proporciona información sobre las formaciones óptimas de los equipos basadas en el grado de interacción entre los participantes.

Si la MED anterior se reorganizara de la siguiente manera (como se muestra a continuación) una posible asignación de equipo es:

Equipo 1		Participantes 1, 5 y 6
Equipo 2		Participantes 4 y 5
Equipo 3		Participantes 2 3, 4 y 7

Tabla 9-6; Equipos y participantes.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

Téngase en cuenta que haciendo que el participante 4 sea miembro de los equipos 2 y 3 se pueden absorber más interacciones internamente dentro de un equipo sin aumentar innecesariamente el tamaño del equipo (incluyendo al participante 5 en el equipo 3).

### 9.1.28 MED numéricas

En la notación MED binaria (donde la matriz está llena de "unos" y "ceros" o marcas "X" y celdas vacías) se utiliza un único atributo para transmitir las relaciones entre los diferentes elementos del sistema, es decir, el atributo "existencia" que significa la existencia o ausencia de una dependencia entre los diferentes elementos.

En comparación con las MED binarias, las MED numéricas pueden contener una multitud de atributos que proporcionan información más detallada sobre las relaciones entre los diferentes elementos del sistema. Una descripción mejorada de estas relaciones proporciona una mejor comprensión del sistema y permite el desarrollo de algoritmos de partición y rasgado más complejos y prácticos.

Como ejemplo, considérese el caso en el que la tarea B depende de la información de la tarea A. Sin embargo, si esta información es predecible o tiene poco impacto en la tarea B entonces la dependencia de la información

podría ser eliminada. Las MED binarias carecen de la riqueza que aporta ese argumento.

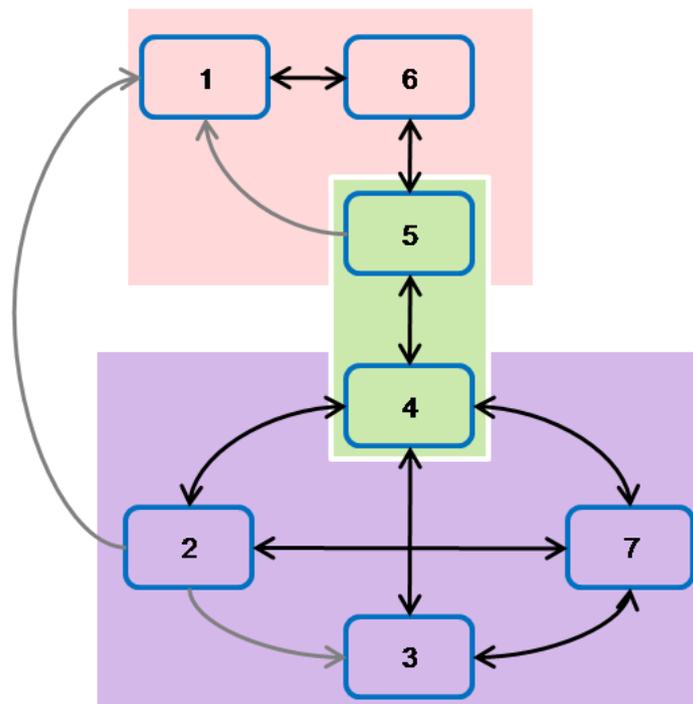


Imagen 9-17; Relaciones entre tareas.

Fuente: [www.Dsmweb.org](http://www.Dsmweb.org)

Posibles atributos y medidas que se pueden utilizar:

- Números de nivel: Steward (Steward, 1981) sugirió el uso de números de nivel en lugar de simples marcas "X", para la matriz binaria. Los números de nivel reflejan el orden en el que deben rasgarse las marcas de retroalimentación. La marca con el número de nivel más alto se rasga primero y la matriz se reordena (es decir, se particiona o se secuencia) de nuevo. Este proceso se repite hasta que desaparecen todas las marcas de retroalimentación. Los números de nivel varían del 1 al 9 dependiendo del juicio de los ingenieros sobre donde se puede hacer una buena estimación para una pieza de información que falte.
- Clasificaciones de importancia: se puede construir una escala verbal simple para diferenciar entre niveles importantes de las marcas "X".

Como ejemplo, podemos definir una escala de 3 niveles de la siguiente manera:

1. Alta Dependencia
2. Media Dependencia
3. Baja Dependencia

Algunos otros atributos dependen del tipo de MED utilizada en la representación y análisis del problema. Por ejemplo, en una MED basada en actividad, se pueden utilizar las siguientes medidas:

- Fuerza de dependencia: por ejemplo puede ser un valor entre 0 y 1, donde 1 represente una dependencia fuerte y 0 ninguna. La matriz puede dividirse minimizando la suma de las fuerzas de dependencia por debajo de la diagonal.
- Volumen de información transferido: se puede utilizar en la MED una medida real del volumen de la información intercambiada. La división de una MED de este tipo requiere la minimización del volumen de información de la retroalimentación
- Variabilidad de la información intercambiada: se puede utilizar una medida de la variabilidad para reflejar la incertidumbre en la información intercambiada entre las tareas. Esta medida puede ser la varianza estadística de los resultados para esa tarea de ejecuciones anteriores de esa tarea o alguna otra medida similar. Y si carecemos de datos históricos, se puede diseñar una medida subjetiva con las opiniones de expertos para reflejar la variabilidad en los resultados.
- Probabilidad de repetición: este número refleja la probabilidad de que una actividad produzca nuevo trabajo en otra. Las relaciones de retroalimentación representan la probabilidad de tener que volver a iterar

actividades anteriores después de que se realiza una actividad posterior, mientras que las relaciones de avance pueden representar la probabilidad de un nuevo trabajo de segundo orden tras una iteración.

