



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

“Evaluación de proyectos fotovoltaicos usando Lógica Difusa”

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA:
JOSUÉ EMMANUEL ROMÁN BENÍTEZ

Director de tesis: Dr. Diego Seuret Jiménez

Sinodales

Dr. Miguel ángel Basurto Pensado

Dr. Juan Carlos García Castrejón

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

Dr. Alvaro Zamudio Lara

CUERNAVACA MOR.

MAYO 2018



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



ASUNTO: APROBACIÓN DE TESIS
Cuernavaca, Morelos, 21 de mayo de 2018

JOSUE EMMANUEL ROMAN BENITEZ
P R E S E N T E

Por este conducto le notifico que su tesis de Maestría titulada, **“Evaluación de proyectos fotovoltaicos usando Lógica Difusa”**

Fue aprobada en su totalidad por el jurado revisor y examinador integrado por los ciudadanos:

NOMBRE	FIRMA
DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO	
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN	
DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES	
DR. ALVARO ZAMUDIO LARA	
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ	

Por consiguiente, se autoriza a editar la presentación definitiva de su trabajo de investigación para culminar en la defensa oral del mismo.

Sin otro particular aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
POR UNA HUMANIDAD CULTA
Una universidad de excelencia

DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ
COORDINADOR DE POSGRADO EN INGENIERÍA
Y CIENCIAS APLICADAS

JAHPRSU/nmc

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209
Tel. (777) 329 70 00, ext. 6208 / raquel.sotelo@uaem.mx

UA
EM

Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023

RESUMEN

La lógica difusa desde sus inicios en la década de los 60 ha ampliado los horizontes de aplicación. Originalmente inicio como un sistema para la descripción del lenguaje, ha pasado a ser una poderosa herramienta de control. Al tener una estructura que reside en nuestro lenguaje, puede ser aplicada siempre que podamos definir unas variables lingüísticas con sus valores y funciones de pertenencia; con el apoyo de un experto, definiremos las reglas que nos permitirán obtener un resultado en (Radiación Solar, Costo de la tecnología, Operación y mantenimiento, Costo del terreno, Costo del petróleo.) con base en un profunda revisión bibliográfica logramos definir sus valores. En seguida apoyados en nuestra experiencia se han definido las reglas de defusificación.

Todos los cálculos se realizaron usando la herramienta de Matlab y su kit de lógica difusa, esto nos permitió evaluar algunos proyectos que ya existen y vemos que realmente son atractivos.

Con este trabajo se abre camino a la evaluación de nuevos proyectos de energía solar fotovoltaica con base en este método.

ABSTRACT

The fuzzy logic since its beginnings in the decade of the 60 has extended the horizons of application. Originally started as a system for describing language, it has become a powerful control tool. By having a structure that resides in our language, can be applied whenever we can define some linguistic variables with their values and membership functions, functions of belonging with the support of an expert define the rules that will allow us to obtain a result. (Solar Radiation, Cost of technology, Operation and maintenance, Cost of land, Cost of oil), based on a thorough literature review we define their values. At once supported by our experience the rules have been defined.

All calculations were done using the Matlab program and its fuzzy logic kit, this allowed us to evaluate some projects that already exist and we see that they really are attractive.

This work opens the way to the evaluation of new projects of photovoltaic solar energy based on this method.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera expresar mis agradecimientos al profesor y director de la tesis de maestría, al Dr. Diego Seuret Jiménez, por su amabilidad, sabiduría, dedicación y ayuda constante durante el periodo de investigación, me siento muy agradecido por su estimada atención y por enseñarme los conocimientos científicos y metodologías necesarias para desarrollar el presente trabajo.

A todos los profesores investigadores que me formaron en las materias llevadas durante la maestría, a los miembros del comité tutorial, al Dr. Alvaro Zamudio Lara, Dr. Miguel Ángel Basurto Pensado, Dr. Juan Carlos García Castrejón y la Dra. Margarita Tecpoyolt Torres, por sus valiosas recomendaciones y aportaciones para la mejora de este proyecto.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada y hacer posible el objetivo de finalizar el proyecto de la maestría. También quiero agradecer al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en sus instalaciones y siempre ofrecerme la mejor formación académica.

Agradezco a mis compañeros Edgardo, Ivan, Rodolfo, Edgar, Aldo, Luis, Fernando, que siempre han estado conmigo apoyándome con su amistad sincera y compartiendo los mejores momentos de mi vida.

A mis padres Valente y Ana, mis hermanos. Edgar, Oscar, Jair, Erika, por ser la mejor fortaleza que el creador me pudo brindar.

Agradezco a Dios por permitirme vivir, y darme un poco de sabiduría, dedicación y motivación, pero sobre todo brindarme la dicha de dar este paso en mi vida profesional.

*Dedico este trabajo a mi esposa Maritza
Agradezco el apoyo absoluto e incentivo que han sido
muy importante para alcanzar este objetivo.*

RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
AGRADECIMIENTOS	V
DEDICATORIAS	VI
Lista de tablas	IX
Lista de figuras	IX
Nomenclatura	XI
Subíndices	XII
1 Capítulo 1.- Introducción	1
1.1 Presentación	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Objetivo específicos	3
1.4 Justificación	4
1.5 Hipótesis	4
2 Capítulo 2 – Marco de aplicación	5
2.1 Introducción	5
2.2 Energías renovables	6
2.3 La Energía a nivel mundial	6
2.4 La Energía Solar en México	9
2.4.1 Instrumentos para promover la inversión en México.	10
2.4.2 Marco legal	11
2.4.3 Modalidad para la generación de energía eléctrica	12
2.5 Programas federales	13
2.5.1 Fondos	13
2.5.2 Incentivos fiscales	13
2.5.3 Financiamiento	13
2.5.4 Programas	14
3 Capítulo 3.- La Historia y fundamentos de la lógica Difusa	16
3.1 Definiciones e historia	16
3.1.1 Sistema expertos (SE)	23
3.1.2 Lógica difusa	24
3.1.3 Lógica difusa y sistemas de control	25
3.2 Lógica Difusa	26
3.2.1 Base teórica	26

3.2.2 Sistema difuso de Mandani	34
3.3 Base de Conocimiento	38
4 Capítulo 4.- Construcción del modelo	39
4.1 Introducción	39
4.2 Definición de variables lingüísticas	39
4.3 Radiación Solar	41
4.4 Costo de la tecnología	44
4.5 Operación y Mantenimiento	45
4.5.1 Energía térmica de gas	46
4.5.2 Energía térmica de carbón.	46
4.5.3 Energía solar Fotovoltaica	47
4.5.4 Energía Hidroeléctrica	48
4.6 Costo de Adquisición del terreno	50
4.7 Costo del Petróleo	52
5 Capítulo 5.- Desarrollo del modelo	54
5.1 Modelo	54
5.2 Definición de las funciones de Membresia	56
5.3 Definición de las reglas.	62
6 Capítulo 6.- Validación del proyecto	65
6.1 Caso de estudio en un proyecto fotovoltaico en México	65
6.2 Caso de estudio en un proyecto fotovoltaico en Alemania.	69
7 Capítulo 7.- Conclusiones	74
8 REFERENCIAS	75

Lista de tablas

Tabla 3.1 Acontecimientos históricos de la lógica difusa en aplicación en ingeniería de control, en la toma de decisiones	28
Tabla 3.2 Investigaciones hechas con lógica difusa con aplicaciones en energía sola	29
Tabla 4.1 Costo de la tecnología	53
Tabla 4.2. Costos de O&M en las diferentes tecnologías de proceso de generación de electricidad	57
Tabla 5.1 Valores límites de la función de membresía	65
Tabla. 6.1 Resumen del proyecto	75
Tabla 6.2 Variables lingüísticas del proyecto Aura solar	76
Tabla 6.3 Resumen del proyecto Waldpolenz Solar Park, Alemania	79
Tabla 6.4 Variables lingüísticas del proyecto Waldpolenz Alemania	79

Lista de figuras

Figura 1.1 Planteamiento de la investigación	11
Figura 2.1. Escenario energético 2050 – 2100.....	16
Figura 2.2. Consumo mundial de energía en 2013	17
Figura 2.3. Índice de atracción por país	18
Figura 2.4 Cinturón solar	19
Figura 3.1. Ejemplo de subconjunto borroso	35
Figura 3.2 Componentes de una función de membresía	38
Figura 3.3. Función intersección $C = A \cap B$	39
Figura 3.4 Función Unión $C = \mu A \cup B$	40
Figura 3.5 Función de complemento $\mu A(x) = 1 - \mu_A(x)$	40
Figura 3.6 Operaciones lógicas	41
Figura 3.7 Sistema difuso Mamdani, procesamiento general	42
Figura 4.1. Radiación directa y difusa que incide sobre la superficie horizontal en la superficie terrestre	51
Figura 4.2 Mapa de irradiación solar en México	52
Figura 4.3. La República Mexicana enumerada por zonas	59
Figura 4.4 Precios de terreno por metro cuadrado en México	59
Figura 4.5 Precio anual de la mezcla mexicana	61
Figura 5.1 Sistema difuso Mamdani aplicado en proyecto fotovoltaicos	62
Figura 5.2 Árbol de decisiones.	63
Figura 5.3 Editor de funciones de membresía por Matlab	64
Figura 5.4 Representación de la variable lingüística “Radiación solar” en Matlab	65
Figura 5.5 Representación de la variable lingüística “Costo Tecnología” Matlab	66
Figura 5.6 Representación de la variable lingüística Operación y Mantenimiento en Matlab.	67
Figura 5.7 Representación de la variable lingüística Precio del terreno en Matlab	68

Figura 5.8 Representación de la variable lingüística Precio del petróleo	69
Figura 5.9 Algunas reglas para evaluar el proyecto fotovoltaico.	70
Figura 5.10 Editor de reglas de Matlab y algunas de las 243 reglas	71
Figura 5.11 Aplicación de las reglas.	72
Figura 5.12 Representación de la variable lingüística de la oportunidad de inversión.	72
Figura 6.1 Pagina web del proyecto Aura solar.	74
Figura 6.2 Aplicación de las reglas.	76
Figura 6.3 Resultado de la aplicación de la regla.	77
Figura 6.4 Planta Solar de 40 MW Waldpolenz Alemania.	78
Figura 6.5. NASA meteorología de superficie y Energía Solar	80
Figura 6.6. Aplicación de las reglas	81

Nomenclatura

AIE	Agencia Internacional de Energía
ANFIS	sistema de inferencia borrosa neuro adaptativo
ANN	Red neuronal Artificial
Bancomext	Banco Nacional de Comercio Exterior
BANOBRAS	Banco Nacional de Obras y Servicios
CA	corriente alterna
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CO2	Dióxido de Carbono
COA	Centro de área
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CRE	Comisión Reguladora de Energía
DFE	Análisis Envlovente de Datos difusos
EPIA	Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica
ER	Energía Renovable
FG	Genética difusa
FIDE	Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica
FIRCO	Fideicomiso de Riesgo Compartido
FIS	Sistema de inferencia difusa
FLC	Controlador de Lógica Difusa
FPGA	Matriz de puertas programables
Fuzzy GA	Algoritmos Genético difusos
Fuzzy PSO	Optimización de enjambre de partículas difusas
Fuzzy TOPSIS	Técnica preferencia por la semejanza a la solución ideal
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IGCC	Gasificación Integrada a Ciclo Combinado
kW	Kilowatt
kWh	Kilovatios hora
LD	Lógica difusa
m ²	Metro cuadrado
MCDM	Análisis de decisiones de criterios múltiples
MMtep	Millones de toneladas equivalentes de petróleo
MPPT	Metodología de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia
MW	Mega Watts
MWp	Mega Watios pico
NAFIN	Nacional Financiera
O&M	Operación y Mantenimiento
PIB	Producto interno bruto

PROSOLAR	Programa de fomento de sistemas fotovoltaicos en México
PROMEXICO	Programa de Fideicomiso público en México.
PV	Fotovoltaico
PVPS	Sistema de suministro de energía fotovoltaica
S.N.C	Sociedad Nacional de Crédito.
SE	Sistema Experto
SENER	Secretaria de energía de México
SIE	Servicios Integrales de Energía
tep	Tonelada equivalente de petróleo

SUBINDICES

x	Nombre de la variable
X	Universo del discurso
$T(x)$	Valores lingüísticos
G	Regla sintáctica que genera los valores lingüísticos
M	la regla semántica que asocia cada término lingüístico
$\mu_A(x)$	Función de Membresía
max	Máximo
min	Mínimo

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

1.1 Presentación

El trabajo de investigación que planteamos para el desarrollo de la tesis de Maestría se basa en la aplicación de un modelo de un sistema experto para la evaluación de proyectos fotovoltaicos usando la lógica difusa, a partir de la teorías de subconjuntos difusos (Zadeh 1965), y del estudio de los elementos relacionados en la toma de decisiones en las siguientes dimensiones; radiación solar, costo de la tecnología, operación y mantenimiento, precio del terreno, precio del petróleo. Que apoyados en una profunda revisión bibliográfica nos ha permitido definir sus valores.

La lógica difusa desde sus inicios en la década de los 60 ha ampliado los horizontes de aplicación. Originalmente se hizo para resolver problemas de lenguaje, ha pasado a ser una poderosa herramienta de control. El tener una estructura que reside en nuestro lenguaje puede ser aplicado siempre que podamos definir unas variables lingüísticas con sus valores y funciones de pertenencia.

Todos los cálculos fueron realizados con la herramienta de Matlab y su kit tool box de lógica difusa, ya realizado el programa podemos evaluar proyectos existentes y por lo tanto podemos ver si realmente es viable el proyecto. Con este método se abre camino a la toma de decisiones y evaluación de futuros proyectos fotovoltaicos.

En la figura 1.1 se presenta el planteamiento de la investigación que llevaremos a cabo.

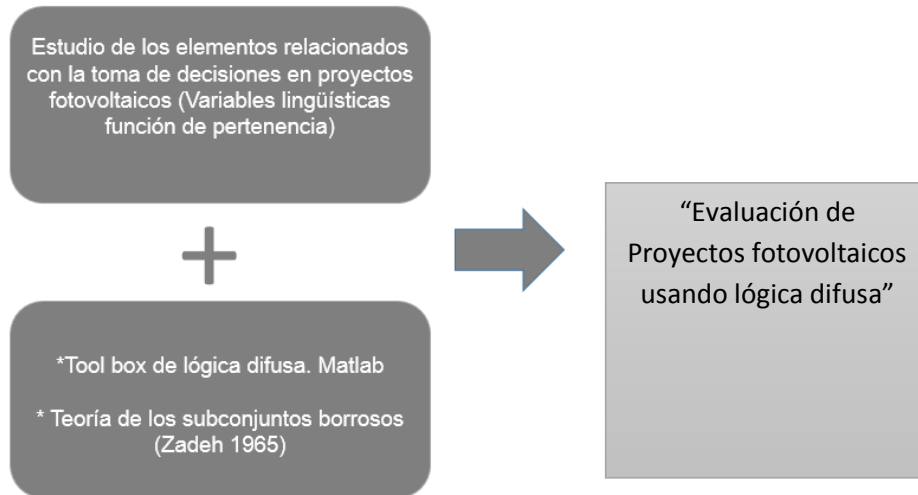


Figura 1.1 Planteamiento de la investigación (Elaboración propia 2016)

En los últimos años, la política energética ha resultado ser un tema prioritario dentro del panorama estratégico mundial. La infraestructura energética de muchos países se basa en el consumo masivo de combustibles fósiles no renovables, cuyo agotamiento obliga a la búsqueda de alternativas energéticas. Son muchos los factores que contribuyen a que el mosaico de producción de energías primarias en el mundo vaya cambiando. Entre los más importantes están: la degradación del medio ambiente por el cambio climático, accidentes nucleares, la escasez de las fuentes tradicionales de energía y el desarrollo científico alcanzado por todos los países. Influenciado por este entorno se espera para el año 2050 que el 20% de las energías primarias provengan de la energía solar eléctrica y que para el 2100 se alcance un 70%, lógicamente combinadas con otras fuentes tradicionales y renovables (WBGU's World Energy Vision 2003). En el 2015 estas cifras están completamente revertidas, las principales fuentes de energía primaria son el carbón, el gas y el petróleo.

1.2 Objetivo.

Crear un controlador experto para la toma de decisiones de inversión en proyectos fotovoltaicos, usando la aplicación de toolbox fuzzy de Matlab.

1.3 Objetivos específicos

- Explorar las variables lingüísticas que pueden ser útiles al evaluar un proyecto fotovoltaico.
- Desarrollar a partir de los estudios planteados, una nueva aplicación y modelos de gestión que auxilien a los empresarios o gobierno, en la toma de decisiones en ambientes de incertidumbre mediante el uso de esta metodología.
- Mostrar la utilidad de este controlador difuso para saber si es viable un proyecto fotovoltaico.
- Validación del modelo con proyectos reales.

1.4 Justificación

Frente a los cambios que estamos viviendo es fundamental encontrar modelos que ayuden a los empresarios o gobiernos en la toma de decisiones principalmente en un ambiente de incertidumbre. Los programas que realizan tareas similares son muy complejos y utilizan modelos matemáticos muy confusos y este algoritmo hace uso términos más familiares, más cercanos a los seres humanos, sin disminuir la exactitud de los resultados. En nuestra investigación realizaremos el algoritmo en un ambiente del kit tool box de lógica difusa de Matlab. Para hacer este algoritmo se estudiaron las variables de entrada fundamentales que influyen en la toma de decisiones.

1.5 Hipótesis

Mediante el uso de un sistema experto basado en la lógica difusa es posible obtener un indicador de inversión confiable.

CAPITULO 2 – Marco de Aplicación.

2.1 Introducción

En este capítulo presentaremos el marco teórico sobre el tema de investigación, detallando las energías renovables, antecedentes de energía, nuestro objetivo se concentra en el desarrollo de un controlador difuso para la toma de decisiones en proyectos fotovoltaicos.

En primer lugar trataremos de profundizar sobre el tema de la lógica difusa o Fuzzy logic con aportaciones sobre antecedentes, conceptos, teorías y estudios científicos relacionados con la toma de decisiones mediante lógica difusa. Para alcanzar este objetivo empezaremos nuestra investigación analizando los acontecimientos relacionados con la lógica difusa.

A continuación, pretendemos dar una idea de cómo ha ido evolucionando la lógica difusa, es este caso destacaremos la toma de decisiones en proyectos de energía Solar.

Enseguida, investigaremos las variables lingüísticas que intervienen para caracterizar o evaluar al sistema de forma difusa, temas como; radiación solar, costo de la tecnología, operación y mantenimiento, precio del terreno, precio del petróleo.

Posteriormente, nos centraremos en desarrollar el controlador difuso para la toma de decisiones en sistemas fotovoltaicos, con el Tool box de lógica difusa de Matlab. Con este controlador sabremos si es viable el desarrollo de un determinado proyecto fotovoltaico.

Finalmente, nos centraremos en la validación del modelo con un proyecto real. A partir de este análisis podemos contribuir con una pequeña aportación al conocimiento científico en esta área.

2.2 Energías renovables

La humanidad desde sus orígenes ha utilizado la energía. El sol es la fuente de energía primordial que le brinda al hombre, a la naturaleza en general luz y calor que son fundamentales para la existencia de la vida en este planeta. En sus inicios, el hombre primitivo usó las bestias para hacer trabajos de carga y como transporte, combatió el frío cuando descubrió el fuego, a base de leña, que continuó utilizando para la cocción de alimentos, luego para la fundición de metales para la creación de utensilios y armas. Más adelante descubrió el carbón. También utilizó la fuerza del viento para navegar por los mares y para después pasar a otras formas de energía.

Entre más se ha ido desarrollando y evolucionando la humanidad, más consumo de energía necesita, lo cual actualmente es un problema ya que la generación de energía a nivel mundial es insuficiente.

La solución de este problema es complicada. Los investigadores y científicos buscan medidas alternativas a las formas de generación de energía que se vienen usando y que sean más amigables con el ambiente y no se agoten en el corto plazo como lo que ocurre con las principales fuentes de energía que hoy se utilizan, como son principalmente los combustibles fósiles y la energía nuclear.

2.3 La energía a nivel mundial

Las preocupaciones de que los suministros serán agotados en el corto y medio plazo, probablemente, han sido exageradas, cada vez se continúan descubriendo nuevas reservas de petróleo y la aplicación de nuevas tecnologías de exploración se están utilizando. Sin embargo, no es menos cierto que las reservas de combustibles fósiles son finitas en última instancia. A largo plazo que se agoten y los sustitutos se necesitan con urgencia.

En la figura 2.1 El Consejo Asesor Alemán sobre el Cambio climático, denota el consumo de energía y que tipo de tecnología se utilizará para satisfacer la demanda de los próximos años. Todas las reservas no renovables se reducirán y la energía que se pronostica más viable es la energía solar.

