



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”, Zacatenco**

**“GESTIÓN DE LA ENERGÍA EN UNA MICRO RED
ELÉCTRICA INTELIGENTE UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA”**

T E S I S

para obtener el título de
Ingeniero Electricista

Presentan

Iván Corona Arriaga

Ignacio Gutiérrez Arvizu

Mario Alberto Seydlitz Rivera

Asesores

M. en C. Jacob Efraín Díaz Lavariega

M. en C. Manuel García López



Ciudad de México, a 28 de enero de 2019

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

TEMA DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
DEBERA (N) DESARROLLAR C. IVAN CORONA ARRIAGA
C. IGNACIO GUTIERREZ ARVIZU
C. MARIO ALBERTO SEYDLITZ RIVERA

“GESTIÓN DE LA ENERGÍA EN UNA MICRO RED ELÉCTRICA INTELIGENTE UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA”

DISEÑAR UN CONTROLADOR DIFUSO PARA LA GESTIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA MICRO RED INTELIGENTE AISLADA, COMPUESTA POR FUENTES DE GENERACIÓN SOLAR, EÓLICA Y UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE BATERIAS.

- ❖ EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN
- ❖ REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES
- ❖ LÓGICA DIFUSA Y CONTROL DIFUSO
- ❖ MODELADO DE LA MICRO RED ELÉCTRICA
- ❖ SIMULACIÓN DE LA MICRO RED ELÉCTRICA INTELIGENTE
- ❖ CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CIUDAD DE MÉXICO, A 28 DE ENERO DE 2019.

ASESORES


M. EN C. JACOB EFRAÍN DÍAZ
LAVARIEGA


M. EN C. MANUEL GARCÍA
LÓPEZ

ING. JUAN DE JESÚS NERI ESCOBAR
JEFE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA



Instituto Politécnico Nacional
Presenta

Bajo protesta de decir la verdad los que suscriben **Iván Corona Arriaga, Ignacio Gutiérrez Arvizu y Mario Alberto Seydlitz Rivera**, manifiestan ser autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "**Gestión de la energía en una micro red eléctrica inteligente utilizando lógica difusa**", en adelante "**La Tesis**" y de la cual se adjunta copia, un impreso y un CD por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgamos al **Instituto Politécnico Nacional**, en adelante **EI IPN**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales o en cualquier otro medio; para apoyar futuros trabajos relacionados con el tema de "**La Tesis**" por un periodo de 10 años contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a **EI IPN** de su terminación.

En virtud de lo anterior, **EI IPN** deberá reconocer en todo momento nuestra calidad de autores de "**La Tesis**".

Adicionalmente, y en nuestra calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de "**La Tesis**", manifestamos que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por los suscritos respecto de "**La Tesis**", por lo que deslindamos de toda responsabilidad a **EI IPN** en caso de que el contenido de "**La Tesis**" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumimos las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México a 01 de abril de 2019

Atentamente

Iván Corona Arriaga

Ignacio Gutiérrez Arvizu

Mario Alberto Seydlitz Rivera



Resumen

En esta tesis se presenta el desarrollo de un controlador difuso para la gestión de energía en una micro red eléctrica inteligente. Se definió la configuración y los elementos que componen a la micro red: sistema solar fotovoltaico, aerogenerador y un banco de baterías como medio de almacenamiento de energía. También se desarrolló el modelo matemático para cada elemento que compone el sistema, posteriormente se validaron a través de una simulación realizada en Simulink de Matlab. Asimismo, se programó el sistema de inferencia difuso tipo Mamdani utilizando la herramienta Fuzzy logic toolbox. Para evaluar el desempeño del controlador, se realizaron tres casos de estudio donde se sometió la generación renovable y el estado de carga de la batería a diferentes condiciones. Como resultados se presenta una respuesta adecuada del controlador para la correcta administración y el máximo aprovechamiento de la energía.



Abstract

This thesis presents the development of a fuzzy controller for the energy management in an intelligent electrical microgrid. It defines the configuration and the elements that make up the microgrid: photovoltaic solar system, wind turbine and a battery bank as a means of energy storage. The mathematical model was also developed for each element that is part of the system, later they were validated through a simulation carried out in Matlab's Simulink software. In addition, the Mamdani fuzzy inference system was made using the Fuzzy logic toolbox tool. In order to evaluate the performance of the controller, three different studies were carried out where the renewable generation and the state of charge of the battery were subjected to different conditions. As results, a good response from the controller is presented for the correct management and maximum use of energy.



Contenido

Resumen	ii
Abstract	iii
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas	xi
Lista de Acrónimos	xii
Capítulo I. El problema de investigación	1
1.1 Introducción	2
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general:	4
1.3.2 Objetivos específicos:	4
1.4 Justificación	5
1.5 Estado del arte	6
1.6 Aportaciones	8
1.7 Estructura de tesis	9
Capítulo II. Redes eléctricas inteligentes	11
2.1 Elementos de una red eléctrica inteligente	12
2.1.1 Generación eólica.	13
2.1.2 Generación solar.	18
2.1.3 Otros tipos de generación.	24
2.1.4 Sistemas de almacenamiento de energía.	26
2.1.5 Sistemas electrónicos de potencia.	28
2.2 Gestión y optimización de energía	33



Capítulo III. Lógica difusa y control difuso	37
3.1 Lógica difusa	38
3.2 Funciones de membresía	39
3.2.1 Función de saturación.	40
3.2.2 Función hombro.	41
3.2.3 Función triangular.	41
3.2.4 Función trapecio o pi.	42
3.2.5 Función gaussiana.	43
3.3 Composición	44
3.4 Controladores difusos	46
3.4.1 Difusificación.	46
3.4.2 Base de conocimientos.	48
3.4.3 Lógica de decisiones.	48
3.4.4 Desdifusificación.	48
3.4.5 Control difuso tipo Mamdani.	52
Capítulo IV. Modelado de la micro red eléctrica	54
4.1 Modelo matemático del sistema solar fotovoltaico	55
4.1.1 Modelo matemático de la celda solar fotovoltaica.	55
4.1.2 Modelo matemático del panel solar fotovoltaico.	57
4.1.3 Curvas I-V y P-V de un panel solar fotovoltaico.	58
4.1.4 Efecto de la radiación solar sobre los paneles fotovoltaicos.	59
4.1.5 Efecto de la temperatura sobre los paneles fotovoltaicos.	60
4.1.6 Modelo matemático del panel solar fotovoltaico en Simulink.	62
4.2 Modelo matemático del aerogenerador	66



4.3 Modelo matemático del banco de baterías	70
4.3.1 Modelo matemático del estado de carga (descarga).	70
4.3.2 Modelo matemático del estado de carga (carga).	72
4.3.3 Modelo matemático del banco de baterías en Simulink.	73
4.4 Desarrollo del controlador	75
4.4.1 Entradas y salidas.	75
4.4.2 Funciones de membresía.	77
4.4.3 Base de conocimientos.	79
4.4.4 Desarrollo del controlador difuso en la plataforma Simulink – Matlab.	81
Capítulo V. Simulación de la micro red eléctrica inteligente	86
5.1 Descripción de la micro red	87
5.2 Perfil de demanda	88
5.3 Casos de estudio	89
<i>Caso I. Excedente de generación.</i>	90
<i>Caso II. Déficit de generación.</i>	92
<i>Caso III. Excedente de generación y déficit de energía.</i>	95
Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones	98
6.1 Conclusiones	99
6.2 Recomendaciones y trabajos futuros	100
Referencias	101
Apéndice A. Fuzzy Logic Toolbox.	104
Apéndice B. Comunicación entre Fuzzy Logic Toolbox y Simulink.	113
Anexo C. Ejemplo de cálculo del proceso de inferencia tipo Mamdani.	115



Índice de Figuras

Figura 1.1 Generación de energía eléctrica por tipo de tecnología 2015.	3
Figura 2.1 Capacidad instalada y generación bruta de centrales eólicas.	16
Figura 2.2 Evolución de las adiciones de capacidad, capacidad instalada y generación de las centrales eólicas, 2016-2030.	17
Figura 2.3 Capacidad instalada y generación bruta de centrales fotovoltaicas	20
Figura 2.4 Evolución de las adiciones de capacidad, capacidad instalada y generación de tecnología solar fotovoltaica, 2016-2030.	21
Figura 2.5 Sistemas de almacenamiento de energía según relación densidad de potencia y densidad de energía.	26
Figura 2.6 Diagrama básico de un rectificador trifásico CA-CD.	29
Figura 2.7 Modelo básico de un convertidor CD-CD reductor.	31
Figura 2.8 Modelo básico de un convertidor CD-CD elevador.	31
Figura 2.9 Modelo básico de un inversor trifásico.	33
Figura 2.10 Objetivos en micro redes eléctricas para la gestión de la energía.	34
Figura 3.1 Función de membresía tipo saturación.	40
Figura 3.2 Función de membresía tipo hombro.	41
Figura 3.3 Función de membresía tipo triangular.	42
Figura 3.4 Función de membresía tipo PI.	43
Figura 3.5 Función de membresía tipo gaussiana.	44
Figura 3.6 Diagrama de la composición de T.	44
Figura 3.7 Estructura de un controlador difuso.	46
Figura 3.8 Particiones difusas con distinto número de términos.	47
Figura 3.9 Proceso típico de salida difuso: a) Primera parte de la salida difusa; b) Segunda parte de la salida difusa; y c) Unión de ambas partes.	49
Figura 3.10 Método de máxima de la función de membresía.	49
Figura 3.11 Método de centroide.	50
Figura 3.12 Método de promedio ponderado.	51
Figura 3.13 Método de centro de sumas.	52
Figura 4.1 Circuito equivalente de una celda solar.	55



Figura 4.2	Curvas características I-V y P-V para un panel solar fotovoltaico.	58
Figura 4.3	Curva característica I-V por variación de radiación solar.	59
Figura 4.4	Curva característica P-V por variación de irradiancia.....	60
Figura 4.5	Curva característica I-V por variación de temperatura.	61
Figura 4.6	Curva característica P-V por variación de temperatura.....	61
Figura 4.7	Modelo de la corriente de saturación de referencia en Simulink.	62
Figura 4.8	Modelo de la corriente de saturación (I_0) en Simulink.....	63
Figura 4.9	Modelo de la corriente fotogenerada (I_{pv}) en Simulink.	63
Figura 4.10	Modelo de la corriente de salida (I) en Simulink.	64
Figura 4.11	Modelo del panel solar fotovoltaico en Simulink.....	64
Figura 4.12	Curva característica P-V para diferentes niveles de radiación solar: 1000W/m ² (azul), 800W/m ² (rojo), 600W/m ² (verde) y 400W/m ² (gris).	65
Figura 4.13	Curva característica I-V para diferentes niveles de radiación solar: 1000W/m ² (azul), 800W/m ² (rojo), 600W/m ² (verde) y 400W/m ² (gris).	65
Figura 4.14	Modelo matemático del generador eólico en Simulink.	67
Figura 4.15	Modelo del aerogenerador en Simulink.	68
Figura 4.16	Curva característica Potencia-Velocidad.....	69
Figura 4.17	Potencia-Velocidad del viento-Tiempo.	69
Figura 4.18	Proceso de descarga de la batería a diferentes velocidades	71
Figura 4.19	Proceso de carga de la batería a diferentes velocidades.	72
Figura 4.20	Modelo del estado de carga en Simulink.....	73
Figura 4.21	Modelo de la batería en Simulink.	74
Figura 4.22	Proceso de descarga-carga de la batería.....	74
Figura 4.23	Proceso de carga-descarga de la batería.....	75
Figura 4.24	Diagrama a bloques de la micro red eléctrica.	76
Figura 4.25	Funciones de membresía para la potencia neta.....	77
Figura 4.26	Funciones de membresía para la batería.	78
Figura 4.27	Funciones de membresía para las variables de salida.....	79
Figura 4.28	Interfaz principal del ToolBox de Fuzzy Logic, para el desarrollo del controlador difuso tipo Mamdani en Matlab.....	81



Figura 4.29	Curva de superficie para la salida “Switch de Carga”	82
Figura 4.30	Curva de superficie para la salida “Switch de Descarga”	83
Figura 4.31	Curva de superficie para la salida “Switch Solar 1”	83
Figura 4.32	Curva de superficie para la salida “Switch Solar 2”	84
Figura 4.33	Curva de superficie para la salida “Switch Eólico”	84
Figura 5.1	Simulación de la micro red eléctrica en Simulink.....	87
Figura 5.2	Perfil de demanda empleado en la simulación del sistema.	88
Figura 5.3	Potencia total generada en el caso 1.	90
Figura 5.4	Potencia neta en el caso 1.	91
Figura 5.5	Estado de carga de la batería (SOC) en el caso 1.	91
Figura 5.6	Energía entregada por la batería en el caso 1.	92
Figura 5.7	Potencia total generada en el caso 2.	93
Figura 5.8	Potencia Neta en el caso 2.....	93
Figura 5.9	Estado de carga de la batería (SOC) en el caso 2.	94
Figura 5.10	Energía entregada por la batería en el caso 2.	94
Figura 5.11	Potencia total generada en el caso 3.	95
Figura 5.12	Potencia neta en el caso 3.	96
Figura 5.13	Estado de carga de la batería (SOC) en el caso 3.	96
Figura 5.14	Energía entregada por la batería en el caso 3.	97
Figura A.1	Interfaz principal de Fuzzy Logic Designer.	106
Figura A.2	Interfaz de membership function editor.....	109
Figura A.3	Interfaz de rule viewer.....	111
Figura A.4	Interfaz de surface viewer.....	112
Figura B.1	Variable exportada a workspace de Matlab.	113
Figura B.2	Bloques de Simulink correspondientes a un sistema difuso.	114
Figura B.3	Comunicación entre Fuzzy logic toolbox y Simulink.	114
Figura C.1	Valor de entrada Pneta (25kW).	115
Figura C.2	Valor de entrada SOC (0.85).	115
Figura C.3	Interfaz Rule viewer de Matlab.....	116
Figura C.4	Proceso de difusificación para las condiciones propuestas.	117



Figura C.5 Salidas para las reglas 14 y 15.....	118
Figura C.6 Figura resultante para cada salida.....	118
Figura C.7 Cálculo de centroide para la salida “Carga”.....	121
Figura C.8 Cálculo de centroide para la salida “Descarga”.	122
Figura C.9 Cálculo de centroide para la salida “Solar1”.	119



Índice de Tablas

Tabla 4.1 Características eléctricas del panel solar MESM-50W.....	62
Tabla 4.2 Características eléctricas del aerogenerador GESIS-50KW.....	68
Tabla 4.3 Características eléctricas de la batería MLI Ultra24/5000.....	73
Tabla 4.4 Conjuntos difusos.....	77
Tabla 4.5 Conjunto de reglas incorporadas al controlador difuso.	80



Lista de Acrónimos

Ah	Ampere hora
AMDEE	Asociación Mexicana de Energía Eólica
PCC	Compilador de C Portable
I	Corriente
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
DOF	Diario oficial de la federación
SOC	Estado de Carga
IA	Inteligencia artificial
CSI	Inversores de fuente de corriente
VSI	Inversores de fuente de voltaje
PWM	Modulación por ancho de pulsos
P	Potencia
P_{neta}	Potencia Neta
SENER	Secretaría de Energía
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
NaS	Sulfuro de Sodio
V	Voltaje



Capítulo I. El problema de investigación



1.1 Introducción

Las micro redes inteligentes representan uno de los últimos progresos tecnológicos en la rama de la ingeniería eléctrica en el mundo. Proporcionan una serie de ventajas que en otros sistemas son mucho más difíciles de implementar y gracias a que su desarrollo ha ido de la mano con la constante evolución de las tecnologías limpias, actualmente son una opción válida para enfrentar la contaminación y disminuir el uso de los combustibles fósiles.

La relevancia internacional que tiene las micro redes solo ha ido en aumento con el paso de los años, gracias a su capacidad de integrar la generación de pequeña escala y flexible a la energía limpia y los controles inteligentes.

Por otra parte, la lógica difusa es una técnica de inteligencia artificial que permite emular el comportamiento humano a través de valores de pertenencia. El uso de este método para el control permite manejar variables de diferentes grados de complejidad para simular un escenario y poder identificar qué acciones tomar de acuerdo a la intensidad o “grado de pertenencia” que pueda tener en dicho escenario.

El objetivo de esta tesis, será realizar la simulación de una micro red inteligente en la que se observe una correcta gestión de la energía, para lo cual se diseñará un controlador basado en lógica difusa que sea capaz de responder a diferentes escenarios propuestos en los que las condiciones demanden una administración de la energía diferente en cada caso.

El trabajo partirá desde la configuración de la micro red y sus fuentes de generación, así como el diseño del controlador basado en lógica difusa que se adapte a las condiciones del sistema, hasta la elección de las condiciones a simular para poner a prueba el comportamiento del controlador, monitoreando la micro red para determinar si la gestión de la energía fue la correcta en cada caso.

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad, la gran dependencia en los combustibles fósiles y la contaminación ambiental que estos ocasionan, ha motivado a buscar fuentes de energía alternativas para la generación eléctrica. Las energías renovables son consideradas como fuentes de generación alternativas a las plantas de producción convencionales, destacándose la tecnología solar fotovoltaica y eólica, puesto que han sido las más prometedoras para la producción de electricidad en los últimos años.

La figura 1.1 muestra la generación de energía eléctrica por tipo de tecnología en México en el año 2015, donde las energías renovables aportaron el 20% de la producción total; la eólica y solar colaboraron con el 3% y 1%, respectivamente. Dicho esto, se ha impulsado un plan de desarrollo energético hacia 2024, cuyo objetivo es que el 35% de la generación eléctrica provenga de estas tecnologías (SENER, 2016).

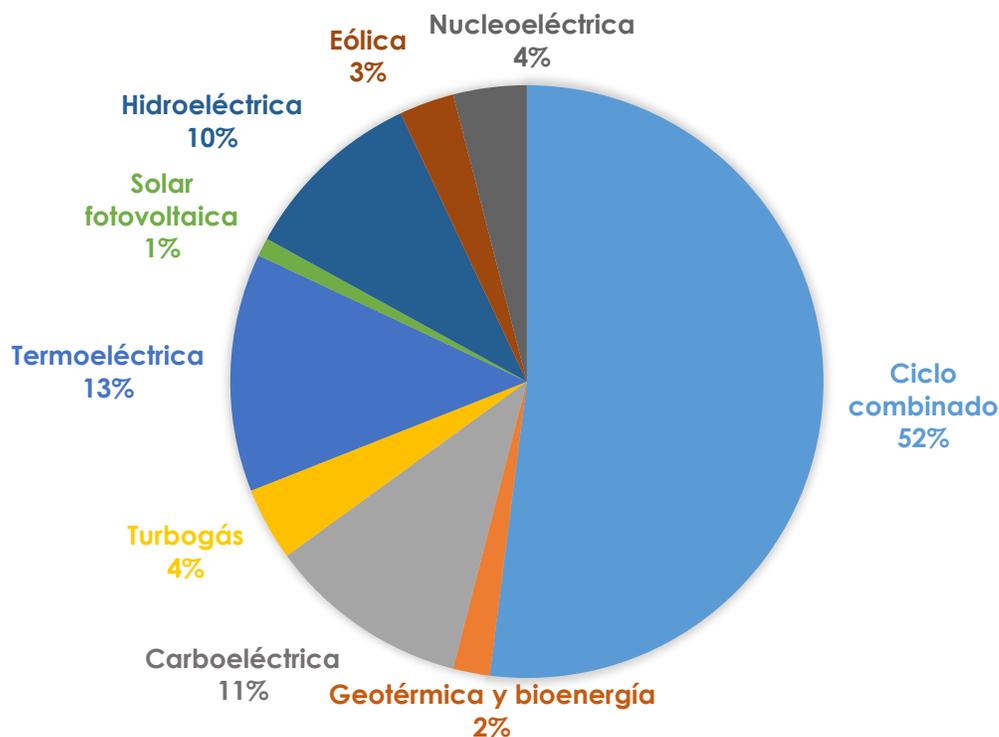


Figura 1.1 Generación de energía eléctrica por tipo de tecnología 2015.



Sin embargo, la integración de plantas de generación solar y eólica en el sistema eléctrico presenta el problema del ineludible vínculo que se tiene a las condiciones ambientales, además del control de la energía entre el lado fuente y lado carga que conforman dicho sistema. En consecuencia, no solo se obtiene generación eléctrica limitada, sino que también se puede tener en algunos lapsos de tiempo, exceso de generación. Por otra parte, la vida útil de los componentes del sistema, principalmente de los generadores y de los sistemas de almacenamiento de energía, se ve afectada y en muchas ocasiones se tienen que reemplazar tempranamente.

Hoy en día, el máximo aprovechamiento de los recursos es un punto clave en la operación de cualquier sistema, por lo tanto, en esta tesis se propone lograr una óptima gestión de la energía en una micro red eléctrica compuesta por un sistema fotovoltaico, eólico y un banco de baterías, para satisfacer la carga demandada bajo condiciones climáticas variables desarrollando un controlador que determinará el momento en que deben de entrar o salir de funcionamiento las fuentes generadoras, garantizando una operación segura, confiable y eficiente de los diferentes elementos que intervienen en este proceso.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general:

Diseñar un controlador difuso para la gestión de energía eléctrica en una micro red inteligente aislada, compuesta por fuentes de generación solar, eólica y un sistema de almacenamiento de baterías.