- Se pueden idear algoritmos de partición para ordenar las tareas en esta MED de tal manera que se minimice la probabilidad de iteración o la duración del proyecto. Browning (2002) ideó un algoritmo de simulación para realizar esa tarea.
- Resiliencia: esta se puede visualizar como la fracción del trabajo original que debe repetirse si se produce una iteración. Esta medida se suele utilizar conjuntamente con la medida de probabilidad de repetición, para simular el efecto de las iteraciones en la duración del proyecto.

### 9.1.29 Análisis de la Estructuras Propia

Un método por el cual pueden analizarse las MED es por analogía a los Sistemas Lineales Dinámicos.

Sea  $u$  un vector que represente el trabajo restante en cada tarea en un proceso de diseño y sea  $A$  una MED numérica.

Dado que una MED muestra la relación entre las repeticiones de las tareas, podemos suponer que el trabajo terminado en la iteración  $(t + 1)$  es una función lineal del trabajo completado en la iteración  $(t)$ , siendo los pesos lineales los valores numéricos en la MED.

Por lo tanto, el trabajo en la iteración  $(t + 1)$  es:

$$A^*u.$$

siendo  $A^*$  la matriz transpuesta conjugada, (también llamada matriz adjunta o simplemente adjunta de una matriz  $A$ )

En  $t = 0$  el “trabajo por hacer” en todas las tareas será 1. Por lo tanto, el vector de trabajo inicial  $u_0$  es un vector de unos.

Después de la primera iteración el trabajo restante es:

$$A^*u_0.$$

Después de la segunda iteración el trabajo restante es:

$$A^*A^*u_0.$$

Después de la  $n$ -ésima iteración el trabajo restante es:

$$A^{*n}u_0.$$

Cada uno de estos términos es un vector de trabajo. Si sumamos todos los vectores de trabajo obtenemos el trabajo total hecho durante el proceso de diseño. Esta suma se puede calcular directamente usando:

$$\text{inv}(I-A)^*u_0.$$

(La suma sólo existe si el autovalor más grande de la matriz  $A$  es menor que la unidad).

Más interesante que calcular el trabajo total es analizar la estructura de la matriz  $A$ . La estructura de autovalores y autovectores (llamados también valores y vectores propios) es importante para caracterizar cualquier matriz cuadrada.

Los autovalores y los autovectores son muy útiles para comprender el comportamiento de los sistemas dinámicos lineales. Cada autovalor está asociado con un autovector.

Cada autovalor nos informa sobre la tasa de convergencia de las iteraciones de modo dinámico (Strang, 1980). Hay que prestar atención a los modos que tienen velocidades de convergencia lenta, ya que estos dominan el comportamiento iterativo y el tiempo total empleado. Los modos con velocidad de convergencia lenta son aquellos que tienen un autovalor más grande.

Como los autovectores están asociados con autovalores, los autovectores asociados con los autovalores de gran magnitud son de particular interés.

Las entradas que tienen mayor peso en estos autovectores indican las tareas que serán los componentes primarios de las iteraciones de convergencia lenta.

Desde el punto de vista de la gestión son interesantes, ya que nos dicen cuáles son las tareas iterativas más importantes. Éstas son las que tendrán que ser reelaboradas un mayor número de veces.

Por supuesto, el argumento anterior combina el álgebra lineal con la gestión del diseño, que es una combinación inusual. El enfoque de la auto-estructura es simple de aplicar y de gran importancia en su capacidad de hacer análisis útiles.

## 9.2 Apéndice 2 Matriz de Transformación de Trabajos (MTT)

### 9.2.1 Introducción

Los modelos de iteración de procesos pueden proporcionar información valiosa sobre cualquier proceso iterativo (Osborne, 1993.). El modelo de iteración paralelo proporciona a los administradores información sobre qué actividades pueden estar contribuyendo más al proceso de ingeniería iterativo en un proceso complejo y acoplado.

Las soluciones al problema de la iteración también se pueden desarrollar usando estos modelos. Las soluciones pueden incluir la adición de recursos, la reestructuración del proceso, el añadido de nuevas herramientas de automatización de procesos de ingeniería, la redefinición de los problemas, la limitación del alcance del proceso de ingeniería, la reasignación de tareas, etc.

Varios investigadores desarrollaron modelos de iteración de procesos. Por ejemplo: Ha y Porteus (Ha & Porteus, 1995) presentaron un modelo de coordinación entre dos actividades acopladas.

En 1996, Smith y Eppinger desarrollaron un modelo diferente de iteración secuencial de procesos de ingeniería. Ese modelo de iteración secuencial permitió el cálculo del tiempo de espera total para un grupo de tareas en las que cada tarea tenía una probabilidad distinta de crear nuevo trabajo para las otras tareas.

Cada uno de estos esfuerzos de modelado fue una contribución importante en la ciencia de gestión porque cada modelo explora una faceta diferente de la iteración de procesos de ingeniería. La complejidad de la iteración de procesos de ingeniería impide que un solo modelo pueda captar todos los comportamientos observados ni responder a todas las cuestiones de interés de la ciencia de gestión (Smith R. , 1992).