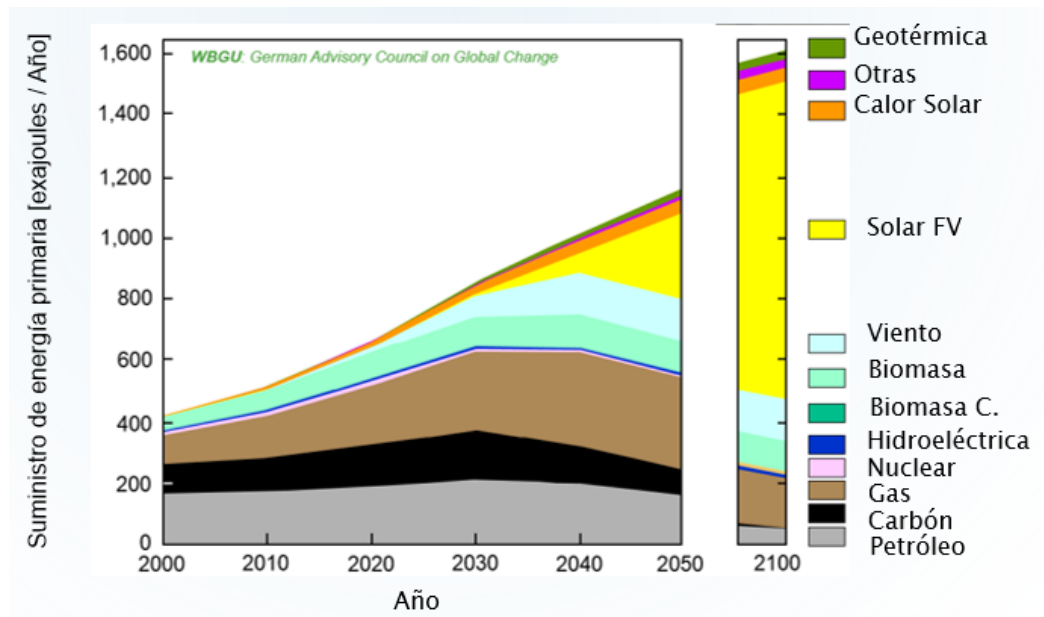


Figura 2.1. Escenario energético 2050 - 2100 (WBGU 2003)

En el 2012 la producción mundial de energía primaria totalizó 13,611.81 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MMtep) ó 5.6359×10^{20} J. El consumo mundial de energía creció 0.7% en el 2012, al totalizar 8,978.86 MMtep (3.759269×10^{20} J.). En el 2012 los países con mayor consumo energético fueron China con 19.0% y Estados Unidos con 16.0% del total. Por su parte, India, Rusia y Japón representaron el 5.7%, 5.1% y 3.4% respetivamente. Estos 5 países en conjunto consumieron 49.2% de la energía a nivel global el 47.0% del PIB mundial durante 2012. Por sus parte México ocupó el décimo sexto lugar en el consumo de energía, lo cual presentó 1.3% del total del 2012. En la figura 2.1 se muestra que, los principales energéticos que se consumen son los de origen fósil, teniendo en total el 66.1% entre el petróleo y sus derivados, el gas natural y el carbón. También se observa el

consumo por sectores, siendo el principal a nivel mundial el sector industrial con 2,540.76 MMtpe (1.0637 x10²⁰J.) con el 28.6% del total, seguido por el sector de transporte con 2,506.06 MMtpe (1.0496 x10²⁰J.), representando el 27.8% y el residencial con 2,076.06 MMtpe (8.6920 x10²⁰J.) constituyendo el 23.2% ¹

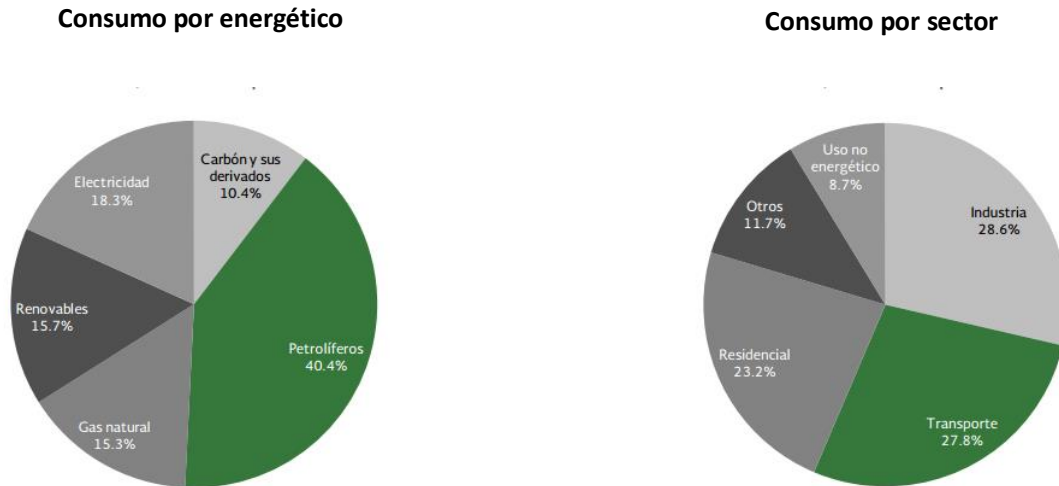


Figura 2.2. Consumo mundial de energía en 2013 (Secretaría de energía 2014).

La figura 2.2 denota la producción y el consumo de energía a través de los años en México. Cada año es menor la producción de energía, debido a la disminución en la extracción de petróleo y combustibles fósiles; y el conjunto es mayor porque se ha incrementado la población y el modo de vida que tenemos actualmente, el cual demanda más energía que en años anteriores.

¹La Tonelada equivalente de petróleo (tep, en inglés toe) es una unidad de energía. Su valor equivale a la energía que rinde una tonelada de petróleo, la cual, como varía según la composición química de este, se ha tomado un valor convencional de: 41 868 000 000 J. = 11 630 kWh

Es una de las unidades grandes de energía. Sirve también de parámetro (comparación) de los niveles de emisión de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera que se genera al quemar diversos combustibles.

2.4 La Energía Solar en México

México se encuentra entre los países con mayor potencial en materia solar ya que es de los 5 países que recibe mayor energía de este tipo en el mundo. Como se observa en la figura 2.3, Los cinco líderes naturales de este tipo de energía son: China, Singapur, México, Australia e India. Lo anterior debido a que el país forma parte del “cinturón solar” con una radiación mayor a 5 kWh por m² al día. Asimismo, México cuenta con la base manufacturera de módulos fotovoltaicos más grande de América Latina. (Promexico 2012)

Los países que se encuentran en la latitud ± 35 con respecto al Ecuador son conocidos como el cinturón solar debido a que tienen los niveles más altos de radiación solar al año del planeta. El total de países que lo conforman son 148. En la figura 2.4 se observa que México se encuentra dentro del cinturón solar.

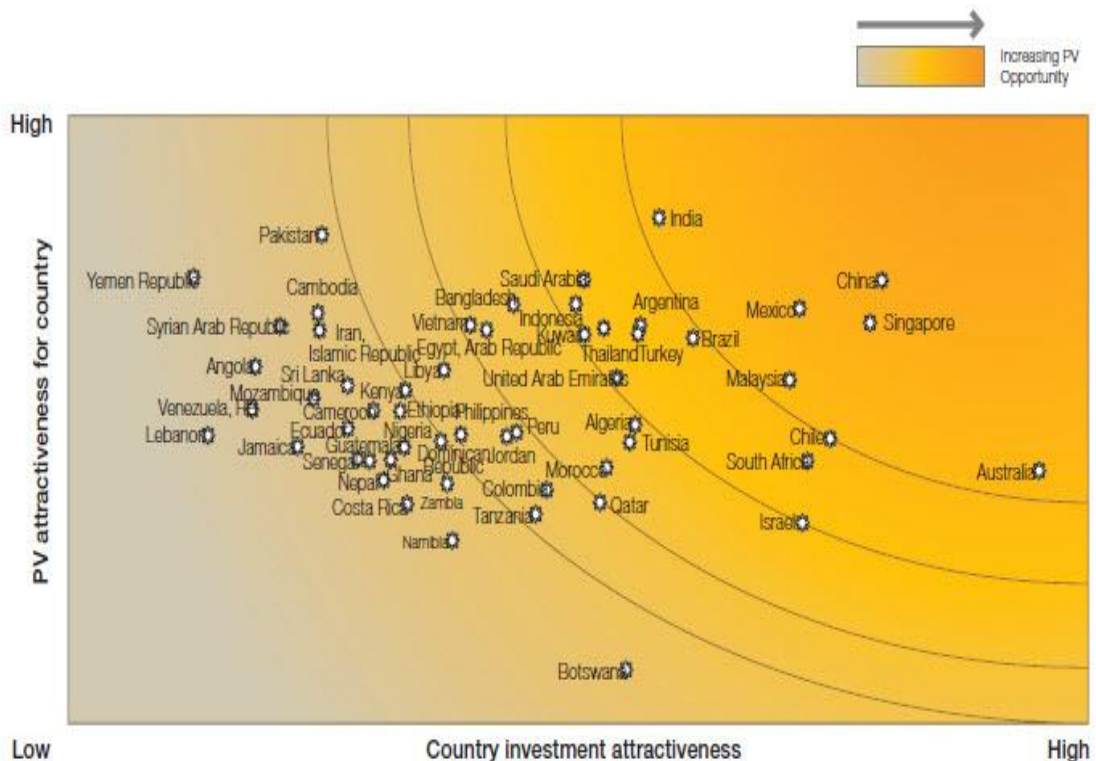


Figura 2.3. Índice de atracción por país. (European Photovoltaic Industry Association EPIA)

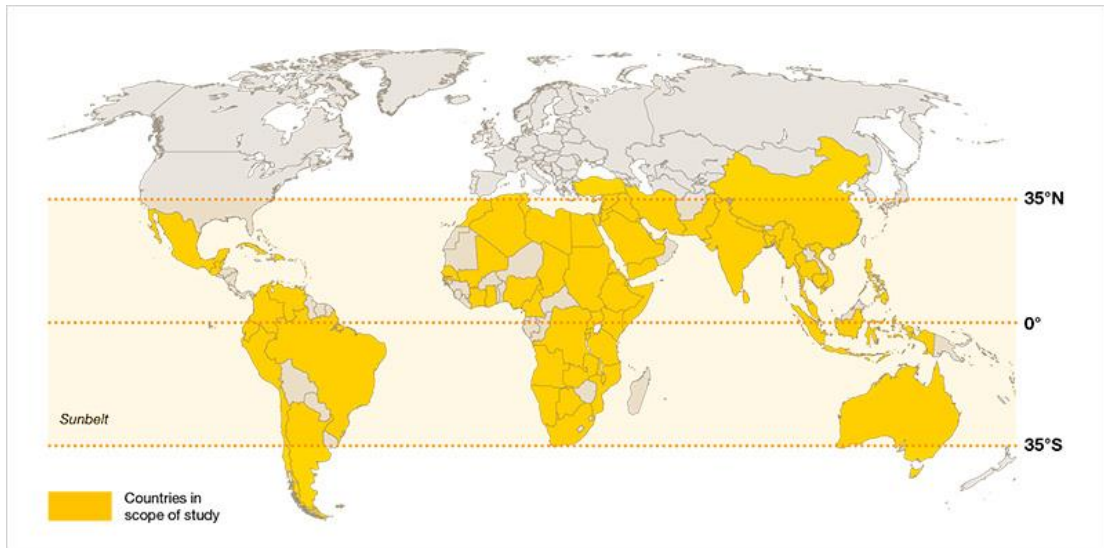


Figura 2.4 Cinturón solar (Aura solar)

México cuenta con una capacidad instalada de 36.8 MW en proyectos solares fotovoltaicos, principalmente en aplicaciones de electrificación rural e industrial. Actualmente, se encuentran en construcción diferentes proyectos, que tendrán una capacidad instalada total de 141.66 MW.

2.4.1 Instrumentos para promover la inversión en México.

México cuenta con una excelente ubicación geográfica y extenso potencial de recursos renovables, por lo que resulta atractivo para la inversión extranjera. Para incentivar la participación privada en la generación de energía eléctrica con fuentes renovables, diferentes instituciones como la CRE, la CFE y la SENER, otorgan los siguientes incentivos (Promexico 2012)

Banco de energía: permite la acumulación de excedentes de energía a los productores bajo el esquema de autoabastecimiento para ser utilizados en el futuro o ser vendidos a la CFE.

Tarifa preferencial para la transmisión de energía: cargo por servicio de transmisión para ER o cogeneración eficiente de \$0.14 pesos/kWh, en lugar de \$0.30 \$0.40 pesos/kWh que es la tarifa de transmisión que se cobra por energía basada en fuentes tradicionales.

Medición neta (Net Metering): se aplica a proyectos de pequeña escala (hasta 10kWp para hogares y 30 kWp para empresas). Consiste en compensar el costo de la electricidad utilizada con la energía aportada a la red nacional.

Metodología de contraprestaciones para el pago a los generadores de ER: establece los precios máximos y mínimos con los que el suministrador (CFE) podrá adjudicar los contratos de generación de electricidad en los esquemas de pequeño productor y productor independiente, así como también la contraprestación (remuneración) que les pagará a las empresas ganadoras. Esto permitirá transparentar el proceso y ofrecer certidumbre y una utilidad razonable a los interesados en generar electricidad con fuentes renovables. (Promexico 2012)

2.4.2 Marco Legal

Con el objetivo de promover la inversión en ER, México ha trabajado en la creación y modificación de leyes que permitan incentivar su uso y disminuir la dependencia energética relacionada con los combustibles fósiles. En la Estrategia Nacional de Energía, se establece una meta de 35% de capacidad para generación eléctrica con tecnologías limpias para el año 2024 (Energías renovables unidad de inteligencia de negocio 2012).

2.4.3 Modalidad para la generación de energía eléctrica.

En diciembre de 1992, la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica fue modificada para permitir la participación privada en la generación de energía eléctrica, entre las que se encuentran las siguientes modalidades:

Autoabastecimiento: Generación de energía eléctrica destinada al autoconsumo de personas físicas y morales.

Producción independiente de energía: generación de energía eléctrica en centrales con capacidad mayor a los 30 MW, para su venta a la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Pequeña producción: personas físicas y morales que destinen el total de la energía generada para su venta a la CFE (la capacidad del proyecto no deberá ser mayor a 30 MW); el autoabastecimiento de comunidades rurales donde no exista servicio de energía eléctrica (los proyectos no excederán de 1 MW); y la exportación (proyectos con un límite máximo de 30 MW).

Importación y exportación: la exportación de energía eléctrica es viable a través de proyectos de cogeneración, producción independiente y pequeña producción. Si los permisionarios desean utilizar o vender energía eléctrica dentro del país deberán obtener un permiso de la CRE de acuerdo a la modalidad de la que se trate. (Energías renovables unidad de inteligencia de negocio 2012).

2.5 Programas federales

Para apoyar el desarrollo de energías alternativas, se cuenta con:

2.5.1 Fondos.

Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía: tiene como objetivo impulsar el sector energético del país mediante proyectos, programas y acciones que promuevan el desarrollo de las ER y la eficiencia energética para reducir el incremento en las emisiones de GEI. (Informe cero 2009 - 2015).

Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética SENER-Conacyt: impulsa la investigación científica aplicada y desarrollo tecnológico para impulsar las fuentes renovables de energía y la eficiencia energética. (CONACYT – SENER 2014).

2.5.2 Incentivos fiscales.

Arancel cero: exenta del pago de impuesto general de importación o de exportación a equipos anticontaminantes y sus partes: maquinaria, equipo, instrumentos, materiales, animales, plantas y demás artículos para investigación y desarrollo tecnológico. (OCDE (2013)).

Depreciación acelerada de activos fijos: permite la depreciación del 100% de las inversiones en equipo y maquinaria para la generación de energía a través de fuentes renovables. (OCDE (2013)).

2.5.3 Financiamiento.

Nacional Financiera, S.N.C. (NAFIN) se encarga de financiar el desarrollo de proyectos de ER a través del fondeo con recursos de organismos

internacionales, financiamiento con emisión de capital y colocación de deuda para proyectos en construcción o en operación. (Nacional Financiera 2013).

Banco Nacional de Obras y Servicios, S.N.C. (BANOBRAS): Banco de Desarrollo que trabaja con el sector público y privado a través del financiamiento de proyectos de infraestructura y servicios públicos de los gobiernos locales, apoya su fortalecimiento financiero e institucional e promueve la inversión y financiamiento privado. (BANOBRAS 2016).

Banco Nacional de Comercio Exterior (Bancomext) cuenta con fondeo externo para proyectos sustentables a largo plazo que incluyen proyectos de generación de ER, protección y mejora ambiental y Mecanismos de Desarrollo Limpio. (BANCOMEXT 2015).

Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) financia la instalación de tecnologías de ER y eficiencia energética utilizadas en para agronegocios de áreas rurales. (FIRCO 2015).

Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE): Financiamiento a proyectos de generación y cogeneración de energía eléctrica hasta de 500 KW, para la adquisición e instalación de equipos y sistemas, con el uso de fuentes de ER. (FIDE 2012).

2.5.4 Programas

Servicios Integrales de Energía (SIE) para Pequeñas Comunidades Rurales en México: proyecto de electrificación rural que tiene como objetivo proveer de servicio eléctrico a aquellas comunidades aisladas de la energía eléctrica y suministrarlas con fuentes renovables. Este programa tiene como meta beneficiar a 50,000 viviendas (aproximadamente 250,000 habitantes) en un período de ejecución de cinco años. (SENER 2015).

Programa de fomento de sistemas fotovoltaicos en México (Prosolar): programa que pretende impulsar en el corto y mediano plazo la tecnología

solar fotovoltaica y garantizar el crecimiento del mercado con calidad. Esto a través de cuatro líneas de acción: 1) marco regulatorio y normativo adecuado, 2) financiamiento, 3) capacitación; e 4) información y difusión. (SENER 2012).

CAPITULO 3.- LA HISTORIA Y FUNDAMENTOS DE LA LOGICA DIFUSA

3.1 Definiciones e Historia

Las ideas básicas de la lógica difusa se encontraron en Aristóteles hace 2500 años al considerar que existían grados de veracidad y falsedad.

El término difuso aplicado a la La lógica Difusa (Fuzzy) fue originalmente expuesta por el Dr. Lofti Zadeh en 1965 catedrático de la universidad de Berkeley California (L.A. Zadeh 1965).

A partir de la publicación del artículo fuzzy sets en la revista *information and Control*. Esta teoría ha sido aplicada en el ámbito de las ciencias formales, pero en los últimos 50 años, investigadores del todo el mundo han publicado muchos trabajos y estudios con aplicaciones a diferentes ámbitos. La disciplina a la que se hace mención proporciona por sí misma, un medio apropiado para efectuar procesamiento de información. En un primer nivel, la lógica difusa puede ser vista como un lenguaje que nos permite traducir sentencias sofisticadas del lenguaje natural en un formalismo matemático. Las propiedades de los conjuntos difusos se describen dentro de un tipo de objetivos con un grado de membresía, o grado de pertenencia continuo en el intervalo $[0,1]$. Esta idea va en contravía con la teoría clásica de conjuntos, en la que los objetos sólo tienen una grado de pertenencia (Función característica), que toman sólo el valor binario $\{0, 1\}$. A cada objeto x en un conjunto difuso X se le asigna un grado de pertenencia, cuya función usualmente se denota por $\mu(x)$. [Zadeh, 1965]. Los criterios individuales de enfoques tradicionales en la toma de decisiones no pueden manejar la complejidad de los sistemas actuales.

La lógica difusa proporciona una herramienta flexible que es capaz de manejar y reunir a una amplia gama de variables evaluadas de manera diferente y por

lo tanto ofrecer una valiosa ayuda para el tomador de decisiones al señalar el problema. Como lo demuestra este trabajo.

En los últimos años con el surgimiento de la globalización, el mundo es testigo de un fuerte aumento en el consumo de energía, los modelos energéticos y la planificación de la energía es de gran importancia para una futura prosperidad económica y la seguridad ambiental. Esta técnica de computación flexible como la lógica difusa está siendo adoptada en el modelado de energía para determinar con precisión un proyecto energético, ya que con esta técnica proporciona estimaciones reales de un proyecto fotovoltaico.

De acuerdo con una proyección en el 2011 por la AIE, generadores de energía solar pueden producir la mayor parte de la electricidad del mundo en los próximos 50 años. Los cambios tecnológicos, la producción en masa y la competencia en el mercado, a través de estos cambios esta tecnología se ha hecho más barata.