1.3.2 Objetivos específicos:

1. Realizar una simulación en el software *MATLAB/Simulink* con el fin de observar el desempeño de cada uno de los elementos que conforman la micro red eléctrica.



2. Determinar las reglas y restricciones que deben ser tomadas en cuenta para desarrollar el controlador difuso.
3. Analizar los posibles escenarios que se dan en una micro red durante la gestión de la energía.

1.4 Justificación

Para el desarrollo de este trabajo se ha propuesto un sistema eléctrico donde las plantas generadoras son de tecnología solar fotovoltaica y eólica. Esto se debe a que México es uno de los 5 países con mayor nivel de radiación solar en el mundo, con un potencial de hasta 40MW de producción de energía eléctrica; sin embargo, sólo se aprovecha el 5% de ésta (Meneses, 2017). Por otra parte, México también cuenta con excelentes ciudades ventosas donde se podría aprovechar perfectamente el gran potencial eólico que éstas poseen. Ahora bien, esta propuesta ayudaría a que, a mediano plazo, se disminuya la dependencia que existe en los combustibles fósiles para generar electricidad y esto disminuya las emisiones de gases por efecto invernadero.

Por otra parte, en esta tesis se identificarán los elementos principales que componen una micro red inteligente. En la actualidad, la supervisión, el control y monitoreo de cualquier proceso son necesarios si se desea que éste sea eficiente. En el caso de la red eléctrica, se desea que proporcione el servicio de manera segura; es decir, que no haya interrupciones en el suministro de energía, que tenga flexibilidad en la gestión de los picos de demanda, y que su gestión de abastecimiento sea de la manera más óptima posible para tener un mejor aprovechamiento de la energía. Además, debido a la carencia de energía eléctrica en diversas zonas a lo largo del país se propone que sea una micro red aislada. Con la implementación a corto - mediano plazo de micro redes inteligentes aisladas en México, el sistema eléctrico nacional aumentaría su eficiencia en el sector de generación, distribución y comercialización.



Puesto que todo proceso inteligente requiere de un sistema de control que nos permita realizar las actividades antes mencionadas, se ha propuesto desarrollar un sistema de control difuso que sea capaz de auto gestionar la energía eléctrica producida por las plantas de generación, ya que la lógica difusa, al ser una rama de la inteligencia artificial (IA), proporciona un mecanismo de inferencia que permite simular los procedimientos de razonamiento humano en sistemas basados en reglas, de tal manera que nos permite gobernar un proceso sin la necesidad de conocer su modelo matemático.

Finalmente, al término de esta tesis se busca aportar nuevas ideas para ampliar la noción que se tiene en la actualidad sobre las redes inteligentes, ya que en México la implementación de estas nuevas tecnologías ha sido discreta y se espera que en los próximos años se incorporen y colaboren para satisfacer adecuadamente las necesidades que demande el sistema eléctrico del país, integrando y aprovechando adecuadamente la energía producida por fuentes de generación renovables, a fin de reducir notablemente la emisión de gases contaminantes al medio ambiente.

1.5 Estado del arte

En la actualidad la electricidad es fundamental en la vida diaria de la población, y es imprescindible que llegue de forma ininterrumpida a los hogares, negocios e industrias de las ciudades para evitar todo tipo de pérdidas o interrupciones en la producción, es por esto que los sistemas de autogestión y supervisión se han vuelto tan relevantes en el sistema eléctrico, principalmente en los países y regiones del mundo con mayor desarrollo tecnológico.

Durante los últimos años, el número de proyectos enfocados en este aspecto han ido poco a poco en aumento, no sólo como parte de la iniciativa privada o como trabajos de investigación, sino también como parte del proyecto de desarrollo de una red eléctrica nacional.



Las tesis que se han elaborado sobre el tema en México han sido escasas, sin embargo, a continuación, se citan algunos de los trabajos a nivel mundial que abordan este tema:

En Gasco González (2013) se modela una red distribuida, un sistema de generación fotovoltaico y un sistema de generación eólica y se realizan los estudios de integración estáticos y dinámicos para analizar el comportamiento de las redes con presencia de generación renovable distribuida y sistemas de acumulación. También propone la optimización de los sistemas de generación propuestos para prestar el servicio complementario de ajuste de frecuencia en una red distribuida.

Este proyecto es un estudio para la futura integración de las redes eléctricas en el sistema de distribución eléctrica. Es bastante amplia en cuanto a análisis, abarcando otros tipos de generación y de almacenamiento de la energía analizando distintos tipos de control.

El siguiente trabajo, de Uzma Amin (enero 2013) es el proyecto más similar al aquí presentado, en especial porque hace uso de una micro red y su objetivo final es la simulación de ésta en Simulink /MATLAB. Aunque en este caso funciona con un Compilador de C Portable (PCC). En este trabajo se realiza un análisis sobre las formas en las que se pueden implementar los tipos de generación distribuida en diferentes modelos de micro red.

En Saranya S. D (abril 2015) se plantea el objetivo de ampliar la vida útil de la batería haciendo uso de la lógica difusa, analizando los cambios que puede llegar a haber en un sistema de conexión y desconexión y como el sistema de lógica difusa puede llegar a hacer más ligeros estos cambios para las baterías, optimizando su manejo y ampliando su vida útil.

Por otra parte, Obasi J. O (enero 2016) a diferencia de los anteriores se enfoca en el uso de la Lógica Difusa para realizar la administración de la micro red orientado a realizar una simulación con el software Simulink apoyándose de la



herramienta del controlador de lógica difusa con la que esté cuenta para emular diferentes casos de generación y demanda. Este proyecto se enfoca en la carga o descarga de la batería ya que se trata de un sistema aislado y plantea situaciones donde la batería no es requerida, donde se carga y descarga en diferentes momentos de la simulación y donde la batería es completamente descargada sin satisfacer la demanda.

Otro trabajo, de R. Karthick (enero 2017) se encarga de modelar no solo las clásicas fuentes de generación distribuida, sino que además implementa un electrolizador de hidrógeno que funciona como respaldo para las fuentes de generación primarias eólica y solar. Se realiza un modelado matemático de cada fuente y se ejecuta una simulación en Simulink. Este proyecto utiliza un controlador basado en lógica difusa para asegurar la administración óptima de la energía principalmente de las baterías en el sistema, haciendo incluso una comparación sobre los sistemas regulares y otros basados en lógica difusa.

1.6 Aportaciones

Las aportaciones más relevantes alcanzadas en el desarrollo de esta tesis son:

1. En este trabajo se propuso, además de realizar una correcta administración del sistema de almacenamiento (evitando sobrecargas y descargas profundas) tener un control de conexión/desconexión de las fuentes de generación renovable, evitando de esta manera excedentes de generación y obteniendo un mejor aprovechamiento de la energía.
2. Esta tesis representa uno de los primeros trabajos que se desarrollan a nivel licenciatura en el área de la lógica difusa como técnica de control en su aplicación al control y administración de la energía en micro redes eléctricas en el país.
3. El interés y la motivación de esta tesis fue abordar temas como las micro redes eléctricas debido a que es un área poco explorada y desarrollada en México y también sobre la inteligencia artificial, que en este caso es la lógica difusa.



4. Se realizó la programación y comunicación entre la herramienta *Fuzzy Logic Toolbox* y Simulink para el desarrollo del sistema de control difuso.

1.7 Estructura de tesis

En el primer capítulo se presenta el problema de investigación a abordar, y se plantea una propuesta de solución para resolver el mismo, enseguida se encuentran los objetivos y la justificación del trabajo. Además, se presenta el estado del arte, con los trabajos más recientes que tratan de atender la problemática. Al final del capítulo se presentan las aportaciones y la forma en que está organizada esta tesis.

En el segundo capítulo se menciona la definición general de las redes eléctricas inteligentes y los elementos que las componen, destacándose las fuentes de energía renovable y su situación actual en México, los sistemas de almacenamiento de energía y los sistemas electrónicos de potencia. Por último, se describen los objetivos básicos que se buscan atender en las micro redes eléctricas, presentando las ventajas y desventajas que tienen estos sistemas.

En el tercer capítulo se habla sobre la lógica difusa, los fundamentos teóricos de esta técnica de control y del control difuso, mencionando su estructura, dándose una breve descripción de cada etapa y haciendo énfasis en la inferencia tipo Mamdani, misma que es utilizada para el desarrollo del sistema de control difuso.

En el cuarto capítulo se presentan los modelos matemáticos de los diferentes elementos que componen a la micro red, los cuales son: sistema solar fotovoltaico, aerogenerador y un banco de baterías como medio de almacenamiento de energía. Asimismo, se presenta la validación de cada modelo obtenido haciendo uso del software Simulink de Matlab. Al final del capítulo se desarrolla la programación del controlador difuso, definiendo las entradas y salidas, las funciones de membresía, la base de conocimientos y el método de desfusificación, haciendo uso de la herramienta Fuzzy logic toolbox de Matlab y se hace la interpretación de las curvas de control obtenidas para cada variable.



En el quinto capítulo se muestra la simulación realizada en el software Simulink de Matlab. Se presenta un perfil de demanda y la energía renovable producida por el sistema bajo diferentes condiciones, con el fin de observar y analizar la respuesta del controlador en 3 diferentes casos de estudio. Cada uno de ellos tiene un tiempo de simulación de 24 horas.

Finalmente, en el sexto capítulo se establecen las conclusiones de los casos simulados. Se proponen ideas que a futuro pueden ser desarrollados para la administración de la energía en sistemas interconectados, así como una serie de recomendaciones que pueden ser tomadas en cuenta para tener un análisis más completo de la temática de esta tesis.



Capítulo II. Redes eléctricas inteligentes



En el presente capítulo se estudia la situación actual de las redes inteligentes y los elementos que las conforman. Esto servirá para poder identificar los retos que existen, las ventajas y desventajas de estos sistemas y su proyección a futuro en el país.

El sistema eléctrico ha sido desde su nacimiento uno de los más extensos y complejos que ha conocido el ser humano, y actualmente, dicho sistema carece de infraestructura que garantice el máximo aprovechamiento de los recursos; es decir, que se logre una mejor gestión de energía para satisfacer la demanda eléctrica de manera económicamente eficiente y sustentable; sin dejar a un lado de que este proceso se realice de manera segura y confiable, manteniendo e incluso mejorando la calidad del suministro de energía eléctrica.

Con la aparición de nuevas tecnologías de generación y acumulación, resulta interesante el estudio de un nuevo concepto de red de distribución, capaz de no sólo consumir energía, sino también de generarla a través de flujos bidireccionales. De esta manera, las tecnologías de generación, como las tecnologías de acumulación, junto a las cargas de la red, pueden ser ahora reguladas, conectadas, desconectadas y ajustadas con el fin de optimizar el funcionamiento de la propia red. Es así, como nace el concepto de red de distribución de energía eléctrica inteligente, capaz de equilibrar la generación y la demanda del sistema eléctrico.

La Ley de la Industria Eléctrica en México (2014), define a una red eléctrica inteligente como: “Red Eléctrica que integra tecnologías avanzadas de medición, monitoreo, comunicación y operación, entre otros, a fin de mejorar la eficiencia, confiabilidad, calidad o seguridad del Sistema Eléctrico Nacional”.

2.1 Elementos de una red eléctrica inteligente

En esta tesis, se estudiarán las tecnologías de generación, acumulación y de control, destacando los siguientes elementos:



1. Generación eólica.
2. Generación solar fotovoltaica.
3. Otros tipos de generación.
4. Sistemas de acumulación de energía.
5. Sistemas electrónicos de potencia.

2.1.1 Generación eólica.

Un aerogenerador o turbina eólica es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica, misma que, impulsa un generador para producir electricidad. La energía producida depende de diferentes parámetros como son: tamaño y cantidad de las aspas, altura del aerogenerador, ubicación geográfica, orientación y velocidad del aire (Gascó, 2013).

A bajas velocidades del viento, no hay energía suficiente para que la turbina comience a operar y, por lo tanto, no hay producción de energía. A la velocidad entre 3 y 5 m/s, el aerogenerador empieza a producir potencia eléctrica hasta alcanzar su producción máxima. (Weedy, Cory, Jenkins, Ekanayake, & Strbac, 2012, p.15).

La máxima producción de energía se obtiene con una velocidad del viento de 13 a 14 m/s. A velocidades de viento mayores, la turbina debe ser controlada para proteger al rotor, al generador y a los equipos de electrónica de potencia de una sobrecarga. El factor de planta para este tipo de centrales se encuentra entre 20% y 40%, por lo que no es posible que éstos produzcan electricidad por largos periodos a su máxima capacidad.

La tecnología eólica ha tenido un crecimiento importante debido a su rápido desarrollo tecnológico y disminución de costos, convirtiéndola en la energía renovable con mayor crecimiento y demanda mundial. Además, la capacidad de los aerogeneradores ha aumentado gracias a los avances tecnológicos, llegando a aproximarse a los 5MW de producción y 10MW para aplicaciones off-shore o marinas (SENER, 2015).



El medio que comprende la energía eólica es muy amplio e incluye diversos aspectos de ingeniería (aerodinámica, electrónica de potencia, mecánica, control y automatización, etc.). Sin embargo, es importante señalar que, en el ámbito de los generadores eólicos, existen básicamente tres tipos de tecnologías:

1. *Generador eólico síncrono*. El generador síncrono es una máquina formada por un rotor y un estator. El rotor es la parte móvil del generador y su función principal es producir el campo magnético a través de imanes. El estator es la parte fija, formado por una serie de devanados, en donde se producirá la corriente alterna inducida por el campo magnético variable creado por el rotor.

Los generadores compuestos por un rotor basado en electroimanes o imanes permanentes no requieren del uso del multiplicador, por lo que aumenta el rendimiento al eliminar las pérdidas que éste provoca y el ruido que genera. Por el contrario, requieren el uso de un gran número de polos, que se traduce en grandes diámetros del generador y en consecuencia grandes pesos y costes de producción y montaje elevados. (Talayero & Telmo, 2011, p.78)

El incremento de la velocidad del viento provoca un aumento en la potencia activa suministrada por el aerogenerador manteniendo la velocidad de giro constante. Al sincronizar estas máquinas, la frecuencia, amplitud y fase de las tensiones generadas y de la red sean idénticas. (Gascó, 2013, p.24).

Este tipo de generadores eólicos son capaces de variar la tensión de salida y regular la potencia reactiva generada mediante el control de la corriente continua de excitación.

2. *Generador eólico asíncrono*. El generador asíncrono produce energía eléctrica, cuando la velocidad de giro del rotor es superior a la velocidad de giro del campo magnético de excitación creado por el estator. La energía necesaria para crear el campo de excitación del estator se toma de la red. Al tratarse de una bobina, se produce un consumo de corriente desfasada con la tensión (energía reactiva),

con lo que el factor de potencia de la línea eléctrica de distribución a la que se encuentra conectada la instalación eólica puede verse afectado; por tal motivo, se disponen de condensadores en paralelo con la línea de salida del generador para cumplir con los requerimientos de la red. (Talayero & Telmo, 2011, p. 79).

Es posible conmutar polos o usar dos bobinados diferentes para operar con dos velocidades fijas, y conseguir una mayor eficiencia del aerogenerador. Actualmente se han desarrollado sistemas de electrónica de potencia avanzados que permiten aumentar el deslizamiento del generador y controlar la potencia activa y reactiva de la máquina, obteniendo un factor de potencia alto (alrededor de 0.95).

3. Generador de velocidad variable doblemente alimentado. La máquina está formada por dos partes: estator y rotor. El estator de la máquina se conecta directamente a la red, mientras que el rotor se conecta a la red mediante un convertidor. El convertidor se emplea para controlar la tensión del rotor y el sistema de control se programa para que permita el uso del generador en el punto de operación óptima. Es posible desacoplar parcialmente la producción de potencia activa y reactiva. El convertidor del lado del rotor genera potencia activa y reactiva, mientras que el lado de la red mantiene la tensión en un valor constante.

En su estudio, León, Dos Santos, & Vilaragut (2014) mencionan que la gran ventaja de este sistema frente a otros sistemas eólicos, es que la potencia circulante por el convertidor rotórico, para velocidades en torno a la de sincronismo, es solo una pequeña fracción de la potencia total de la máquina, lo que supone un ahorro considerable en los convertidores electrónicos necesarios (párr.3).

2.1.1.1 La generación eólica en México.

En los últimos años, el aprovechamiento de la energía eólica para la generación de electricidad en el país ha mostrado un crecimiento constante y considerable. En la figura 2.1 se observa que en el año 2015 la capacidad instalada alcanzó los 2800 MW, clasificándose así en la segunda fuente de generación renovable con mayor producción de energía eléctrica en el país (SENER, 2016).

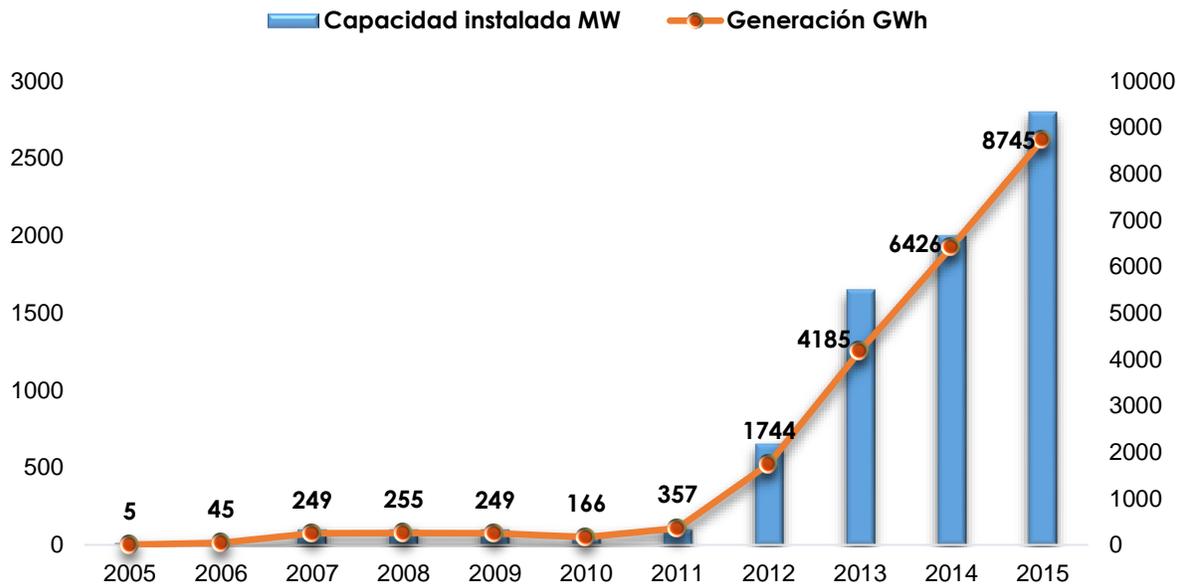


Figura 2.1 Capacidad instalada y generación bruta de centrales eólicas, 2005-2015.

Al cierre de 2015, se contaba con 32 plantas de generación en todo el territorio nacional, cuya capacidad instalada representa el 4.1% y el 2.8% de la generación eléctrica en el país.

La energía eólica tiene un papel importante para lograr la meta planteada para el año 2024, en producir el 35% de electricidad mediante energías renovables, ya que la implementación de esta tecnología no solo trae consigo beneficios medioambientales con la reducción de emisiones de CO₂, sino también económicos y sociales al brindar el servicio de suministro eléctrico a zonas rurales aprovechando los recursos naturales con los que estas cuentan.

En la figura 2.2 se observa la evolución en la generación de electricidad proveniente de esta fuente de energía a lo largo del período comprendido entre 2016 y 2030, para ubicarse en 47,365.6 GWh al final del período (SENER, 2016).

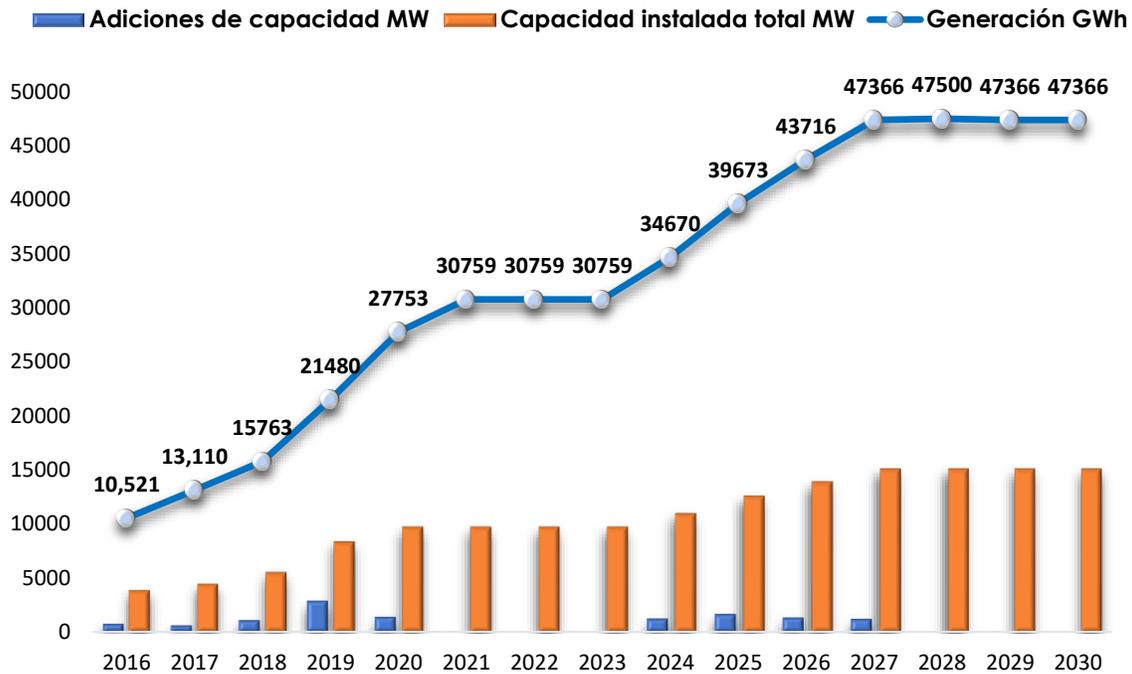


Figura 2.2 Evolución de las adiciones de capacidad, capacidad instalada y generación de las centrales eólicas, 2016-2030.

