

## Evaluación de proyectos fotovoltaicos en el Perú utilizando el software Matlab y su kit de lógica difusa

Evaluation of photovoltaic projects in Peru using Matlab  
software and its fuzzy logic kit

**José Luis Díaz Chuque**  
[Luis1275121@gmail.com](mailto:Luis1275121@gmail.com)  
**Universidad Nacional del Santa**  
**Perú, Nuevo Chimbote**

### RESUMEN

Desde sus inicios en la década del 60, la lógica difusa ha abierto la puerta de la comprensión de las computadoras, las máquinas y los sistemas basados en ellas. Originalmente se creó como un sistema de descripción del lenguaje, pero se ha convertido en una poderosa herramienta de control. Esta puede ser aplicada siempre que podamos definir unas variables lingüísticas de entrada (Radiación solar, costo de la tecnología, costo de operación y mantenimiento, Costo del terreno y Costo del petróleo) con sus valores y funciones de pertenencia y que, con el apoyo de un experto y una revisión bibliográfica extensa, se definirán las reglas de defuzzificación que nos permitirán obtener un sistema de inferencia difuso (FIS) óptimo; es por ello que el presente estudio abre camino a la evaluación de futuros nuevos proyectos fotovoltaicos en el Perú, con la finalidad de poder determinar si son viables o no.

**Palabras clave:** Lógica difusa; proyectos fotovoltaicos; variables lingüísticas; software Matlab.

### ABSTRACT

Since its beginnings in the 1960s, fuzzy logic has opened the door to understanding computers, machines and systems based on them. It was originally created as a language description system but has become a powerful control tool. It can be applied whenever we can define some input linguistic variables (solar radiation, technology cost, operation and maintenance cost, land cost and oil cost) with their values and membership functions and, with the support of an expert and an extensive bibliographic review, the defuzzification rules

will be defined that will allow us to obtain an optimal fuzzy inference system (FIS). This is why the present study paves the way for the evaluation of future new photovoltaic projects in Peru, to determine whether they are viable or not.

**Key words:** Fuzzy logic; photovoltaic projects; linguistic variables; Matlab software.

## INTRODUCCIÓN

La utilización de un sistema de inferencia difuso (FIS), mediante la lógica difusa, puede facilitar el proceso de toma de decisiones en la realización de proyectos solares fotovoltaicos. La lógica difusa es una herramienta útil para tomar decisiones y conocer si un proyecto de fotovoltaico es factible. Una vez finalizado el programa, creemos que cualquier persona puede utilizar fácilmente esta herramienta, sin un alto nivel de experiencia, permitiendo la evaluación de proyectos solares fotovoltaicos en diferentes lugares y por diferentes personas con igual razonamiento. Una herramienta como esta puede ser muy útil para las diversas organizaciones a nivel mundial (Román, 2018).

Uno de los mayores desafíos del mundo es satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica y hacerla sostenible en el tiempo. Hoy en día, el 81.3% de la energía total proviene de los combustibles fósiles. El problema de este tipo de energía no solo está relacionado con la escasez de materia prima y su relación directa con el calentamiento global, sino también con la contaminación del aire, la generación de la lluvia ácida, la destrucción de la capa de ozono y la devastación de áreas forestales. Por lo tanto, el incremento de las fuentes de energía renovable se ha vuelto cada vez más importante, toda vez que en la actualidad solo el 2% de la energía total proviene de las energías renovables (solar, eólica, marítima, etc.) (International Energy Agency, 2020).

Para el año 2040, la demanda energética global total aumentará en un 30%, así mismo la gran parte de este consumo provendrá de los países en vías de desarrollo. También se espera que el 37% de la producción de electricidad provenga de fuentes renovables, específicamente, la generación solar y eólica. Hoy en día, alrededor del 23% del consumo eléctrico mundial se genera a partir de este tipo de fuentes. Hasta cierto punto, el mayor uso de estas tecnologías puede atribuirse a su mayor competitividad y a la entrada en vigor del Acuerdo de París en el año 2016. Las economías mundiales dependerán menos de los combustibles fósiles, tales como el petróleo y el carbono, y elegirán fuentes más limpias y eficientes. En particular, se espera que el consumo del gas natural continúe creciendo hasta en un 50% en los futuros años, con la finalidad de que se posicione por encima del carbón en el consumo energético global (Simons, 2017).

