

Diseño de un sistema de inferencia difusa de Mamdani para el análisis de riesgos logísticos en operaciones militares

Moreno Cabezalí, Belén María ^{1,2,*}

- 1 Departamento de Ingeniería de Organización, Administración de Empresas y Estadística. E.T.S. Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid. belen.moreno.cabezali@alumnos.upm.es (BMMC)
 - 2 Departamento de Economía de la Empresa (ADO), Economía Aplicada II y Fundamentos Análisis Económico. Universidad Rey Juan Carlos. belenmaria.moreno@urjc.es (BMMC)
- * Autor Principal y responsable del trabajo. belen.moreno.cabezali@alumnos.upm.es (BMMC)
-

Resumen:

La OTAN define la logística militar como la ciencia de planificar y ejecutar el movimiento y el mantenimiento de fuerzas. Sirve de enlace entre las fuerzas desplegadas y la base industrial que proporciona los materiales y el armamento requeridos para la finalización de la misión con éxito. Las operaciones militares, desde combates de alta intensidad hasta misiones humanitarias, llevan asociadas riesgos de diferente naturaleza y cierto nivel de incertidumbre. Los riesgos logísticos son considerados un factor crítico debido a que tienen influencia sobre el éxito de las operaciones. Esto se debe a que la logística incide en todos los niveles de planificación y ejecución de las operaciones (estratégico, operativo y táctico). Para mejorar las posibilidades de éxito de las operaciones, resulta necesario implementar una gestión de riesgos oportuna y eficaz que permita mitigar o eliminar dichos riesgos. De lo contrario, si surge un problema y el material crítico no puede ser entregado rápidamente, se pone en peligro toda la operación. De acuerdo con la revisión de la literatura, existe poca investigación cuantitativa sobre la evaluación de riesgos en la logística militar. La mayoría de los estudios sólo proporcionan una descripción cualitativa o un análisis cuantitativo de unos pocos tipos de riesgos. Para aumentar las posibilidades de éxito de las operaciones es necesario analizar más tipos de riesgos para conocerlos mejor y mejorar su gestión. Por tal motivo, este trabajo realiza una revisión de la literatura para identificar los principales riesgos logísticos, y, además, propone un sistema de inferencia difusa (FIS) de Mamdani, implementado en MATLAB Fuzzy Logic Toolbox, para poder evaluar los riesgos logísticos de las operaciones en todas las etapas, de principio a fin. Esto permitirá a los expertos

priorizar los riesgos más críticos y desarrollar estrategias de respuesta efectivas para aumentar las posibilidades de operaciones exitosas.

Palabras clave: Riesgo; Análisis de riesgos; Logística militar; Lógica difusa; MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.

1. Introducción

El riesgo es un componente ineludible en las operaciones militares. Llevan asociados riesgos de diferente naturaleza, con características propias y un grado variable de complejidad. En términos generales, el riesgo se puede definir como eventos inesperados que pueden tener un efecto positivo (oportunidades) o negativo (amenazas) en los objetivos de la operación.

La estabilidad de las operaciones está determinada por varios factores, entre ellos, la gestión de la cadena de suministro juega un papel clave. La logística militar es un componente de la cadena de suministro, por consiguiente, también influye directamente en el éxito de las operaciones. La logística representa un aspecto importante de la vida diaria. En mayor o menor medida, todas las actividades dependen de ella. Está presente en cualquier momento o lugar donde se consumen bienes, ya que su objetivo principal es suplir el déficit de bienes [1]. La logística se considera en el sector militar un componente crítico de la guerra con un objetivo claro: permitir que se cumpla la misión u objetivo de la fuerza. Su desarrollo está motivado por la necesidad de apoyar a los ejércitos en campañas, operaciones y períodos de paz.

A lo largo de la historia militar, se ha utilizado con frecuencia el término “logística” (del griego λογιστικός), aunque ha tenido diferentes connotaciones. Sus orígenes se remontan a la mitología griega alrededor del año 1184 a.C., cuando se entendía que era una acción militar que incluía suministro, almacenamiento y distribución. Sin embargo, no fue hasta el año 1880, cuando empezó a ganar relevancia en el ejército, aunque exclusivamente en la marina. Este creciente interés se debió a la progresiva industrialización de la guerra, que se tradujo en líneas de suministro cada vez más complejas para los barcos [2].