La energía eólica no sólo reduce la dependencia en fuentes de generación convencionales de nuestro país, sino que permite a nuestro sistema energético evolucionar hacia un modelo de generación distribuida, en el que los ciudadanos puedan convertirse en generadores de su propia energía eléctrica.

Los 12,000MW de producción eléctrica mediante energía eólica, marcados como objetivo para el año 2025, permitirán la generación de energía distribuida en entornos urbanos, semi urbanos, industriales y agrícolas, a la vez que crearán un entramado industrial que dará empleo a más de 45,000 personas (AMDEE, 2012).

Ventajas de la energía eólica.

1. No contamina, al no emplear combustibles para su operación.
2. El aire es un recurso inagotable.
3. No genera residuos contaminantes.
4. Larga vida útil (30 años).



5. Puede ser instalado en zonas rurales.
6. Las tierras en las que se establecen los parques eólicos no son perturbadas en gran medida.
7. Programas de mantenimiento simples.
8. Apertura y aumento de empleos en la sociedad.

Desventajas de la energía eólica.

1. Gran extensión territorial (para el caso de parques eólicos).
2. Contaminación auditiva.
3. Producción no controlada.
4. Energía intermitente.
5. Impacto estético en el paisaje.
6. Peligro para la fauna de aves de la zona.
7. Costes elevados de instalación.
8. Afecta a la estabilidad del sistema eléctrico.

2.1.2 Generación solar.

La tecnología de una planta solar consiste en la conversión de la radiación solar en electricidad por medio de un dispositivo semiconductor conocido como celda solar o celda fotovoltaica. Éstas funcionan mediante un fenómeno conocido como efecto fotovoltaico. El efecto fotovoltaico se produce al incidir radiación solar sobre materiales semiconductores extrínsecos, compuestos por una unión NP, generando un flujo de electrones en el interior de esos materiales y una diferencia de potencial entre la capa P y la capa N, que puede ser aprovechada en forma de energía eléctrica.

El material semiconductor más común que se emplea en la fabricación de celdas fotovoltaicas es el silicio, ya que es un elemento que se encuentra habitualmente en la arena y cuya disponibilidad es ilimitada pues es una materia prima inagotable (el silicio es el segundo material más abundante en la masa terrestre).



Una de las principales desventajas que tiene la tecnología solar fotovoltaica es el rendimiento, ya que “depende de la tecnología empleada en su construcción, actualmente, las tres tecnologías más empleadas son los paneles amorfos, policristalinos y monocristalinos, que alcanzan un rendimiento aproximado de 10, 15 y 20% respectivamente” (Gascó, 2013, p. 37).

La potencia generada es proporcional a la intensidad solar recibida. Su producción está condicionada por el ciclo solar de 24 horas, siendo en las horas centrales (hora solar pico) cuando presenta su mayor producción.

Cabe destacar que para un buen rendimiento del sistema fotovoltaico influyen otros factores como la temperatura ambiente (a temperaturas mayores a 25°C disminuye la eficiencia del módulo), y las sombras, formadas por la proyección de los cuerpos, las cuales se comportan como una resistencia durante el proceso de conversión de la energía (a mayor resistencia, disminuye la eficiencia del módulo). Por eso, es sumamente importante la posición y la orientación de los paneles solares.

Los componentes más importantes de un sistema fotovoltaico son las celdas solares, que se encargan de recibir la radiación solar; los módulos, que unen los diversos arreglos de las celdas solares en una unidad; y los inversores, que se usan para convertir la electricidad generada en una forma adecuada para el uso diario (conversión de corriente continua a alterna).

La energía solar fotovoltaica es una tecnología que no requiere el uso de combustibles, por lo que puede ser utilizada cerca de los centros de consumo reduciendo la congestión del sistema eléctrico. Su dependencia del recurso solar provoca intermitencia en la generación, no obstante, la disponibilidad del recurso es altamente predecible respecto a otras fuentes intermitentes, con auxilio de tecnologías de pronóstico existentes. (SENER, 2015, p. 39)

2.1.2.1 La energía solar en México.

En México, se cuenta con nueve centrales fotovoltaicas operando, las cuales representan menos del 0.1% de la capacidad total instalada y el 0.03% de la generación eléctrica en el país. En la figura 2.3 se muestra el incremento que ha tenido la capacidad instalada y la generación de electricidad a partir de energía solar en los últimos años, destacando los 170MW y 190.3GWh de generación en el año 2015 (SENER, 2016).

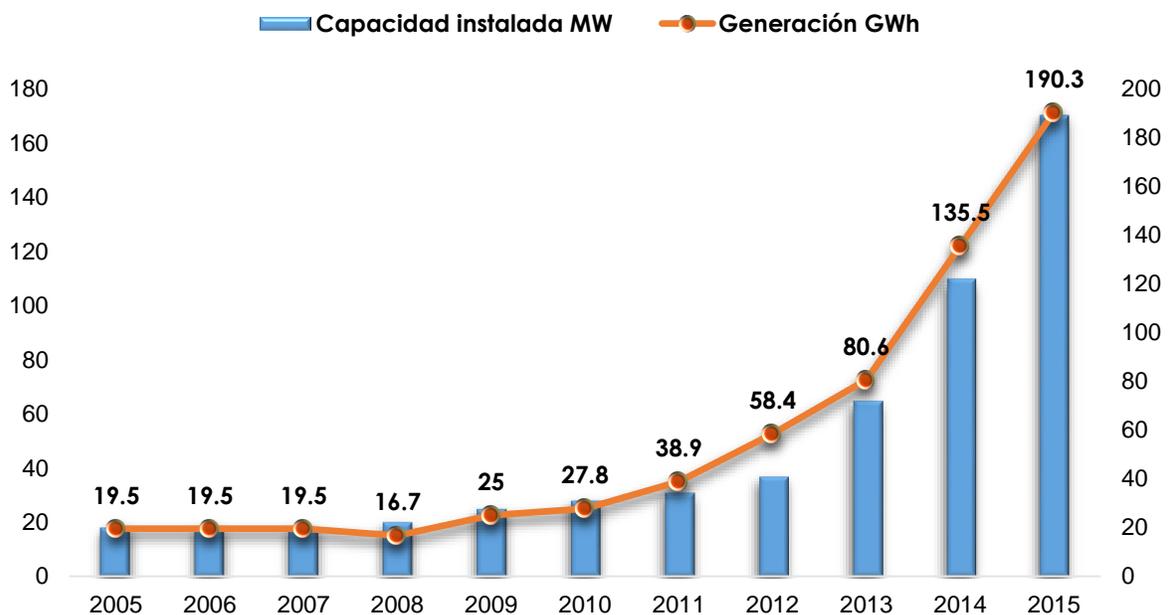


Figura 2.3 Capacidad instalada y generación bruta de centrales fotovoltaicas, 2005-2015.

La energía solar fotovoltaica comienza a tomar mayor relevancia en la generación de electricidad en algunos países. Esto se debe a que la rápida disminución en los costos y el aumento de la eficiencia que ha tenido esta tecnología en los últimos años, ha hecho que la electricidad no subsidiada y generada a partir de energía solar fotovoltaica, pueda competir con los costos de generación eléctrica mediante el uso de combustibles fósiles.

Este incremento se ha visto reforzado por el crecimiento importante de los Contratos de Interconexión Legados (Pequeña y Mediana Escala), los cuales desde 2010 han observado tasas de crecimiento importantes.

En la figura 2.4 se indica la evolución de la capacidad instalada de la tecnología solar fotovoltaica en México, pasando de 1,031.2MW en 2016 a 6,890.9 MW en 2030. Cabe destacar que habrá dos períodos trascendentes para la adición de capacidad de generación eléctrica, el primero será entre 2016 y 2018, con cerca de 3,546.6MW. El segundo período comprende del 2020 al 2030, siendo 2025, 2026 y 2027, los que tendrán la mayor adición de capacidad a instalar con 3,288.1MW. (SENER, 2016, p. 61)

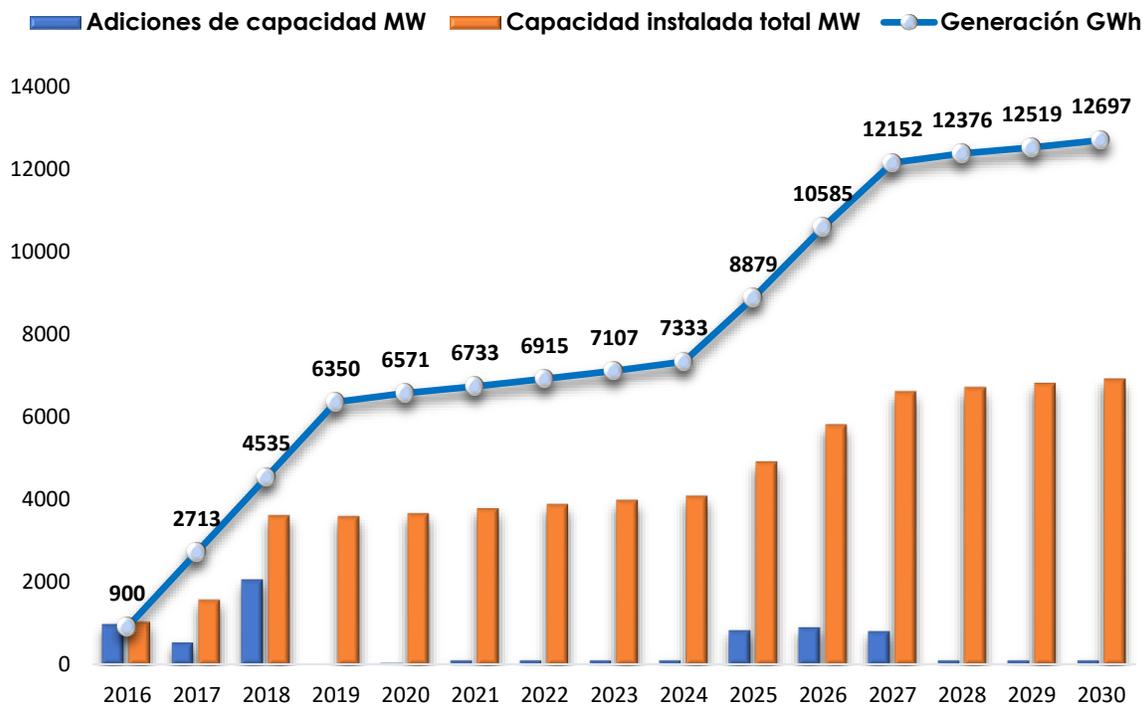


Figura 2.4 Evolución de las adiciones de capacidad, capacidad instalada y generación de tecnología solar fotovoltaica, 2016-2030.

Ventajas de la energía solar fotovoltaica.

1. No contamina: No produce emisiones de CO₂ ni de otros gases contaminantes a la atmósfera.

2. No consume combustibles.
3. No genera residuos (Pequeño o nulo impacto ecológico).
4. No produce ruidos.
5. Elevada calidad energética.
6. Inagotable a escala humana.
7. Su instalación es simple.
8. Requiere poco mantenimiento.
9. Tienen una larga vida útil (aproximadamente 25-30 años)
10. Resiste condiciones climáticas extremas: granizo, viento, temperatura, humedad.
11. No existe una dependencia de los países productores de combustibles.
12. Instalación en zonas rurales.
13. Venta de excedentes de electricidad a una compañía eléctrica.
14. Tolera aumentar la potencia mediante la incorporación de nuevos módulos fotovoltaicos.
15. Requiere de mano de obra especializada y calificada, dando apertura y aumento al número de empleos en la sociedad.

Desventajas de la energía solar fotovoltaica.

1. Costes elevados de instalación.
2. Energía intermitente.
3. Procesos de fabricación contaminantes.
4. Gran extensión territorial.
5. Bajos rendimientos energéticos.
6. Contribución de armónicos a la red.

Integración de la energía solar en micro redes.

De acuerdo con la perspectiva que se tiene en el sector eléctrico de nuestro país con el desarrollo de la generación distribuida, la energía solar fotovoltaica se puede integrar de diferentes maneras, como son:



1. Fotovoltaica aislada: Los sistemas fotovoltaicos aislados, al no estar conectados a la red, requieren baterías, para almacenar la energía no utilizada para su uso posterior. En la actualidad existen baterías de alta calidad diseñadas especialmente para las aplicaciones solares, con tiempos de vida útil de más de 15 años.

En la instalación, la batería está conectada al sistema fotovoltaico mediante un controlador de carga, el cual protege la batería contra las sobrecargas o descargas profundas que puedan afectar su vida útil, y también puede proporcionar información sobre el estado del sistema. A su vez, el uso de un inversor es necesario para convertir la energía entregada por el sistema fotovoltaico en forma de corriente continua a corriente alterna. Además, este tipo de instalación favorece el progreso socioeconómico en zonas rurales que no disponen del servicio de energía eléctrica.

2. Fotovoltaica conectada a la red: Este tipo de instalación es el más común de encontrar en la actualidad, debido a que “más del 90% de los generadores fotovoltaicos están conectados a la red de distribución eléctrica y vierten a ella su producción energética. Esto evita que las instalaciones necesiten baterías y constituye una aplicación más directa y eficiente de la tecnología” (González, 2012, p. 58).

La energía producida se usa primero para consumo propio y los excedentes, si los hay, se inyectan a la red a través de un medidor bidireccional. La implementación de este tipo de sistema disminuye la necesidad de comprar electricidad; por lo tanto, disminuye la factura por parte de la compañía suministradora, ya que solo proporcionará el servicio cuando la energía producida por el sistema fotovoltaico no sea suficiente para satisfacer la energía demandada.

2.1.3 Otros tipos de generación.

2.1.3.1 Generación hidroeléctrica.

El objetivo de una central hidráulica es aprovechar la energía cinética y potencial del agua disponible a cierta altura para convertirla en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Para transformar la energía cinética y potencial del agua en energía mecánica de rotación se utilizan dispositivos denominados turbinas hidráulicas, las cuales, acopladas al eje de un generador eléctrico, le imprimen el movimiento de giro necesario para que éste produzca energía eléctrica.

Carta, Calero, Colmenar, & Castro (2009), destacan que la tipología de las centrales hidroeléctricas es muy variada. Estas dependen de:

1. La altura del salto. No existe criterio para clasificar estas alturas, sin embargo, a título orientativo pueden indicarse las siguientes medidas: gran salto (más de 150 m), mediano salto (entre 20 m y 150 m) y bajo salto (entre 2 m y 20 m).
2. El tipo de tecnología.
3. La localización y tipo de presa, embalse, etc. (p.430).

En México, al cierre de 2015 se reportó 97 centrales de generación hidroeléctrica con una capacidad total de 12,490MW, 0.5% mayor que lo reportado en el año anterior (SENER, 2016).

Para cubrir las crecientes necesidades de demanda de electricidad en ciertas regiones del país y aprovechando las condiciones geográficas con las que cuenta el territorio nacional, en la planeación del SEN se ha considerado la adición de 4,491.8MW de capacidad de energía hidroeléctrica para el período de 2016 - 2030. Así, entre 2016 y 2030 la capacidad instalada por energía hidroeléctrica pasará de 12,551.1MW a 16,975.8MW en 2030. (SENER, 2016, p. 45)



2.1.3.2 Generación con bioenergía.

La bioenergía es la energía derivada de la conversión de biomasa mediante procesos termoquímicos de conversión (carbonización, gasificación y pirólisis) con los cuales se pueden obtener combustibles gaseosos o líquidos, que pueden ser empleados en un proceso de combustión y producir calor o generar electricidad.

Los bioenergéticos de acuerdo con la definición de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (2008) es la siguiente: “Combustibles obtenidos de la biomasa provenientes de materia orgánica de las actividades, agrícola, pecuaria, silvícola, acuacultura, algacultura, residuos de la pesca, domésticas, comerciales, industriales, de microorganismos, y de enzimas, así como sus derivados, producidos, por procesos tecnológicos sustentables que cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas por la autoridad competente en los términos de esta ley”.

En México, se emplean dos tipos de bioenergía: biomasa y biogás para la generación de energía eléctrica. Estas fuentes de energía son otra alternativa a la sustitución de combustibles fósiles, y en años recientes, ha crecido su potencial logrando ocupar una posición en la matriz energética. Entre 2005 y 2015 la capacidad instalada para generación de energía eléctrica por biogás paso de 19.3 MW a 80.8MW, lo que representó un incremento de 319.1%. Entre 2016 y 2030, se adicionará 60.8MW de capacidad de generación eléctrica. (SENER, 2016, p.63)

2.1.3.3 Generación Geotérmica.

La energía geotérmica es un tipo de energía renovable que consiste en el aprovechamiento del calor que existe en el subsuelo del planeta, es decir, utilizar el calor de las capas internas de la Tierra y con él generar energía.

Las centrales geotérmicas operan con el mismo principio que las centrales convencionales, con la diferencia de que éstas obtienen el vapor del subsuelo. El vapor geotérmico se envía a un separador de humedad para transformar la energía

cinética en mecánica, cuyo movimiento se transmite al generador para producir electricidad. México cuenta con 8 centrales geotermoeléctricas, que representan el 1.4% de la capacidad total y el 2% de la generación de electricidad en el país (SENER, 2016).

2.1.4 Sistemas de almacenamiento de energía.

Teniendo en cuenta que la generación a través de energías renovables no es siempre constante debido a factores ambientales, se debe incluir al momento del diseño y como componente principal de la micro red un sistema de almacenamiento de la energía.

El almacenamiento de energía permite compensar los desbalances entre la generación y el consumo, posibilitando una adecuada calidad de suministro. Sin embargo, no existe la tecnología de almacenamiento perfecta y todas tienen sus limitaciones en cuanto a densidad de potencia/energía, tiempo de respuesta/tiempo de autonomía, coste económico y ciclo de vida. En la figura 2.5, se observa una clasificación de las diferentes tecnologías de almacenamiento de acuerdo con su densidad de potencia y densidad de energía.

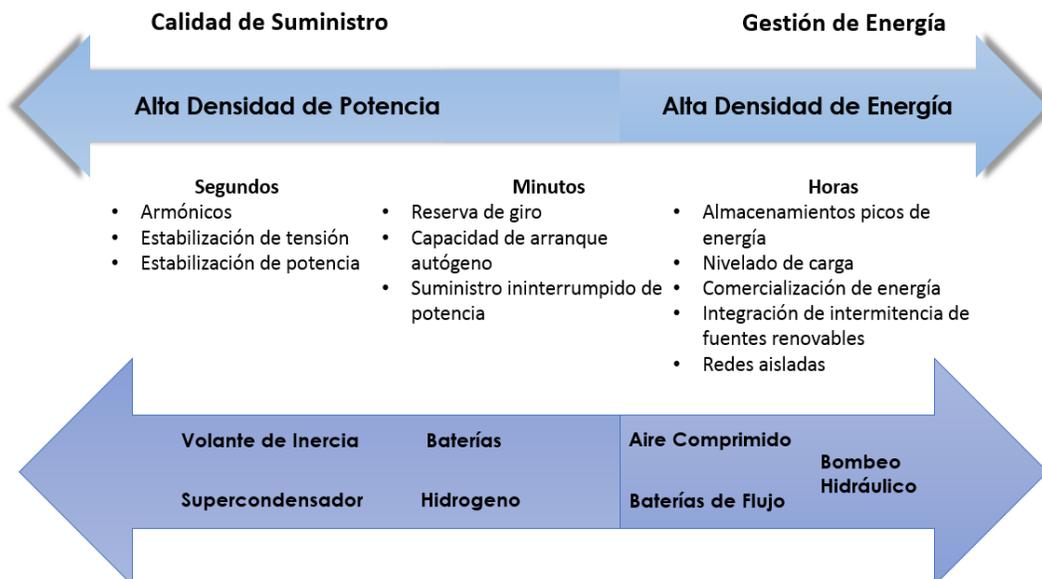


Figura 2.5 Sistemas de almacenamiento de energía según relación densidad de potencia y densidad de energía.



Los diversos dispositivos de almacenamiento permiten mejorar el funcionamiento del sistema eléctrico en diferentes maneras. Principalmente permitiendo trabajar a los generadores en régimen constante a pesar de las posibles fluctuaciones en la carga. Y también pueden hacer frente a variaciones en las fuentes de energía primaria cuando estas no son gestionables como mencionamos anteriormente. Por último, permite considerar al conjunto de generadores-almacenamiento como una única unidad con capacidad de generación predecible.