La energía cumple un papel primordial en el desarrollo mundial, el cual ahora está controlado por los combustibles fósiles (petróleo y carbón), los cuales son usados para generar la energía eléctrica. Pero, el calentamiento global debido al alto consumo de estos combustibles se ha transformado en un fenómeno mayor. Para contrarrestarlo, se debe generar energía renovable, amigable con el medio ambiente y cada vez más accesible debido a la evolución de la tecnología y la competencia en el mercado. Así mismo, se ha

demostrado que las energías renovables reducen la pobreza y brindan oportunidades comerciales y laborales en los países desarrollados; No obstante, se ha demostrado que se usa de manera intermitente y no es confiable. Por ello, se han desarrollado diferentes metodologías, técnicas y tecnologías, con la finalidad de que puedan proporcionar la máxima fiabilidad y eficiencia para la producción de energía renovable. De estos métodos sobresale la Lógica Difusa, que permite conceptualizar la indefinición de un sistema en un único parámetro cuantitativo, ya que se trata de una inferencia aproximada que también tiene “validez lingüística” en reemplazo de valores explícitos nítidos. La lógica difusa se ocupa de la noción de “valor de verdad” que se encuentra entre valores típicos de la lógica clásica (Blancas, 2019).

En los últimos años, la energía eólica y solar fotovoltaica han madurado completamente y han experimentado (y seguirán experimentando) reducciones de costos impactantes. Desde los años 2009-2019, el costo de la generación de energía solar fotovoltaica se redujo en un 82%, mientras que para la energía eólica se redujo en un 39%. La reducción de costos continuará y nada nos hace pensar que esta tendencia se detendrá. La energía eólica y solar son el abastecimiento de energía más baratas para dos tercios de los habitantes de este mundo y muy pronto estarán disponibles para todos (Fresco, 2021).

La energía solar se transformará en el nuevo líder del mercado eléctrico mundial. Con los parámetros políticos vigentes, está en trayecto establecer nuevos récords de desempeño cada año después de 2022. Si los Gobiernos e inversionistas redoblan sus esfuerzos de energía limpia alineada con el escenario de sostenibilidad, el auge energético tendrá un gran crecimiento, ya que la energía solar y la eólica serían más alentadores para enfrentar el cambio climático mundial (Biol, 2020).

La fuente de energía proveniente del sol es una de las alternativas energéticas que se viene desarrollando para reemplazar el uso de los combustibles fósiles. El Perú está más cerca de Ecuador, donde hay sol en casi todo el año. De acuerdo con el Atlas Solar Peruano, elaborado por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), la radiación solar anual del Perú es muy alta, siendo alrededor de 5,5 a 6,5 kWh/m<sup>2</sup>, 5,0 a 6,0 kWh/m<sup>2</sup> y 4,5 a 5,0 kWh/m<sup>2</sup>, respectivamente en la sierra, costa y selva (PUCP, 2017).

En el Perú, el 54,25% de la energía total proviene de las centrales termoeléctricas, el 39,78% de las centrales hidroeléctricas, el 3,25% de las centrales eólicas, el 0,48% de las centrales de biomasa y el 2,25% de las centrales solares (las cuales son 07 e integran el Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional -COES) (Osinermin, 2021). La central solar más grande del Perú es la “C.S Rubí”, ubicada en el Departamento de Moquegua y cuenta con una potencia instalada nominal de 144,5 MW.