Se requiere una planificación adecuada a nivel mundial, nacional, y regional. Todas preguntas que puede responder un especialista. Pero el alcalde de un pequeño poblado en la sierra, puede tomar una decisión aproximadamente justa si debe decidir sobre estas cosas. Es por este motivo que el desarrollo de software basado en expertos, que permitan tomar decisiones uniformes en condiciones diferentes, es muy importante. Se han realizado muchas investigaciones (para desarrollar sofisticadas herramientas que pueden analizar y suministrar soluciones muy exactas sobre inversiones y proyectos (ver tabla 3.1) Sin embargo su talón de Aquiles está en que algunas de las informaciones que reciben como datos están caracterizadas por la incertidumbre la vaguedad y la aproximación. (D. Seuret 2016)

Los proyectos para la generación de energía en los países en desarrollo han demostrado que la energía renovable puede contribuir directamente al alivio de la pobreza, así como proporcionar oportunidades de negocio y empleo.

A través de los años se han desarrollado múltiples acontecimientos relevantes con conjuntos difusos y lógica difusa. desde sus orígenes para resolver un sistema para la descripción de un lenguaje “Fuzzy Sets” (Zadeh 1965), hasta poder controlar un motor de vapor (Mamdani, et al 1974), control de un horno de cemento (F.L. Smith Co., Dinamarca 1980), el frenado y control del tren subterráneo de Sendai (S. Yasunobu, et al 1987). Así como hemos presenciado la aplicación de lógica difusa en aparatos electrodomésticos, también se ha presenciado esta aplicación para problemas de gestión financiera (MRG López 2001), Análisis de riesgo (W.G de Ru.J.H.P. Eloff 2006), Lógica difusa aplicada a la toma de decisiones (Brunet-D. Alfonso 2010), Selección de personal (Carlos A. Díaz-Contreras 2014).

En este proyecto se utiliza la lógica difusa para la evaluación de proyectos fotovoltaicos.

En la tabla **3.1 y 3.2** presentamos un resumen de investigaciones internacionales que han utilizado la lógica difusa principalmente en proyectos de control, toma de decisiones y en la tabla 3.2 investigaciones en proyectos de energía renovables con lógica difusa.

Año	Teoría de Conjuntos Difusos
1965	Orígenes de la Teoría de lógica difusa (Dr. Lofti Zadeh) fuzzy Sets
1971	Formalización de los fundamentos de la lógica difusa (Zadeh)
1974	Control de un motor de vapor basado en lógica difusa (Mamdani, et al)
1980	Control de un horno de cemento (F.L. Smith Co., Dinamarca)
1987	Control del Subterráneo de Sendai (S. Yasunobu, Hitachi)
1987	Fuzzy Boom de la lógica Difusa en Japón

Año	Aplicación de la lógica difusa en la toma de Decisiones
2001	Lógica difusa en las finanzas (MRG López)
2006	Análisis de riesgos (W.G. de Ru, J.H.P. Eloff)
2008	Sistemas expertos en negocios (Jang & Gulley)
2010	LD aplicada a la toma de decisiones (Brunet-D. Alfonso)
2011	Evaluación de riesgo crediticio (Baila Laurente, G.)
2012	La Gestión de indicadores empresariales con LD para la toma de decisiones (M. Darío, C. Augusto)
2013	Aplicaciones de criterios múltiples en el Análisis de Energía Renovable (Rimal Abu Taha)
2014	selección de personal (Carlos A. Díaz-Contreras)

Tabla 3.1 Acontecimientos históricos de la lógica difusa en aplicación en ingeniería de control, en la toma de decisiones. Elaboración propia (2016)

Tabla 3.2 Investigaciones hechas con lógica difusa con aplicaciones en energía solar.

TECNICA	TEMA	AÑO	OBJETIVOS	INVESTIGADOR	LUGAR DE REALIZACION
Fuzzy expert	Conocimiento experto VS control clasico en el diseño de construccion	1995	Este documento también discute las capacidades del sistema experto lógica difusa en el logro de una gestión óptima de los recursos en los diseños de los edificios.	A.I. Dounis, Lefas	Atenas, Grecia.
Fuzzy GA	Control de lógica difusa basada en GA de una planta de energía solar que utiliza campos de colectores distribuidos	1999	El GA realiza las operaciones básicas de reproducción, para buscar la mejor base de reglas que permite optimizar el tiempo de respuesta de la planta a la entrada de la temperatura o la potencia de la demanda mediante el control del campo de colectores distribuido de la planta.	Luk et al	Hertfordshire, Reino Unido
Fuzzy clustering	Modelado difuso de la irradiación solar sobre superficies inclinadas	2003	Se propone un modelo de irradiancia solar en superficies inclinadas orientadas arbitrariamente, El modelo considera grupos superpuestos y permite una mejor descripción de las situaciones cielo cerca de la zona de transición entre las categorías contiguas.	Gomez and Casanovas	Valencia, España
Fuzzy optimization	Una optimización difusa global de la eficiencia de un sistema de bombeo de agua con energía fotovoltaica	2004	Una optimización difusa en línea de la eficiencia global del sistema de bombeo de agua por energía fotovoltaica impulsado por un motor de excitación independiente DC (DCM), un imán permanente síncrono motor (PMSM), o una inducción motor (IM), acoplado a una bomba centrífuga.	Benlarbi et al.	Laghouat, Algeria
Neuro-fuzzy, ANFIS	El desarrollo de un sistema multi propósito sol seguimiento mediante el control difuso	2005	El diseño y simulación de sistemas de seguimiento del sol, controlada en tiempo, que incluyen: un sol eje de seguimiento con la abertura inclinada igual al ángulo de latitud ecuatorial seguimiento al sol en dos ejes y seguimiento del sol acimut / elevación.	Alata et al.	Irbid, Jordania
Neuro-fuzzy, ANFIS	técnicas de inteligencia artificial aplicadas a la estimación de la irradiancia global de cada hora de índice de la nube procedente de satélites	2005	Se utilizaron tanto los datos de imágenes de satélite y terrestre de información a partir de los años 1994, 1995 y 1996. Los resultados de estos modelos de inteligencia artificial se compararon con una regresión multivariable basado en modelo HELIOSAT I. Se observó un mejor comportamiento general de los modelos de inteligencia artificial.	Luis F. Zarzalejo	Madrid, España

Neuro-fuzzy, ANFIS	Estudio de previsión de la radiación solar por hora y día usando redes neuronales recurrentes de ondas pequeñas diagonales	2008	Se requiere un pronóstico preciso de la irradiación solar para diversas aplicaciones de energía solar y análisis de impacto ambiental en los últimos años. Comparativamente, varios modelos de predicción de la irradiación basados en redes neuronales artificiales (ANN) se desempeñan mucho mejor en la precisión que muchos modelos de predicción convencionales.	Cao and Lin	Shanghai , China
Neuro-fuzzy, ANFIS	Modelo dinámico neuro-difuso con filtro de Kalman para predecir la irradiancia y la temperatura para sistemas de energía solar	2008	Una previsión dinámica de irradiancia y temperatura ambiente. La previsión a medio plazo (MTF) da un comportamiento meteorológico diario. Se compone de un estimador de neuro-difuso basado en los comportamientos de los parámetros meteorológicos, los resultados obtenidos pueden ser fácilmente adaptados para prever cualquier salida del sistema de conversión de energía solar.	Chaabene and Ammar	Sfax, Tunes
Neuro-fuzzy, ANFIS	Metodología para la predicción de secuencias de índice de claridad media mensual y datos de radiación solar diaria en áreas remotas: Aplicación para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo	2008	Un sistema de inferencia neuro-difuso modelo adaptativo adecuado (ANFIS) se presenta para la estimación de las secuencias de índice de claridad media mensual y los datos totales de radiación solar en sitios aislados basados en coordenadas geográficas. La magnitud de la radiación solar es el parámetro más importante para el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos .	Mellit et al.	Madrid, España
Fuzzy MCDM	Algoritmo multicriterio difuso para la gestión de la energía en un panel fotovoltaico.	2008	Se presenta un algoritmo que hace borrosa la decisión con el fin de conectar un aparato doméstico en cualquiera de la red eléctrica o de un panel fotovoltaico (PVP). La decisión se toma en tiempo real con respecto a varios criterios de ahorro de energía y sobre los PVP máximos estados de energía y aparatos disponibles	Salah et al.	Sfax, Tunes
Neuro-fuzzy, ANFI	Coordenadas polares basada control del punto de máxima potencia en tiempo real con un controlador difuso de un sistema fotovoltaico	2009	Se presenta una nueva técnica de simulación en tiempo real del sistema de generación fotovoltaica mediante el uso de sistema de interfaz en tiempo real dSPACE. El sistema propuesto incluye red neuronal artificial (ANN) y el esquema de controlador de lógica difusa utilizando información polar. Este tipo de reglas de lógica difusa para el funcionamiento del módulo PV en el punto de funcionamiento óptimo.	Syafaruddin et al.	Bornova, Provincia de Esmima, Turquía
Fuzzy regression	Predicción de la irradiancia solar global basado en el análisis de series de tiempo: Aplicación a las centrales térmicas planificación de la producción de energía solar	2010	El mejor método para predecir valores media diarias de la radiación solar es modelos de redes neuronales con componente perdido como entrada, a excepción de la estación de Lérida, donde los modelos basados en índice de claridad tienen menos incertidumbre porque esta magnitud tiene un comportamiento lineal y es más fácil para simular por modelos.	Martin et al.	Tres cantos, España
Neuro-fuzzy, ANFIS	Múltiples modelos basados MPPT neuro-difusa para instalación fotovoltaica conectada a la red trifásica	2010	Se presenta una nueva metodología para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) de un sistema conectado a la red, utilizando la red neuro-difusa. El método propuesto predice el PV de referencia garantizando tensión de transferencia de potencia óptima entre el generador fotovoltaico y la red principal de la utilidad.	Chaouachi et al.	Tokio, Japón
Fuzzy TOPSIS	enfoque fuzzy para la evaluación de almacenamiento de energía térmica en sistemas de energía solar concentrada (CSP)	2010	Es posible concebir un sistema de almacenamiento y es posible ampliar la producción de calor más allá de las horas de pleno sol. Con este trabajo es de proponer y poner a prueba la validez y eficacia del método multicriterio difuso	Cavallaro	Campobasso, Italia
Fuzzy PSO	Suministro de energía mediante un controlador difuso para un sistema fotovoltaico independiente a la red.	2010	El desarrollo de un sistema fotovoltaico, optimizado con lógica difusa (PV) controlador de despacho de energía usando un algoritmo de inteligencia, El sistema fotovoltaico en cuenta es independiente de la red y se compone de un controlador de lógica difusa (FLC), generadores fotovoltaicos, baterías de almacenamiento,	Weich and Venayagamoorth y	Missouri, USA

TECNICA	TEMA	AÑO	OBJETIVOS	INVESTIGADOR	LUGAR DE REALIZACION
Neuro-fuzzy, ANFIS	El modelado basado en ANFIS para el sistema de suministro de energía fotovoltaica	2011	Debido a los diversos cambios estacionales, mensuales y diarias de datos meteorológicos, es relativamente difícil encontrar un modelo adecuado para el sistema de suministro de energía fotovoltaica (PVPS). El modelado y simulación de un sistema utilizando un esquema adaptativo Neuro-Fuzzy Inferencia y la proposición de un nuevo sistema de configuración experto.	Adel Mellit	Limassol , Cyprus
Neuro-fuzzy, ANFIS	Comparación de la lógica difusa y redes neuronales en el máximo seguidor del punto de energía para los sistemas fotovoltaicos	2011	Se propone dos métodos de seguimiento del punto de máxima potencia utilizando una lógica difusa y unos controladores de redes neuronales para instalaciones fotovoltaicas.	Salah and Ouali	Sfax, Tunes
Neuro-Fuzzy DEA	Un enfoque flexible de la red neuronal difusa análisis envolvente de datos para la optimización de la ubicación de las plantas solares con la incertidumbre y la complejidad	2011	Se presenta un enfoque neuro-difuso flexible para la optimización de la ubicación de las plantas solares con posible complejidad e incertidumbre. El enfoque flexible se compone de la red neuronal artificial (ANN) y el análisis envolvente de datos difusos (DFE). Se aplica el enfoque inteligente de este estudio para la optimización de la ubicación de las plantas solares en Irán.	Azadeh et al	Tehran, Iran
Fuzzy MCDM	Análisis de sitio PV basado en evaluación difusa espacial multicriterio	2012	Se presenta algunos resultados preliminares de un estudio de investigación realizado en la evaluación de los recursos de energía solar en Omán. Se utilizó basado en SIG multicriterio espacial enfoque de evaluación	Charabi an Gastil	Mascate, Oman
Neuro-fuzzy, ANFIS	el pronóstico la radiación solar sobre la base de la lógica difusa y redes neuronales	2013	Se presenta una técnica de el pronóstico la radiación solar basado en redes neuronales difusas y, cuyo objetivo es lograr una buena precisión en diferentes condiciones climáticas. La precisión de la radiación solar pronosticada afectará a la el pronóstico potencia de salida de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red, que es importante para el funcionamiento y la planificación del sistema de potencia.	Chen et al.	Nanyang, Singapur
Neuro-fuzzy, ANFIS	Modelo y el diseño de un controlador de seguimiento de Hopfield NN basada en fuzzy para aplicaciones fotovoltaicas autónomas	2014	El aprovechamiento de la energía de la abundancia, la luz solar libre es actualmente un tema candente en la comunidad investigadora. La disponibilidad de módulos solares de bajo costo ha hecho posible la obtención de energía solar en una mayor eficiencia. Los módulos fotovoltaicos (PV) tienen características no lineales, y por lo tanto, el proceso de adaptación de impedancia es obligatorio.	Arulmurugan and Suthanthiravanitha	Tamil Nadu, India
Fuzzy GA	Modelar la radiación solar de la región del Mediterráneo en Turquía mediante el uso de algoritmos difusos genéticos	2014	El estudio investiga la capacidad de enfoque de FG (fuzzy genética) en el modelado de la radiación solar de siete ciudades de la región mediterránea de Anatolia, Turquía. Latitud, longitud, altitud y mes de los datos del año	Kisi	Samsun, Turquía
Fuzzy GA	rastreadores inteligentes punto de máxima potencia para aplicaciones fotovoltaicas utilizando chip FPGA: Un estudio comparativo Samsun.	2014	Varios métodos inteligentes (IMS) utilizados en el seguimiento del punto de máxima potencia y su posible aplicación en una matriz de puertas programables de campo plataforma reconfigurable (FPGA)	F. Chekired	Algiers, Algeria
Fuzzy PSO	Parques fotovoltaicos inteligentes para la estabilización de la frecuencia robusta en el sistema de interconexión de múltiples área de control basado en lógica basada en PSO óptima Sugeno difusa	2015	En la actualidad, los grandes parques fotovoltaicos conectados a la red están instalados extensamente en sistemas de potencia. Sin embargo, además del cambio de carga, la potencia de salida intermitente de parques fotovoltaicos puede dar lugar al grave problema de la fluctuación de la frecuencia del sistema	Wu et al.	Bangkok, Thailandia
Fuzzy MCDM	Lógica Difusa para la evaluación de Proyectos de Energía Renovable.	2016	Variables lingüísticas con sus valores y funciones de pertenencia con el apoyo de un experto definir las reglas que nos permitirán obtener un resultado. (costo de materia prima, costo dela tecnología, energía almacenada, y como variable de salida interés en la inversión).	D. Seuret et al.	Cuernavaca, Mor.

Tabla 3.2 Fuente: Elaboración propia a partir de artículos científicos electrónicos

2016

3.1.1. Sistemas Experto (SE)

Los sistemas expertos son programas computacionales (software) diseñados para tener disponibles las habilidades de los expertos a los no expertos. Estos programas tratan de emular los patrones de razonamiento del experto humano en la solución de un problema en un campo determinado. Utilizando los conocimientos mediante deducción lógica de conclusiones. Con esto se busca una mejora en la calidad y rapidez de respuestas dando así lugar a una mejora de la productividad del experto.

Los sistemas expertos pueden estar basados en reglas, es decir, disponen de unos conocimientos predefinidos que se utilizan para tomar todas las decisiones (aplicando heurística), o basados en casos, donde la solución a un problema similar planteado con anterioridad se adapta a un nuevo problema.

Para los verdaderos expertos humanos supone un gran apoyo que reduce tiempo y, en ocasiones puede realizar tareas por sí mismo. Pero, para que un sistema experto sea una herramienta efectiva debe de poseer dos capacidades: por un lado debe ser posible explicar los razonamientos del sistema experto, por otro debe ser capaz de integrar nuevos conocimientos así como modificar sus conocimientos obtenidos por otros mejorados.

Podemos ver el conocimiento humano como declarativo, es decir, hechos que son guardados en la memoria y como procedimientos, habilidades para utilizar el conocimiento declarativo para algún propósito.

Existen varias formas para crear programas que actúen como sistema expertos, los primeros y más utilizados son los sistemas basados en reglas, los cuales utilizan reglas si-entonces para representar un proceso de razonamiento del experto. Algunos expertos en conocimiento, opinan que una parte significativa del razonamiento humano puede expresarse en forma de reglas. Lo que le da un interés adicional a los sistemas basados en reglas (Santoyo 2015).

3.1.2 Lógica Difusa

El concepto de lógica difusa es muy común, está asociado con la manera en que las personas perciben el medio, por ejemplo ideas relacionadas con la altura de una persona, velocidad con la que se mueve un objeto, la temperatura dominante en una habitación, cotidianamente se formulan de manera ambigua. Una persona puede ser alta o baja, algo puede moverse rápido o lento, una temperatura puede ser baja o moderada o alta, se dice que estas afirmaciones acerca de una variable son ambiguas porque rápido, bajo, alto son afirmaciones del observador, y estas pueden variar de un observador a otro. Uno se puede preguntar cuándo algo es frío o caliente, que tan baja es la temperatura cuando decimos frío, o que tan alta es cuando decimos caliente.

Los conjuntos difusos definen justamente estas ambigüedades, y son una extensión de la teoría clásica de conjuntos, donde un elemento pertenece o no a un conjunto, tal elemento tiene solo 2 posibilidades, pertenecer o no, un elemento es bi-valuado y no se definen ambigüedades. Con conjuntos difusos se intenta modelar la ambigüedad con la que se percibe una variable. Los conjuntos difusos son la base para la lógica difusa, del mismo modo que la teoría clásica de conjuntos es la base para la lógica Booleana. Con los conjuntos difusos se realizan afirmaciones lógicas del tipo si-entonces, definiéndose estas con Lógica Difusa. Este tema es propio de inteligencia artificial, donde se intenta emular en pensamiento humano.

Nuestro campo de estudio es la toma de decisiones, debemos tener en cuenta la experiencia o base de conocimiento del experto. Desde que Lotfy A. Zadeh (1965) desarrolló este concepto de lógica difusa, se ha trabajado en este tema, el principal centro de desarrollo es Japón, donde sus investigadores la han aplicado a muy diversos sistemas, principalmente electrodomésticos, sistemas más recientes están vinculados con la industria, la medicina y la actividad

espacial. Muchas publicaciones y libros se han escrito de este tema, pero aún queda mucho por explorar.

3.1.3. Lógica difusa y sistemas de control.

La incorporación de lógica difusa a los sistemas de control da lugar a lo que llamaremos sistemas de control difuso. Dentro de los sistemas de control se encuentran dos grandes áreas, el modelado o identificación y el control propiamente dicho o control directo. Nos enfocaremos en el modelo de un sistema experto en la toma de decisiones, suponiendo conocido el modelo de este.

La idea es muy simple, se trata de determinar de manera lógica que se debe hacer para lograr los objetivos, crear un controlador experto para la toma de decisiones en proyectos fotovoltaicos para saber si es viable un determinado proyecto, de mejor manera posible a partir de una base de conocimiento proporcionada por un experto en la materia de energía fotovoltaica, sin esta base no es posible desarrollar una aplicación y que esta funcione de manera correcta.

Se utiliza el conocimiento y experiencia de un experto para construir un controlador que emule el comportamiento de tal persona. Comparado con el control tradicional, el control difuso tiene dos ventajas prácticas, una es que el modelo matemático del proceso a controlar no es requerido y otra es que se obtiene un controlador no lineal desarrollado empíricamente sin complicaciones matemáticas.

En el presente trabajo se usan de manera indistinta los siguientes términos para referirse a: lógica difusa: fuzzy logic, lógica borrosa; para sistemas de control: fuzzy system, control borroso, control fuzzy; controladores con lógica difusa: fuzzy logic controllers (FLC), fuzzy inference system (FIS), controladores fuzzy, controlador borroso o difuso.

3.2 Lógica Difusa

Como se indicó anteriormente, cotidianamente nos movemos en un mundo con definiciones ambiguas, si alguien dice “está por llover” nos interesa saber en qué medida esto es cierto y en cuanto tiempo sucederá. La toma de decisión a partir de información que no específica también es un procedimiento cotidiano, esto es el que se intenta emular con lógica difusa a partir de: la observación del entorno, la formulación de reglas lógicas y de los mecanismos de toma de decisión. En la presente sección se verán los conceptos básicos de lógica difusa que se aplican en control, tales son conjuntos difusos, funciones de membresía, operaciones borrosas, reglas, inferencia, defusificación y los pasos para la toma de decisión.