Una definición más reciente de este término es la proporcionada por la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN), que la define como la ciencia de la planificación y ejecución del movimiento y mantenimiento de las fuerzas. Sirve de enlace entre las fuerzas desplegadas y la base industrial que proporciona los materiales y el armamento requeridos para la finalización de la misión con éxito. Cubre las siguientes áreas: diseño y desarrollo, adquisición, almacenamiento, transporte, distribución, mantenimiento, evacuación y disposición de material; transporte de personal; adquisición, construcción, mantenimiento, operación y enajenación de instalaciones; adquisición de prestación de servicios; apoyo médico y de servicios de salud [3].

Los riesgos están presentes en las operaciones militares, desde combates de alta intensidad hasta misiones humanitarias, pero con frecuencia carecen de precisión o cuantificación. La red logística militar se enfrenta a riesgos de carácter operativo en forma de imprevistos e interrupciones de eventos causados por la acción del enemigo, el terreno y el clima [4]. Este tipo de riesgos influyen directamente en el éxito de las operaciones, ya que la logística está presente en todos los niveles de planificación y ejecución de las operaciones (estratégico, operativo y táctico).

Existen pocos estudios que propongan una metodología que permita realizar un adecuado análisis de este tipo de riesgos. Las operaciones necesitan herramientas útiles que permitan planificar y apoyar a la toma de decisiones para abordar los desafíos logísticos inherentes a brindar apoyo en entornos a menudo austeros. Para una correcta evaluación del riesgo, se requiere una estimación tanto de la gravedad (impacto) como de la probabilidad de ocurrencia de esos resultados [4].

Para dar respuesta a esta necesidad, este trabajo propone un sistema de inferencia difusa (FIS), implementado en MATLAB Fuzzy Logic Toolbox que permitirá a los expertos militares la identificación, evaluación y gestión de los riesgos logísticos asociados a las operaciones militares en cada etapa, desde el inicio hasta el final de la misma. De manera similar, ayudará a asegurar la entrega del material crítico en caso de que surja algún problema, y así evitar poner en peligro a toda la operación.

El modelo propuesto se basa en la lógica difusa. Fue introducida por Zadeh en el año 1965 para tratar la vaguedad en el pensamiento humano. Permite el modelado matemático de la incertidumbre, y, además, proporciona herramientas de carácter formal para manejar la imprecisión inherente a la toma de decisiones [6]. Esta teoría ha demostrado ser una técnica ideal en el análisis de riesgos en algunos sectores como el sector de la construcción [7], el sector de fabricación aditiva [8], el sector militar [9], la industria minera [10], etc.

2. Desarrollo

A continuación, se exponen los pasos seguidos para el diseño del FIS propuesto como modelo de evaluación de riesgos:

2.1. Selección de los riesgos potencialmente críticos

El primer paso es identificar los riesgos logísticos potencialmente críticos en el éxito de la operación militar. En este trabajo, se realizó una revisión de la literatura para identificar y sintetizar los riesgos logísticos más frecuentes.

La revisión de la literatura muestra que los principales riesgos en este campo son los relacionados con las condiciones climáticas desfavorables y la ubicación geográfica alejada, el retraso en la entrega los materiales y el armamento requeridos, la falta de permisos gubernamentales, la falta de personal cualificado, la limitación del presupuesto, la falta de transparencia en la información, la incorrecta previsión del stock necesario, la mala calidad de los materiales y el armamento, los elevados costes de mantenimiento, la obsolescencia tecnológica, la gran variedad de materiales y armamento, la cultura y la actitud militar, los conflictos de intereses, los daños producidos en el transporte en los materiales, etc. [11-18].

2.2 Selección del sistema de inferencia difusa (FIS)

El segundo paso es la selección de un FIS, que genera un mapeo entre las variables de entrada y las de salida. El programa MATLAB Fuzzy Logic Toolbox ofrece la opción de elegir entre dos tipos de FIS: Mamdani y Sugeno. En este estudio, se utiliza el tipo Mamdani debido a su naturaleza intuitiva y facilidad de aplicación. Y que tiene una estructura muy simple de operaciones “mín-máx”.