Existen principalmente dos dispositivos para el almacenamiento de energía, los cuales son:

1. Sistemas de Baterías. Que almacenan la energía en forma de energía química. Al tratarse de fuentes de corriente directa, es necesario el uso de inversores para la generación en corriente alterna.

2. Sistemas Flywheel (volante de inercia). Los cuales funcionan con un principio de energía cinética, el cual funciona con un motor conectado a un generador conectado a un inversor que hace interfaz con la red de distribución. Este tipo de dispositivo tiene una respuesta más rápida en comparación al sistema de baterías.

Entre estos tipos de sistemas, el de baterías es bastante maduro y es el que está más implementado en el sistema eléctrico. Por lo que su desarrollo ha sido y sigue siendo bastante amplio. De acuerdo con Gauchía (2011), las aplicaciones en estudio de baterías en redes inteligentes son:

1. Nivelación o load levelling: Permitiendo una mayor penetración de las energías renovables.
2. Seguimiento de carga: Disponen de una rampa de cargabilidad mejor que la de las centrales, lo que reduce el consumo de combustible mejorando el factor de potencia.
3. Regulación de tensión: Mantener el flujo de potencia, satisfacer el nivel de tensión de la demanda, control de la potencia reactiva.



4. Reserva ante incidentes menores que afecten a líneas o generadores.
5. Reanudación del servicio en caso de cero nacional.
6. Aplanado de la curva de carga de subestaciones en transporte y distribución.
7. Mejorar los fenómenos de parpadeo o flicker en el lado del consumidor, así como impulsos de tensión.
8. Abastecimiento de demanda máxima de electricidad (baterías NaS).
9. Compensación de la potencia de salida variable en plantas fotovoltaicas (PV) (baterías NaS).
10. Gestión de la energía (baterías NaS).

2.1.5 Sistemas electrónicos de potencia.

Un sistema electrónico de potencia, es un conjunto de elementos que haciendo uso de dispositivos y circuitos de estado sólido; buscan procesar señales para cumplir objetivos de control y conversión de la energía eléctrica. Estos sistemas hacen uso de las tres áreas más importantes en la ingeniería eléctrica: La electrónica, la potencia y el control (Motto,1977).

La electrónica se aplica principalmente con los dispositivos y circuitos para procesar la información; La potencia para trabajar con máquinas rotatorias o estáticas para la generación, distribución y utilización de grandes cantidades de energía eléctrica; y el área de control se encarga de la estabilidad y respuesta característica de sistemas cerrados utilizando retroalimentación ya sea analógica o digital (Motto,1977).

Generalmente este tipo de sistemas son utilizados para administrar y controlar el flujo de energía para poder satisfacer las necesidades de los usuarios y también de los equipos. Para poder manipular la energía tanto demandada como generada en el sistema a tratar se hará uso de convertidores de potencia.

“Un convertidor es un módulo básico de los sistemas de electrónica de potencia. El convertidor usa dispositivos conductores de potencia controlados por señales electrónicas y quizás elementos de almacenamiento de energía, como inductores y capacitores” (Mohán, 2009, p.9). El fin de los convertidores de potencia es modificar las condiciones de tensión y corriente en el sistema para transformarla de acuerdo a los requerimientos específicos de la carga.

Los convertidores se dividen en 4 categorías:

1. Corriente alterna (CA) – Corriente directa (CD)
2. Corriente directa (CD) – Corriente alterna (CA)
3. Corriente directa (CD) – Corriente directa (CD)
4. Corriente alterna (CA) – Corriente alterna (CA)

2.1.5.1 Rectificador CA-CD.

Un rectificador es un dispositivo o conjunto de elementos encargados de transformar potencia de corriente alterna a corriente directa. Esta conversión es lograda mediante tiristores los cuales permiten controlar la magnitud de la energía en el lado de CD, así como también pueden regular la velocidad en los motores, el control de la tensión en CD se logra mediante el retraso de los instantes en los que conduce el tiristor, en la figura 2.6 se puede observar un ejemplo de estos rectificadores (Mohán, 2009).

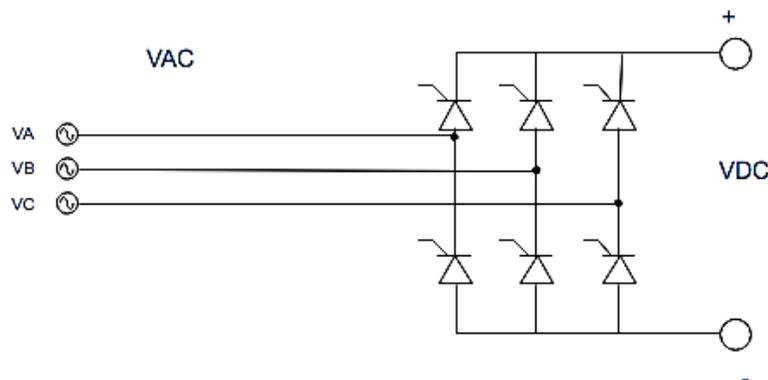


Figura 2.6 Diagrama básico de un rectificador trifásico CA-CD.

Este tipo de convertidor también es utilizado en conjunto con un inversor CD-CA lo que permite controlar una corriente de CA con las características que se necesiten.

2.1.5.2 Convertidor CD-CD.

Los sistemas convertidores CD-CD son utilizados en sistemas para suministro de energía en CD, entre los usos que se le dan sistemas cargadores de baterías donde es necesario controlar la tensión de salida a un valor constante teniendo valores de entrada variables, este sistema es aplicado generalmente en los sistemas fotovoltaicos debido a la variación en la generación de la energía por los cambios en la intensidad solar a lo largo del día y la necesidad de las baterías de una tensión constante para su carga (Mohán, 2009).

“En un convertidor CD-CD con un voltaje de entrada dado, el voltaje medio de salida se controla mediante el control de los tiempos de encendido y apagado” (Mohán, 2009, p.143). Este método es llamado modulación por ancho de pulsos. Entre los convertidores más comunes se pueden considerar 5:

1. Convertidor reductor (buck).
2. Convertidor elevador (boost).
3. Convertidor reductor/elevador (buck-boost).
4. Convertidor cók.
5. Convertidor de puente completo.

Entre estos, los tipos buck y boost se podrían considerar como los modelos básicos, el buck-boost y el cók son ambas combinaciones de los modelos básicos y el puente completo resulta una adaptación al puente reductor.

Convertidor reductor.

Este tipo de convertidor produce un voltaje medio más bajo en la salida que el voltaje de entrada, Se aplica principalmente en fuentes de energía de CD regulada y el control de velocidad en motores (Mohán, 2009), en la figura 2.7 se muestra un convertidor CD-CD.

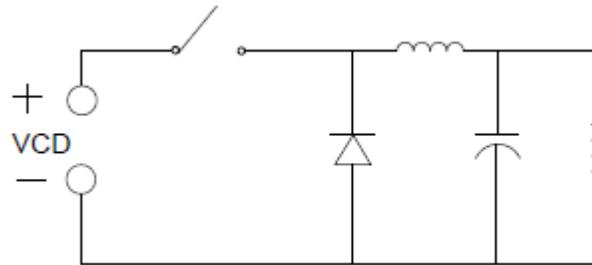


Figura 2.7 Modelo básico de un convertidor CD-CD reductor.

Convertidor elevador.

Este tipo de convertidor produce un voltaje mayor a la salida del mismo que el de entrada, Es utilizado comúnmente en fuentes de energía de CD regulada y para frenado regenerativo de motores de CD (Mohán, 2009), en la figura 2.8 se muestra el circuito equivalente de este convertidor.

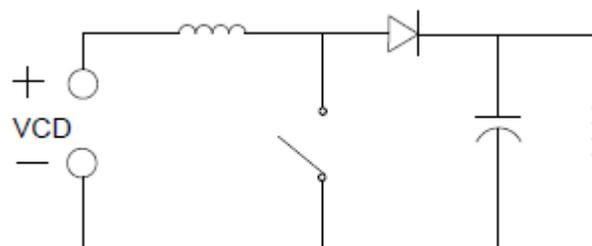


Figura 2.8 Modelo básico de un convertidor CD-CD elevador.



2.1.5.3 Inversor CD-CA.

Un inversor CD-CA es aquel dispositivo o conjunto de elementos los cuales se encargan de transformar una señal de voltaje de CD en la entrada y por la salida genera un voltaje de CA deseado (Mohán, 2009).

Este tipo de inversor es utilizado en motores de CA y fuentes de alimentación las cuales no pueden ser interrumpidas, teniendo como fin generar una onda sinusoidal de CA de manera que se pueda controlar la magnitud y su frecuencia (Mohán, 2009). Para estos inversores se presentan dos tipos:

1. Inversores de fuente de voltaje (VSI).
2. Inversores de fuente de corriente (CSI).

Los inversores por fuente de voltaje son divididos en 3 categorías:

1. Modulados por ancho de pulsos.
2. De onda cuadrada.
3. Monofásicos con cancelación de voltaje.

En los inversores modulados por ancho de pulsos se considera un voltaje CD de entrada constante y el inversor controla la frecuencia y voltaje en la salida CA haciendo uso de PWM en los interruptores del inversor por los anchos de pulso (Mohán, 2009).

Para el caso de los inversores de onda cuadrada se controla el voltaje de entrada para controlar la magnitud de CD a la salida, y el inversor sólo se encargará de la frecuencia del voltaje (Mohán, 2009).

Su nombre describe la forma de onda del voltaje en CA (cuadrada). El circuito de inversor trifásico consiste en una terminal por fase y la salida en CA dependerá de la tensión de entrada y los interruptores, como se muestra en la figura 2.9.

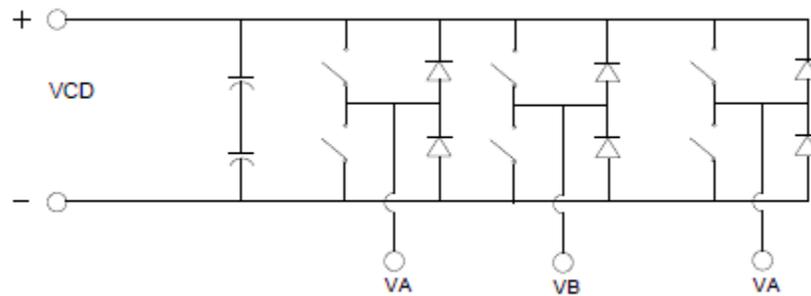


Figura 2.9 Modelo básico de un inversor trifásico.

2.2 Gestión y optimización de energía

El concepto de micro redes eléctricas está basado principalmente en el control local que se tiene en la generación y la carga. Debido a lo anterior, el control de generación y carga de las micro redes tiene como meta satisfacer la demanda de los consumidores de forma autónoma y de la manera más óptima posible.

Es importante mantener equilibrio entre generación y demanda para garantizar una operación segura de las micro redes aisladas, previniendo cortes de energía, que puedan darse cuando la capacidad de generación y energía almacenada es superada por la demanda (Lagunas, 2004).

Esto se puede realizar mediante controladores basados en diferentes técnicas de control. El controlador es el dispositivo responsable de determinar las acciones a realizar y supervisar las mismas, con el fin de tener una buena operación en el sistema. Además, deberá monitorear continuamente el estado de operación del sistema y mantenerlo dentro de los objetivos de la operación (Lagunas, 2004). Las acciones de control deberán asegurar que dichos objetivos se logren y mantengan, a pesar de las incertidumbres y restricciones (condiciones ambientales) en las fuentes de generación. Dicho esto, se pueden tener diferentes objetivos, tales como:

1. Calidad de la energía: La operación del sistema debe asegurar un suministro de energía sin interrupción con los requerimientos de calidad de energía (voltaje y en su caso, frecuencia) mínimos de aplicación.
2. Costos de operación: Reducción en los costos de generación, que dependen de una combinación de factores tales como tipo de generadores, eficiencia, tipo de combustible y costo, mantenimiento, etc.
3. Costos ambientales: Se utiliza para disminuir la utilización de energía proveniente de fuentes de energía contaminantes. Por otra parte, se pretende disminuir los costos que involucre el tratamiento de las emisiones contaminantes.

En la figura 2.10 se muestran los objetivos a atender en las micro redes eléctricas en temas de: calidad de la energía, costos de operación, de almacenamiento de energía y ambientales.

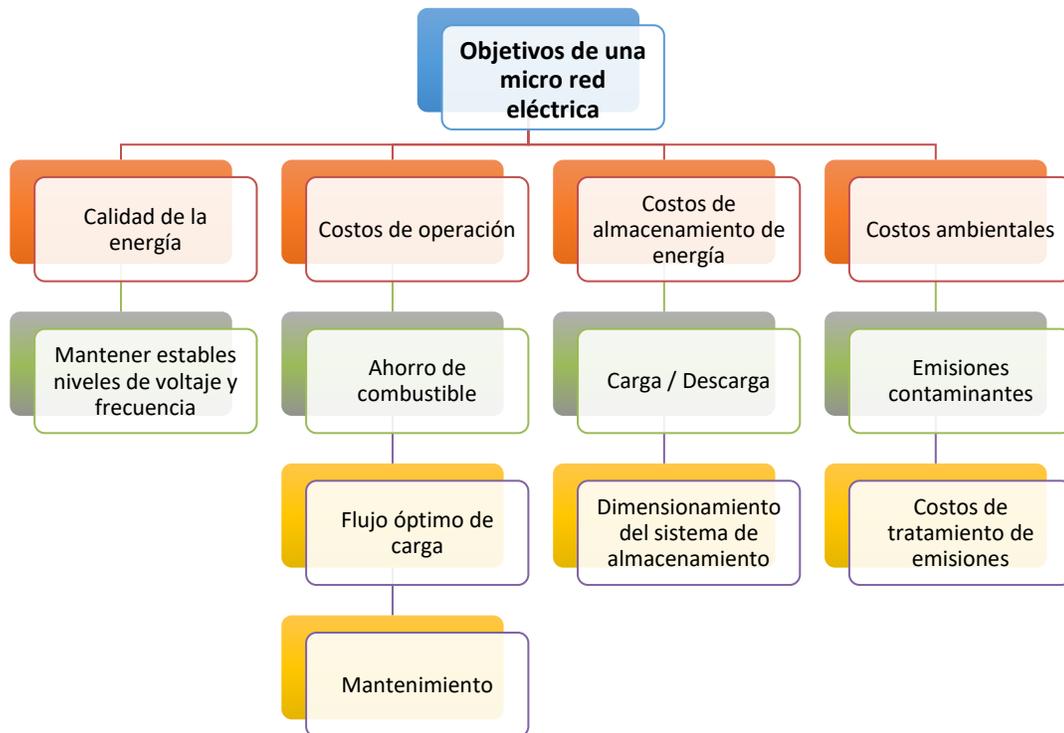


Figura 2.10 Objetivos en micro redes eléctricas para la gestión de la energía.



Para este trabajo, se tendrán como objetivos aumentar el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, cuando se tenga recurso disponible (solar o eólico) y exista demanda de energía por parte de la carga, esto deberá ser suministrada por la energía renovable evitando la descarga del banco de baterías, manteniéndolo así lo más cargado posible.

Dicho lo anterior, el siguiente objetivo será aumentar la vida útil del banco de baterías, para esto es necesario minimizar el ciclado del banco de baterías, es decir, minimizar el número de ciclos de carga y descarga del banco de baterías. En este punto se deben considerar los siguientes aspectos para conseguir una buena operación del sistema.

Al reducir al mínimo el ciclado del banco, no se tienen las descargas profundas y las sobrecargas que llevan a una pérdida de la vida útil del banco de baterías. Si el banco de baterías es operado siempre a un bajo estado de carga, se incrementa la sulfatación, la cual reduce severamente la vida del banco de baterías. Por otra parte, si el banco es operado en forma continua en el nivel máximo de estado de carga (100%), se tienen pérdidas importantes de electrolito y se va desgastando el material de las placas de las celdas de las baterías.

Ventajas de las micro redes eléctricas.

El desarrollo de las micro redes inteligentes implica diversas ventajas en los aspectos más relevantes de la industria eléctrica:

1. Las micro redes son por definición sistemas de poca capacidad de generación, lo que implica un impacto ecológico mucho menor, reduciendo las emisiones de gases y evitando grandes construcciones de plantas eléctricas. Además, la cercanía que existe entre la fuente y el usuario ayuda a concientizar sobre el uso adecuado de la energía.
2. La poca distancia entre el generador y los usuarios finales contribuyen también a la operación y planeación de la red, mejorando la capacidad de



soporte, reduciendo la congestión de alimentadores y limitando la necesidad de expansión del sistema.

3. Mejora la calidad de la energía al permitir una mejor administración de la oferta y la demanda y mejora de los procesos de restauración a través de la operación de las micro fuentes.

Desventajas de las micro redes eléctricas.

La implementación de las micro redes también representa algunas desventajas actualmente. Siendo principalmente los siguientes:

1. Los costes de inversión son muy elevados debido a todos los nuevos equipos que tienen que agregarse a las redes, lo que implica conflictos de diseño, control, almacenamiento, generación, etc. Estos factores limitan bastante a la cantidad de usuarios que pueden solventar el gasto para utilizarlas en sus sistemas.
2. Otro de los obstáculos que presentan las micro redes es la poca normatividad que existe al respecto, ya que en México aún no está reglamentado su aplicación que sirva de guía para su implementación en el mercado.

Ahora que se conocen los aspectos más relevantes de las micro redes, en el capítulo siguiente se abordarán los fundamentos teóricos de la técnica de control que será utilizada para hacer de éste, un sistema inteligente.



Capítulo III. Lógica difusa y control difuso



En este capítulo se hablará de la técnica de control utilizada para el desarrollo del sistema que administrará la energía producida en la micro red eléctrica, la lógica difusa; destacando la anatomía básica de un controlador difuso, describiendo cada etapa y mencionando los métodos más empleados en los diferentes procesos que lo conforman. Asimismo, se presenta la metodología a seguir para la modelación del sistema de inferencia difuso tipo Mamdani.

El cerebro humano es capaz de razonar con información que involucra incertidumbre en un mundo donde las cosas son parcialmente ciertas. Por otra parte, las computadoras manejan datos basados en aseveraciones que son totalmente ciertas o falsas; en ese sentido, se han realizado estudios sobre el manejo de información en una escala de cero a uno. A esta nueva forma de procesamiento de información se le conoce como lógica difusa.

La lógica difusa es una rama de la inteligencia artificial y su origen se da en 1965 con la teoría de conjuntos difusos publicada por Lotfi Asker Zadeh. Su bondad es que permite controlar sistemas complejos a través de conceptos cualitativos como: “La velocidad es alta” o “El precio es bajo”, asignadas por un experto; por tal motivo, se dice que la lógica difusa emula el razonamiento humano.

Su aplicación se da en áreas de la ingeniería, de finanzas, derecho, ciencias de la salud, etc., y gracias a la flexibilidad que este tipo de lógica ofrece, hoy en día es sumamente viable su uso para solucionar problemas de optimización e incluso para controlar sistemas donde no se conoce el modelo matemático del proceso que se desea manipular.

3.1 Lógica difusa

La lógica difusa de acuerdo con Ponce (2010), “Es un conjunto de principios matemáticos basados en grados de membresía o pertenencia, cuya función es modelar información” (p.33). Esta lógica fue creada con el fin de emular la lógica humana y facilitar la toma de decisiones acertadas de acuerdo a la información.



Esta herramienta se basa en reglas lingüísticas declaradas por el usuario las cuales dictan la salida del sistema. Las variables lingüísticas son palabras a las que se les asignan valores, usadas para describir algún fenómeno u objeto (Ponce, 2010). Por ejemplo, una variable numérica podría ser: la temperatura es igual a 2°C , mientras que una variable lingüística toma valores lingüísticos: la temperatura es fría.

Se busca representar la forma de pensar humana mediante el uso de las afirmaciones en las cuales se utilizan las cualidades, tales pueden ser “poco”, “medio”, “muy”, “mucho”, entre otras dependiendo del sistema a analizar y el usuario que se encargue de atribuir a los rangos de membresía una expresión lingüística. Otra característica que se considera ventaja es que no se requiere conocer el modelo matemático del sistema real, pudiéndose utilizar como una caja negra donde se le insertan entradas y el sistema generará una salida deseada (Ponce, 2010).

En esta lógica se utilizan rangos de membresía teniendo como intervalo valores entre 0 y 1, siendo esta la principal diferencia con la lógica convencional que utiliza solo los valores de 0 y 1.

3.2 Funciones de membresía

Para asignar valores a las diferentes entradas, son necesarias las funciones de membresía, las cuales toman distintas formas, según Ponce (2010), “Para representar los grados de pertenencia de cada elemento que conforma el conjunto difuso, lo más natural es extraer los datos del fenómeno a representar y con ellos definir la forma de la función de membresía” (p.49).

Existen funciones de membresía convencionales y no convencionales con las cuales podremos realizar un mapeo de los datos de un universo nítido a un universo difuso (Ponce, 2010). Las funciones convencionales se presentan a continuación:

3.2.1 Función de saturación.

En esta función se tiene un valor de 0 hasta cierto punto y después crece con una pendiente hasta alcanzar el valor de 1, de donde ya no se mueve (Ponce, 2010); este comportamiento se explica en la ecuación (3.1).