3.2.1 Base teórica

Variable lingüística.

Para representar el conocimiento en razonamiento aproximado tenemos que utilizar variables lingüísticas. Una variable lingüística (L.A. Zadeh 1975) es aquella cuyo valores son palabras o sentencias en un lenguaje natural. De esta forma una variable lingüística sirve para representar cualquier elemento que sea demasiado complejo, o del cual no tengamos una definición concreta; es decir, lo que no podemos describir en términos numéricos. Una variable lingüística tiene 5 propiedades ($x, X, T(x), G, M$)

x es nombre de la variable.

X es el universo del discurso.

$T(x)$ son los valores lingüísticos que acepta la variable.

G es la regla sintáctica que genera los valores lingüísticos.

M es la regla semántica que asocia cada término lingüístico de X con su significado.

■ **Conjuntos borrosos.**- Los conjuntos clásicos, tienen limitaciones, se define un universo de discurso que contiene a conjuntos cuyos bordes están bien definidos, un elemento puede o no pertenecer a cierto conjunto, algo es verdadero o falso, no se definen situaciones intermedias. Los conjuntos borrosos son una extensión de los clásicos, donde se añade una función de pertenencia, definida ésta como un número real entre 0 y 1. Así se introduce el concepto de conjunto o subconjunto borroso y se lo asocia a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta lingüística, donde esta es el nombre del conjunto o subconjunto. Por cada conjunto se define una función de pertenencia o membresía denominada $\mu_A(x)$, indica el grado en que la variable x está incluida en el concepto representado por la etiqueta A ($0 \leq \mu_A(x) \leq 1$), si esta función toma el valor 0 significa que tal valor de x no está incluido en A y si toma el valor 1 el correspondiente valor de x está absolutamente incluido en A . En la Figura I-1 se puede apreciar un ejemplo donde el conjunto velocidad (con variable x) está subdividido en 3 subconjuntos {Baja, Meda, Alta}, con sus respectivas funciones de membresía $\{\mu_{Baja}(x) \mu_{Media}(x) \mu_{Alta}(x)\}$.

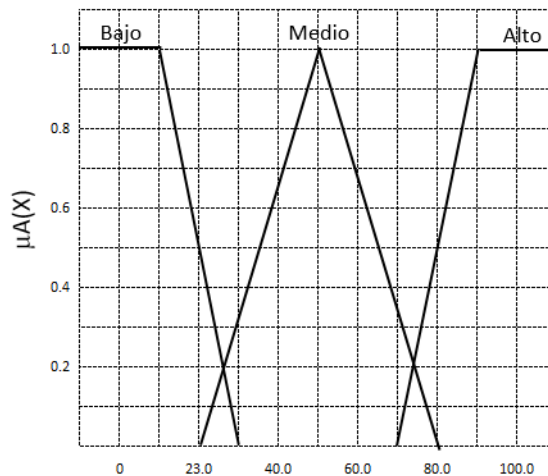



Figura 3.1. Ejemplo de subconjunto borroso.

Definición. Sea X una colección de objetos, expresados en forma genérica por x . Entonces, un conjunto difuso A en X , se define como un conjunto de pares ordenados.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\}$$

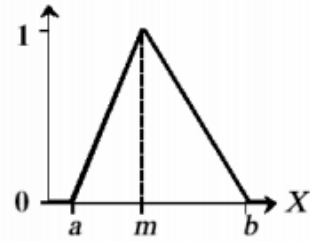
Donde $\mu_A(x)$ es una función de pertenencia cuya etiqueta es A y su dominio es x .

 **Función de membresía.**- Las funciones de membresía representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta.

Existe una gran variedad de formas para las funciones de membresía, las más comunes son del tipo trapezoidal, triangular, singleton, S.

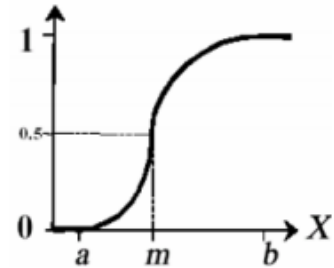
Forma Triangular

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ (x-a)/(m-a) & \text{si } x \in (a, m] \\ (b-x)/(b-m) & \text{si } x \in (m, b) \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$



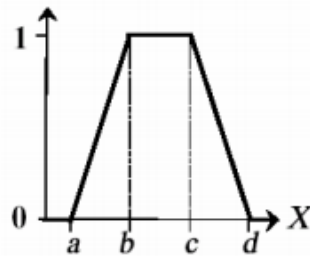
Forma S

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ 2\{(x-a)/(b-a)\}^2 & \text{si } x \in (a, m] \\ 1-2\{(x-a)/(b-a)\}^2 & \text{si } x \in (m, b) \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$



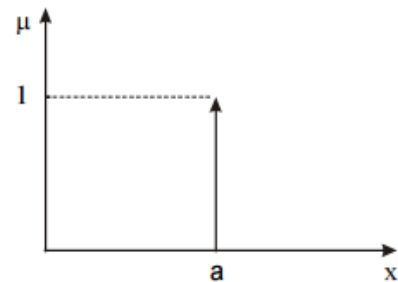
Forma Trapezoidal

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq a) \text{ o } (x \geq d) \\ (x-a)/(b-a) & \text{si } x \in (a, b] \\ 1 & \text{si } x \in (b, c) \\ (d-x)/(d-c) & \text{si } x \in (c, d) \end{cases}$$



Forma singleton

$$A(x) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases}$$



En la fig 3.2 se observa los componentes de una función de membresía

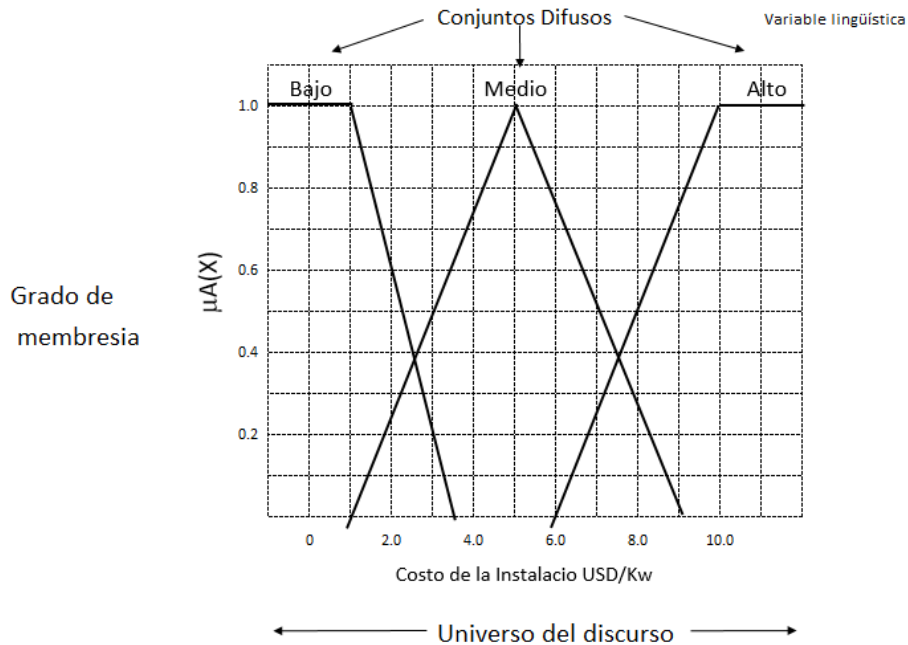


Fig. 3.2 Componentes de una función de membresía.

Operaciones Borrosas.- A los subconjuntos se les puede aplicar determinados operadores o bien se puede realizar operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto se obtendrá otro conjunto, lo mismo sucede cuando se realiza una operación entre conjuntos.

Se definen a continuación 3 operaciones básicas a realizar sobre conjuntos, estas operaciones son complemento, unión e intersección. Sean las etiquetas A y B las que identifican a dos conjuntos borrosos asociados a una variable lingüística x, las operaciones se definen como:

- Complemento $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$
- Unión. Operador lógico OR (max) $\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$
- Intersección. Operador lógico AND (min) $\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$

Ahora se muestra gráficamente en las figuras 3.3, 3.4, 3.5 cada una de las operaciones básicas en los conjuntos difusos.

Función Intersección $C = A \cap B$ si y solo si

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad \text{para } \bar{A} x \in X$$

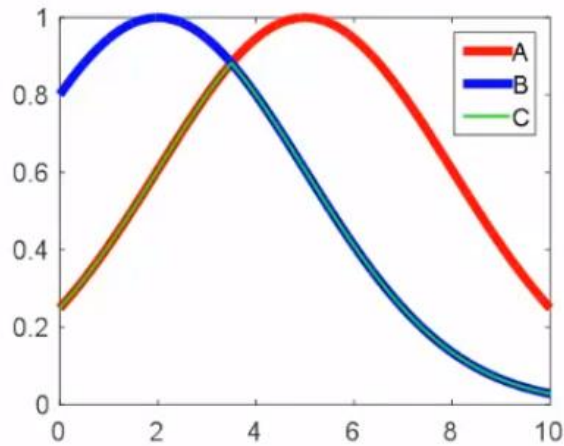


Figura 3.3. Función intersección $C = A \cap B$ (L.A. Zadeh 1965)

Función de Unión $C = \mu_{A \cup B}$ si y solo si

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad \text{para } \bar{A} x \in X$$

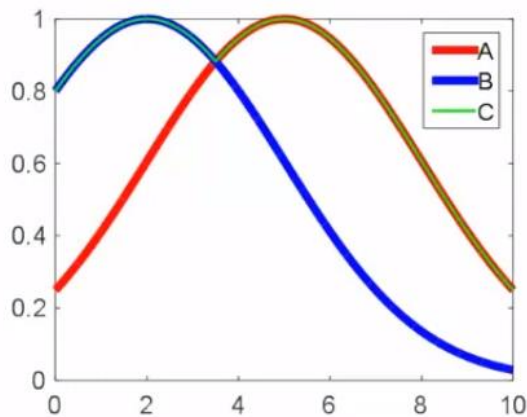


Figura 3.4 Función Unión $C = \mu A \cup \mu B$ (L.A. Zadeh 1965)

Función de complemento $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ para $\bar{A} \in X$

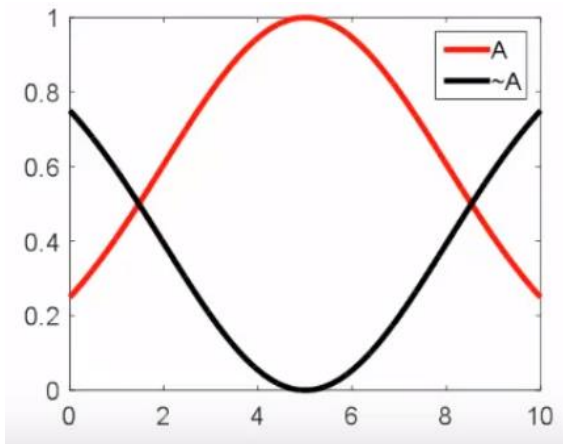


Figura 3.5 Función de complemento $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ (L.A. Zadeh 1965)

Hay muchas definiciones para las operaciones lógicas, algunas otras definiciones que normalmente también se utilizan son como las que se muestran en la figura 3.5

- Operador lógico AND del producto $\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x)$
- Operador lógico OR $\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x) + \mu_B(x), 1]$

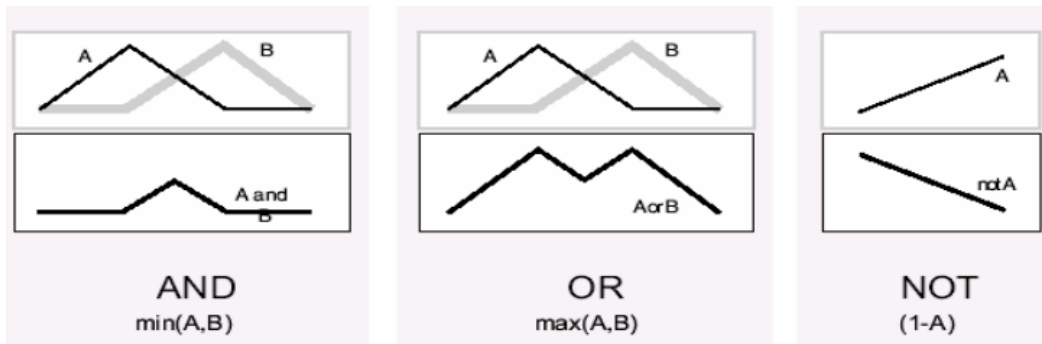


Figura 3.6 Operaciones lógicas.

+ **Reglas borrosas.**- Los controladores difusos usan reglas, estas combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada llamados antecedentes o premisas y le asocian un conjunto borroso de salida llamado consecuente o consecuencia. Involucran a conjuntos difusos, lógica difusa e inferencia difusa. A estas reglas se les llama reglas borrosas o difusas o fuzzy rules. Son afirmaciones del tipo SI-ENTONCES. Los conjuntos borrosos del antecedente se asocian mediante operaciones lógicas borrosas AND, OR, etc.

Las reglas borrosas son proposiciones que permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para expresar este conocimiento de manera completa normalmente se precisan varias reglas, que se agrupan formando lo que se conoce como base de reglas, es decir, la edición de esta base determina cual será el comportamiento del controlador difuso y es aquí donde se emula el conocimiento o experiencia del operario y la correspondiente estrategia de control.

La base de reglas suele representarse por tablas. Esta es clara en el caso de 2 variables de entrada y una de salida. En la medida que la

cantidad de variables lingüísticas crece, también lo hará la tabla, y más difícil se hará su edición.

Junto a cada regla puede estar asociado un valor entre cero y uno que pesa a tal regla, esto puede ser importante cuando una regla tiene menor fuerza que otras de la base de reglas. Existe una gran variedad de tipos de reglas, dos grandes grupos son las reglas difusas de Mamdani y las reglas difusas de Takagi-Sugeno.

La estructura de las reglas es la misma tanto para controladores como para modelos, simplemente cambiarán las variables implementadas.

3.2.2 Sistema difuso de Mamdani

Es posiblemente el método más ampliamente utilizado propuesto por Ebrahim Mamdani en 1974, En la siguiente fig. 3.7 se muestra la configuración básica de un sistema tipo Mamdani. (Mamdani 1974)

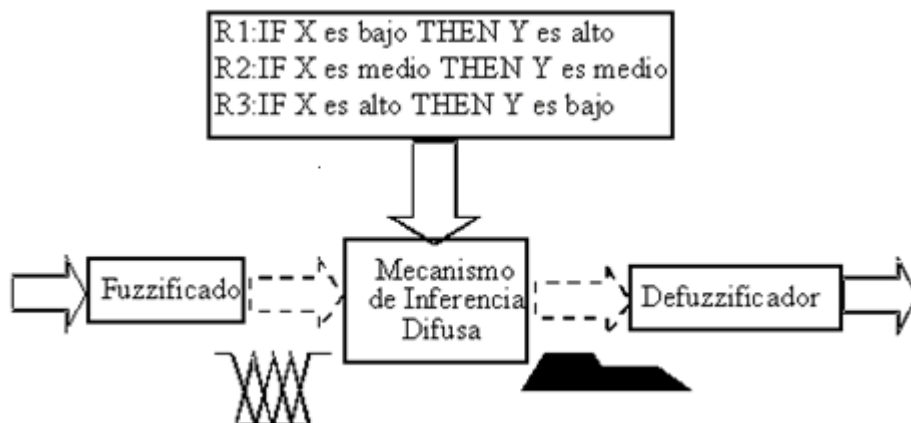


Figura 3.7 Sistema difuso Mamdani, procesamiento general. (Mamdani 1974)

Un sistema difuso tipo Mamdani se distinguen las siguientes partes.

- ✚ **Fuzzificación.-** La entrada de un sistema de lógica difusa tipo Mamdani normalmente es un valor numérico proveniente, por ejemplo de una persona experta; para que este valor pueda ser procesado por el sistema difuso se hace necesario convertirlo a un "lenguaje" que el mecanismo de inferencia pueda procesar. Esta es la función del fuzzificador, que toma los valores numéricos provenientes del exterior y los convierte en valores "difusos" que pueden ser procesados por el mecanismo de inferencia. Estos valores difusos son los niveles de pertenencia de los valores de entrada a los diferentes conjuntos difusos en los cuales se ha dividido el universo de discurso de las diferentes variables de entrada al sistema.

- ✚ **Mecanismo de Inferencia difusa.-** Teniendo los diferentes niveles de pertenencia arrojados por el fuzzificador, los mismos deben ser procesados para generar una salida difusa. La tarea del sistema de inferencia es tomar los niveles de pertenencia y apoyado en la base de reglas generar la salida del sistema difuso.

- ✚ **Base de reglas difusas.-** La base de reglas son la manera que tiene el sistema difuso de guardar el conocimiento lingüístico que le permiten resolver el problema para el cual ha sido diseñado. Estas reglas son del tipo IF-THEN.


Una regla de la base de conocimiento tiene dos partes, el antecedente y la conclusión como se observa en lo siguiente:

IF < **Antecedentes** > THEN < **Consecuente** >

El antecedente o premisa describe una condición y el consecuente describe la conclusión.

Ejemplo:

IF error **is Positivo Grande** AND **derivada del error is Positiva Baja** THEN **u is Positiva Chica**.

 **Defuzzificación.-** Es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada, pero es en términos difusos. Esta conclusión o salida difusa es obtenida por la etapa de inferencia borrosa, esta genera un conjunto borroso pero el dato de salida del sistema debe ser un número real y debe ser representativo de todo el conjunto obtenido en la etapa de agregado, es por eso que existen diferentes métodos de defuzzificación y arrojan resultados distintos, el “más común y ampliamente usado” es el centroide. Con el método de defuzzificación del centroide se transforma la salida difusa en un número real el cual es la coordenada equis (x) del centro de gravedad de tal conjunto difuso de salida.

El método centroide también es llamado centro de gravedad o método Sugeno que es el más usado.

Ecuación 1: Defusificación por centro de gravedad


$$y_d = \frac{\int_S y u_Y(y) dy}{\int_S u_Y(y) dy}$$

Donde μ_Y es la función de pertenencia del conjunto de salida Y , cuya variable de salida es y . S es el dominio o rango de integración. Este método en realidad trae una carga computacional importante, por lo que se emplean en general otros esquemas con menor carga. Uno de los defusificadores más usados es el centro de área (COA, *center of area*) también llamado de altura, el centro de gravedad es aproximado por el centro de gravedad de un arreglo de “masas puntuales”, las cuales son el centro de gravedad de cada conjunto de salida correspondiente a cada regla, con “masa” igual al grado de pertenencia en ese punto de su centro de gravedad. Si se le llama δ_l al centro de gravedad del conjunto difuso de salida B_1 de la l -ésima regla, el centro de gravedad queda determinado por

Ecuación 2. Defusificación por centro de área.

$$y_d = \frac{\sum_{l=1}^R \delta_l \mu_{B_1}(\delta_l)}{\sum_{l=1}^R \mu_{B_1}(\delta_l)}$$

Donde R es el número de reglas. El concepto del centro de gravedad es en muchos casos el punto de partida para la obtención de distintos métodos de defusificación.

 **Toma de decisión:** En la sección anterior se presentaron los conceptos básicos de un sistema de inferencia o de toma de decisión. Se verá ahora de manera resumida y en forma gráfica los pasos que son llevados a cabo para la toma de decisión en este sistema de inferencia. En forma genérica el esquema de toma de decisión es el siguiente.

3.3 Base de Conocimientos

Se ha indicado anteriormente que el controlador debe emular el comportamiento de un experto. La base de reglas es lo que representa este conocimiento o experiencia, se debe tener en cuenta que las fuentes de conocimiento pueden ser muy variadas, aquí se considerará la experiencia del experto y el conocimiento obtenido a partir de ensayos con el modelo del proceso.

La información que se extrae de las simulaciones está relacionada con el comportamiento o respuesta del sistema en lazo abierto y/o cerrado (usando algún controlador sencillo), con esta información se definen las reglas, es decir, la estrategia de control.

Es importante observar el comportamiento de las variables de entrada del controlador, una ayuda de esto es tener información de su derivada y su integral en el tiempo, en estas se puede tener idea acerca de la velocidad de cambio y el error acumulado.