2.3. Definición de las variables lingüísticas

El tercer paso es la definición de las variables de entrada y de salida para el modelo de evaluación de riesgos. Una variable lingüística se define como una variable que puede tomar palabras como su valor en lenguaje natural donde las palabras están representadas por conjuntos difusos definidos en el universo de discurso en el que se define la variable [19].

Este modelo consta de dos variables de entrada: la probabilidad de ocurrencia del riesgo y el impacto del riesgo en los objetivos de la operación en términos de alcance, tiempo, coste y calidad. La evaluación de los dos parámetros permite calcular el valor de la variable de salida: la relevancia del riesgo en el éxito de las operaciones militares (Figura 1).

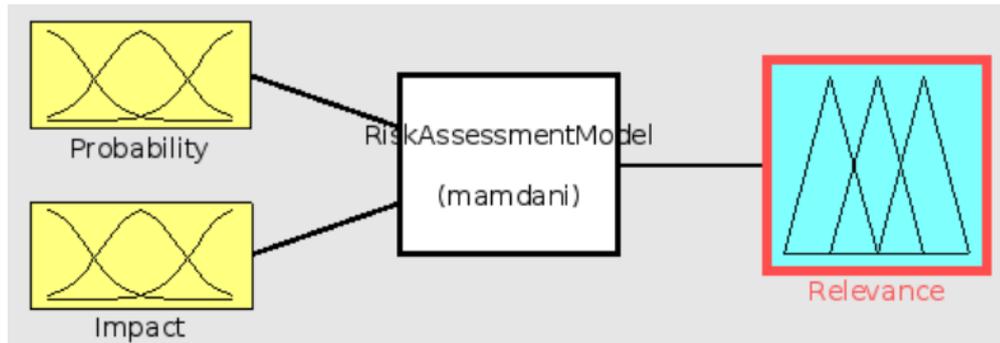


Figura 1. Estructura del FIS de Mamdani para la evaluación de riesgos logísticos. Fuente: Programa MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.

2.4. Formulación de las funciones de pertenencia (MFs)

El cuarto paso consiste en la formulación de las MFs para los conjuntos difusos de las variables lingüísticas. Una MF es una curva que representa la asignación de los puntos de datos de entrada a un valor o grado de pertenencia que tiene un intervalo entre 0 y 1. En el FIS Mamdani, se pueden utilizar diferentes tipos de MFs, algunas de las cuales son triangulares, trapezoidales, singletones, sigmoides o gaussianas [20].

En esta investigación, cada variable lingüística se compone de cinco conjuntos difusos. Cada conjunto difuso se describe mediante un término lingüístico. En consecuencia, se utilizan cinco términos lingüísticos para la expresión de cada variable lingüística. Entre las diferentes clases de funciones de pertenencia, se decidió seleccionar las gaussianas al ser la opción más natural. La Figura 2 presenta los conjuntos difusos y la MF gaussiana utilizada para cada uno de ellos.

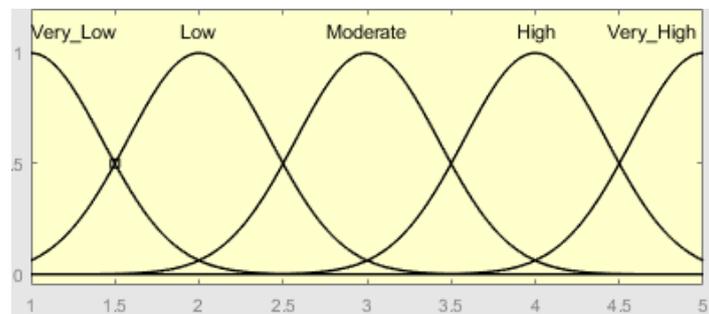


Figura 2. MFs gaussianas de los conjuntos difusos de las variables lingüísticas. Fuente: Programa MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.