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \rightarrow x \leq a \\ \frac{x - b}{a - b} & \rightarrow a \leq x \leq b \\ 1 & \rightarrow x \geq b \end{cases} \quad (3.1)$$

En la figura 3.1 se puede observar una función de membresía de tipo saturación, para este ejemplo en el rango del 0 al 10 se tiene un valor de pertenencia 0, del 10 al 30 incrementa hasta llegar al 1 y a partir de 30 todos los valores de pertenencia serán de 1.

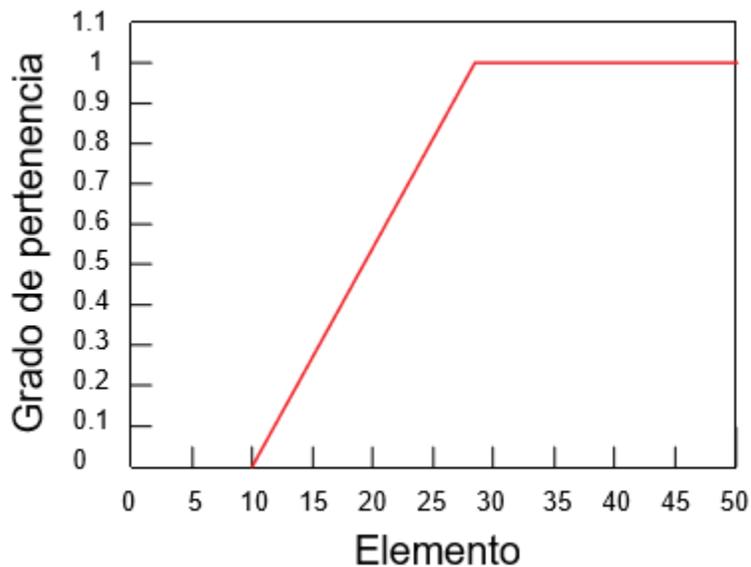


Figura 3.1 Función de membresía tipo saturación.

3.2.2 Función hombro.

Se puede considerar que esta función es la contraria a la función de saturación debido a que se comienza con un valor de membresía de 1 y desciende con una pendiente hasta alcanzar el valor de 0 (Ponce, 2010). Este comportamiento se explica en la ecuación (3.2) y su representación gráfica se observa en la figura 3.2.

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \rightarrow x \leq a \\ \frac{x - b}{a - b} & \rightarrow a \leq x \leq b \\ 0 & \rightarrow x \geq b \end{cases} \quad (3.2)$$

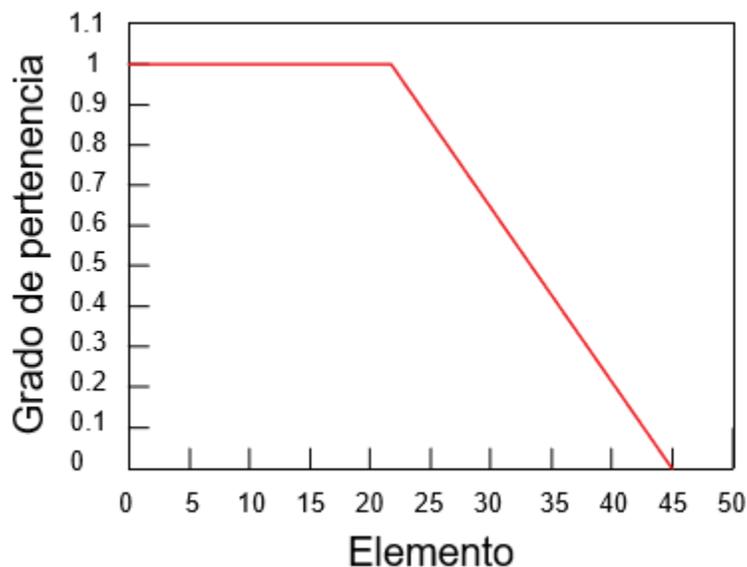


Figura 3.2 Función de membresía tipo hombro.

3.2.3 Función triangular.

En esta función se consta de una parte con pendiente positiva la cual al llegar al valor de 1 comienza su pendiente negativa la cual desciende de la misma manera, dando la forma triangular (Ponce, 2010), su comportamiento se describe en la ecuación (3.3).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x - a}{b - a} \rightarrow a \leq x \leq b \\ \frac{x - d}{b - d} \rightarrow b \leq x \leq d \\ 0, \text{ de otra manera} \end{cases} \quad (3.3)$$

Una aplicación de esta función podría ser la temperatura corporal, la cual considera un valor óptimo a los 37 grados, pero ya sea menor o mayor a esta se considera peligroso, por lo tanto, entre menor sea el nivel de pertenencia más peligroso será (Ponce, 2010). La función triangular se muestra en la figura 3.3.

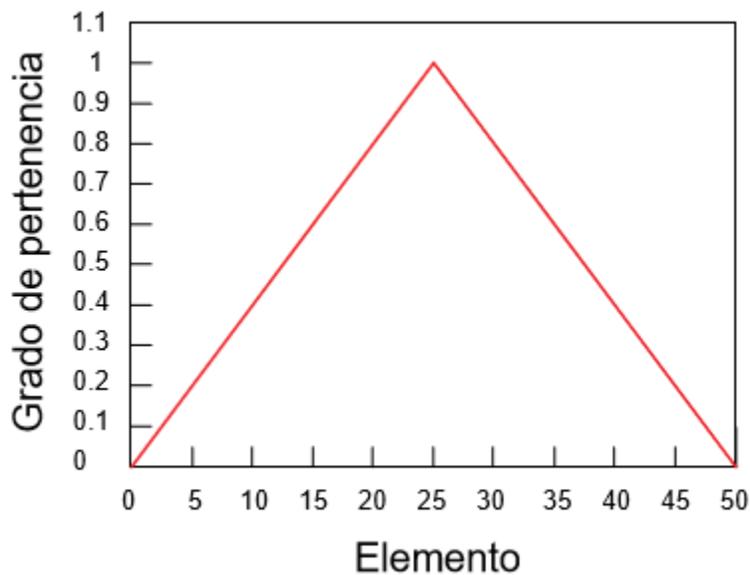


Figura 3.3 Función de membresía tipo triangular.

3.2.4 Función trapecio o pi.

Esta es una manera de generalizar la función triangular, cuenta con los mismos elementos, una pendiente positiva hacia el valor de membresía 1 y una pendiente negativa hacia el valor de membresía 0, sin embargo, en ésta el valor unitario de membresía puede tenerse en más de un punto siendo el fenómeno a analizar el que defina el ancho del valor unitario para los distintos valores (Ponce, 2010); este comportamiento se describe en la ecuación (3.4).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x - b}{b - a} \rightarrow a \leq x \leq b \\ 1 \rightarrow b \leq x \leq c \\ \frac{x - c}{d - c} \rightarrow c \leq x \leq d \\ 0, \text{ de otra manera} \end{cases} \quad (3.4)$$

Esta función es muy utilizada para cuando se tiene un rango de valores óptimos, alrededor de los cuales las condiciones no son favorables. La función de tipo trapecio o pi se describe en la figura 3.4.

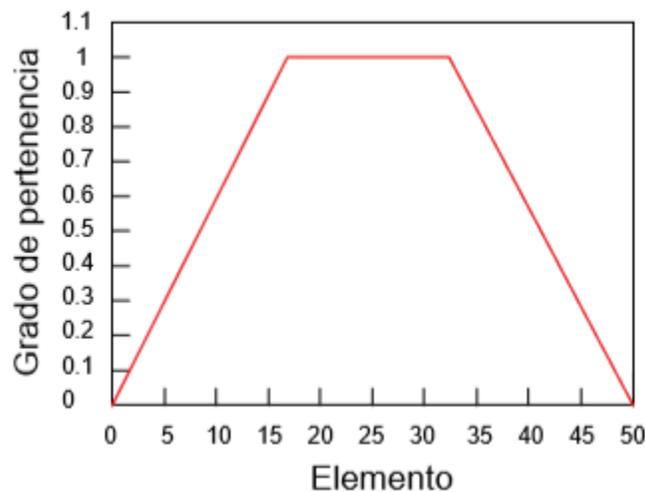


Figura 3.4 Función de membresía tipo PI.

3.2.5 Función gaussiana.

Este tipo de función está definida por un valor m , el cual significa el punto medio donde se presentará el pico más alto, y una constante “ k ” la cual describe el ancho de la campana, el comportamiento se describe en la ecuación (3.5).

$$f(x) = e^{\frac{-(x-m)^2}{2k^2}} \quad (3.5)$$

Un ejemplo de esta función se muestra en la figura 3.5, donde el grado de pertenencia aumenta paulatinamente hasta llegar a un conjunto de valores cercanos a uno, entre 20 y 30; un grado de pertenencia uno en 25 y a partir de 35 desciende.

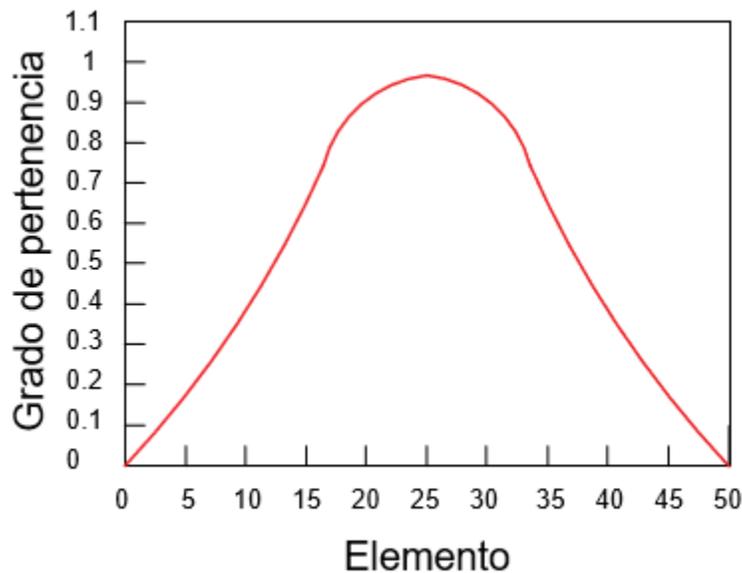


Figura 3.5 Función de membresía tipo gaussiana.

3.3 Composición

La composición es una relación usada en la lógica difusa. Se basa en los máximos y mínimos. “El objetivo de la composición es relacionar conjuntos que aparentemente no tienen relación. En la lógica difusa esto tiene mucho sentido pues hay diferentes ponderaciones o grados de pertenencia” (Ponce, 2010, p. 65). Esto se puede ejemplificar a través de conjuntos: El conjunto R es la relación existente entre los elementos del universo X y el universo Y , y sea el conjunto S la relación entre los elementos del universo Y y el universo Z . Finalmente, T es la relación de los mismos elementos que contiene el conjunto R y S . En la figura 3.6 se presenta el diagrama de esta composición.

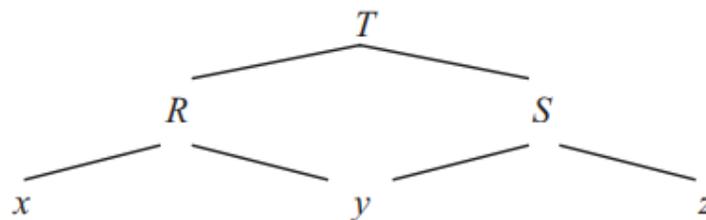


Figura 3.6 Diagrama de la composición de T .



Analizando esto mediante conjuntos:

$$T = R \cdot S \tag{3.6}$$

Donde T es la composición de R con S:

$$X_T(x, z) = \bigvee_{y \in Y} (X_R(x, y) \wedge X_S(y, z)) \tag{3.7}$$

La expresión anterior muestra la forma en que se hace la composición. El procedimiento consiste en tomar los valores mínimos de los conjuntos más pequeños, en este caso “x, y, z”, y una vez que se obtuvieron estos valores, de éstos se determina el máximo, siendo este el valor final de la composición.

Realizando un ejemplo, se busca determinar el conjunto:

$$\mu(x_1, z_1)$$

A partir de las matrices:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

De acuerdo con la ecuación (3.7) se acomodan los términos:

$$\mu(x_1, z_1) = \max[\min((x_1, y_1), (x_1, z_1)), \min((x_1, y_2), (y_2, z_1)), \min((x_1, y_3), (y_3, z_1)), \min((x_1, y_4), (x_4, z_1))]$$

Sustituyendo los valores se determina:

$$\mu(x_1, z_1) = \max[1] = 1$$

Aplicando esto a un sistema difuso se determina:

$$R = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 \\ 0.8 & 0.4 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.6 & 0.2 \\ 0.1 & 0.7 & 0.5 \end{bmatrix}$$

Solución:

$$T = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.6 & 0.5 \\ 0.8 & 0.6 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$\mu_z(x, y) = V(\mu(x, y) \cdot \mu(y, z))$$

Por la composición, máx- composición del producto:

$$\mu_T(x_2, z_2) = \max((0.8 \cdot 0.6), (0.4 \cdot 0.8)) = 0.48$$

$$T = \begin{bmatrix} 0.63 & 0.42 & 0.25 \\ 0.72 & 0.48 & 0.20 \end{bmatrix}$$

3.4 Controladores difusos

Un controlador difuso se compone principalmente de cuatro etapas: difusificación, base de conocimientos, lógica de decisiones y desdifusificación, como se muestra en la figura 3.7.

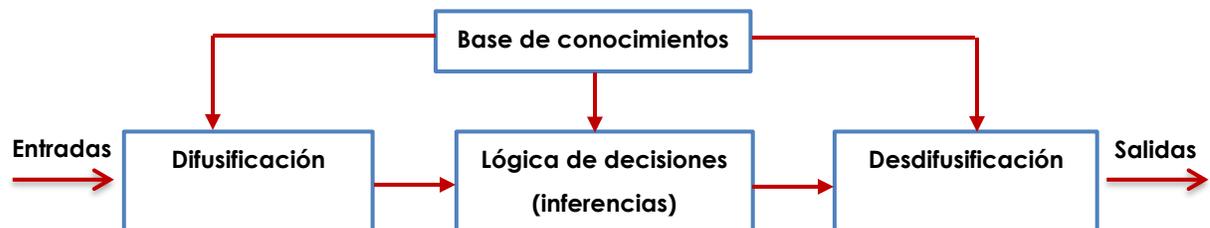


Figura 3.7 Estructura de un controlador difuso.

3.4.1 Difusificación.

La etapa de difusificación es la encargada de medir los valores de las variables de entrada para realizar el mapeo que transfiere el rango de valores de las variables a un universo difuso. Convirtiendo los datos de entrada en valores lingüísticos que son las etiquetas de las funciones de pertenencia o los conjuntos difusos. (Ross, 2010, p.93)

La representación de la información puede realizarse de manera discreta, segmentando un universo en un número definido de partes, es posible definir un conjunto difuso asignando valores de pertenencia a cada elemento del nuevo universo discreto. Para la “discretización” se precisa realizar un mapeo usando escala para transformar los valores medidos en las variables de entrada a valores del universo discreto, pudiendo ser de forma uniforme o no uniforme, o combinando ambos.

“Generalmente se asocia una variable lingüística a un conjunto de términos, definiendo de esta manera el universo de discurso. Para saber cuántos términos son requeridos se usan particiones difusas. El número de conjuntos difusos indica la complejidad del controlador” (Ponce, 2010, p.72).

Para ejemplificar lo anterior, en la figura 3.8 se muestran dos variables. La primera (a) se compone por tres funciones de membresía, asociándose a cada una de ellas una variable lingüística: N, Z y P. La segunda variable (b) está compuesta por siete funciones de membresía y, por consiguiente, siete variables lingüísticas: NB, NM, NS, ZE, PS, PM y PB.

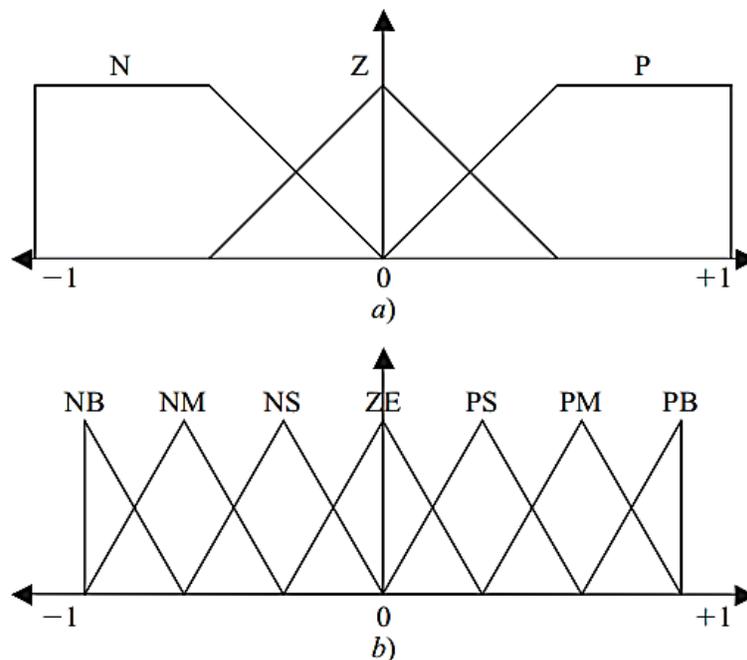


Figura 3.8 Particiones difusas con distinto número de términos.



3.4.2 Base de conocimientos.

La base de conocimientos es donde se integra toda la información del fenómeno que se va a controlar, así como los objetivos del controlador. Consta de una base de datos y reglas lingüísticas para controlar la variable. De la base de datos se obtienen las definiciones para establecer las reglas y manipular los datos difusos y de la base de reglas se caracterizan las metas del controlador y políticas a utilizar para llevar a cabo el control, empleando preposiciones.

“Un algoritmo de control difuso debe ser capaz de inferir una acción de control correspondiente para cada estado del proceso que se va a controlar, propiedad que se denomina unidad” (Ponce, 2010, p.72).

3.4.3 Lógica de decisiones.

La lógica de decisiones es el núcleo del controlador difuso, a partir de esta se simula la lógica usada por las personas al tomar decisiones, basada en conceptos difusos e inferencia de acciones de control, emplea implicaciones y las reglas establecidas en la base de conocimientos.

3.4.4 Desdifusificación.

La interfaz de desdifusificación se encarga del mapeo a escala y convierte el rango de valores de las variables de salida a los universos correspondientes a partir de una acción de control difusa. Sin embargo, la salida del proceso puede ser la unión lógica de dos o más funciones de membresía definidas en el universo de discurso de la salida de la variable.

En la figura 3.9 se muestra una salida difusa compuesta por dos partes: (a) función trapezoidal, (b) función triangular; y (c) figura resultante de la unión de estas dos funciones de membresía. (Ross, 2010, p.98).

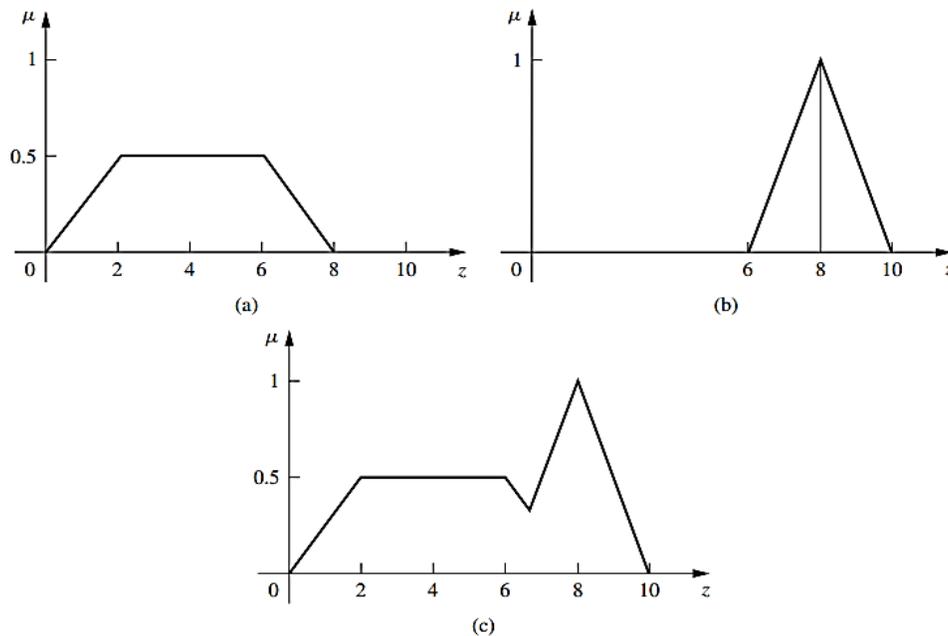


Figura 3.9 Proceso típico de salida difusa: a) Primera parte de la salida difusa; b) Segunda parte de la salida difusa; y c) Unión de ambas partes.

A continuación, se mencionan los métodos más empleados para obtener este valor:

1. Máxima de la función de membresía: También es conocido como método de la altura. Se define de acuerdo a la siguiente ecuación (3.8):

$$\mu_C(z^*) \geq \mu_C(z), \text{ para } z \in Z \tag{3.8}$$

Donde z^* es el valor desdifusificado, y su representación gráfica se muestra en la figura 3.10.