CAPÍTULO 4.- CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

4.1 Introducción.

El sector de energías fotovoltaicas en México es una industria naciente, la energía solar ha crecido favorablemente en los últimos años, México se ubica entre los principales cinco países más atractivos del mundo para invertir en proyectos de energía solar fotovoltaica. (Secretaría de economía 2013)

La construcción del modelo se realiza en función de las coincidencias sobre el tema de la mayoría de los investigadores y de las experiencias propias. Esto quiere decir que es posible que otro investigador tenga experiencias distintas y por tanto algunas formulaciones pueden diferir. Esto se verá reflejado en la elección de las variables lingüísticas y de su cantidad así como de sus valores lingüísticos, en la forma de las funciones de pertenencia y de la Reglas básicas. Este modelo se construye sobre las bases de los algoritmos usados por Matlab en su tool kit de Fuzzy Logic. Para entender el modelo es importante aclarar que significa cada una de las variables lingüísticas que se emplearán. (D. Seuret *et. al* 2016)

4.2 Definición de variables lingüísticas.

Las variables lingüísticas son aquellos indicadores que utilizaremos para caracterizar o evaluar al sistema en forma difusa. Aquí hemos utilizado como términos como radiación solar; alta, media, baja, cuando hablamos de la variable lingüística de la radiación solar.

Bien ahora debemos encontrar los indicadores que utilizaría un experto cuando debe de evaluar la realización de un proyecto fotovoltaico. Los expertos en la materia buscan en la literatura temas relativos, por ejemplo en literaturas académicas y los informes de los estudios de viabilidad de proyectos de energía solar, etc.

Cuando se hace un programa de evaluación se pueden tomar muchos indicadores que se tendrán en cuenta con su peso y siempre de la misma forma. Esta es una de las ventajas de la evaluación de proyectos con programación inteligente, ella no dependerá de las condiciones del evaluador, ni siquiera si son distintos evaluadores. Trataremos de exponer los que consideramos como más importantes:

1. Ambientales y naturales.

A) Área disponible para la instalación de planta energética.

I) Precio del Terreno.

B) Desastres energéticos ocurridos recientemente.

b) Materia prima.

I) Insolación diaria.

II) existencia de combustibles fósiles.

III) Viento.

IV) Geotermia.

2. Tipo y costo de la Tecnología.

3. Operación y mantenimiento.

4. Precio de materia primas.

I) Volatilidad de la materia primas.

II) precio del petróleo

5. Socio económico

PIB.

Leyes que regulen la inversión de energía renovable.

Es seguro que se pueden colocar otros indicadores más, pero el problema principal está en que estos indicadores deben ser medibles para que puedan ser fusificados e integrados al sistema. En este caso consideraremos las variables más importantes para tomar una decisión viable de un proyecto fotovoltaico. En este caso tomaremos 5 variables

- ✚ Radiación Solar.
- ✚ Costo de la Tecnología.
- ✚ Operación y Mantenimiento (O&M).
- ✚ Costo del Terreno.
- ✚ Precio del petróleo.

4.3 Radiación Solar

Es bien sabido que la selección del sitio determina el futuro la producción de energía eléctrica y los valores socioeconómicos de la central y que merece ser prestado más atención. (Yunna Wu 2014).

Para medir la cantidad de energía que llega del sol se emplea como unidad el Watt-hora y para conocer la potencia de dicha radiación se usa el Watt (en SI). En el caso del aprovechamiento de la energía solar, lo que interesa es la cantidad de energía por unidad de tiempo y por unidad de área que llega perpendicularmente a la superficie de la tierra. Los rayos del sol se aprovechan más cuando llegan perpendicularmente a una superficie. Por lo tanto la cantidad de radiación que recibe el planeta depende de la inclinación y es variable, dichos cambios se deben de conocer para tener la mayor cantidad de energía disponible.

La distribución temporal de la energía solar que alcanza la superficie es muy irregular. No solo varia la insolación máxima diaria (horas en las que el sol está

por encima del horizonte del lugar), sino que la radiación solar es más o menos atenuada según la composición instantánea de la atmosfera que atraviesa. En término medio solo el 47% de la radiación incidente sobre la atmosfera terrestre alcanza la superficie del planeta. El 31% lo hace directamente y el otro 16% después de ser dispersada por polvo en suspensión, vapor de agua y moléculas de aire. La energía restante, un 53%, es reflejada hacia el espacio exterior o absorbida en la atmosfera.

La potencia de la radiación solar que se recibe en un instante determinado sobre un metro cuadrado de superficie se conoce como *irradiancia* (I) y se expresa en W/m^2 . Para una distancia media Tierra-Sol el valor de la irradiancia en un plano exterior a la atmosfera y perpendicular a los rayos del sol se conoce como *constante solar* (S). El valor determinado por la NASA indica que la constante solar es $1,353 W/m^2 (\pm 1.6\%)$.

La parte de la radiación solar que llega a la superficie terrestre sin ser dispersada ni absorbida por la atmósfera se llama *radiación solar directa* (Figura 4.1) se supone que la radiación dispersada llega a la superficie terrestre de manera uniforme desde todas las direcciones y se llama *radiación solar difusa* (Ibáñez *et al.* 2005).

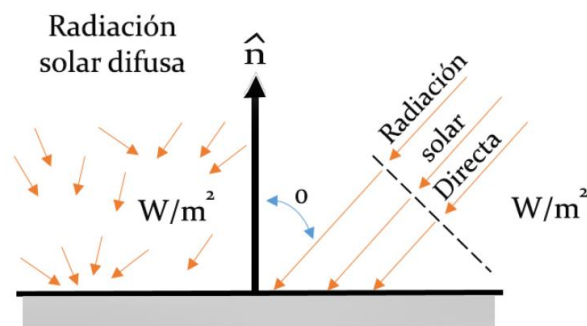


Figura 4.1. Radiación directa y difusa que incide sobre la superficie horizontal en la superficie terrestre (Cengel Y. 2004).

El país tiene una alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; la zona norte es de las más soleadas del mundo. Con una irradiación media anual de aproximadamente 5 kWh/m² por día, México es uno de los países a nivel mundial que presenta condiciones ideales para el aprovechamiento masivo de este tipo de energía. Sin embargo, este potencial no se ha aprovechado ampliamente. En la figura 4.2 observamos el mapa de la república mexicana comparando las zonas de mayor a menor producción anual de radiación solar global diaria.

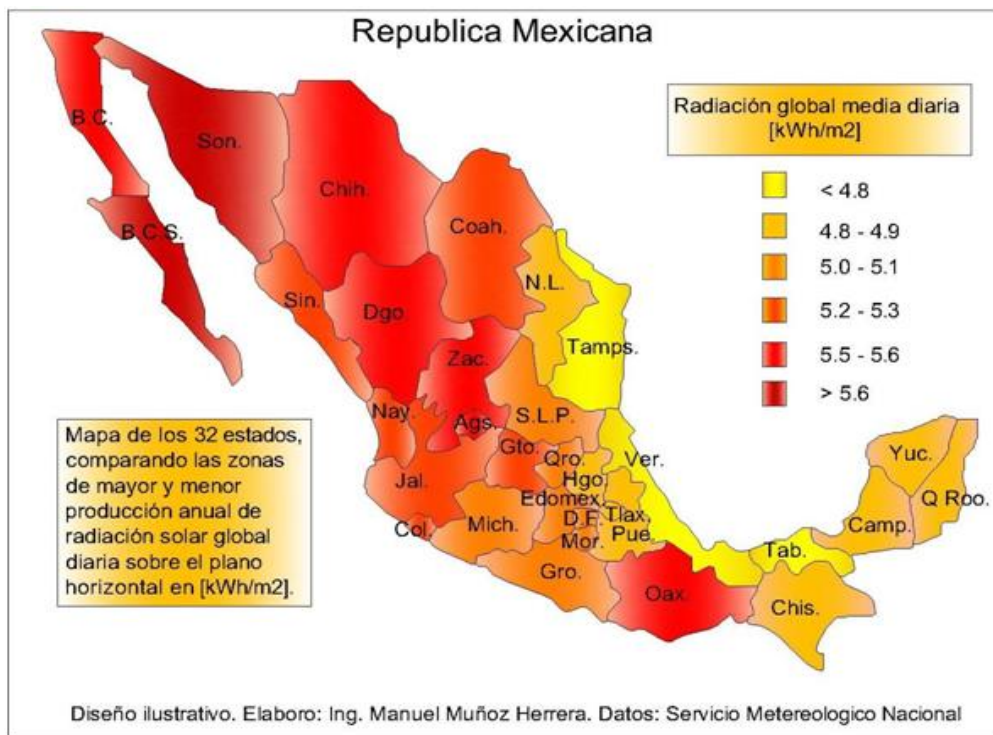


Figura 4.2 Mapa de irradiación solar en México (M. Muñoz, SMN)

4.4 Costo de la Tecnología

La actividad de generación consiste, de forma simplificada, en transformar – mediante una tecnología concreta – una energía primaria (térmica, hidráulica, eólica, solar, etc.) en energía eléctrica. Cada tecnología de generación tiene su propia estructura de costes y características técnicas.

Cada tecnología resulta especialmente adecuada, técnica y económicamente para prestar un servicio concreto en relación con la cobertura de la demanda eléctrica.

Todas las tecnologías son necesarias, ya que se complementan para suministrar de la forma más adecuada posible (en términos de coste y seguridad de suministro) la energía que demandan los consumidores en cada momento.

A modo de ejemplo, hay tecnologías con costes fijos muy altos (amortización de la inversión, parte fija del coste de operación y mantenimiento, etc.) pero con costes variables muy bajos. Estas tecnologías son las más adecuadas para producir un número de horas al año muy elevado. Por el contrario, hay tecnologías con costes fijos muy bajos pero con costes variables muy altos. Estas tecnologías son las más adecuadas para producir durante un número reducido de horas al año (aquellas en las que la demanda es más alta).

Cada vez es necesario disponer de tecnologías que permitan satisfacer las restricciones medio ambientales en generar electricidad sin contaminar. Así es evidente que cada tecnología presta un servicio concreto en la cobertura de la demanda total y que todas son necesarias ya que se complementan unas con otras para suministrar la demanda en cada momento de la forma más adecuada posible en términos técnicos, económicos y medioambientales. El costo de la tecnología es una de las variables más difíciles de reducir a un

rango, ya que depende no solo del tipo de tecnología sino también del tamaño de la instalación. Como en este trabajo nos interesa definir el Universo del discurso de la variable lingüística Costo de la Tecnología, solo tomaremos valores extremos como se muestra en la tabla 4.1

Tecnología de Proceso	Tamaño de la Instalación	Costo de Tecnología (US\$/kW-año)
Ciclo combinado (Gas)	200 MW	424
Carbón (Termoeléctrica)	150 MW	877
Hidroeléctrica	500 MW	400-3000
Solar	222 MW	450
Gas	300 MW	326
Biomasa	30 MW	1500

Tabla 4.1 Costo de la tecnología (P. R. Díaz Herrera 2013)

4.5 Operación y mantenimiento (O & M).

Cualquiera que sea la fuente para crear la energía eléctrica mediante combustibles fósiles o renovables, los costos de operación y mantenimiento (O&M) son una parte muy importante para un proyecto de inversión de una central eléctrica, siendo una pieza del rompecabezas de inversiones que junto con los gastos del capital, costos de los combustibles, esto debe ser equilibrado contra la rentabilidad del ciclo de vida, la eficiencia y disponibilidad de la fuente de energía. Los costos fijos como variables, incluyen también el mantenimiento preventivo y correctivo, supervisión de la central, costos laborales, la gestión de activos, seguridad e higiene para garantizar la salud y seguridad del personal laboral.

Los costos de operación y mantenimiento varían ampliamente de diferentes maneras en la forma de generar la energía. Lo altos gastos de mantenimiento algunas veces son compensado por ventajas de otras áreas o viceversa. (E. Rodríguez 2014)

4.5.1 Energía térmica de gas.

La producción de electricidad a partir del gas es conocida por tener costos bajos en la operación y mantenimiento si este se compara con otros métodos de para su generación, las estadísticas de la IEA lo demuestran. Las centrales eléctricas equipadas con turbinas de combustión de ciclo simple, el más común (y menos eficiente) en tecnología de gas, han llegado a un promedio anual de coste por operación y mantenimiento de sólo \$20 USD d por kilovatio (kW) producido, por lo que esta tecnología resulta la opción más barata en términos operación y mantenimiento en la industria.

El mantenimiento de un efectivo sistema de lubricación para turbinas de gas es una consideración importante para las plantas eléctricas a partir de gas como medida de mantenimiento preventivo, y forma un componente vital de sus gastos de operación y mantenimiento. En un sentido más amplio, teniendo en cuenta como las energías renovables se están convirtiendo en una parte cada vez más grande la mezcla de energéticos de las economías desarrolladas, las plantas de gas, con su capacidad de producir de forma rápida o reducir sus operaciones según sea necesario, son cada vez más importantes como un suplemento seguro y variable que apoya a un suministro renovable intermitente. (E. Rodríguez 2014)

4.5.2 Energía térmica de carbón.

El carbón ha sido durante mucho tiempo el caballo de batalla del mercado de la generación eléctrica. Sin embargo, puede encontrarse en el ocaso de su reinado conforme los legisladores ambientales buscan limitar su dependencia de la energía del carbón, pero sus fuertes ventajas financieras en el horizonte hacen del carbón una opción económicamente competitiva. No obstante, los costos de operación y mantenimiento no son espectacularmente bajos para el carbón. Por ejemplo las plantas subcríticas, como opción más barata, llegan a

\$43 USD por kW, aumentándose los costes de manera constante a través de las modernas tecnologías de combustión de carbón ultrasupercrítica y supercríticas más eficientes antes de llegar a los \$88 USD por kW, en el caso de las opciones con menores niveles de contaminación y captura de carbono integradas en plantas de ciclo combinado de gasificación (IGCC).

Uno de los principales impulsores de los costes O&M en las plantas de carbón es el seguimiento y el mantenimiento de los muchos componentes móviles que intervienen en el proceso de generación, incluyendo turbinas y grupos electrógenos, transportadores de carbón y sistemas de manipulación. Como las centrales eléctricas de carbón son a menudo centrales de base, con frecuencia se espera que estos componentes operen continuamente mientras son sometidos a cargas pesadas y altas temperaturas, así como a diversos niveles de polvo, suciedad y humedad. Las innovaciones en el mantenimiento predictivo y optimización de activos han ayudado a reducir los costes a través de los años, pero el gasto en términos O&M en este sector de peso en la industria, se espera que mantenga estabilidad hasta 2035. (E. Rodríguez 2014)

4.5.3 Energía solar Fotovoltaica.

Fruto del continuo desarrollo de la tecnología solar fotovoltaica (PV) que, a \$25 USD por kW, ha logrado posicionar las instalaciones fotovoltaicas a gran escala entre las tecnologías de generación de energía más baratas en términos de operaciones y mantenimiento. Por supuesto, la relativa simplicidad de la energía solar fotovoltaica es el factor que se define aquí. La limpieza de los paneles fotovoltaicos, junto con una cuidadosa monitorización de las unidades de inversores y subsistemas de CA, son las tareas de mantenimiento primarias en este tipo de instalaciones. La AIE también proyecta abruptamente una caída de los costes iniciales de capital para estos proyectos hasta el año 2035, lo que significa que la energía solar fotovoltaica está alcanzando

rápidamente a los combustibles fósiles como una propuesta financiera atractiva, unido a sus ventajas de adopción como una alternativa respetuosa con el medio ambiente.

El mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red es mínimo, y de carácter preventivo. Para los sistemas con seguidores este mantenimiento no es tan simple ya que incluye revisarlas partes móviles sometidas a desgaste, cambio de piezas y lubricación (E. Rodríguez 2014)

4.5.4 Energía Hidroeléctrica.

La energía hidroeléctrica a gran escala es en la actualidad significativamente más barata de operar y mantener que los proyectos de menor envergadura; el primero tiene un coste promedio anual O&M de \$53 USD por kW, mientras que las más pequeñas alcanzan los \$70 USD. Inusualmente, sin embargo, el coste de mantenimiento de grandes instalaciones como presas y diques están previstos que aumenten en lugar de caer en el futuro, igualándose incluso casi con los costos estables de la energía hidroeléctrica a pequeña escala en 2035.

El costo de operación y mantenimiento (O&M) es una de las variables clave para un proyecto de inversión, en la siguiente figura 4.2 observamos los costos que con lleva generar un kw de energía.

Tecnología de Proceso	O&M \$USD/Kw
Ciclo combinado (Gas)	25
Carbón (Termoeléctrica)	43
Hidroeléctrica	53
solar	25
Gas	20

Tabla 4.2. Resumen de Costos de O&M en las diferentes tecnologías de proceso de generación de electricidad.

4.6 Costo de Adquisición del terreno.

México se encuentra entre los 5 países más atractivos del mundo para invertir en proyectos de energía Fotovoltaica, y el costo del terreno es una de las variables de suma importancia en un proyecto de inversión, La ubicación y características del terreno, antes que sus condiciones y calidad, es lo que ahora más influye en la cotización. Los terrenos sin arbolado ni obstáculos que resten horas de sol son los más demandados y valorados. No importa que sean improductivos, lo que interesa es que los paneles que se instalen queden expuestos al sol el mayor tiempo posible.

Las características de los terrenos tienen que ser:

- ✚ Terreno preferentemente plano.
- ✚ Terreno uso agrícola o no agrícola, ejidal, o propiedad privada.
- ✚ Camino de acceso.
- ✚ Línea de alta tensión sobre predio.
- ✚ Subestación CFE en un radio de 10 km. Aproximadamente.
- ✚ No necesita agua.

La instalación fotovoltaica se tiene que situar en un lugar que gocé de una gran radiación solar y un ambiente limpio contando con un gran número de días soleados durante el año por lo que será apto para un proyecto fotovoltaico. Al seleccionar un terreno debe de considerarse su orografía casi horizontal en el eje norte – sur y con una ligera pendiente ascendiente en el eje Norte – Sur favorable. Se debe de considerar una zona donde no existan montañas, ni edificaciones en el entorno próximo que pudieran producir sombras.

Son muchos los propietarios de terrenos que esta dispuestos a vender sus terrenos tanto para siembra, para ganadería, proyectos de energía, etc. pero no todo terreno es idóneo para proyectos de energía solar fotovoltaica de venta

a la red. En la siguiente figura 4.3 muestra el mapa de la república mexicana por zonas y buscar los precios de diferentes terrenos en la república mexicana.

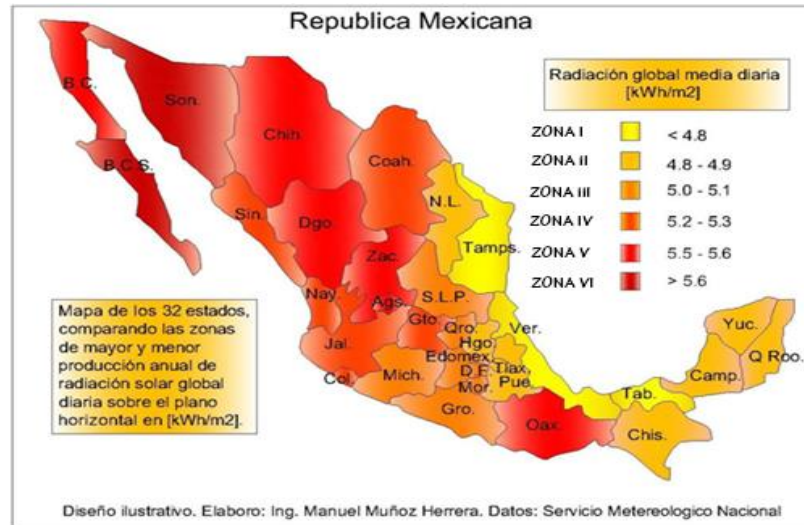


Figura 4.3. La República Mexicana enumerada por zonas.

Terreno	Ubicación	Zona	Superficie total hm ²	Total m ²	Precio total	Precio \$pesos x m ²
Venta	Minatitlan, Ver	Zona I	200	2,000,000	\$ 90,000,000.00	\$45.00
Venta	Villahermosa, Tabasco	Zona I	97	970,000	\$ 17,460,000.00	\$18.00
Venta	Venado, San Luis P.	Zona II	50	500,000	\$ 5,000,000.00	\$10.00
Venta	Tamaposo, San Luis P.	Zona II	100	1,000,000	\$ 2,500,000.00	\$2.50
Venta	Queretaro	Zona III	100	1,000,000	\$ 185,000,000.00	\$185.00
Venta	Toluca, Edo de Mex.	Zona III	100	1,000,000	\$ 270,000,000.00	\$270.00
Venta	Cuernavaca, Mor.	Zona IV	118	1,180,000	\$3,422,000,000.00	\$2,900.00
Venta	Tlaltizapan, Mor.	Zona IV	500	5,000,000	\$ 350,000,000.00	\$70.00
Venta	Aguascalientes, Ags	Zona V	100	1,000,000	\$ 1,000,000.00	\$1.00
Venta	Canovas, Jalisco	Zona V	100	1,000,000	\$ 8,000,000.00	\$8.00
Venta	Puerto Libertad, Sonora	Zona VI	100	1,000,000	\$ 2,000,000.00	\$2.00
Venta	Puerto Libertad, Sonora	Zona VI	100	1,000,000	\$ 250,000.00	\$0.25
Venta	Baja California Sur.	Zona VI	100	1,000,000	\$ 300,000.00	\$0.30

Figura 4.4 Precios de terreno por metro cuadrado en México, Elaboración propia a partir de los datos de diferentes inmobiliarias de la web, año 2016.