Cada conjunto difuso se define mediante una MF gaussiana definida por la Eq. (1), cuando σ , es la desviación estándar, y c , la media.

$$f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Los términos lingüísticos para las dos variables de entrada (la probabilidad de ocurrencia y el impacto en los objetivos de la operación en términos de alcance, tiempo, coste y calidad) y la variable de salida (la relevancia del riesgo en el éxito de las operaciones militares) se pueden describir como se muestra en la Tabla 1.

Variable	Término lingüístico	Interpretación general	Calificación nítida	Calificaciones difusas	Universo del discurso (x)
Probabilidad	Baja	El riesgo es muy poco probable que ocurra.	1	$1 \leq P \leq 2,5$	$x_P \in (1,5)$
	Muy baja	Es poco probable que ocurra el riesgo.	2	$1 \leq P \leq 3,5$	
	Moderada	Existe una cierta probabilidad de que el riesgo ocurra.	3	$1,5 \leq P \leq 4,5$	
	Alta	Es probable que ocurra el riesgo.	4	$2,5 \leq P \leq 5$	
	Muy alta	El riesgo es muy probable que ocurra.	5	$3,5 \leq P \leq 5$	
Impacto	Muy bajo	El impacto del riesgo es muy bajo.	1	$1 \leq I \leq 2,5$	$x_I \in (1,5)$
	Bajo	El impacto del riesgo es bajo.	2	$1 \leq I \leq 3,5$	
	Moderado	El impacto del riesgo es moderado.	3	$1,5 \leq I \leq 4,5$	
	Alto	El impacto del riesgo es alto.	4	$2,5 \leq I \leq 5$	
	Muy alto	El impacto del riesgo es muy alto.	5	$3,5 \leq I \leq 5$	
Relevancia	Muy baja	Es casi imposible que ocurra un evento. Las consecuencias son insignificantes. Sin impacto en el cumplimiento de la misión. No se requieren acciones de gestión.	1	$1 \leq R \leq 2,5$	$x_R \in (1,5)$
	Baja	La ocurrencia de un evento es posible - consecuencias menores / no significativas. Poco impacto en el cumplimiento de la misión. No se requieren acciones de gestión específicas.	2	$1 \leq R \leq 3,5$	
	Moderada	Es casi seguro que el evento ocurra; las consecuencias son menores/insignificantes. Los efectos son altos y es poco probable que ocurra el evento. Limita la capacidad de llevar a cabo una operación militar. Se requieren acciones de gestión.	3	$1,5 \leq R \leq 4,5$	
	Alta	El evento cierto o casi seguro que ocurre con consecuencias menores o el evento improbable con consecuencias críticas. Se requieren estrategias de respuesta y seguimiento.	4	$2,5 \leq R \leq 5$	
	Muy alta	Las consecuencias son catastróficas o altas. La pérdida de la capacidad para cumplir la misión es inevitable ahora o casi segura. Se requieren estrategia de respuesta específicas y seguimiento.	5	$3,5 \leq R \leq 5$	

Tabla 1. Definición de los términos lingüísticos, y sus calificaciones difusas y nítidas. Fuente: [8, 21].

2.5. Establecimiento de las reglas *If-Then*

El quinto paso es la formulación de las reglas *If-Then* que son la base del proceso de inferencia difusa. Estas reglas muestran el valor de la variable de salida la relevancia del riesgo en el éxito de las operaciones militares) cuando los valores de las variables de entrada (la probabilidad de ocurrencia y

el impacto en los objetivos del proyecto en términos de alcance, tiempo, coste y calidad) se expresan mediante diferentes términos lingüísticos. Estas reglas son fácilmente comprensibles e intuitivas [8].

En este estudio, se han establecido un total de veinticinco reglas para diseñar el modelo propuesto, como se muestra en la Tabla 2 [8].

		Impacto				
		MB	B	M	A	MA
Probabilidad	MB	MB	MB	MB	B	M
	B	MB	B	B	M	M
	M	MB	B	M	A	A
	A	B	B	M	A	MA
	MA	B	M	A	MA	MA

Tabla 2. Matriz de las reglas difusas *If-Then*. Fuente:[8]

2.6. Proceso de inferencia difusa

El último paso es el proceso de inferencia difusa. Implica la formulación del mapeo de las dos variables de entrada a la variable de salida utilizando la lógica difusa. Este proceso está compuesto de cinco pasos [8].