El modelo MTT complementó la investigación realizada hasta el momento, explorando el proceso de iteración de los procesos de ingeniería con mayor detalle. El MTT estudia las "iteraciones paralelas", un caso extremo en el que una serie de actividades de ingeniería se ponen en marcha a la vez. Cada actividad genera información que puede hacer que los demás repitan todo o parte de su propio trabajo.

En esta situación, supondremos que la repetición de actividades es determinista y todo el conjunto de actividades converge a la solución del proceso. Con ello, podemos analizar un gran número de subprocesos de ingeniería y determinar qué subconjuntos de tareas requerirán la mayor parte del esfuerzo durante el proceso de iteración.

Comenzamos partiendo del concepto de la Matriz de Estructura de Diseño o MED, que hemos visto antes (Apéndice 1). Ésta nos muestra cómo se puede modelar la iteración extendiendo esta representación y desarrollando una interpretación analítica basada en la estructura de autovectores y autovalores del modelo matricial.

La filosofía del método de la MED (Steward, 1981) es dividir en tareas individuales el proyecto de diseño de ingeniería y analizar las relaciones entre estas tareas para identificar la estructura subyacente de las tareas del proyecto.

Se ha demostrado que el estudio de las relaciones entre las tareas individuales de diseño de ingeniería puede mejorar el proceso general de diseño y es una buena forma de analizar estrategias alternativas de diseño de ingeniería.

Varios trabajos anteriores desarrollaron un modelo de cómo se relacionan los diferentes aspectos de un problema de ingeniería (Von Hippel, 1990). Alexander desarrolló una técnica gráfica (Alexander C. , 1964) donde las necesidades funcionales son nodos y las interacciones entre las necesidades son arcos. Su idea fue segmentar el grafo en subsecciones que tengan relativamente pocas interacciones con otros grupos a través de las fronteras exteriores. Estas segmentaciones gráficas dan lugar a subsistemas técnicos

que deben separar las necesidades técnicas en problemas solucionables de forma independiente.

El método de la MED es similar a la técnica de Alexander, pero ahora los nodos son tareas específicas de diseño de ingeniería y los arcos tienen sentido e indican flujos de información entre tareas. Los nodos del gráfico están dispuestos en una matriz cuadrada donde cada fila y su columna correspondiente se identifican con una de las tareas. A lo largo de cada fila, los elementos no nulos indican de qué otras tareas requiere información la tarea dada. Cada columna indica qué otras tareas reciben información de la tarea dada. Los elementos diagonales no transmiten ningún significado en este punto, ya que una tarea no puede depender de su propia terminación. La imagen siguiente muestra una matriz MED cualquiera de estructura de diseño de ingeniería.

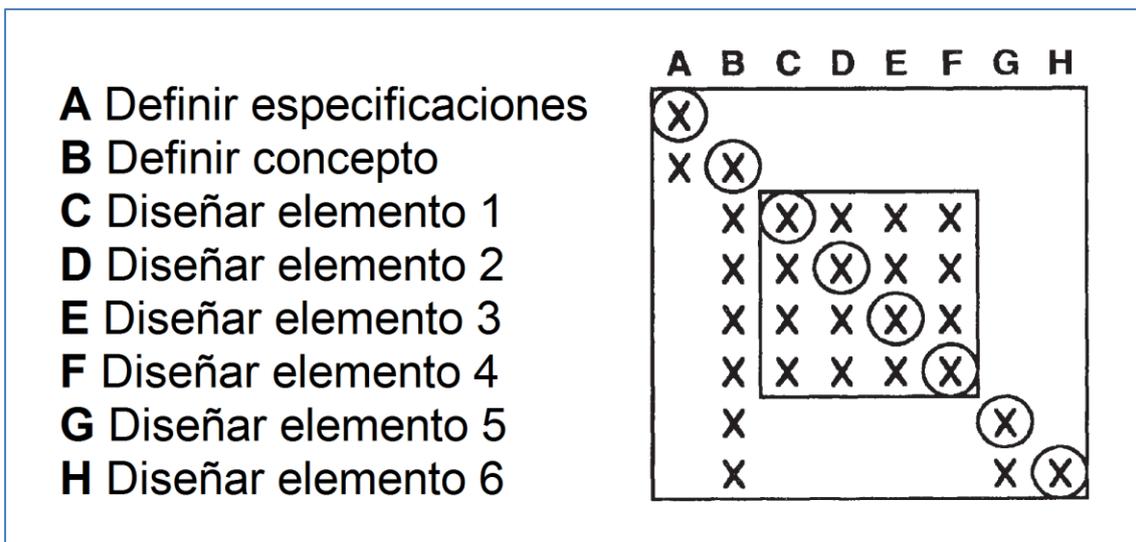


Imagen 9-18; Matriz de Estructura de Diseño.

Fuente: Smith y Eppinger

En este proceso, la tarea C requiere información de las tareas B, D, E y F, la tarea B requiere información sólo de la tarea A y la tarea A no necesita ninguna información para comenzar.

La matriz MED se puede utilizar para identificar un orden en conjuntos de tareas y/o identificar aspectos problemáticos en el proceso de diseño de ingeniería. Algunos, o todos los elementos de la matriz, pueden hacerse sub-diagonales (o sea que están en la diagonal situada debajo de la diagonal principal) tales como los correspondientes a las tareas A, B, G y H en la Imagen 9-18, reordenando las tareas de la matriz usando un algoritmo de partición (Steward, 1981) (Rogers & Padula, 1989) (Gebala & Eppinger, 1991).