4.7 Costo del Petróleo.

El petróleo es hoy en día uno de los combustibles fósiles más preciados debido a su gran potencial energético y, por ello, la economía de muchos países se basa en el petróleo. En un futuro no muy lejano se espera que el suministro de petróleo se agote o sea demasiado pequeño para cubrir toda la energía demandada. Las energías renovables son la solución a esta situación.

La reducción del precio de la electricidad, uno de los objetivos de la reforma energética del gobierno mexicano, pone el pie a las energías renovables y deja en entredicho las metas de cambio climático. La caída de más de 50% de los precios del crudo durante los últimos 12 meses hace más barato producir electricidad a través de gas y otros hidrocarburos, desde el petróleo hasta el diésel. En julio de este año, los precios pasaron de 55 a 46 dólares por barril, cuando en 2008 rebasaban los 120 dólares. (A. Solis 2015)

Para empezar el petróleo no compite con la energía renovables como la energía eólica o solar, estas realizan diferentes roles, el petróleo sigue siendo dominante en el transporte mientras que las energías renovables generan electricidad (D. Shukman 2015).

El petróleo continuaría siendo una fuente demasiado cara para alimentar la red eléctrica. Por ejemplo, en los Estados Unidos, la generación eléctrica a partir del petróleo no llega al 1%, y a nivel internacional no sobrepasa el 5%. La caída del precio del petróleo conduce a la caída del precio del gas, y este sí compite directamente con las renovables. (eoliccat.net 2015).

En la siguiente figura 4.5 podemos observar el histórico de la mezcla mexicana. Observamos que el costo va a la baja

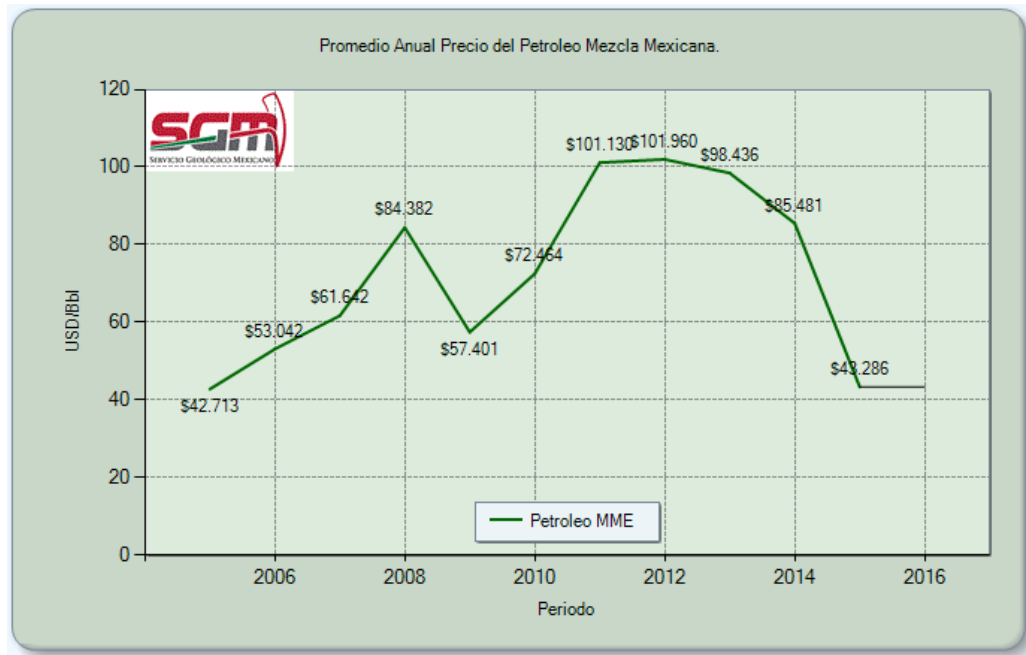


Figura 4.5 Precio anual de la mezcla mexicana (Servicio geológico Mexicano 2016).

CAPÍTULO 5 DESARROLLO DEL MODELO

5.1 Modelo

Para la evaluación de un proyecto se deben tomar los valores reales, en el lugar donde se pretende realizar el proyecto en los tiempos en que se realizará el proyecto. Entonces fusificarlos según las funciones de pertenencia definidas y someterlos a las reglas creadas, luego de obtener los valores difusos de las variables de salida desfusificarlo para obtener un valor que le tenga sentido para un ser humano. Este proceso se ha realizado con el Tool Kit de Fuzzy Logic de Matlab.

En la figura 5.1 se muestra el modelo de sistema experto basado en lógica difusa para determinar viabilidad en proyectos fotovoltaicos. Estas variables emplearían un experto cuando debe de evaluar la realización de un proyecto fotovoltaico. Cuando se hace un programa de evaluación se pueden tomar muchos indicadores que se tendrán en cuenta con su peso.

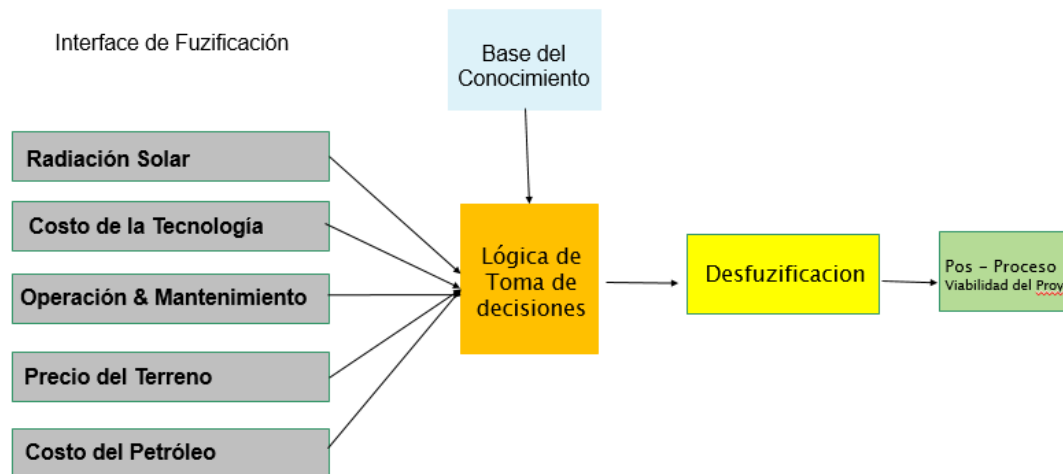


Figura 5.1 Sistema difuso Mamdani aplicado en proyecto fotovoltaicos.

Una vez definidas las variables, cada variable será evaluada con cada una de las demás variables para así tener un resultado. La figura 5.2 Árbol de decisiones, podemos observar las reglas que se generan, sin descartar ninguna posibilidad de omitir alguna regla para llegar a un resultado viable.

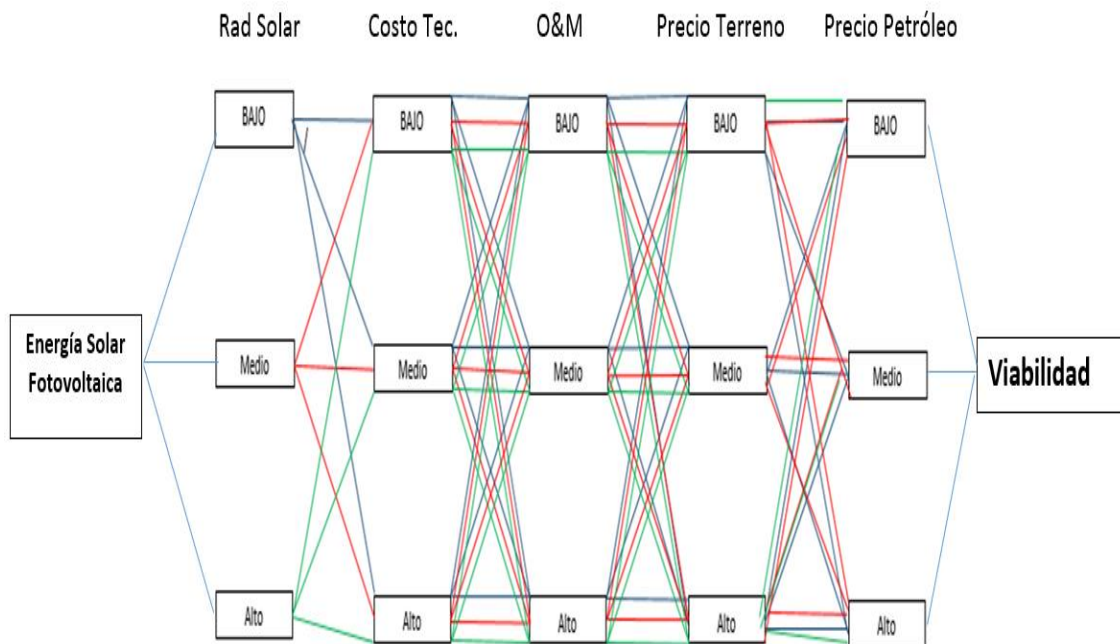


Figura 5.2 Árbol de decisiones (Elaboración propia 2016)

Un árbol de decisión es una forma gráfica y analítica de representar todos los eventos que puedan surgir a partir de una decisión asumida en cierto momento. Entonces tenemos 243 reglas diferentes empleadas al problema.

$$\mu(\mathbf{x}) = 3^5 = 243 \quad 5.1$$

Donde; 3 es número de decisiones (alto, medio, bajo) por cada variable lingüística.

Donde; 5 es el número de variables lingüísticas.

5.2 Definición de las Funciones de membresía

Como se muestra en la tabla 5.1, se observa las variables y los criterios con sus valores límites que se tomaron en cuenta para la función de membresía.

Variables	Criterio (Funcion de membresia)
Radiación Solar	Radiacion solar : baja < 4.8 hrs
	Radiacion solar : media 4.8 a 5.3
	Radiacion solar : Alta > 5.3
Costo de la Tecnologia	Costo de la instalacion: baja < 2.5 Usd/W
	Costo de la instalacion: Media 2.5 a 7.5 Usd/W
	Costo de la instalacion: Alto > 7.5 a 10 Usd/W
Costo de O&M	Costo Operación y Mantenimiento: baja < 25 Usd/Kw
	Costo Operación y Mantenimiento: Media 25 a 38 Usd/Kw
	Costo Operación y Mantenimiento: Alto > 38 Usd/Kw
Costo del terreno	Costo del terreno: baja < \$3 x m2
	Costo del terreno: Media \$3 a \$10 x m2
	Costo del terreno: Alto > \$10 x m2
Costo del petróleo	Costo del Petróleo: baja < \$45 x barril
	Costo del Petróleo: Media \$45 a 71 x barril
	Costo del Petróleo: Alto > \$71 a 120 x barril

Tabla 5.1 Valores límites de la función de membresía, Elaboración propia (2016)

Estos mismos valores los insertamos en el programa de Matlab, como se muestra en la figura 5.3 energía

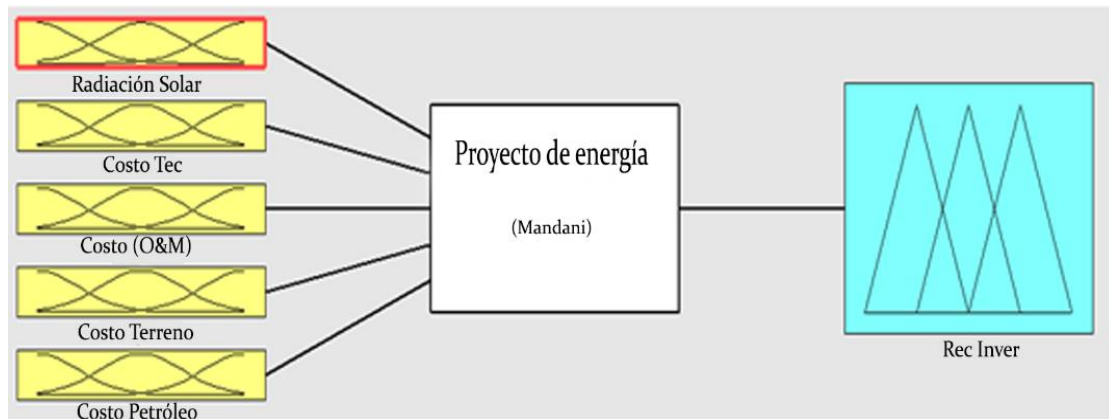


Figura 5.3 Editor de funciones de membresía por Matlab

Hemos tomado las funciones de membresía, triangular y trapezoidal, para “La radiación solar”. Como se muestra en la figura 5.4

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 4.2 \\ \frac{0.48 - x}{4.8 - 4.2} & \text{si } 4.2 < x < 4.8 \\ 1 & \text{si } x \geq 4.8 \end{cases}$$

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 4.4 \\ \frac{x - 4.4}{4.85 - 4.4} & \text{si } 4.4 < x < 4.85 \\ \frac{5.33 - x}{5.33 - 4.85} & \text{si } 4.85 < x < 5.33 \\ 0 & \text{si } x \geq 5.33 \end{cases}$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x < 5.1 \\ \frac{x - 5.1}{5.6 - 5.1} & \text{si } 5.1 < x < 5.6 \\ 0 & \text{si } x \geq 5.6 \end{cases}$$

Las cuales se presentan en la figura 5.4

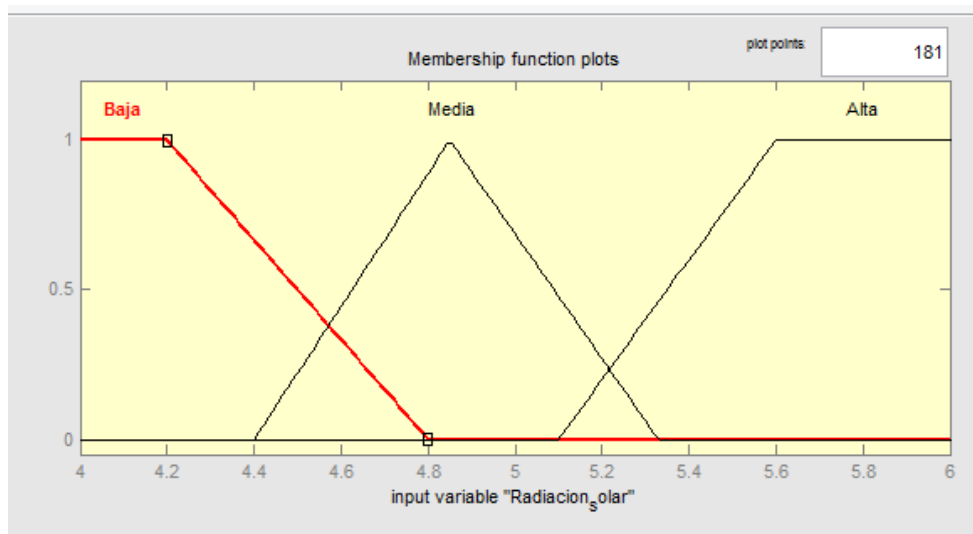


Figura 5.4 Representación de la variable lingüística “Radiación solar” en Matlab

Hemos tomado las funciones de membresía, triangular y trapezoidal. Para el costo de la tecnología. Como se observa en la figura 5.5

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 2.5 \\ \frac{2.5-x}{2.5-1} & \text{si } 1 < x < 2.5 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \end{cases}$$

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 2.5 \\ \frac{x-2.5}{5-2.5} & \text{si } 2.5 < x < 5 \\ \frac{7.5-x}{7.5-5} & \text{si } 5 < x < 7.5 \\ 0 & \text{si } x \geq 7.5 \end{cases}$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 9 \\ \frac{x-7.5}{9-7.5} & \text{si } 7.5 < x < 9 \\ 0 & \text{si } x < 7.5 \end{cases}$$

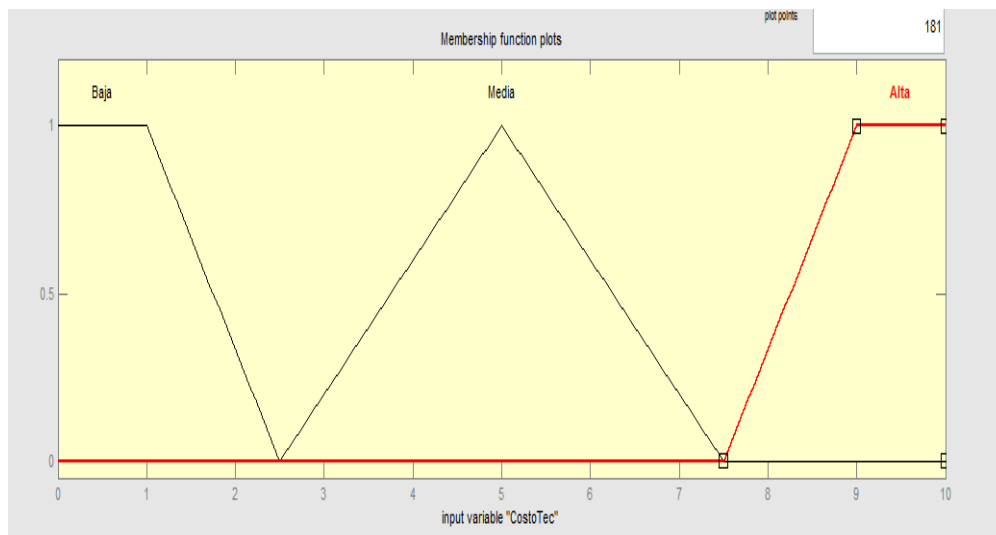


Figura 5.5 Representación de la variable lingüística “Costo Tecnología” Matlab

Hemos tomado para la Función de membresía triangular y trapezoidal para “Operación y mantenimiento” como se observa en la figura 5.6

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 12 \\ \frac{25-x}{25-12} & \text{si } 12 < x < 25 \\ 1 & \text{si } x \geq 25 \end{cases}$$

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 20 \\ \frac{x-20}{29-20} & \text{si } 20 < x < 29 \\ \frac{38-x}{38-29} & \text{si } 29 < x < 38 \\ 0 & \text{si } x \geq 38 \end{cases}$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 43 \\ \frac{x-20}{43-20} & \text{si } 35 < x < 43 \\ 0 & \text{si } x < 35 \end{cases}$$

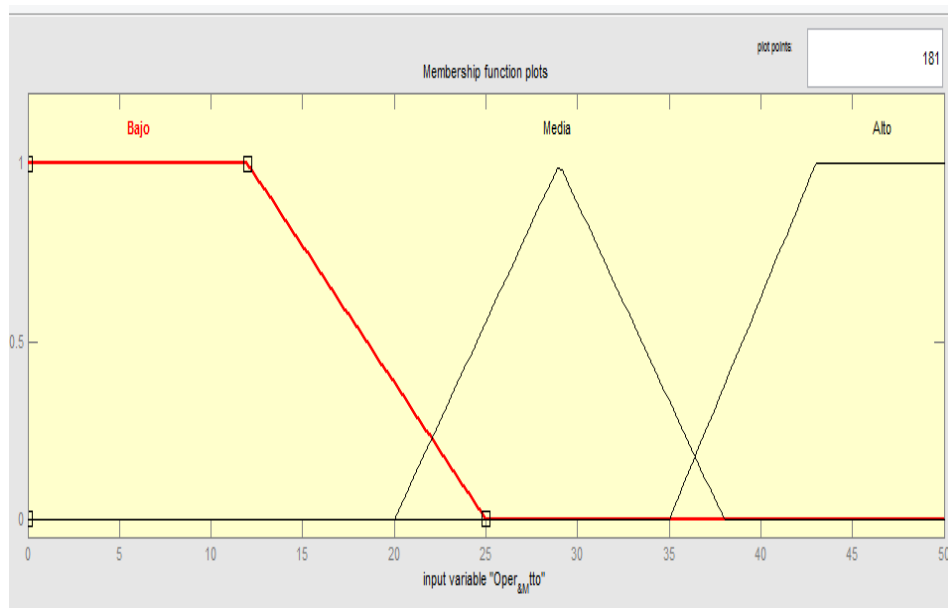


Figura 5.6 Representación de la variable lingüística Costo de Operación y Mantenimiento en Matlab.