- Fuzzificación de las variables de entrada.
- Aplicación del operador difuso (*AND* u *OR*) en el antecedente. En este trabajo, se ha utilizado el operador difuso *AND*.
- Implicación del antecedente al consecuente.
- Agregación de los consecuentes a través de las reglas.
- Defuzzificación.

3. Resultados y discusión

En este apartado, se va a presentar un ejemplo número hipotético como ilustración de la aplicación potencial del modelo propuesto para la evaluación de riesgos logísticos. En este ejemplo, un experto militar valora las dos variables de entrada (probabilidad e impacto) de tres riesgos logísticos presentes en la operación militar de la cual es responsable. Tras la aplicación del FIS, obtiene el valor de la variable de salida (relevancia) de cada uno de los riesgos como se puede observar en la Tabla 3.

Riesgo	Probabilidad	Impacto	Relevancia
Condiciones climatológicas desfavorables	2,5	3,5	3
Retraso en la entrega del material y armamento	4	3,5	3,49
Falta de personal cualificado	2	2,5	2,14

Tabla 3. Evaluación de los riesgos. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se va a realizar el análisis en concreto del riesgo “falta de personal cualificado” a modo de ejemplo. Para el resto de los riesgos, el procedimiento sería el mismo. La Figura 3 muestra el proceso de inferencia difusa que, tras la introducción de los valores de la probabilidad e impacto, el FIS desarrollado en este trabajo, arroja un valor de relevancia para ese riesgo de 2,14.

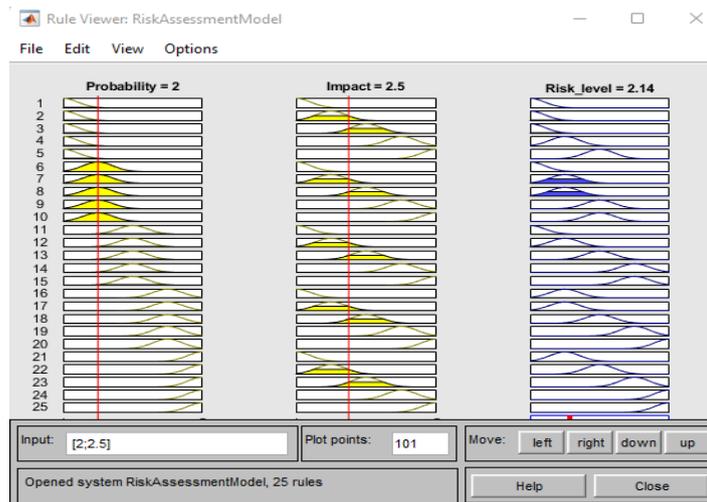


Figura 3. Rule viewer. Fuente: Programa MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.

Según la Tabla 1, al tener un valor de relevancia de 2,14, estaría dentro de las tres categorías de relevancia “moderada”, “baja” y “muy baja”. Aplicando la Eq. (1), se puede calcular el grado de pertenencia de este riesgo en cada uno de estos tres conjuntos difusos. Para el conjunto de relevancia “moderada”, este riesgo tiene un grado de pertenencia de 0,69, mientras que para el conjunto de relevancia “baja” es de 1, y para el conjunto de relevancia “muy baja” es de 0,52. A efectos prácticos, se considera que la relevancia de este riesgo es “baja”, ya tiene el grado de pertenencia en este conjunto difuso es el más alto. De acuerdo con la Tabla 1, la ocurrencia de este riesgo es posible pero su impacto es de carácter menor o no significativo. Por lo tanto, en caso de ocurrencia, apenas tendría impacto en el cumplimiento de la misión, y no se requieren acciones de gestión específicas.

4. Conclusiones

El FIS de Mamdani propuesto en este trabajo es una herramienta que puede resultar de gran utilidad en la evaluación de riesgos logísticos, así como para la selección de estrategias de respuesta a dichos riesgos en función de su relevancia para poder eliminarlos o mitigarlos. Permite calcular la relevancia de cada riesgo mediante la evaluación de los parámetros: la probabilidad y el impacto, a pesar de la vaguedad del lenguaje humano, y la imprecisión y la incertidumbre en la toma de decisiones.