Una matriz completamente sub-diagonal indica que existe una secuencia donde todas las tareas pueden ser completadas con toda la información disponible de entrada. Esa secuencia puede contener tanto tareas que deben realizarse en serie como tareas que pueden realizarse en paralelo. La información en una matriz de diseño sub-diagonal será entonces similar a la expresada en un gráfico de **CPM** (Método del Camino Crítico) o **PERT** (Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos).

Normalmente, debido a la complejidad en los procesos de diseño de ingeniería modernos, la matriz no puede reordenarse para conseguir que todos sus elementos estén en la sub-diagonal (como en las tareas C y F en la Imagen 9-18). En estos casos, existe un flujo cíclico de información en el proceso de diseño de ingeniería y no son aplicables las técnicas estándar **CPM / PERT** debido a la presencia de tales ciclos. Del mismo modo, no es posible una progresión secuencial de las tareas de diseño de ingeniería. Las tareas en las que no es posible un ordenamiento puramente secuencial ni paralelo están acopladas de tal manera que se debe utilizar algún proceso alternativo para resolver las interacciones como: la iteración. Por esta razón, la iteración es una herramienta típica de los proyectos de diseño de ingeniería (Hubka, 1980).

La sub-matriz 4 x 4 de la Imagen 9-18 representa un problema de diseño de ingeniería definido de tal manera que las tareas son tan complejas e interrelacionadas que será necesaria la iteración para completarlas.

Es importante conocer el conjunto ya establecido de modelos que permiten realizar bucles dentro de un marco del modelo PERT. Este conjunto de modelos es conocido como **GERT** (Técnica de Evaluación y Revisión General)

(Taylor & Moore, 1980). Sin embargo, el análisis directo de cualquier red GERT es difícil, por lo que normalmente se utiliza la simulación para evaluar los proyectos (Neumann & Steinhardt, 1979).

### 9.2.2 El modelo de la MTT

El modelo MTT proporciona un modelo manejable de los procesos de iteración de ingeniería, válido también para grandes proyectos. Al preservar la trazabilidad, normalmente se puede ver la relación entre la estructura del problema y el tiempo de desarrollo del proyecto.

Debido a que el GERT se basa en la simulación para grandes proyectos es difícil encontrar esa relación. Normalmente las empresas competidoras que se enfrentan al mismo problema de ingeniería pueden elegir diferentes estrategias de abordaje, lo que implica una matriz de estructura de diseño subyacente diferente. Si una empresa elige trabajar más en tareas secuenciales (en serie) en vez de en tareas superpuestas (en paralelo) puede afectar significativamente el tiempo de desarrollo. Además, la forma en que una empresa descompone el problema en problemas más pequeños tiene un impacto importante en el proceso y, por lo tanto, cambia la matriz MED. Dado que cada modelo de MED es específico para el proceso de ingeniería de cada empresa, puede ser una herramienta poderosa en los proyectos de ingeniería actuales.

Para el propósito estudiado en este método, se supondrá que las tareas y las interrelaciones de un problema de ingeniería son conocidas e inalterables durante el transcurso del proyecto. Esta suposición es razonable para una empresa que está trabajando en un proyecto de ingeniería en un área en la que tienen un grado significativo de práctica y menos cierta para una empresa que hace un tipo de proyecto por primera vez o desarrolla una tecnología completamente nueva o que evoluciona rápidamente.

El tiempo de desarrollo es muy importante en la gestión de procesos de ingeniería y las iteraciones complejas son una fuente importante de incremento del tiempo de desarrollo.

Mientras que el método de la MED es una herramienta útil para identificar los bloques que están acoplados en los que se producen iteraciones complejas, el análisis de la Matriz de Transformación del Trabajos pretende caracterizar cómo se producen dichas iteraciones.

Si se incluyen en la MED las duraciones de tareas, podemos usar este método para estimar la duración total del proyecto. Las tareas en serie pueden evaluarse sumando sus tiempos individuales y las tareas en paralelo pueden evaluarse encontrando el máximo de esos tiempos de tarea. Para el proyecto caracterizado por la MED en la Imagen 9-18, si los tiempos estimados de cada tarea son  $a, b, c, \dots, h$ , el tiempo del proyecto de ingeniería será  $a + b + \max. \{f(c, d, e, f), g + h\}$  donde  $f(x)$  es una función desconocida que corresponde al tiempo de desarrollo para el bloque de tareas acopladas. El modelo de análisis de la Matriz de Transformación del Trabajos ilustra cómo se puede evaluar el tiempo de iteración para dicho bloque de tareas acoplado y cómo identificar qué aspectos del problema de ingeniería contribuyen más al tiempo total de iteración. El modelo MTT se basa en resultados de álgebra lineal estándar, pero la interpretación de la relación entre la estructura de la matriz y el tiempo de desarrollo fue realizada por Smith y Eppinger.

### 9.2.3 Modelo de Iteración

Para modelar las iteraciones de los procesos de ingeniería se usa una versión extendida numérica de la Matriz de Estructura de Diseño completamente acoplada que se llama Matriz de Transformación del Trabajos (**MTT**). En una Matriz de Transformación de Trabajos hay dos tipos de información: los elementos fuera de la diagonal representan la importancia de la dependencia entre las tareas, dando lugar a transferencia de trabajo o a nuevo trabajo, implicado en las iteraciones (Imagen 9-19 a), como se define en la siguiente

sección. Los elementos diagonales en la MTT representan el tiempo que se tarda en completar cada tarea durante la primera iteración (Imagen 9-19 b).