Hemos tomado para la Función de membresía triangular y trapezoidal para “Costo del terreno”. Como se observa en la figura 5.7

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 3 \\ \frac{3-x}{3-1.5} & \text{si } 1.5 < x < 3 \\ 1 & \text{si } x \geq 1.5 \end{cases}$$

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 2 \\ \frac{x-2}{6-2} & \text{si } 2 < x < 6 \\ \frac{10-x}{10-6} & \text{si } 6 < x < 10 \\ 0 & \text{si } x \geq 10 \end{cases}$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 12 \\ \frac{x-9}{12-9} & \text{si } 9 < x < 12 \\ 0 & \text{si } x < 9 \end{cases}$$

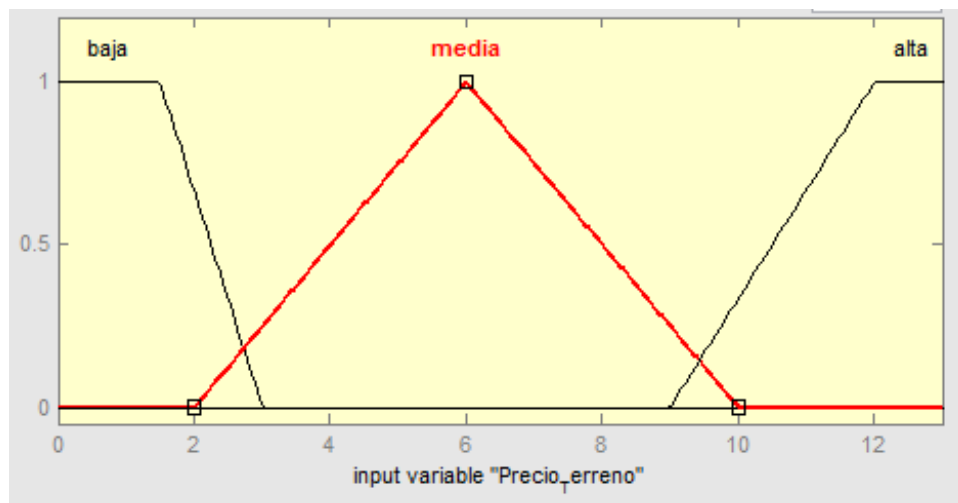


Figura 5.7 Representación de la variable lingüística Costo del terreno en Matlab

Hemos tomado para la Función de membresía triangular y trapezoidal para “Costo del petróleo”. Como se observa en la figura 5.8

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 45 \\ \frac{45-x}{45-15} & \text{si } 15 < x < 45 \\ 1 & \text{si } x \geq 45 \end{cases}$$

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 35 \\ \frac{x-35}{53-35} & \text{si } 35 < x < 53 \\ \frac{71-x}{71-53} & \text{si } 53 < x < 71 \\ 0 & \text{si } x \geq 71 \end{cases}$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 80 \\ \frac{x-63}{80-63} & \text{si } 63 < x < 80 \\ 0 & \text{si } x < 63 \end{cases}$$

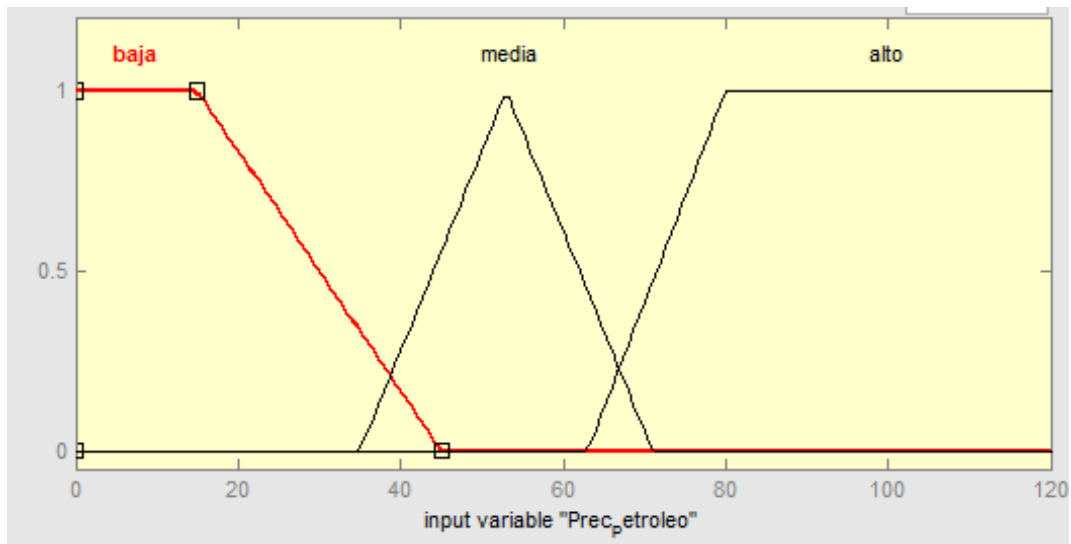


Figura 5.8 Representación de la variable lingüística Costo del petróleo en Matlab.

5.3 Definición de las reglas.

las Reglas If - then son el núcleo del controlador difuso, Al tener las 5 funciones de membresía con sus valores límites, comenzamos formar cada una de las reglas para la toma de decisiones, Las reglas que hemos hecho para introducirlas al programa del Matlab, en la herramienta(fuzzy tools) son 243 posibles alternativas que pueden surgir en el problema y son como se muestran en la Figura 5.9

No.	REGLA	Then	Rec de inversior
1	IF_Radiacion Solar es BAJA_AND_Costo Tecn. es BAJA_AND_O&M es BAJA_AND_Costo Terreno es BAJA_AND_Costo Petro BAJA	Then	bajo
2	IF_Radiacion Solar es BAJA_AND_Costo Tecn. es BAJA_AND_O&M es BAJA_AND_Costo Terreno es BAJA_AND_Costo Petro MEDIO	Then	bajo
3	IF_Radiacion Solar es BAJA_AND_Costo Tecn. es BAJA_AND_O&M es BAJA_AND_Costo Terreno es BAJA_AND_Costo Petro ALTO	Then	bajo
181	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es BAJA_AND_O&M es ALTO_AND_Costo Terreno es BAJA_AND_Costo Petro BAJA	Then	medio
182	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es BAJA_AND_O&M es ALTO_AND_Costo Terreno es BAJA_AND_Costo Petro MEDIO	Then	medio
183	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es BAJA_AND_O&M es ALTO_AND_Costo Terreno es BAJA_AND_Costo Petro ALTO	Then	medio
184	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es BAJA_AND_O&M es ALTO_AND_costo Terreno es MEDIO_AND_Costo Petro BAJA	Then	bajo
185	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es BAJA_AND_O&M es ALTO_AND_costo Terreno es MEDIO_AND_Costo Petro MEDIO	Then	bajo
186	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es BAJA_AND_O&M es ALTO_AND_costo Terreno es MEDIO_AND_Costo Petro ALTO	Then	medio
226	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es ALTO_AND_O&M es MEDIO_AND_Costo Terreno es BAJA_AND_Costo Petro BAJA	Then	bajo
227	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es ALTO_AND_O&M es MEDIO_AND_Costo Terreno es BAJA_AND_Costo Petro MEDIO	Then	medio
228	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es ALTO_AND_O&M es MEDIO_AND_Costo Terreno es BAJA_AND_Costo Petro ALTO	Then	alto
229	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es ALTO_AND_O&M es MEDIO_AND_costo Terreno es MEDIO_AND_Costo Petro BAJA	Then	bajo
230	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es ALTO_AND_O&M es MEDIO_AND_costo Terreno es MEDIO_AND_Costo Petro MEDIO	Then	bajo
231	IF_Radiacion Solar es ALTO_AND_Costo Tecn. es ALTO_AND_O&M es MEDIO_AND_costo Terreno es MEDIO_AND_Costo Petro ALTO	Then	medio

Figura 5.9 Algunas reglas para evaluar el proyecto fotovoltaico. (Elaboración propia 2016)

Se elaboró cada una de las reglas (fig. 5.9) para evaluar el proyecto fotovoltaico, y se introdujeron al editor de Reglas de Matlab (fig. 5.10).

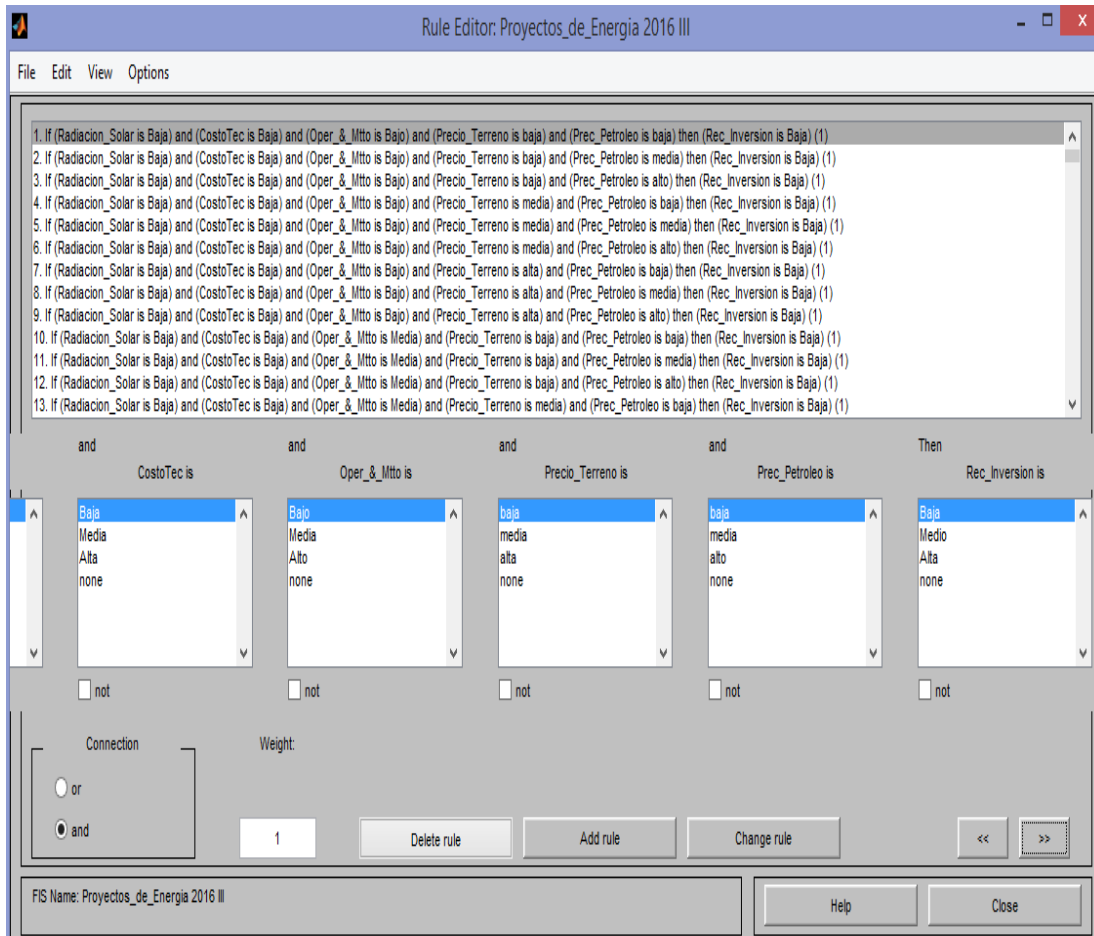


Fig. 5.10 Editor de reglas de Matlab y algunas de las 243 reglas.

En la figura 5.10 se muestra la evaluación la de las 243 reglas, así como los valores de las variables de salida.

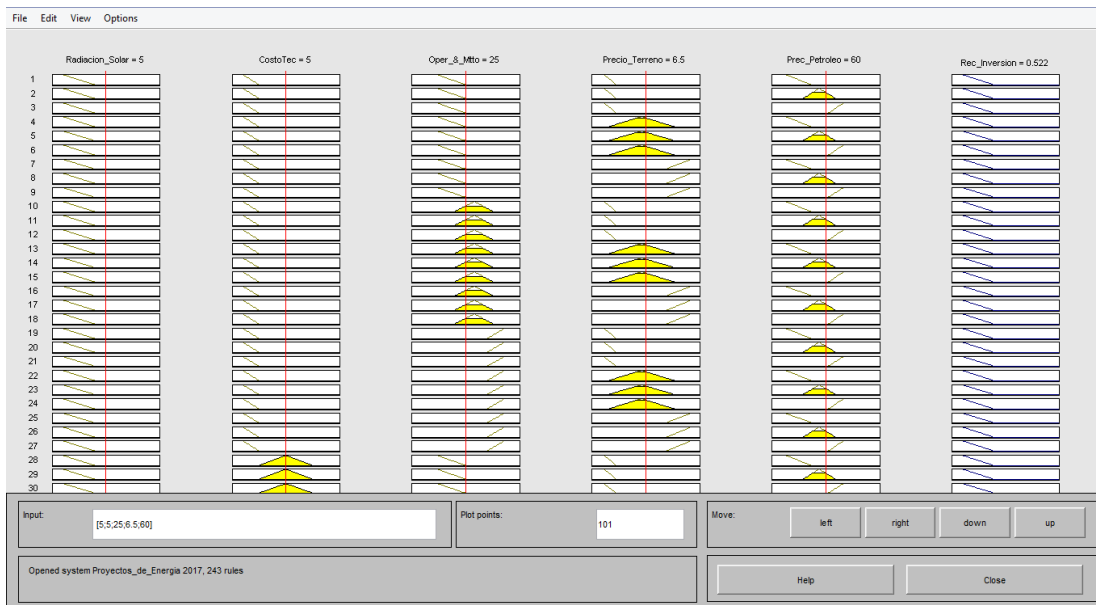


Fig. 5.11 Aplicación de las reglas.

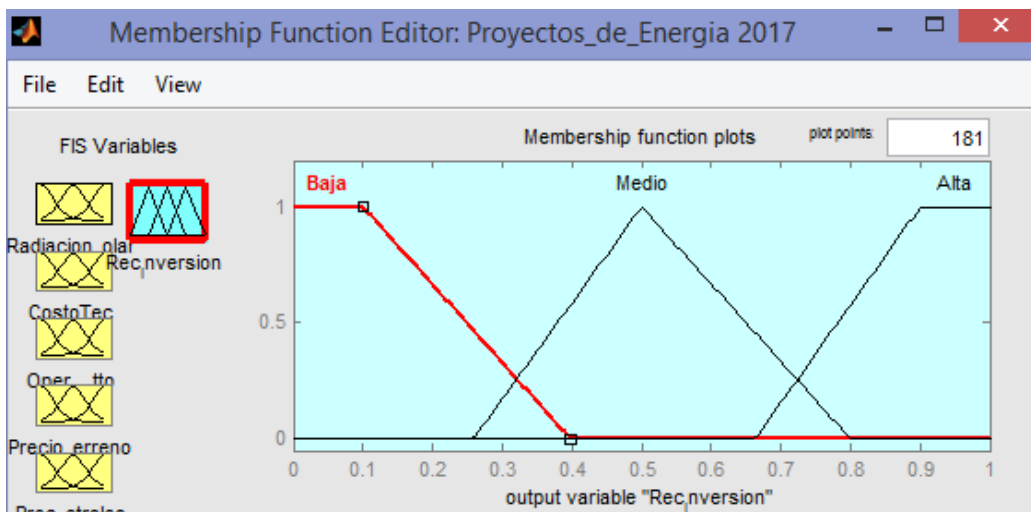


Fig. 5.12 Fusificación de las reglas.

Con las variables lingüísticas definidas, es posible tener una respuesta sobre un determinado proyecto de energía solar fotovoltaica, ahora lo que tenemos demostrar su validación y evaluar un proyecto real.

CAPÍTULO 6 VALIDACIÓN DEL PROYECTO

6.1 Caso de estudio en un proyecto fotovoltaico en México

Planta Aura Solar, Baja California Sur, La Paz.

Como uno de nuestros objetivos específicos fue la validación del programa con un proyecto real, en este caso de estudio analizaremos el corporativo Aura Solar. Proyecto solar FV de 30 MW. En la Fig. 6.1 observamos el corporativo en su sitio de internet.



Figura 6.1 Pagina web del proyecto Aura solar (2013)

Descripción del proyecto.

En el año 2012 la empresa Gauss Energía construyó Aura Solar I en La Paz, Baja California Sur, planta con una capacidad de 39 MWp. El proyecto Aura Solar I genera 82 GW por hora al año, suficiente para abastecer el consumo de 164 mil habitantes (65% población de La Paz).

El desarrollo cubre una superficie de 100 hectáreas, con una instalación de 131,800 módulos policristalinos con seguidores de un eje. La inversión total del proyecto ascendió a US\$100 millones, y su vida útil será de 30 años.

Ubicación del proyecto.

La Paz es una de las zonas del país con máxima incidencia solar y una irradiación global horizontal que supera los 5.7 KW/h/m al día.

El sitio cuenta con un Certificado de Inafectabilidad Agrícola que data de 1980. Esto implica que la construcción de este proyecto no generó mayor impacto ambiental en la zona. En cuanto al uso de suelo, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) determinó que la superficie no presentaba vegetación forestal alguna que pueda ser afectada. En seguida se muestra en la fig. 6.2 el resumen de proyecto.

Proyecto	Aura Solar	
Ubicación	Baja California Sur	
costo Proyecto	\$ 100,000,000.00	Dls
área del proyecto	100	Hectáreas
Generación	30	MW
módulos	131,800	pzs

Tabla. 6.1 Resumen del proyecto.

En seguida se muestra la figura 6.3 la tabla de las variables lingüísticas que nuestro programa necesita para sacar un resultado, si nuestro Proyecto pertenece o no pertenece a una propiedad de que si se haga o no se haga.

VARIABLES LINGÜISTICAS		
Radiación Solar	5.7	Kwh/m2*Dia
Costo Tecnología	0.40	Dls/w
Operación & Mtto	25	Dls/w
Costo del Terreno	3	Mts ²
Costo Petróleo	99	Dls x barril

Tabla 6.2 Variables lingüísticas del proyecto Aura solar.

Se insertan los valores reales del proyecto de Gauss Energía en el programa ya confeccionado con se muestra en la Fig. 6.3



Figura 6.2 Aplicación de las reglas.

Resultados

Con las variables lingüística definidas, este proyecto de energía Solar, recibe 0.848 puntos para desarrollarse; ver figura 6.5, en este caso de estudio lo que favoreció fueron las variables clave que se tomaron en cuenta para saber si es viable o no es viable desarrollar el proyecto.

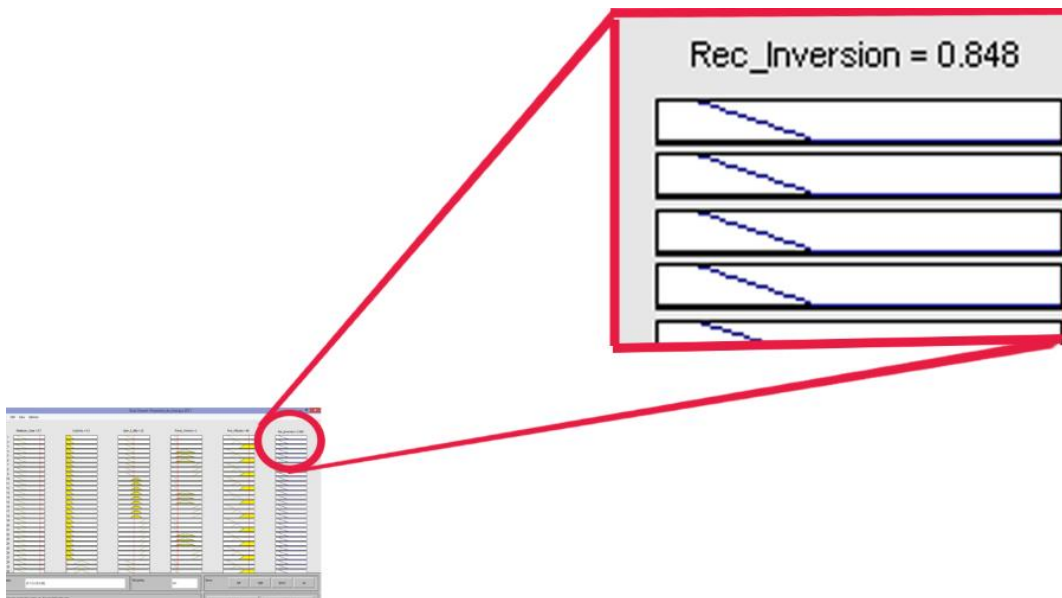


Figura. 6.3 Resultado de la aplicación de la regla.

El resultado o variable de salida que nos dice el programa, nos va a indicar la diferencia entre la estadística y la lógica difusa, la lógica difusa no nos da un valor probabilístico, la lógica difusa nos da una pertenencia a una propiedad, en cuanto pertenece el valor de salida a una propiedad de que si se haga dicho proyecto.

6.2 Caso de estudio en un proyecto fotovoltaico en Alemania.

Planta Solar Waldpolenz Alemania

En este caso de estudio analizaremos una planta de energía solar que se llevó a cabo cerca de Leipzig, Alemania, el distrito de Muldentalkreis en el estado de Sajonia en medio de 220 hectáreas de la ubicación en los municipios de Brandis y Bennewitz. Como "Sistema de Energía Solar" Solar server presenta la planta de energía solar con terminación en 40 MW, con 550,000 paneles, colocados en una superficie de 220 hectáreas



Figura. 6.4 Planta Solar de 40 MW Waldpolenz Alemania

Analizamos los datos de esa planta de energía solar en Alemania, con tener algunos datos claves del proyecto Tabla. 6.7, podemos saber si es viable hacer o no hacer el proyecto fotovoltaico.