Con el ejemplo presentado, se demuestra que este FIS permite obtener resultados precisos y confiables, siendo una herramienta ideal para la evaluación de riesgos logísticos y que sirva de ayuda en la toma de decisiones en las operaciones militares.

Referencias

- [1] Prebilič, V. Theoretical aspects of military logistics. *Defense & Security Analysis*.**2006**; 22(2), 159-177.
- [2] Valdés Matías, P. Tesis doctoral. La logística del ejército romano durante la República media (264-188 a. C.). *Universidad de Barcelona*.**2017**.
- [3] Logistics [Internet]. NATO. 2022 [cited 2 August 2022]. Available from: https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_61741.htm
- [4] McConnell B, Hodgson T, Kay M, King R, Liu Y, Parlier G et al. Assessing uncertainty and risk in an expeditionary military logistics network. *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*.**2019**;18(2):135-156.

- [5] Liya J, Tiening W, Ronghui W. Risk evaluation of military supply chains based on case and fuzzy reasoning. *2010 International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM)*.**2010**.
- [6] Nieto-Morote A, Ruz-Vila F. A fuzzy approach to construction project risk assessment. *International Journal of Project Management*.**2011**;29(2):220-231.
- [7] Kiani Mavi R, Standing C. Critical success factors of sustainable project management in construction: A fuzzy DEMATEL-ANP approach. *Journal of Cleaner Production*.**2018**; 194:751-765.
- [8] Moreno-Cabezali B, Fernandez-Crehuet J. Application of a fuzzy-logic based model for risk assessment in additive manufacturing R&D projects. *Computers & Industrial Engineering*. **2020**;145:106529.
- [9] Tubis A, Ryczyński J, Żurek A. Risk Assessment for the Use of Drones in Warehouse Operations in the First Phase of Introducing the Service to the Market. *Sensors*. **2021**;21(20):6713.
- [10] Jiskani I, Moreno-Cabezali B, Ur Rehman A, Fernandez-Crehuet J, Uddin S. Implications to secure mineral supply for clean energy technologies for developing countries: A fuzzy based risk analysis for mining projects. *Journal of Cleaner Production*. **2022**;358:132055.
- [11] Prebilič V. Theoretical aspects of military logistics. *Defense & Security Analysis*. **2006**;22(2):159-177.
- [12] McConnell B, Hodgson T, Kay M, King R, Liu Y, Parlier G et al. Assessing uncertainty and risk in an expeditionary military logistics network. *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*. **2019**;18(2):135-156.
- [13] Glas A, Hofmann E, Eßig M. Performance-based logistics: a portfolio for contracting military supply. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. **2013**;43(2):97-115.
- [14] Rutner S, Aviles M, Cox S. Logistics evolution: a comparison of military and commercial logistics thought. *The International Journal of Logistics Management*. **2012**;23(1):96-118.
- [15] Rahman, A. R. A., & Hamid, N. R. A. (2019). Achieving logistics performance in military environmental dynamism: The role of organizational capabilities. *International Journal of Supply Chain Management*. **2019**; 8(2), 1004-1017.
- [16] Acero R, Torralba M, Pérez-Moya R, Pozo J. Order processing improvement in military logistics by Value Stream Analysis lean methodology. *Procedia Manufacturing*. **2019**;41:74-81.
- [17] Liya J, Tiening W, Ronghui W. Risk evaluation of military supply chains based on case and fuzzy reasoning. *2010 International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM)*. **2010**.
- [18] Ryczyński J, Tubis A. Tactical Risk Assessment Method for Resilient Fuel Supply Chains for a Military Peacekeeping Operation. *Energies*. **2021**;14(15):4679.
- [19] Zeng J, An M, Smith N. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. *International Journal of Project Management*. **2007**;25(6):589-600.
- [20] Harliana P, Rahim R. Comparative Analysis of Membership Function on Mamdani Fuzzy Inference System for Decision Making. *Journal of Physics: Conference Series*. **2017**;930:012029.
- [21] Ryczyński J, Tubis A. Tactical Risk Assessment Method for Resilient Fuel Supply Chains for a Military Peacekeeping Operation. *Energies*. **2021**;14(15):4679.