Se supone que habrá múltiples iteraciones y que el tiempo requerido por una tarea para cada etapa posterior es una función de la cantidad de tiempo dedicado a trabajar en las tareas que proporcionan su entrada en la etapa anterior. Con estas condiciones se desea calcular la suma de los tiempos de todas las etapas.

Para el propósito de este análisis, se supondrá que cada tarea crea una cantidad determinada de trabajo nuevo para las otras tareas.

Se llama “nuevo trabajo” a la repetición de una tarea porque se intentó originalmente con información imperfecta (con suposiciones, algunas de las cuales resultaron no ser 100% correctas). Por lo tanto, el “nuevo trabajo” adapta la solución en evolución para tener en cuenta la información modificada.

El método expuesto a continuación se divide en tres secciones:

- En la primera sección se describen los supuestos y la mecánica subyacente al modelo.
- En la segunda sección se describe por qué los autovalores y autovectores de la MTT son relevantes para el análisis del tiempo de desarrollo.
- En la tercera sección se describe cómo se interpreta la estructura de autovectores y autovalores de la matriz.

Después de la derivación del modelo, ilustramos el proceso analítico usando un ejemplo simple:

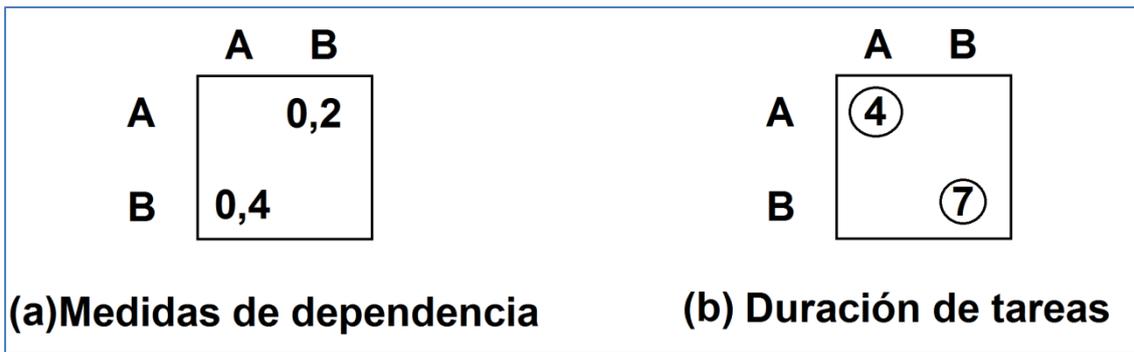


Imagen 9-19; Matrices de dependencia y de duración

Fuente: (Smith & Eppinger, 1997)

### 9.2.4 Supuestos

El modelo de la matriz de transformación de Trabajos (MTT) hace tres supuestos que nos permiten realizar el análisis algebraico lineal de la matriz MTT:

- En cada etapa / iteración paralela se realizan completamente todas las tareas.
- El “nuevo trabajo” realizado es una función del trabajo realizado en la anterior etapa de iteración.
- Los parámetros de transformación de trabajos en la matriz no varían con el tiempo.

La primera suposición de que todas las tareas acopladas se realizan en cada etapa es una idealización que se cumple en muchos proyectos de diseño. La suposición se cumple en una situación en la que hay un equipo de trabajo cuya composición es fija, que están geográficamente cerca y que están trabajando en un conjunto de cuestiones relacionadas entre sí simultáneamente. Esta situación se da y se recomienda en la ingeniería concurrente. En ese entorno, nos interesan las tareas de diseño fuertemente acopladas (no las secuenciales o desacopladas) para las cuales la suposición de iteración completamente paralela parece razonable. Es importante señalar que esta parte estrechamente

acoplada del proceso de desarrollo puede no incluir todo el proceso de desarrollo del producto, sino sólo un subconjunto iterativo del proceso. Si hay barreras organizacionales o temporales que no permiten el trabajo simultáneo en estrecha cooperación, entonces esta suposición probablemente no se mantendría. Para una extensión de la suposición de que son completamente paralelas, también se consideró un modelo de iteración en el que las tareas se ejecutan en múltiples fases.

El segundo y el tercer supuestos, “que el nuevo trabajo es una función lineal del trabajo en la iteración anterior” y que “los parámetros de transformación del trabajo no varían con el tiempo”, son muy convenientes desde un punto de vista matemático, pero hay que estudiar si se pueden cumplir.

Se ha observado, que la cantidad de tiempo por cada iteración disminuye en la práctica (los procesos de ingeniería convergen con el tiempo). Además, si el número de iteraciones es relativamente pequeño, la mayor parte del nuevo trabajo se completa en las primeras iteraciones. Por lo tanto, supondremos que si los parámetros de partida cambiaran con el tiempo, los cambios afectarían principalmente a la cantidad de trabajo en iteraciones del final, que no contribuyen demasiado al tiempo total.

Dadas estas observaciones, la segunda y tercera suposiciones parecen razonablemente posibles de cumplir.

Para describir el modelo, se introduce primero el concepto del vector de trabajo  $u_t$ , que es un vector de dimensión  $n$ , donde  $n$  es el número de tareas de diseño acoplado por realizar. Cada elemento del vector de trabajo contiene la cantidad de trabajo a realizar en cada tarea después de la etapa de iteración  $t$ . El vector de trabajo inicial  $u_0$  es un vector de unos, porque todo el trabajo está por realizarse en cada tarea al principio del proceso de iteración.