Proyecto	Waldpolenz Solar Park	
Ubicación	Alemania	Leipzig
Costo Proyecto	\$ 200,000,000.00	Dls
Área del proyecto	220	Hectareas
Generación	52	MW
Módulos	550,000	pzs

Tabla 6.3 Resumen del proyecto Waldpolenz Solar Park, Alemania.

Ya con el resumen del proyecto, analizamos los datos de entrada para así colocarlos en nuestro programa ya diseñado, investigamos la radiación solar de esa provincia de Alemania, costo de tecnología, operación y mantenimiento, costo del terreno, costo del petróleo.

Investigamos las variables de entrada fundamentales y que son las que tuvo que analizar un experto en el tema al momento de tomar una decisión, Simularemos con los datos fundamentales de ese proyecto en nuestro programa para así saber con el resultado de salida si pertenece o no pertenece hacerse dicho proyecto. Tabla 6.4

VARIABLES LINGUISTICAS		
Radiación Solar	2.82	Kwh/m2*Dia
Costo Tecnología	0.30	DLS/W
Operación & Mtto	25	DLS/W
Costo del Terreno	14.62	mts cuadrado
Costo Petróleo	90	Dls x barril

Tabla 6.4 Variables lingüísticas del proyecto Waldpolenz Alemania

Después de obtener el dato sobre la cantidad media de radiación solar en Leipzig, Alemania fig. 6.5 nos apoyamos con una página de la NASA

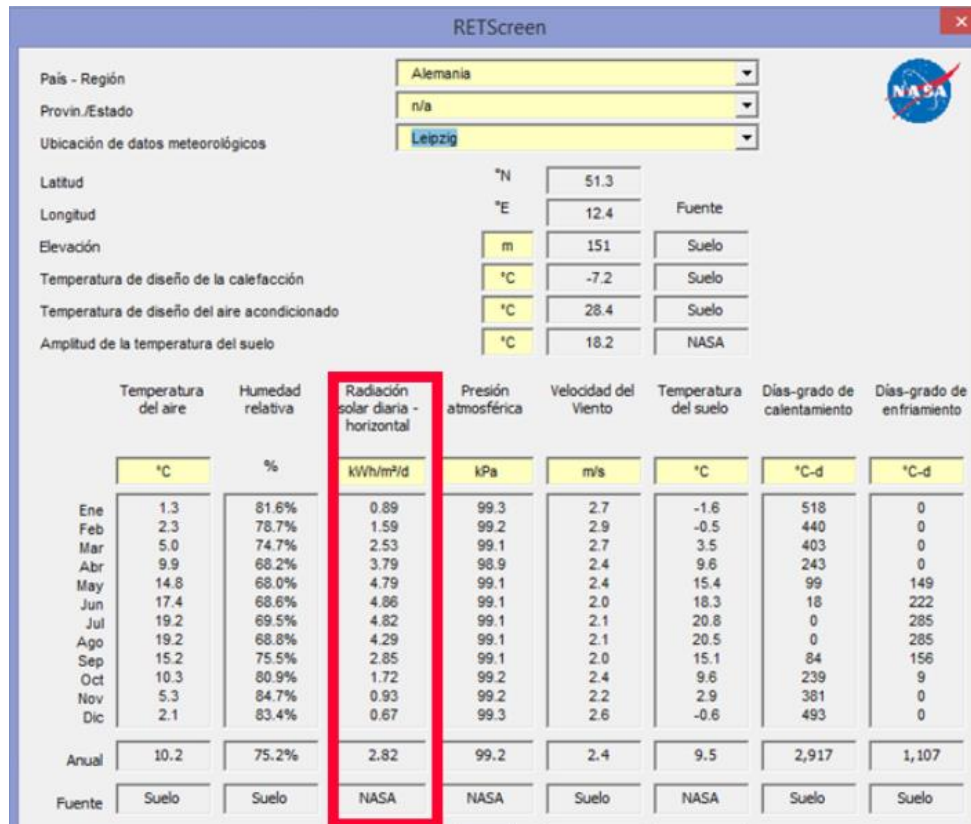


Figura 6.5. NASA meteorología de superficie y Energía Solar

El costo del terreno promedio ronda los 9,950 € en año 2008 según la oficina federal de estadísticas (DWN 2013).

A pesar de haber perdido más de cien dólares en el segundo semestre de 2008, el barril (de 159 litros) que toma como referencia la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) se vendió en todo el año a una media de 94,45 dólares (Precio Petróleo Net 2008).

Metemos los datos asignados de la figura 6.8 en el programa, para obtener un resultado de salida, ver figura 6.6

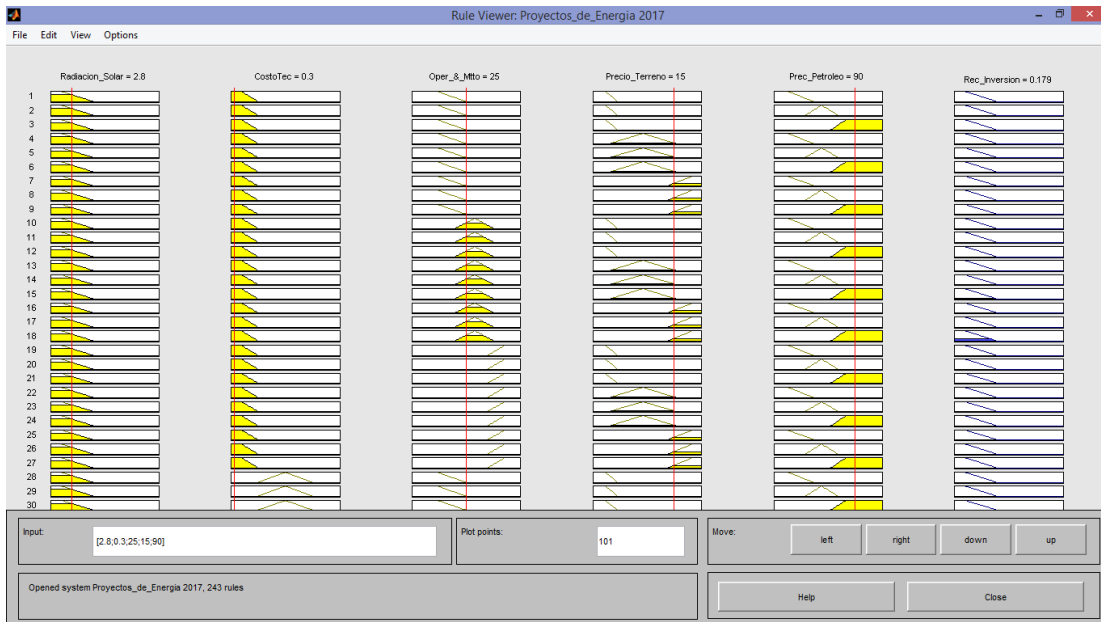


Figura 6.6. Aplicación de las reglas

Resultado Caso de estudio 2.

Con las variables lingüística definidas, este proyecto de energía Solar, recibe 0.179 puntos para desarrollarse; lo que un experto en el tema si este proyecto estuviera por realizarse en México, con esa puntuación; Pertenece a la propiedad de que no se haga.

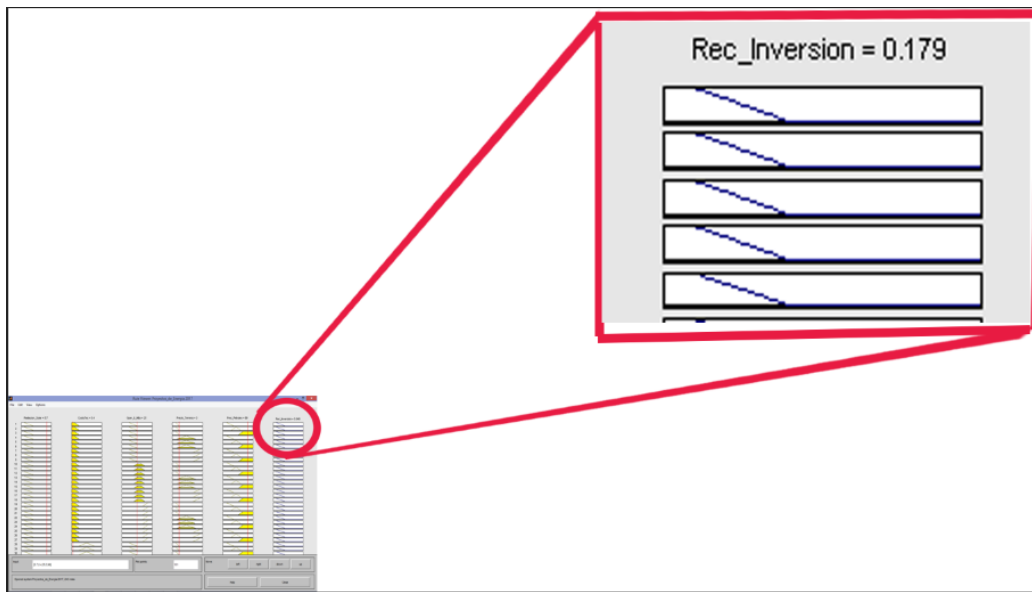


Figura 6.7. Resultado de la aplicación de las reglas.

Pero ¿por qué un país a pesar de no contar con un recurso solar favorable apuesta por la energía Solar?

Después del desastre nuclear de la planta de Fukushima, Japón. El gobierno Alemán tomó la decisión de convertir a Alemania en el primer país industrializado que abandona la energía nuclear.

Alemania apuesta a la revolución energética como oportunidad para ser pionero en el mundo por el camino hacia una modernidad sostenible.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

7.- Conclusiones.

El ámbito de la lógica difusa tiene una historia de unas seis décadas pero ha encontrado una aplicación más eficiente y ocurre en los años 90 cuando fue el boom de aplicaciones de Lógica Difusa, cuando empiezan a aparecer productos de consumo marcados como difusos. Aunque las aplicaciones al control difuso no fue de las primeras aplicaciones de la teoría de los conjuntos difusos si fue la que hizo que se prestara atención a esta teoría.

La contribución de este trabajo consiste en aportar la utilización de un algoritmo que puede facilitar la toma de decisiones en la construcción de proyectos de energía solar fotovoltaica mediante la lógica difusa. Ello constituye una herramienta útil para ser utilizada para la toma de decisiones y saber si es viable un proyecto de energía solar fotovoltaica de realizarse o no en dicho lugar. En este trabajo hemos planteado mostrar el funcionamiento del modelo y para ello hemos recurrido a la validación de un proyecto real.

Una vez realizado el programa consideramos que nuestra aplicación como herramienta puede ser fácilmente empleada por cualquier persona, sin la necesidad de una elevada especialidad, lo cual permitirá evaluar proyectos de energía solar fotovoltaica en distintas regiones y por distintas personas con el mismo criterio. Una herramienta como esta puede ser de utilidad a organizaciones administrativas, sector educativo, empresarios, sector gobierno.

8 REFERENCIAS

- A.I.Dounisa, Lefas. (1995) Knowledge-based versus classical control for solar-building designs. 281-292.
- "es.scribd.com," [Online]. Available:
<http://es.scribd.com/doc/61153946/COSTOS-DE-CENTRALES-ELECTRICAS#scribd..> (último acceso 28 de diciembre de 2015)
- A. Solis (2015) Bajos precios del petróleo frenan las energías renovables, Disponible: <http://www.forbes.com.mx/bajos-precios-del-petroleo-frenan-las-energias-renovables/#gs.Cw4no3Y> (último acceso 18 dic 2016).
- Adel Mellit, Soteris A. Kalogirou (2011) ANFIS-based modelling for photovoltaic power supply system: A case study 250-258.
- Almanza, R y López, S (1975) Total solar radiation in Mexico using sunshine hours and meteorological data. Solar Energy Vol 21, pp. 441-448.
- Arulmurugan R, Suthanthiravanitha N. (2013) Solar radiation forecast based on fuzzy logic and neural networks. 195-201.
- Aura Solar (2016) Proyecto de energía Solar Fotovoltaica Disponible: <http://www.aurasolar.com.mx/aura-solar-i.html> (ultimo acceso 18 Dic 2016).
- Aymen Chaouachi, Rashad M. Kamel, Ken Nagasaka. (2010) A novel multi-model neuro-fuzzy-based MPPT for three-phase grid-connected photovoltaic system. 2219-2229.
- Azadeh A, Sheikhalishahi M, Asadzadeh SM. (2011) A flexible neural network-fuzzy data envelopment analysis approach for location optimization of solar plants with uncertainty and complexity. 3394-3401.

- Banco Nacional de Comercio Exterior (2015), http://www.bancomext.com/wp-content/uploads/2015/02/Expediente_unico_Banca_Desarrollo_UBD_150217.pdf (ultimo acceso: 02 de Enero de 2016).
- Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, S.N.C. (2016), <https://www.gob.mx/banobras/acciones-y-programas/financiamiento-a-proyectos> (último acceso: 04 de agosto de 2016).
- Brunet–D. Alfonso (2010) Lógica difusa aplicada a la toma de decisiones, Industrial Vol XXXI, No. 1/2010
- Cao J, Lin X. (2008) Study of hourly and daily solar irradiation forecast using diagonal recurrent wavelet neural networks. 1396–406.
- Carlos A. Díaz-Contreras, Alejandra A. Rojas, Nathaly G. Barrientos (2014) Logica Difusa vs modelo de regresión múltiple para la selección de personal. Ingeniare. Rev. Chil. Ing. Vol 22, No. 4.
- Cengel Yunus A. (2004). Transferencia de calor. McGrawHill. Reno, Nevada.
- Chekired F, Mellit A, Kalogirou SA, Larbes C. (2014) Intelligent maximum power point trackers for photovoltaic applications using FPGA chip: A comparative study. 83-99.
- Chen SX, Gooi HB, Wang MQ. (2013) Solar radiation forecast based on fuzzy logic and neural networks. 195-201.
- Chokri Ben Salah, Maher Chaabene. (2008) Multi-criteria fuzzy algorithm for energy management of a domestic photovoltaic panel. 993-1001.
- Chokri Ben, Salah Mohamed Ouali. (2011) Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems. 43-50.

- CONACYT – SENER- Sustentabilidad energética (2014) convocatoria innovación energética en energía renovable, eficiencia energética y acceso en américa latina y el caribe, México D.F.
- D. Seuret-Jimenez (2016) Fuzzy Logic for Evaluation of Renewable Energy Projects, Preparation of Papers for International Journal of Modern Engineering Research, 2249-6645.
- D. Shukman (2015) Cae el precio del petróleo: ¿adiós a las energías verdes? Disponible: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/02/150202_petroleo_precio_energias_renovables_lp (ultimo acceso 18 Dic 2016).
- E. Rodriguez, (2014) Costes de operación y mantenimiento de diferentes tipos de energía, Disponible: <http://www.fierasdeingenieria.com/los-costes-de-operaciones-y-mantenimiento-de-los-diferentes-tipos-de-energia> (ultimo acceso 18 de Dicimbre de 2016)
- E.H. Mamdani and S. Assilian (1974) "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", Int. J. Man-Machine Studies, 7, pp. 1-13.
- Energías renovables unidad de inteligencia de negocio (2012) Primera edición, secretaria de economía, México, D.F.
- Eoliccat.net (2015) Como afecta la caída del petróleo a las energía renovables? Disponible: <http://eoliccat.net/como-afecta-la-caida-del-precio-del-petroleo-a-las-energias-renovables/?lang=es> (ultimo acceso 18 diciembre 2016).
- Fausto Cavallaro. (2010) Fuzzy TOPSIS approach for assessing thermal-energy storage in concentrated solar power (CSP) systems. 496-503
- Fideicomiso de riesgo compartido (2015), <https://www.firco.gob.mx> (último acceso: 10 de Diciembre de 2016).

- Fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica (2012) http://www.fide.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=121&Itemid=219 (ultimo acceso: 18 de Diciembre 2016).
- Fondo de sustentabilidad energética, Informe cero (2013) Secretaria de Energía, México D.F.
- Gomez, Casanovas. (2003) Fuzzy modeling of solar irradiance on inclined surfaces. 307-315.
- Ibañez Plana M., Rosell Polo, J.R. Rosell Urrutia J.I. (2005) Tecnologia solar, Mundi-Prensa, Madrid, España.
- K.Benlarbi, L.Mokrani, M.S.Nait-Saida. (2004) A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system. 203-216.
- Kisi O. (2014) Modeling solar radiation of Mediterranean region in Turkey by using fuzzy genetic approach. 429-436.
- L.A. Zadeh. (1965) Fuzzy set. Information and Control, 8, 338–353.
- Luis F. Zarzalejo, Lourdes Ramirez. (2005) Artificial intelligence techniques applied to hourly global irradiance estimation from satellite-derived cloud index. 1685-97.
- Luis Martin, Luis F. Zarzalejo, Jesus Polo. (2010) Prediction of global solar irradiance based on time series analysis: Application to solar thermal power plants energy production planning. 1772-1781.
- Mellit A, Kalogirou SA, Shaari S, Salhi H. (2008) Methodology for predicting sequences of mean monthly clearness index and daily solar radiation data in remote areas: Application for sizing a stand-alone PV system. 1570-1590.

- Mohanad Alata, M.A.Al-Nimr. (2005) Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control. 1229-1245.
- MRG Lopez (2001) Modelo de un Sistema Experto a partir de la aplicación de la Lógica Difusa, para ayudar en la decisiones bursátiles. Universidad del SABES 01, 2007-3542.
- Nacional Financiera S.N.C. (2013) Informe anual de actividades, Nacional Financiera, Banca de desarrollo.
- OCDE (2013), Evaluaciones de la OCDE sobre el desempeño ambiental: México, D.F.
- P.R. Díaz Herrera, www.academia.edu, disponible: https://www.academia.edu/6079727/An%C3%A1lisis_comparativo_de_la_configuraci%C3%B3n_de_las_tecnolog%C3%ADas_de_generaci%C3%B3n_el%C3%A9ctrica_con_captura_y_almacenamiento_de_CO2_en_M%C3%A9xico. (ultimo acceso 28 de diciembre de 2015).
- PROMEXICO inversion y comercio (2012) Energias renovables, Primera edición, Secretaria de economica, Mexico, D.F.
- Richard L.Welch, Ganesh Kumar Venayagamoorthy. (2010) Energy dispatch fuzzy controller for a grid-independent photovoltaic system. 928-937.
- S. Yasunobu, S. Miyamoto, and H. Ihara (1981) "Train Automatic Operation System by Fuzzy Theory", The Proceedings of 20th SICE, 467/468.
- Santoyo E., Rodríguez B. (2015)Evaluación del deterioro presente en conductores de acero al carbón mediante un sistema inteligente. 18(2), 113-120.
- Secretaria de Economía (2013) Energías Renovables, unidad inteligencia de negocios, Primera edición, Secretaria de economía, Cd. Mex.

- Secretaria de Energía (2012), Programa de fomento de sistemas Fotovoltaicos en Mexico (ProSolar), Mexico D.F.
- Secretaria de Energía (2015), Proyecto Servicios Integrales de Energía, <https://www.gob.mx/sener/articulos/proyecto-servicios-integrales-de-energia> (ultimo acceso 18 de Diciembre 2016).
- Secretaria nacional de energia (2013), Estrategia nacional de energía 2013-2027 Disponible: <http://www.gob.mx/sener/documentos/estrategia-nacional-de-energia> (Ultimo acceso 18 diciembre 2016)
- Servicio Geológico Mexicano (2016) Seguimiento precio del petróleo mezcla mexicana. Disponible: <http://portalweb.sgm.gob.mx/economia/es/energeticos/mezcla-mexicana.html> (ultimo acceso 19 Dic 2016).
- Syafaruddin, Engin Karatepe. (2009) Polar coordinated fuzzy controller based real-time maximum-power point control of photovoltaic system. 2597-2606.
- W.G. de Ru, J.H.P. Eloff (1991) información risk assenment: risk analysis and risk management, the 8th World conference on computer security audit and control, London, UK.
- WBGU'S World Energy Vision, (2003) http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/ha uptgutachten/jg2003/wbgu_jg2003_engl.pdf (ultimo acceso: 28 de mayo 2016).
- Wu Y, Geng S, Zhang H, Gao M. (2015) Decision framework of solar thermal power plant site selection based on linguistic Choquet operator. 303-311.
- Yassine Charabi, Adel Gastli. (2011) PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation 2554-2561

Yunna Wu, Shuai Gen, Haobo Zhang, Min Gao. (2014) Decision framework of solar thermal power plant site selection based on linguistic Choquet operator. 0306-2619.