La principal fuente de energía renovable del país es la energía hidroeléctrica, seguida de la energía solar, con una potencia total de 69 445 MW y 25 000 MW, respectivamente. El Perú tiene una gran envergadura de generación de energía renovable, pero rara vez se utiliza. El documento del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) “Elaboración de la nueva matriz energética sostenible y evaluación ambiental estratégica como instrumentos de planificación”, introduce el Plan de Desarrollo de los Recursos Energéticos Renovables

(RER) 2012-2040. En los resultados, se estima que la potencia total instalada alcanzará los 24 976,9 MW para el 2040, de los cuales las centrales RER participantes serán de 4 321 MW (17,3% del total). Para lograr esta capacidad, se requerirá una inversión de aproximadamente US\$ 8 757 millones. Este es un gran desafío para el marco regulatorio, ya que se deberá de promover un gran auge en la instalación de los RER (Osinermin, 2019).

En el Perú, se han realizado 04 subastas on-grid, las cuales fueron realizadas en los años 2009, 2011, 2013 y 2015, respectivamente, y 01 subasta off-grid, la cual fue realizada en el año 2013, que permitieron diversificar nuestra matriz energética. Adicional a ello, el gobierno actual deja al próximo gobierno 15 proyectos de generación de recursos energéticos renovables (RER) en diversos departamentos del país, con un financiamiento de US\$ 1 319 millones y que representará una potencia instalada de 1 208 MW. Así mismo, todos estos proyectos cuentan con concesiones definitivas y se espera que entren en operación entre los años 2022 y 2024, entregando energía de calidad y limpia al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). El principal proyecto de energía solar es la Central Solar Fotovoltaica llamada Continua Misti, la cual está ubicada en el Departamento de Arequipa, con un financiamiento superior a los US\$ 210 millones y una potencia instalada de 300 MW. En el ámbito de la electrificación rural, hoy en día el MINEM cuenta con 9 proyectos de centrales eléctricas con sistemas fotovoltaicos en los Departamentos de Amazonas, Loreto y Ucayali. Dos de estos están en la fase de licitación y los restantes se espera sean licitados a fines de este año. Los habitantes beneficiados superan los 52 000 peruanos, con un financiamiento total de más de S/ 270 millones, también deja orientado el Segundo Programa Masivo con sistemas de energía fotovoltaica, en mejora de 107 mil viviendas rurales que se encuentran en lugares agrestes que carecen del servicio de electricidad y que, por su ubicación, son probablemente sensibles de ser electrificadas a través de los paneles solares (Gálvez, 2021).

Por esta razón resulta fundamental que el estado peruano y la empresa privada continúen impulsando e incentivando de manera efectiva la generación fotovoltaica a gran escala y que estos proyectos puedan ser evaluados previamente para determinar la confiabilidad y viabilidad de su inversión. Una de las herramientas más efectivas para realizar esta evaluación es a través del sistema de inferencia difuso (FIS), basado en la lógica difusa (Toolbox Fuzzy) del software Matlab.

## MÉTODO

La siguiente investigación utilizó la experiencia y el conocimiento de un experto para formar un sistema de inferencia difuso (FIS) que simule su comportamiento mediante la toma de los valores reales, en el lugar y en el momento, en el que se pretende llevar a cabo el proyecto.