Durante cada iteración, en todas las tareas de diseño se completa todo el trabajo. Sin embargo, el fin del trabajo en cada tarea hará que se produzca una cierta reelaboración para todas las otras tareas que dependen de la tarea completada para obtener información. La matriz de transformación de trabajo

documenta dicha dependencia de la información. Cada etapa de iteración produce un cambio en el vector de trabajo de acuerdo con:

$$u_{(t+1)} = A^t u_t$$

donde cada una de las entradas  $a_{ij}$  de  $A$  implica que hacer una unidad de trabajo en la tarea de diseño  $j$  crea  $a_{ij}$  unidades de nuevo trabajo para la tarea de diseño  $i$ . Entonces la matriz  $A$  representa la porción de la fuerza de las dependencias de la matriz MTT (Imagen 9-19 a). Las entradas diagonales de  $A$  son ceros. Dado que el proceso es iterativo, el vector de trabajo  $u_t$  también puede expresarse como:

$$u_t = A^t u_0$$

La suma de todos los vectores de trabajo es el vector de trabajo total  $U$ , que representa el número total de veces que se intenta cada una de las tareas durante el total de  $M$  etapas de iteración del proceso de diseño:

$$U = \sum_{t=0}^M u_t = \sum_{t=0}^M A^t u_0 = \left( \sum_{t=0}^M A^t \right) u_0$$

El resultado del modelo  $U$  está por lo tanto en las unidades de la cantidad original de trabajo realizada en cada tarea en la primera etapa de iteración. (Por ejemplo, si el elemento  $i$  en el vector  $U$  es 1,6 entonces ingeniería habrá realizado un total de 60% de reelaboración en la tarea  $i$  en las etapas

posteriores). Por ahora, escalamos  $U$  con las duraciones de tarea para obtener unidades de tiempos de tarea. Si  $W$  es una matriz que contiene los tiempos de las tareas a lo largo de su diagonal (Imagen 9-19 b), entonces  $WU$  es un vector que contiene la cantidad de tiempo que cada tarea requerirá durante las  $M$  etapas de iteración.

Si  $A$  tiene autovectores linealmente independientes (la matriz de los autovectores  $S$  es invertible) entonces  $A$  se puede descomponer en:

$$A = V\Lambda V^{-1}$$

donde:  $\Lambda$  es la matriz diagonal de los autovalores de  $A$  y  $V$  es la matriz de los autovectores correspondiente.

Para que  $V$  sea invertible es suficiente, pero no necesario, que ninguno de los autovalores se repita.

Las potencias de  $A$  pueden encontrarse mediante:

$$A^t = V\Lambda^t V^{-1}$$

El vector de trabajo total  $U$  puede ser expresado como:

$$U = V \left( \sum_{t=0}^M \Lambda^t \right) V^{-1} u_0$$

Si el mayor autovalor es menor que uno, entonces el proceso de diseño converge (es decir, cuando  $M$  tiende a infinito el vector de trabajo total  $U$  tiene límite). Un autovalor mayor que uno correspondería a un proceso de diseño en el que una unidad de trabajo en una tarea durante una etapa de iteración crea más de una unidad de trabajo para esa misma tarea en una etapa futura. Un sistema así es inestable y el vector  $U$  no convergería, creciendo sin límite al aumentar  $M$ . El que las entradas, ya sea en cada fila o en cada columna de la matriz  $A$ , sumen menos de uno es una condición suficiente, pero no necesaria, para la estabilidad.

Si se toma el límite cuando M tiende a infinito, se puede usar la fórmula:

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{t=0}^M \Lambda^t = (I - \Lambda)^{-1}$$

Un proceso de diseño no convergente sería uno en el que no existiese una solución técnicamente posible a las especificaciones dadas o en el que los diseñadores no estén dispuestos a llegar a compromisos para alcanzar una solución. Esta situación no es probable que ocurra en entornos de diseño de ingeniería concurrente en los que se fomenta la colaboración o en procesos de rutina en los que un equipo es responsable de diseñar una nueva versión de un producto ya existente. Si un proceso de ingeniería no converge, se deben adaptar las especificaciones y reestructurar el problema para que el proceso se estabilice.

El resto de la demostración del modelo de la Matriz de Transformación del Trabajo se circunscribe a problemas en los que se puede encontrar una solución en un tiempo finito (todos los autovalores son menores que uno). Si el mayor autovalor no está cerca de uno, entonces el límite se obtendrá en pocas iteraciones. Para el resto de esta demostración se utiliza el límite, aunque el análisis también se puede hacer para muchas iteraciones.

Los autovalores reales positivos corresponden a modos de diseño no oscilatorios.

Los autovalores negativos y complejos describen oscilaciones amortiguadas (Ogata, 1967). Los modos de diseño oscilatorio indican que el trabajo no está disminuyendo para todas las tareas del modo a la misma velocidad, pero el trabajo está cambiando de tarea a tarea durante el proceso de iteración. La magnitud de la variabilidad en la cantidad de trabajo entre vectores de trabajo distintos no es tan importante como la magnitud total del trabajo realizado. Los detalles de la variabilidad serían útiles si estuviéramos observando la información del trabajo de las tareas individuales. Pero, estamos considerando la información sumada, por lo que la variabilidad individual (como indica la no positividad del autovector o del autovalor) es menos importante.