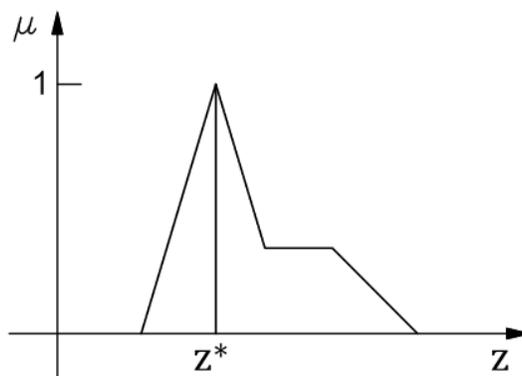


Figura 3.10 Método de máxima de la función de membresía.

2. Método de centroide: También conocido como método de centro de gravedad o centro de masas, es uno de los métodos más predominante en la interfaz de desdifusificación. El método se define mediante la ecuación (3.9):

$$z^* = \frac{\int \mu C(z) \cdot z \, dz}{\int \mu C(z) \, dz} \quad (3.9)$$

Su metodología es sencilla: corta la función de membresía al grado de la membresía respectiva; es decir, segmenta las funciones de membresía, generando en cada función dos áreas, como se muestra en la figura 3.11. El área inferior que se forma es la que se toma para hacer el cálculo. Se sobreponen todas estas áreas y se saca el centroide de la superposición, el cual nos dice la salida real del sistema. (Ponce, 2010, p.74).

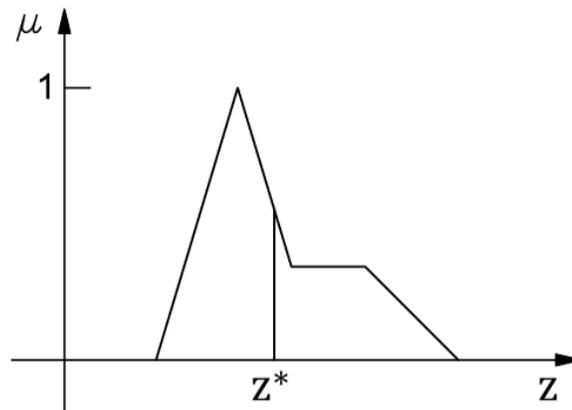


Figura 3.11 Método de centroide.

3. Método de promedio ponderado: El método de promedio ponderado es el más utilizado en aplicaciones difusas ya que es uno de los métodos computacionalmente más eficientes. Sin embargo, generalmente está restringido a funciones simétricas de membresía de salida. Se define por la siguiente expresión algebraica y su representación gráfica se observa en la figura 3.12:

$$z^* = \frac{\sum \mu C(\bar{z}) \cdot \bar{z}}{\sum \mu C(\bar{z})} \quad (3.10)$$

Donde \bar{z} es la centroide de cada función de membresía.

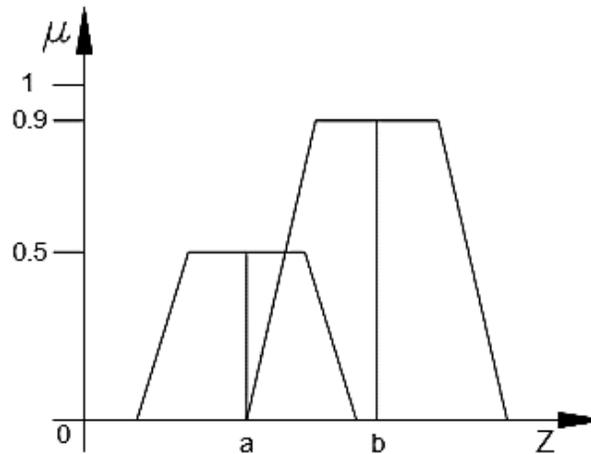


Figura 3.12 Método de promedio ponderado.

4. Suma de centros: el método no está restringido a las funciones de membresía simétrica. Este proceso implica la suma algebraica de los conjuntos difusos de salida individual, en lugar de su unión. Por ejemplo, en la figura 3.13 se muestran dos conjuntos: a) C1 con una función de membresía trapezoidal, b) C2 con una función de membresía tipo triangular, y siendo c) la desdifusificación del proceso. Una ventaja de este método es que no está restringido a funciones de membresía simétricas; sin embargo, en este método es necesario encontrar los centroides de cada función de membresía (Ross, 2010, p.106).

$$z^* = \frac{\sum_{k=1}^n \mu C_k(z) \int \bar{z} dz}{\sum_{k=1}^n \mu C_k(z) \int dz} \quad (3.11)$$

Donde \bar{z} es la distancia al centroide de cada una de las funciones de membresía.

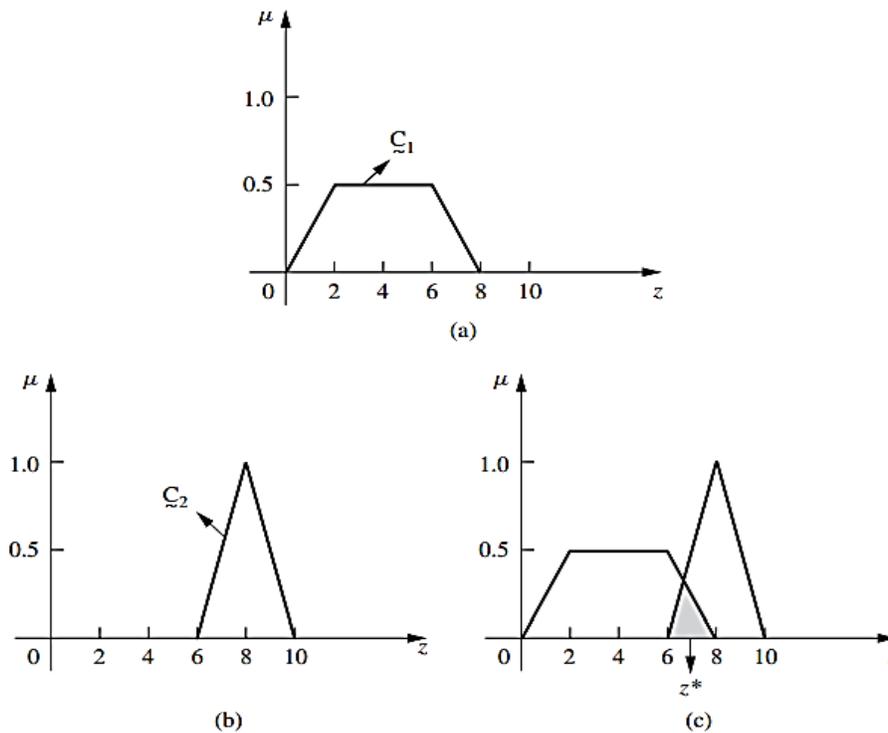


Figura 3.13 Método de centro de sumas.

3.4.5 Control difuso tipo Mamdani.

Este método fue propuesto por Mamdani en 1975, y es el más común en el control difuso. El principal objetivo de este controlador es describir procesos en términos de variables lingüísticas, y el uso de ellas para establecer reglas de control basadas en la experiencia humana. La metodología utilizada en el método de inferencia tipo Mamdani se puede describir de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Determinar el conjunto de reglas difusas en términos de variables lingüísticas.
2. Definir las funciones de membresía para las variables de entrada.
3. Establecer reglas a partir de proposiciones condicionales. Estas reglas tienen estructura de relación “Si-Entonces”, siendo de esta manera que se puede modelar el pensamiento humano, o los procesos de razonamiento sin necesitar un análisis cualitativo de precisión.



4. Difusificación de las variables de entrada, generalmente basado en una composición máx - mín.
5. Establecer las funciones de membresía para las variables de salida.
6. Desdifusificación para encontrar el valor nítido de salida, normalmente utilizando el método de centroide.

A partir de lo explicado en este capítulo, se tomarán las bases para el diseño del controlador difuso que se encargará de administrar adecuadamente la energía en el sistema. Con esto se concluyen los fundamentos teóricos; en los siguientes capítulos se presentará el desarrollo de la simulación y del controlador, así como el modelado de los elementos que componen a la micro red eléctrica.



Capítulo IV. Modelado de la micro red eléctrica

En este capítulo se estudiará el comportamiento y se generarán los modelos matemáticos de cada elemento que conforma el sistema, como son: las fuentes de generación, el sistema de almacenamiento y el controlador difuso.

A partir de los fundamentos teóricos que han sido abordados, es necesario simular las características de los elementos de la micro red en el software Simulink de Matlab. Estos modelos serán desarrollados enfocándose en los perfiles de carga (Potencia), considerando tensiones de generación estables y sin pérdidas en la conversión de la corriente (CA-CD).

4.1 Modelo matemático del sistema solar fotovoltaico

Como se ha mencionado anteriormente, el panel solar es el elemento principal del sistema fotovoltaico, que, para obtener su potencia, primeramente, es dependiente de la radiación solar (W/m^2) y la temperatura de operación del panel ($^{\circ}C$), considerando también que estos parámetros presentan variaciones durante el transcurso del tiempo. Por tal motivo, es importante establecer el modelo matemático de las celdas fotovoltaicas, que nos permitirá evaluar y analizar el comportamiento que éstas presentan para diversas condiciones ambientales.

4.1.1 Modelo matemático de la celda solar fotovoltaica.

La figura 4.1 muestra el circuito equivalente que se utilizará para evaluar el comportamiento de una celda solar fotovoltaica. El circuito está compuesto por una fuente de corriente (I_{pv}), un diodo y una resistencia serie (R_s).

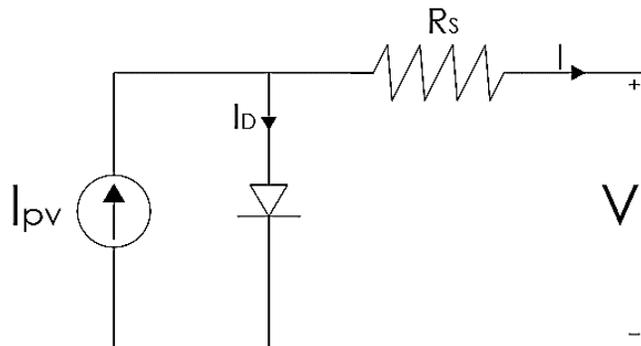


Figura 4.1 Circuito equivalente de una celda solar.



Corriente de salida (I).

Para obtener la corriente total generada por la celda solar, se puede aplicar la ley de Kirchhoff de corrientes, obteniendo la ecuación (4.1):

$$I = I_{pv} - I_D \quad (4.1)$$

Donde:

I_{pv} : Corriente generada debido a la incidencia solar sobre la celda fotovoltaica (A).

I_D : Corriente a través del diodo (A).

I : Corriente de salida (A).

A su vez, la corriente I_D puede ser sustituida por medio de la ecuación del diodo de Shockley:

$$I_D = I_o \left(e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{A \cdot K \cdot T_{op}}} - 1 \right) \quad (4.2)$$

Donde:

I_o : Corriente de saturación inversa del diodo (A).

q : Carga del electrón (1.60218×10^{-19} C).

K : Constante de Boltzman (1.38065×10^{-23} J/K).

T_{op} : Temperatura de operación del panel solar ($^{\circ}$ C).

A : Constante del diodo, para semiconductores de silicio es de 1-2 aproximadamente

De esta manera, al sustituir la ecuación (4.2) en (4.1), obtendremos la corriente total generada:

$$I = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{A \cdot K \cdot T_{op}}} - 1 \right) \quad (4.3)$$

Corriente fotogenerada (I_{pv}).

La corriente fotogenerada varía en función de la radiación solar y de la temperatura de operación de la celda o del panel fotovoltaico, y se describe de acuerdo a la siguiente ecuación:



$$I_{pv} = \frac{S}{S_{ref}} [I_{scr} + K_i(T_{op} - T_{ref})] \quad (4.4)$$

Donde:

S: Radiación solar (W/m²).

S_{ref}: Radiación solar de referencia (1000 W/m²).

I_{scr}: Corriente de cortocircuito (A).

K_i: Coeficiente de temperatura de cortocircuito (A/°C).

T_{ref}: Temperatura de referencia (°C).

Corriente de saturación inversa (I_o).

La corriente de saturación inversa está dada por la siguiente ecuación (4.5):

$$I_o = I_{o-ref} \cdot \left(\frac{T_{op}}{T_{ref}}\right)^3 \cdot e^{\left(\frac{E_g \cdot q}{K \cdot A}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{op}}\right)} \quad (4.5)$$

Donde:

E_g: Energía del semiconductor en su banda de gap (1.12eV para el Silicio).

I_{o-ref}: Corriente de saturación en condiciones de referencia (A).

Finalmente, la corriente de saturación en condiciones de referencia se obtiene por:

$$I_{o-ref} = \frac{I_{scr}}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{K \cdot A \cdot T_{ref}}\right)} - 1} \quad (4.6)$$

4.1.2 Modelo matemático del panel solar fotovoltaico.

Para generar un nivel mayor de energía, las celdas solares deben ser conectadas en una configuración serie-paralelo; de esta forma se da origen al panel solar, cuyo modelo matemático se representa mediante la siguiente expresión:

$$I = N_p \cdot I_{pv} - N_p \cdot I_o \left(e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{A \cdot K \cdot T_{op} \cdot N_s}} - 1 \right) \quad (4.7)$$

Donde:

N_p : Número de celdas solares conectadas en paralelo.

N_s : Número de celdas solares conectadas en serie.

La potencia del panel solar está dada por:

$$P = V \cdot I \quad (4.8)$$

4.1.3 Curvas I-V y P-V de un panel solar fotovoltaico.

Las características típicas de un panel solar se representan mediante las curvas I-V y P-V. En la figura 4.2 se muestra el comportamiento de la corriente y tensión al variar la carga conectada al sistema, bajo condiciones constantes de radiación solar y temperatura. Asimismo, se muestra la curva P-V obtenida a partir de la ecuación (4.8).

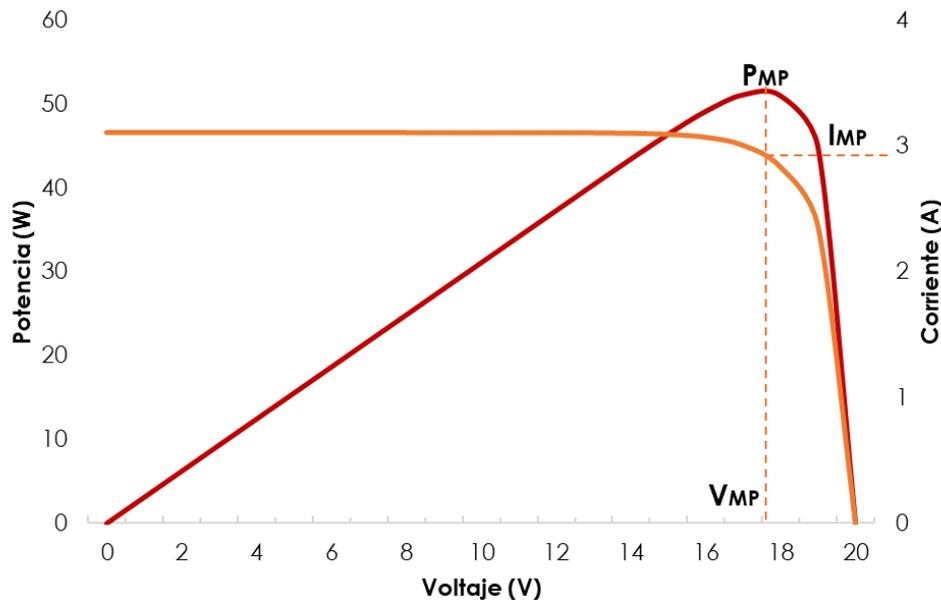


Figura 4.2 Curvas características I-V y P-V para un panel solar fotovoltaico.

El punto de la curva donde $V=0$ se le conoce como corriente de cortocircuito (I_{scr}), y el punto donde $I=0$ se le conoce como voltaje de circuito abierto (V_{oc}). Por otra parte, el punto de máxima potencia (P_{MP}) se obtiene cuando la corriente (I_{MP}) y voltaje (V_{MP}) son a máxima potencia.

4.1.4 Efecto de la radiación solar sobre los paneles fotovoltaicos.

La radiación solar que incide sobre el panel solar influye directamente en la corriente generada, de tal manera que, al aumentar o disminuir la radiación solar incidente, la corriente de cortocircuito se comportará de la misma manera.

En la figura 4.3 se muestra la curva característica corriente – voltaje obtenida para diferentes niveles de radiación solar, manteniendo una temperatura constante.

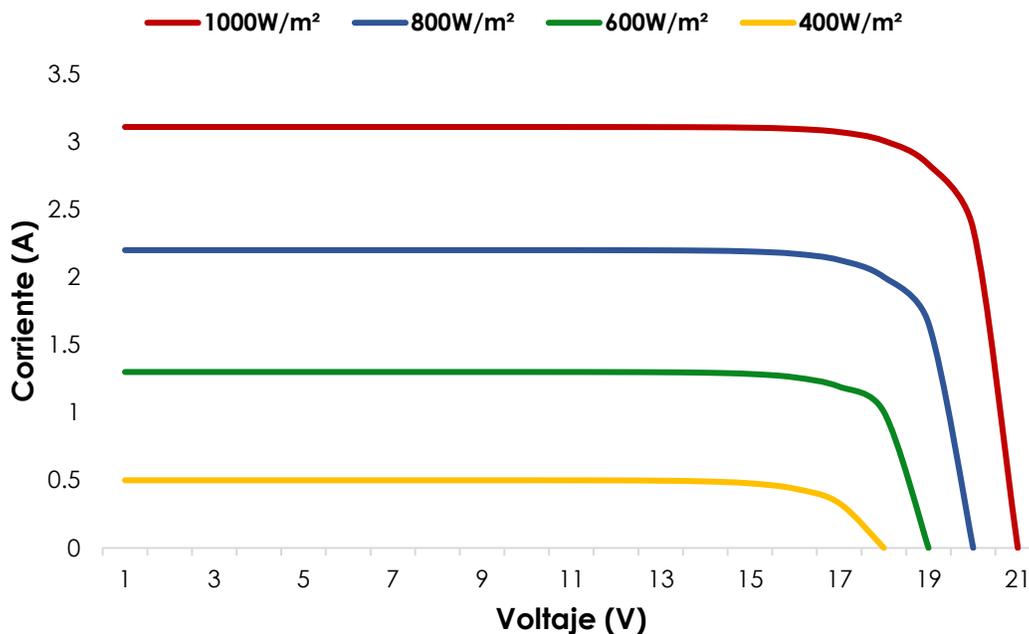


Figura 4.3 Curva característica I-V por variación de radiación solar.

La familia de curvas potencia – voltaje de la figura 4.4, ilustran la potencia eléctrica generada por el panel, la cual es afectada directamente por el resultado de la corriente, de acuerdo a lo establecido en la ecuación (4.8).

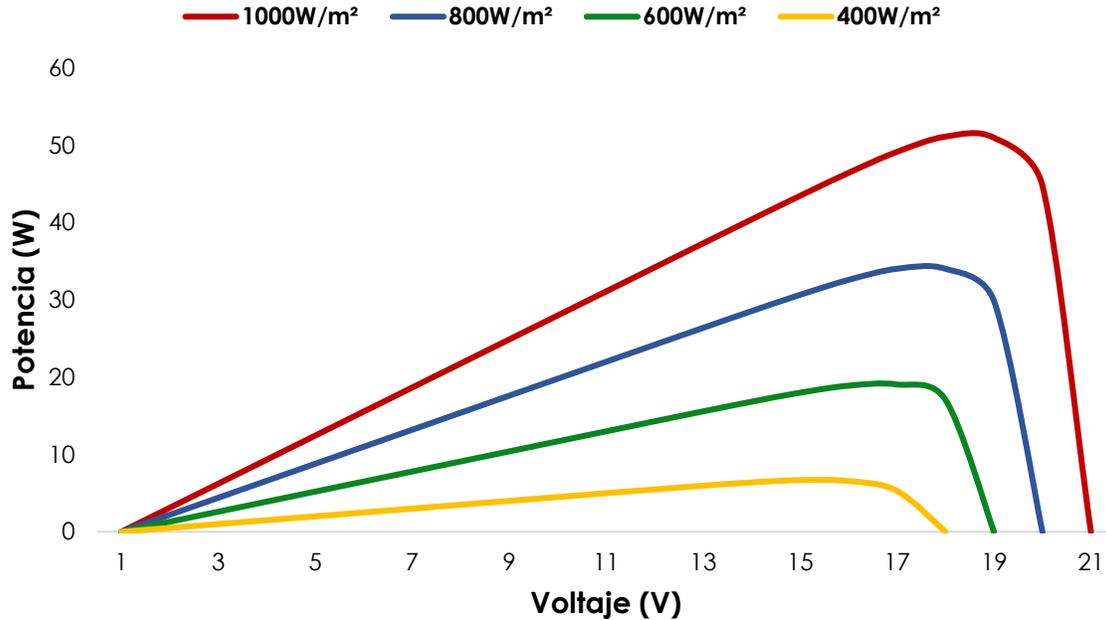


Figura 4.4 Curva característica P-V por variación de irradiancia.