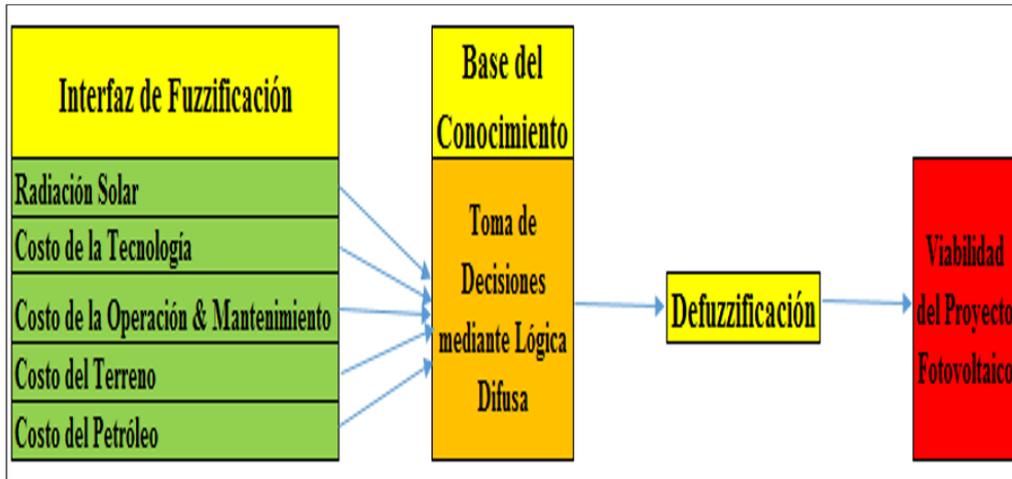


Fig. 1. Detalle del Sistema Experto Basado en la Lógica Difusa Aplicado a Proyectos

Para la evaluación de un proyecto fotovoltaico se deben tomar los valores reales, en el lugar donde se pretende realizar el proyecto y en los tiempos en que se realiza el mismo. Posteriormente se fuzzifican según las funciones de pertenencias definidas y se someten a las reglas creadas, luego se obtienen los valores difusos de las variables de salida y se defuzzifican para obtener un valor que tenga sentido para un ser humano. Este proceso se realiza con el Tool Kit de Fuzzy Logic de Matlab.

**Tabla 1.** Valores límites de la función de membresía

Variables de entrada	Criterios
Radiación Solar (kWh/m <sup>2</sup> x Día)	Radiación Solar: Baja < 4.5
	Radiación Solar: Media 4.5 a 5.2
	Radiación Solar: Alta > 5.2
Costo de la Tecnología (\$/W)	Costo de la Tecnología: Baja < 1.7
	Costo de la Tecnología: Media 1.7 a 3.8
	Costo de la Tecnología: Alta > 3.8
Costo de la Operación y Mantenimiento (\$/kWh)	Costo de la O&M: Baja < 17
	Costo de la O&M: Media 17 a 33
	Costo de la O&M: Alta > 33
Costo del Terreno (\$/m <sup>2</sup> )	Costo del Terreno: Baja < 1
	Costo del Terreno: Media 1 a 1.3
	Costo del Terreno: Alta > 1.3
Costo del Petróleo (\$/Barril)	Costo del Petróleo: Baja < 80
	Costo del Petróleo: Media 80 a 110
	Costo del Petróleo: Alta > 110

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tesis de Román (2018), se destaca que la utilización de un sistema de inferencia difuso (FIS) basado en lógica difusa facilita significativamente el proceso de toma de decisiones en la realización de proyectos solares fotovoltaicos. Este enfoque resulta una herramienta útil y robusta para tomar decisiones y conocer si un proyecto fotovoltaico es factible. El presente estudio respalda dichas conclusiones al demostrar que, mediante la lógica difusa, las variables de entrada (Radiación solar, costo de tecnología, costo de operación y mantenimiento, costo de terreno y costo de petróleo) y la determinación de sus valores (bajo, medio y alto), se pudo determinar que los proyectos fotovoltaicos (C.S Moquegua FV y C.S Rubí) que formaron parte de la muestra, son de carácter viable para las condiciones establecidas en el Perú.

Por otra parte, el artículo científico de Suganthi, Iniyar y Samuel (2015), manifiesta que la revisión destaca claramente que existe un amplio margen para la investigación en modelos basados en difusos en sistemas de energía renovable. Es decir, los investigadores pueden adoptar modelos basados en difusos para enriquecer su investigación y llegar a soluciones pragmáticas que resuelvan la preocupación por la energía y el medio ambiente. En línea con ello, el modelo difuso aplicado en este estudio no solo valida la viabilidad de los proyectos evaluados (C.S. Moquegua FV y C.S. Rubí), sino que también demuestra su potencial para ser replicado en futuros proyectos fotovoltaicos en el Perú, aportando así una herramienta analítica versátil y adaptable a diferentes escenarios.