## 9.2.5 Importancia de cada tarea conociendo el autovalor correspondiente.

Los dos últimos términos de la fórmula del trabajo total son  $S^{-1}$  y  $u_0$ ; estos términos se combinan en un vector, cuyos elementos proporcionan (junto con el término  $(I - \Lambda)^{-1}$  descrito anteriormente) otra ponderación para cada autovector, que es a la vez una magnitud y una dirección.

Como las filas de  $S^{-1}$  correspondientes a los autovalores reales son reales, cada coeficiente de ponderación para un autovector real es también real. Por lo tanto, su dirección es o positiva o negativa. Por lo tanto, las cantidades importantes en un autovector real son los grandes valores positivos, si el coeficiente de ponderación es positivo y los grandes valores negativos, si el coeficiente de ponderación es negativo.

Los autovalores complejos tienen autovectores complejos y coeficientes de ponderación complejos. Determinar cómo interactúan, la dirección del coeficiente de ponderación y la dirección del autovector es difícil. Una forma de considerar la interacción es calcular la contribución del modo al vector de trabajo total  $U$  y ver qué tareas aportan una gran contribución al trabajo total. (Este método es similar al método de Análisis Modal Selectivo (Pérez-Arriaga, Verghese, Pagola, Sancha, & Schweppe, 1990).

Podemos calcular la participación del modo de diseño  $i$ -ésimo observando el vector:

$$S_{\cdot j} \frac{1}{1 - \lambda_i} \sum_{j=1}^n S_{ij}^{-1}$$

donde  $S_{\cdot i}$  es la columna  $i$ -ésima de  $S$ . (Recordar que  $u_0$  es un vector de unos). Este vector muestra la contribución de trabajo desde el modo de diseño  $i$  al vector de trabajo total  $U$ . Observar que este vector es una ampliación del autovector  $i$ -ésimo cuando el autovalor  $i$ -ésimo es real y es tanto una

ampliación como un cambio de dirección para autovalores complejos. En la práctica, éste es una forma más difícil de analizar los modos debido a la posible mala condición de  $S$ , sin embargo, este vector es útil en el análisis de autovectores complejos cuando el autovalor asociado tiene una gran parte positiva real.

### 9.2.6 Clasificación de los modos

Es posible clasificar los modos utilizando la magnitud de los términos de  $(I - A)^{-1}$ , los términos de  $(I - A)^{-1}S^{-1}u_0$  y estimando cuánto participa realmente cada modo en el vector de trabajo total  $U$ . En principio, estos tres métodos pueden determinar la importancia relativa de cada modo de diseño y de cada tarea de diseño dentro de los modos de diseño. En la práctica, incluso cuando  $S$  es invertible, puede estar desfavorablemente condicionada. El condicionamiento desfavorable puede conducir a interpretaciones erróneas de los modos que no contribuyen de forma importante al vector de trabajo total  $U$ . Por esta razón se sugiere la clasificación de los modos de diseño usando el primer método.

#### Ejemplo

Como ilustración de la interpretación anterior de autovalores y autovectores, consideremos la siguiente Matriz de Transformación de Trabajos

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 \\ 0,3 & 0 & 0,4 & 0,2 \\ 0,1 & 0,3 & 0 & 0,5 \\ 0,1 & 0,1 & 0,2 & 0 \end{bmatrix}$$

que es una parte del bloque acoplado (tareas C a F) de la matriz de la Imagen 9-18. Las tareas en esta matriz son: C, D, E y F. Los números pueden interpretarse de la siguiente forma:

si la tarea C se rediseña completamente, debe rehacerse el 30% del trabajo de diseño D (el valor en la fila 2, columna 1, es 0,3), y así sucesivamente.

Las matrices de autovalores  $\Lambda$  y de autovectores  $S$  son:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0,674 & & & \\ & -0,392 & & \\ & & -0,141 + 0,060i & \\ & & & -0,141 - 0,060i \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} 0,410 & -0,067 & 0,657 & 0,657 \\ 0,624 & -0,613 & 0,060 - 0,570i & 0,060 + 0,570i \\ 0,580 & 0,758 & -0,395 + 0,073i & -0,395 - 0,073i \\ 0,326 & -0,213 & 0,065 + 0,274i & 0,065 - 0,274i \end{bmatrix}$$

Los cuatro autovectores son las columnas de  $S$  y los autovalores asociados son los elementos diagonales de  $\Lambda$ . Los autovectores se escalan arbitrariamente para transformarlos en vectores unitarios. Mediante la inspección de los autovectores, vemos que el modo de diseño que converge más lentamente (el que tiene el autovalor de mayor magnitud) se relaciona, principalmente, con las dos tareas del medio. Cuando calculamos los primeros vectores de trabajo, encontramos que apoyan la interpretación anterior.

$$u_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, u_1 = \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,9 \\ 0,9 \\ 0,4 \end{bmatrix}, u_2 = \begin{bmatrix} 0,39 \\ 0,62 \\ 0,53 \\ 0,33 \end{bmatrix}, u_3 = \begin{bmatrix} 0,267 \\ 0,395 \\ 0,390 \\ 0,207 \end{bmatrix}, u_4 = \begin{bmatrix} 0,180 \\ 0,278 \\ 0,249 \\ 0,144 \end{bmatrix}$$

El trabajo realizado en la primera y última tareas es menor que el trabajo en las dos tareas del medio, durante todas las etapas de la iteración. Vemos que el autovector del autovalor que converge más lentamente domina la forma de convergencia de los vectores de trabajo. También es cierto que el autovalor asociado gobierna la tasa de convergencia geométrica (Strang, 1980).