4.1.5 Efecto de la temperatura sobre los paneles fotovoltaicos.

De manera análoga al caso anterior, el voltaje generado se verá afectado por la temperatura de operación del panel solar, de tal forma que, al operar bajo condiciones de temperatura diferentes a las de diseño, y manteniendo un valor de radiación constante, el voltaje de circuito abierto disminuirá. Estas aseveraciones se representan en la familia de curvas corriente – voltaje, mostradas en la figura 4.5 y de potencia – voltaje presentadas en la figura 4.6.

También se puede observar un ligero incremento de la corriente de cortocircuito para valores de temperatura mayores. Esto se debe a que la banda de energía (Band Gap) del material semiconductor decrece a medida que la temperatura aumenta. Por tal motivo, los fabricantes especifican en la hoja de datos un coeficiente de temperatura de corto circuito positivo, refiriéndose a la pequeña elevación de corriente al aumentar la temperatura (Lagunas, 2004).

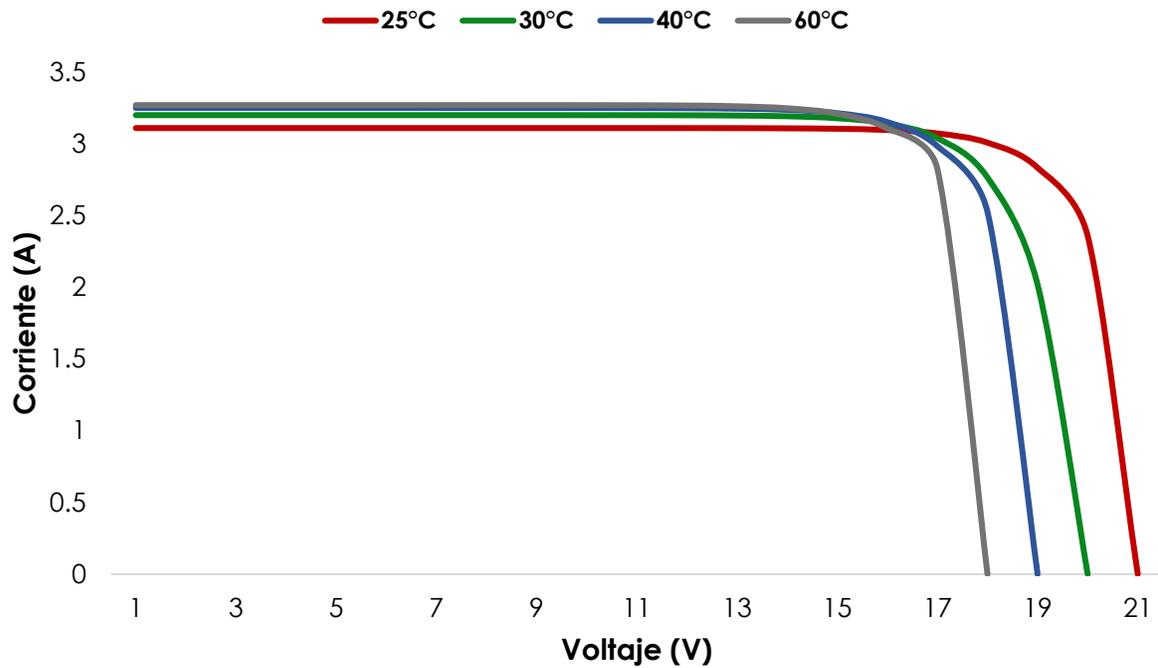


Figura 4.5 Curva característica I-V por variación de temperatura.

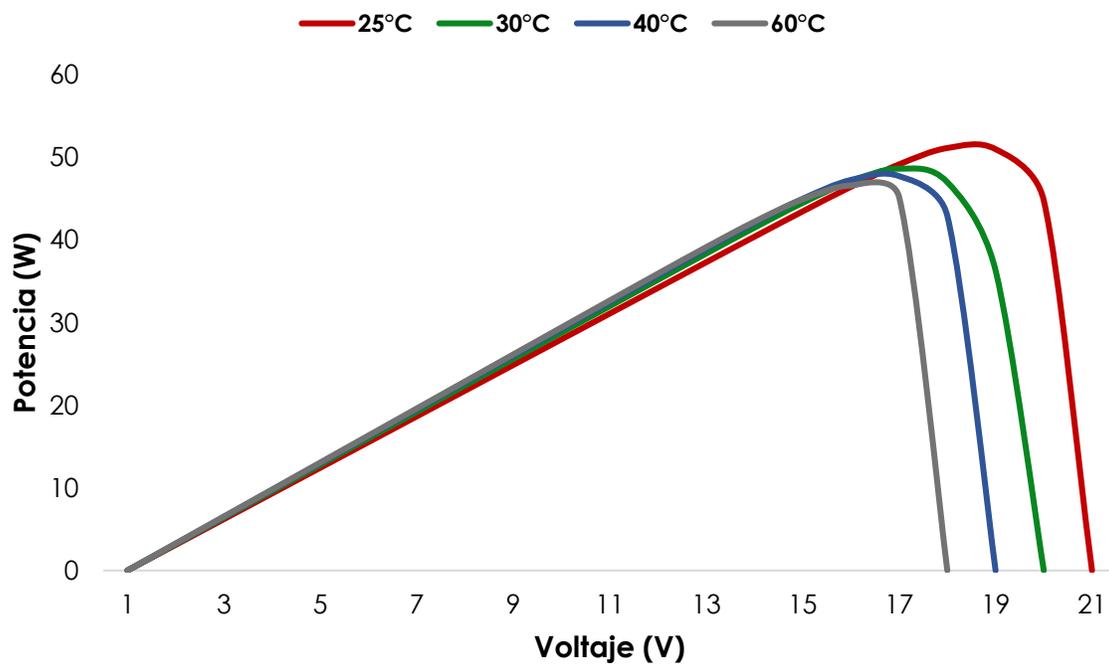


Figura 4.6 Curva característica P-V por variación de temperatura.

4.1.6 Modelo matemático del panel solar fotovoltaico en Simulink.

Para la representación del modelo matemático del panel solar en Simulink, se han utilizado los parámetros básicos del panel solar monocristalino MESM-50W del fabricante “Renovables del sur” para su comprobación mediante las curvas típicas corriente – voltaje (I-V) y potencia – voltaje (P-V). En la tabla 4.1 se muestran las características del panel fotovoltaico:

Tabla 4.1 Características eléctricas del panel solar MESM-50W.

Parámetro	Magnitud
Voltaje de circuito abierto (V_{OC})	21.8 v
Voltaje de potencia máximo (V_{MP})	17.5 v
Corriente de corto circuito (I_{SC})	3.11 A
Corriente de potencia máxima (I_{MP})	2.86 A
Potencia máxima ($P_{Máx}$)	50 W

La figura 4.7 representa la programación a bloques correspondiente a la ecuación 4.6, corriente de saturación de referencia (I_{o_ref}).

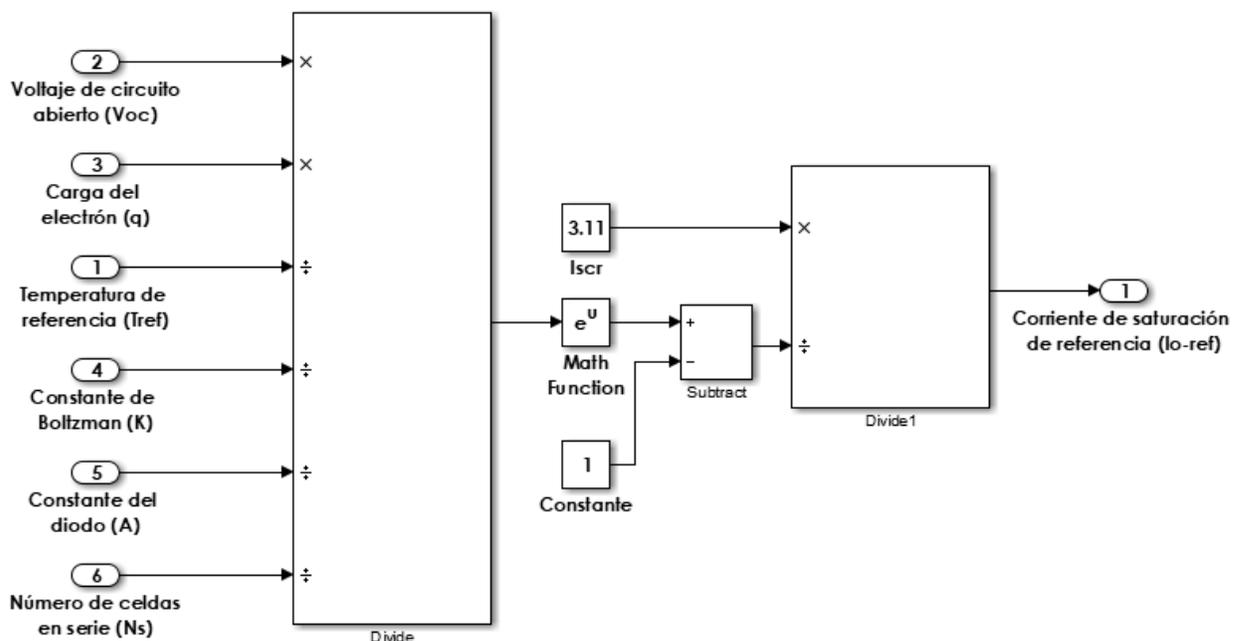


Figura 4.7 Modelo de la corriente de saturación de referencia (I_{o_ref}) en Simulink.

La figura 4.8 representa la programación a bloques correspondiente a la ecuación 4.5, corriente de saturación inversa (I_0).

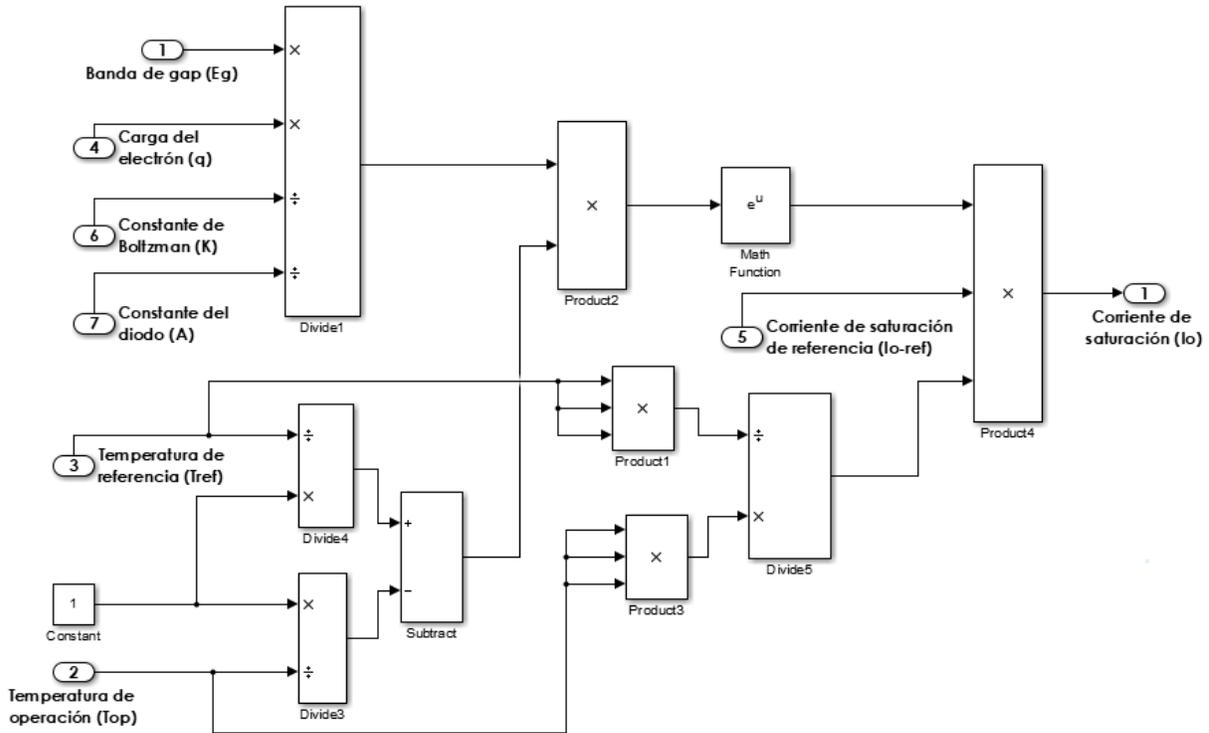


Figura 4.8 Modelo de la corriente de saturación (I_0) en Simulink.

La figura 4.9 representa la programación a bloques correspondiente a la ecuación 4.4, corriente fotogenerada (I_{pv}).

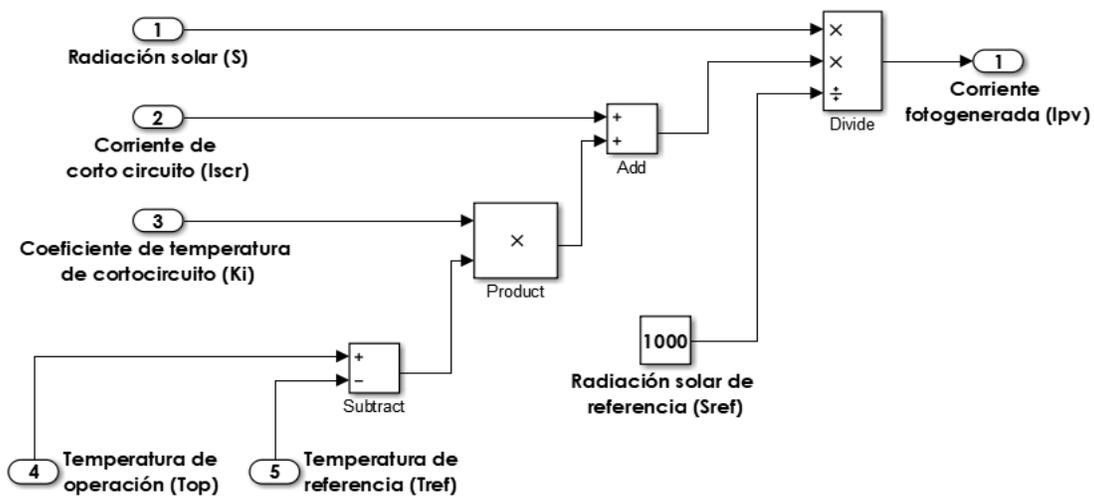


Figura 4.9 Modelo de la corriente fotogenerada (I_{pv}) en Simulink.

La figura 4.10 representa la programación a bloques correspondiente a la ecuación 4.7, corriente de salida (I).

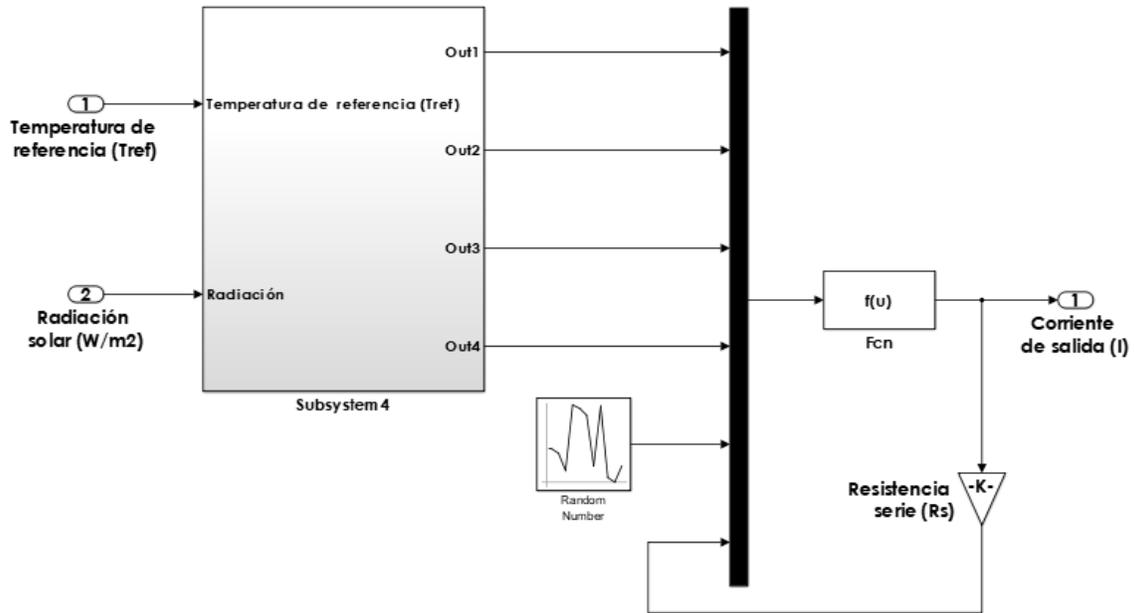


Figura 4.10 Modelo de la corriente de salida (I) en Simulink.

La figura 4.11 representa un modelo reducido de las ecuaciones 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7, donde las variables que se manipularán se encuentran del lado izquierdo (temperatura y radiación solar) y del lado derecho las variables de salida (corriente, potencia y voltaje).



Figura 4.11 Modelo del panel solar fotovoltaico en Simulink.

A continuación, se presentan la familia de curvas I-V y P-V para diferentes niveles de radiación solar, obtenidos de la programación realizada en Simulink.

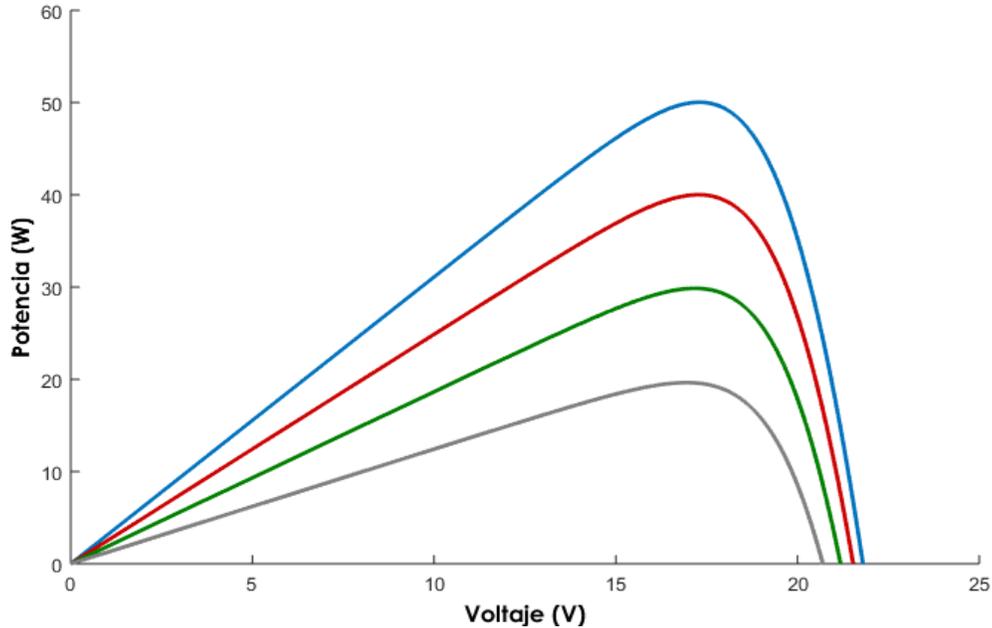


Figura 4.12 Curva característica P-V para diferentes niveles de radiación solar: 1000W/m² (azul), 800W/m² (rojo), 600W/m² (verde) y 400W/m² (gris).

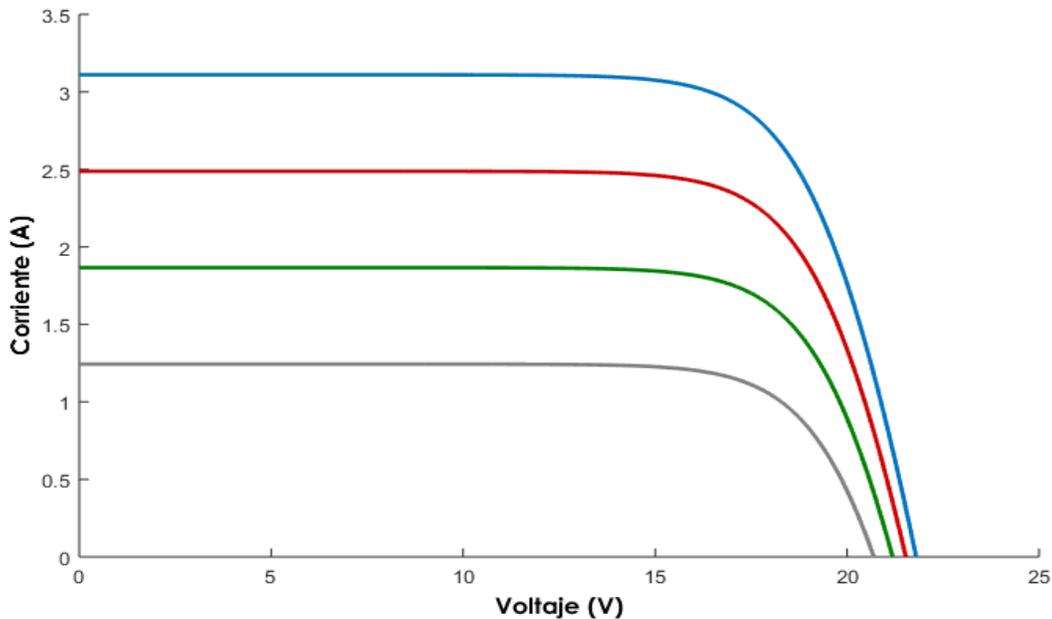


Figura 4.13 Curva característica I-V para diferentes niveles de radiación solar: 1000W/m² (azul), 800W/m² (rojo), 600W/m² (verde) y 400W/m² (gris).