## CONCLUSIONES

La construcción de un modelo de inferencia difuso (FIS) empleando el software Matlab y su kit de lógica difusa demanda una investigación íntegra de las variables lingüísticas de entrada. Dicho proceso, apoyado en una revisión bibliográfica extensa, permite determinar el rango de los valores numéricos necesarios para configurar el modelo y garantizar su precisión en la evaluación de proyectos fotovoltaicos.

El principal aporte de este estudio radica en el desarrollo de un sistema de inferencia difuso (FIS) como herramienta práctica y analítica para respaldar la toma de decisiones de las autoridades gubernamentales en la generación de proyectos fotovoltaicos en el Perú. Este sistema permite determinar de manera objetiva la viabilidad técnica y económica de dichos proyectos, contribuyendo al desarrollo sostenible del sector energético en el país.

Finalmente, se demostró la utilidad del modelo propuesto mediante su validación con dos casos de estudio reales (*C.S. Moquegua FV* y *C.S. Rubí*), los cuales fueron clasificados como viables bajo las condiciones evaluadas. Estos resultados confirman la eficacia del sistema de inferencia difuso (FIS) para evaluar proyectos fotovoltaicos existentes y su potencial para aplicarse en futuros proyectos en el Perú.

## CONFLICTO DE INTERESES.

El autor declara que no existe conflicto de intereses que haya influido en la realización o publicación del presente artículo científico titulado "Evaluación de proyectos fotovoltaicos en el Perú utilizando el software Matlab y su kit de lógica difusa".

## REFERENCIAS

Biol, F. (13 de Octubre de 2020). La energía solar se convertirá en el 'nueva reina' de los mercados eléctricos mundiales. Obtenido de <https://www.aa.com.tr/es/econom%ADa/la-energ%ADa-solar-se-convertir%A1-en-el-nueva-reina-de-los-mercados-el%A9ctricos-mundiales/2005152>

Blancas, J. (27 de Octubre de 2019). Lógica difusa en sistemas sistemas de energía fotovoltaica. Obtenido de <https://energeticalabs.com/logica-difusa-en-sistemas-de-energia-fotovoltaica/>

Fresco, P. (2021). La Nueva Era de la Transición Energética: Bienvenidos al Futuro. Obtenido de [https://www.elconfidencial.com/medioambiente/energia/2021-01-20/energia-crisis-climatica-transicion-futuro\\_2913567/](https://www.elconfidencial.com/medioambiente/energia/2021-01-20/energia-crisis-climatica-transicion-futuro_2913567/)

Gálvez, J. (18 de Julio de 2021). Gobierno de Transición deja una cartera de 15 proyectos RER con una inversión que supera los US\$ 1,300 millones. Obtenido de <https://www.gob.pe/ru/institucion/minem/noticias/506862-gobierno-de-transicion-deja-una-cartera-de-15-proyectos-rer-con-una-inversi-n-que-supera-los-us-1-300-millones>

International Energy Agency, I. (2020). World Energy Outlook 2020. OECDilibrary. Obtenido de [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2020\\_557a761b-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2020_557a761b-en)

Minem (14 de Septiembre de 2021). Perú: radiación solar más alta de todo el planeta.

Osinergmin. (Noviembre de 2019). Energías renovables experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética. Obtenido de [https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/Institucional/Estudios\\_Economicos/Libros/Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf](https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf)

Osinergmin. (4 de Febrero de 2021). Radiografía Energética: PERÚ 2021. Obtenido de <https://issuu.com/osinergmin/docs/infografia-energetica-2021>

- PUCP. (2017). El desarrollo de la energía solar en el Perú. Obtenido de <https://gruporural.pucp.edu.pe/nota/el-desarrollo-de-la-energia-solar-en-el-peru/>
- Román, J. (2018). Evaluación de proyectos fotovoltaicos usando lógica difusa [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/1406>
- Simons, P. (2017). La Energía en el 2040. Obtenido de <https://blogs.iadb.org/energia/es/la-energia-en-el-2040/>
- Suganthi, L., Iniyar, S., & Samuel, A. (Agosto de 2015). Applications of fuzzy logic in renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211500307X>