Podemos extraer aún más información calculando la cantidad total de trabajo completado durante el proceso de iteración y observando los cálculos intermedios. La inspección del término  $(I - \Lambda)^{-1}$  muestra que el único autovector positivo contribuye con significativamente más trabajo al proceso que los modos negativo y complejo:

$$(I - \Lambda) = \begin{bmatrix} 3,065 & & & \\ & 0,718 & & \\ & & 0,874 + 0,046i & \\ & & & 0,874 - 0,046i \end{bmatrix}$$

El coeficiente de ponderación total en la matriz de autovectores determina cómo cada modo contribuye al trabajo total:

$$(I - \Lambda)^{-1} S^{-1} u_0 = \begin{bmatrix} 6,513 \\ -0,223 \\ 0,093 - 0,399i \\ 0,093 + 0,399i \end{bmatrix}$$

Obsérvese que el coeficiente de ponderación en el primer autovector es bastante mayor en magnitud que los otros coeficientes de ponderación. La mayor parte del trabajo en este proceso de iteración es aportado por este modo de diseño primario.

Ahora podemos calcular el vector de trabajo total:

$$U = S(I - \Lambda)^{-1}S^{-1}u_0 = \begin{bmatrix} 2.807 \\ 3.755 \\ 3,595 \\ 2,375 \end{bmatrix}$$

Durante el proceso han completado más trabajo las dos tareas de en medio, como indica la inspección preliminar de los autovectores y autovalores.

### 9.2.7 Resumen del Apéndice 2

El modelo presentado aquí describe el comportamiento de procesos complejos de iteración de diseño. Las características de control determinan no sólo la duración del proceso de desarrollo del proyecto sino también las variaciones en los plazos de desarrollo.

La mejora de los procesos se ve facilitada por la mayor comprensión de los mismos. Los modelos de iteración proporcionan comprensión esencial de los efectos de relaciones complejas dentro de los procesos de ingeniería.

El diseño del sistema muestra que el modelo de Matriz de Transformación del Trabajo es capaz de identificar las "características de control" o los modos de diseño. Estas características regulan la mayor parte del tiempo invertido en el proceso de iteración. Esta identificación es un paso importante para mejorar y acortar los procesos de ingeniería.

Cada modo de diseño identifica un subproblema importante en el proceso de desarrollo iterativo. Así, los equipos pueden enfocarse en mejorar sus habilidades para resolver cada subproblema de manera más eficiente.

Una vez que se han identificado los modos de diseño más iterativos, hay varias maneras en las que los equipos pueden acelerar el proceso. Se recomiendan dos estrategias: iteraciones más rápidas y menos iteraciones.

Se pueden conseguir iteraciones más rápidas con la introducción de mejoras en el proceso como: usando sistemas de diseño por ordenador, usando técnicas de simulación (que reducen la necesidad de ciclos de prototipos y pruebas, que consumen mucho tiempo), usando sistemas de información de gestión de bases de datos, eliminando actividades no integrantes del proceso iterativo etc.

Se pueden conseguir menos iteraciones: mejorando la coordinación entre los individuos con tareas entrelazadas, ubicando conjuntamente a los miembros del equipo responsables de actividades entrelazadas, minimizando el tamaño del equipo, mejorando las especificaciones de los sistemas de intercambio de información, usando modelos de ingeniería capaces de predecir el rendimiento en múltiples dimensiones con lo que se elimina la necesidad de realizar cada análisis por separado.

Las mejoras que crean iteraciones más rápidas implican principalmente acortar los tiempos para cada tarea o cambiar la matriz  $W$ .

Las mejoras para lograr menos iteraciones implican principalmente cambiar las cantidades de reelaboración de trabajos o cambiar la matriz  $A$ .

Para implementar cualquiera de los métodos anteriores, es muy útil saber qué partes del proceso están más estrechamente acopladas, que se consigue con el análisis del modelo de Matriz de Transformación de Trabajos.

Los indicadores del modelo representan el trabajo total realizado por cada una de las tareas durante el proceso de iteración. Son útiles para comparar sistemas alternativos (matrices alternativas de transformación de trabajos). Sin embargo, los indicadores, por sí mismos, no posibilitan la selección de mejores sistemas.

Existe un tipo importante de problemas que son bien comprendidos y en los que los ingenieros y los gestores pueden identificar las tareas y las dependencias de información, sin ser capaces de identificar las características de control del problema general. Éste es el tipo de problemas para los cuales es muy útil un análisis estructurado como éste.

Hay que recordar que el modelo es específico para cada proyecto, empresa y situación. En situaciones reales no todas las facetas de un proceso de desarrollo de productos son predecibles. Hay posibilidades de generalizar este modelo permitiendo algunos elementos estocásticos, pero estas generalizaciones reducen la trazabilidad del modelo; se debe establecer un equilibrio entre la trazabilidad y el realismo.

La Matriz de Transformación de Trabajos puede servir como una útil herramienta de modelado en el análisis de problemas de diseño acoplados. Este método analítico puede conducir a mejoras en los procesos de diseño si centramos la atención en los modos de iteración de diseño que convergen lentamente.