4.2 Modelo matemático del aerogenerador

El siguiente elemento fundamental de la micro red es el sistema de aerogeneradores. Para conseguir la potencia de esta planta se planteará la ecuación que determina la cantidad de energía que existe en el viento, la cual será aprovechada por los aerogeneradores.

$$P_d = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(\rho Av)v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (4.9)$$

Donde:

m: Caudal másico del aire (kg)

ρ : Densidad del aire (kg/m³)

A: Área (m²).

v: Velocidad del viento (m/s).

La ecuación (4.9) expresa la cantidad total de potencia que existe en el aire de forma neta, sin embargo, esta energía no puede aprovecharse por completo debido a las pérdidas que se generan por las variaciones de área y densidad en el aerogenerador. De acuerdo con el físico Albert Betz y su establecida Ley de Betz, la cantidad total que puede llegar a aprovechar un aerogenerador ideal se estima en un 59.3% máximo.

Entonces, la ecuación para la potencia en el rotor del aerogenerador se expresa como:

$$P_r = \frac{16}{17} \left(\frac{1}{2} \rho A v_1^3 \right) \quad (4.10)$$

Donde:

P_r: Potencia del rotor (W).

A: Área barrida por el rotor (m²).

ρ : Densidad del aire (kg/m³).

v₁: Velocidad del viento aguas arriba del rotor (m/s).

Sin embargo, la ecuación (4.10) es general y representa un rotor ideal. En la realidad los mejores aerogeneradores pueden alcanzar de un 70% a un 80% de esta potencia. Otorgándonos que la potencia quedaría dada por:

$$P_r = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A v_1^3 \right) = \frac{1}{2} C_p \rho \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) v_1^3 \quad (4.11)$$

Donde:

D: Diámetro el círculo barrido por las palas (m).

C_p : Coeficiente de potencia del rotor (que depende de la forma aerodinámica de la pala y que en los rotores modernos alcanza valores en el rango de 0,4 a 0,5).

A partir de estas ecuaciones (4.9), (4.10) y (4.11) se determina la cantidad de potencia que será capaz de producir un aerogenerador de acuerdo a las variables de velocidad del viento y el coeficiente de potencia del rotor.

Modelo matemático del aerogenerador en Simulink.

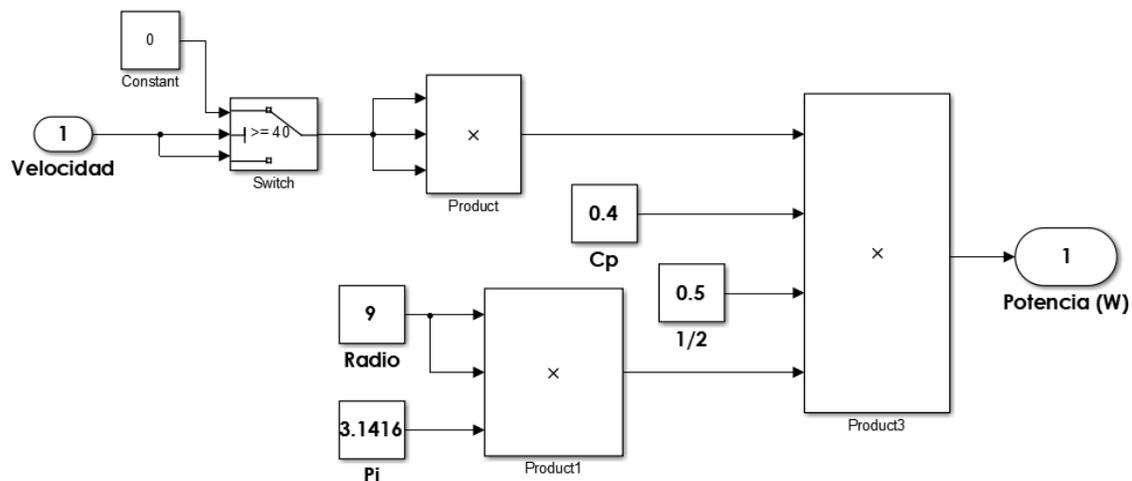


Figura 4.14 Modelo matemático del generador eólico en Simulink.

En el diagrama de Simulink se observa cada parte de la ecuación con sus diferentes entradas de forma explícita. Utilizamos un arreglo para evitar que el generador eólico no rebase la capacidad de velocidad que tiene cuando la velocidad del aire aumente a valores fuera de su rango de operación.

Los parámetros de operación se tomaron del generador comercial GESIS-50kW cuyas características se dan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Características eléctricas del aerogenerador GESIS-50kW.

Parámetro	Magnitud
Potencia nominal	50kW
Diámetro de las aspas	18m
Voltaje de entrada del controlador	380 Vcc
Velocidad de rotación nominal	60 rpm
Velocidad del viento, de arranque	2.5 m/s
Velocidad máxima del viento	40 m/s

A partir de las variables antes mencionadas somos capaces de obtener el valor final de potencia que es capaz de producirse con las entradas indicadas. Terminado el modelo del generador eólico es posible integrarlo al resto de la simulación como un solo bloque en Simulink.



Figura 4.15 Modelo del aerogenerador en Simulink.

La potencia generada dependerá totalmente del valor de velocidad que oscilará en el tiempo, como se observa en la figura 4.16.

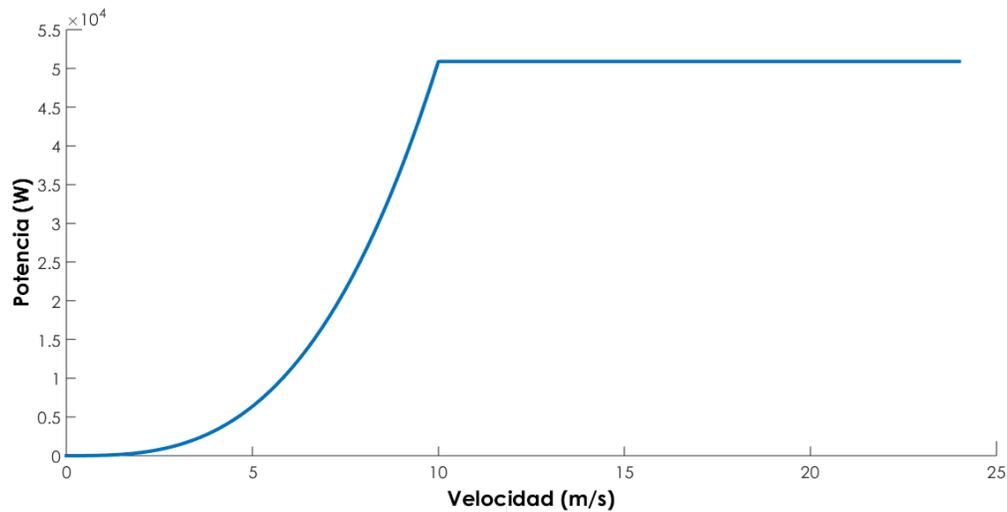


Figura 4.16 Curva característica Potencia-Velocidad.

En la figura 4.17 se puede observar la velocidad del viento en un momento específico, a su vez se observa la cantidad de potencia producida en función de la misma velocidad, obteniendo como resultado la producción de energía a lo largo del tiempo.

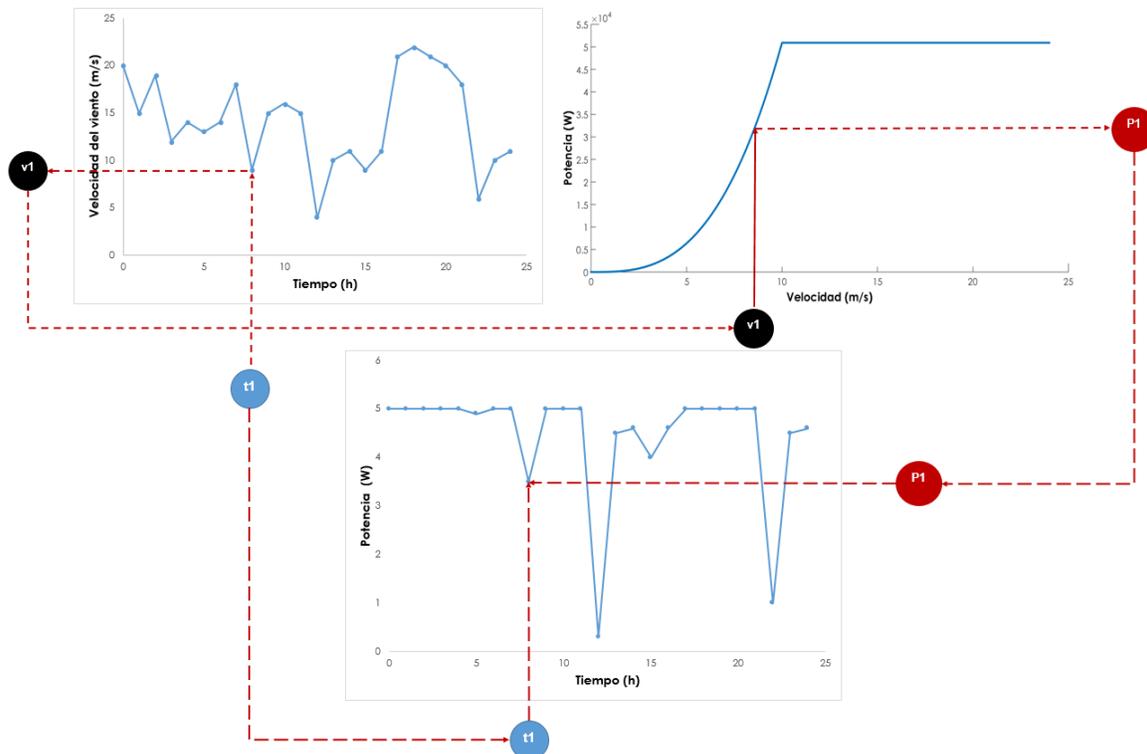


Figura 4.17 Potencia-Velocidad del viento-Tiempo.

4.3 Modelo matemático del banco de baterías

Tomando en cuenta que la generación en las fuentes renovables de energía es variable a lo largo del día y que existe la posibilidad de presentarse tanto déficit como superávit de energía conforme a la demanda, se incluye en la micro red un arreglo de baterías, el cual se encargará de suplir la demanda cuando la generación sea insuficiente, y aprovechará los excesos de generación para la carga de su capacidad.

El enfoque que se realizará en las baterías será en cuanto a su estado de carga o SOC (Estado de carga por sus siglas en inglés) el cual será monitoreado para poder mantener el uso de las baterías en sus parámetros óptimos para que su vida útil no se vea afectada.

El modelo se realizará en base a baterías de tipo estacionarias elaboradas a partir de fosfato de hierro y litio, tomando en cuenta que el SOC de una batería nunca debe ser menor al 20%.

4.3.1 Modelo matemático del estado de carga (descarga).

El método que será utilizado para la estimación del SOC será la estimación de carga basada en la intensidad de corriente debido a que la demanda no será constante a lo largo del día por lo que es necesario establecer un modelo para conocer el estado de carga en los distintos momentos.

Para esto se tomará el SOC inicial, la capacidad nominal de la batería y la velocidad de descarga en términos de la corriente por hora, para lo cual se utilizará la ecuación (4.12):

$$SOC(\%) = \left(SOC_0 - \int \frac{i(t)}{C_n} dt \right) \cdot 100 \quad (4.12)$$

Integrando:

$$SOC(\%) = \left(SOC_0 - \frac{I \cdot t}{Cn} \right) \cdot 100 \quad (4.13)$$

Donde:

SOC: Estado de carga de la batería (%).

SOC₀: Estado de carga inicial de la batería (p.u).

I(t): Velocidad de descarga (A).

t: Tiempo por velocidad de descarga (h).

Cn: Capacidad nominal de la batería (Ah).

La ecuación (4.13) se utilizará para la descarga de las baterías considerando que la esta se puede efectuar en cualquier estado de carga, siempre y cuando no se exceda la profundidad máxima de descarga del 80%.

En la figura 4.18 se muestra el comportamiento a lo largo del tiempo del estado de carga de una batería para diferentes velocidades de descarga, siendo C la capacidad nominal de la batería en Ah y las líneas punteadas presentan las descargas a profundidades mayores al 80% las cuales no son recomendadas.

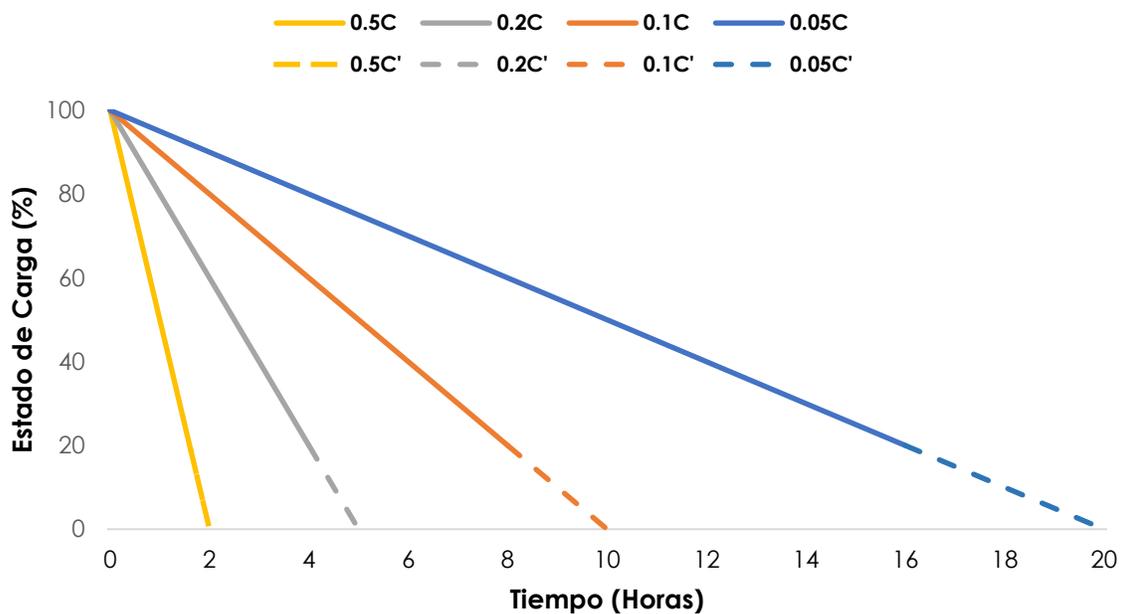


Figura 4.18 Proceso de descarga de la batería a diferentes velocidades.

4.3.2 Modelo matemático del estado de carga (carga).

Para el caso de la carga se considera que el SOC se encuentra por debajo de la capacidad total y se le añadirá energía dependiendo de la intensidad de la corriente por el tiempo de carga por lo cual la ecuación quedará de la siguiente manera:

$$SOC(\%) = \left(SOC_0 + \frac{I \cdot t}{Cn} \right) \cdot 100 \quad (4.14)$$

Tomando en cuenta que una vez alcanzando valores de estado de carga del 100% se debe interrumpir la carga del sistema para evitar sobrecargas que puedan afectar la vida útil de la batería. En la figura 4.19 se muestra el comportamiento a lo largo del tiempo del estado de carga de una batería para diferentes velocidades de carga.

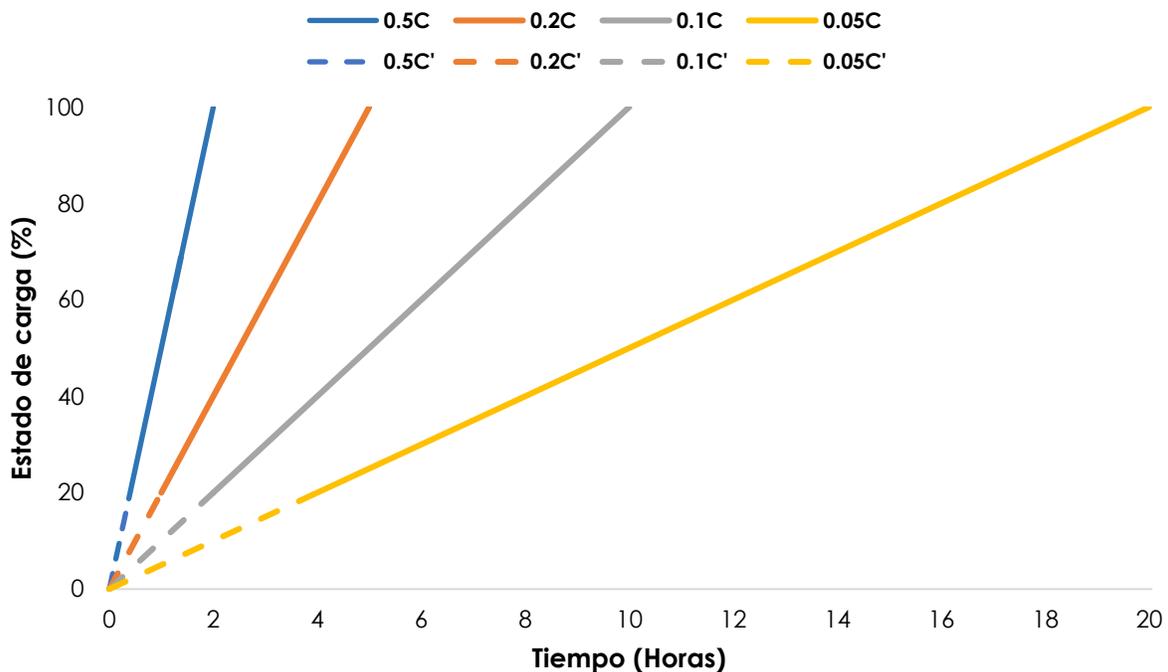


Figura 4.19 Proceso de carga de la batería a diferentes velocidades.

4.3.3 Modelo matemático del banco de baterías en Simulink.

Para la representación del arreglo de baterías en Simulink se utilizaron las ecuaciones (4.13) y (4.14) para carga y descarga, tomando como base la batería del fabricante Mastervolt modelo MLI Ultra24/5000 que está compuesta por fosfato de hierro y litio, cuyas características eléctricas se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Características eléctricas de la batería MLI Ultra24/5000.

Parámetro	Magnitud
Voltaje nominal	26.4v
Capacidad nominal	180Ah
Ciclo de Vida	2000 ciclos a 80% de profundidad de descarga

A partir de estos datos se elaboró el modelo para simular el comportamiento de las baterías en Simulink de acuerdo con las dos funciones mencionadas anteriormente, el cual se muestra en la figura 4.20 y 4.21.

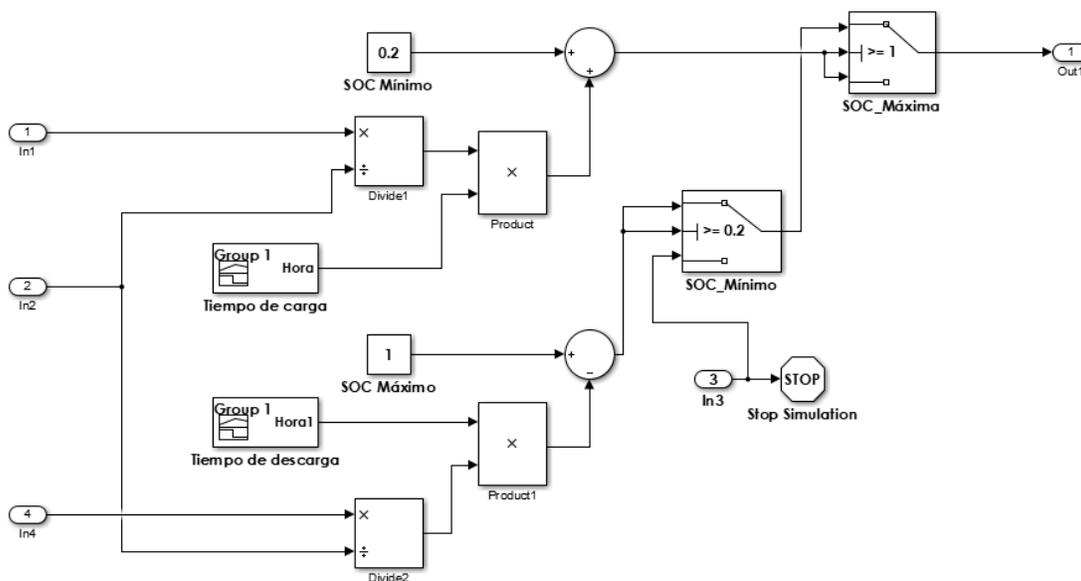


Figura 4.20 Modelo del estado de carga en Simulink.



Figura 4.21 Modelo de la batería en Simulink.

En la figura 4.22 se observa la curva de descarga de la batería, se aprecia que se alcanza la descarga máxima de 80% a las 14 horas aproximadamente, se mantiene constante el nivel de carga por un lapso y posteriormente se vuelve a cargar para alcanzar su punto máximo a las 24 horas.

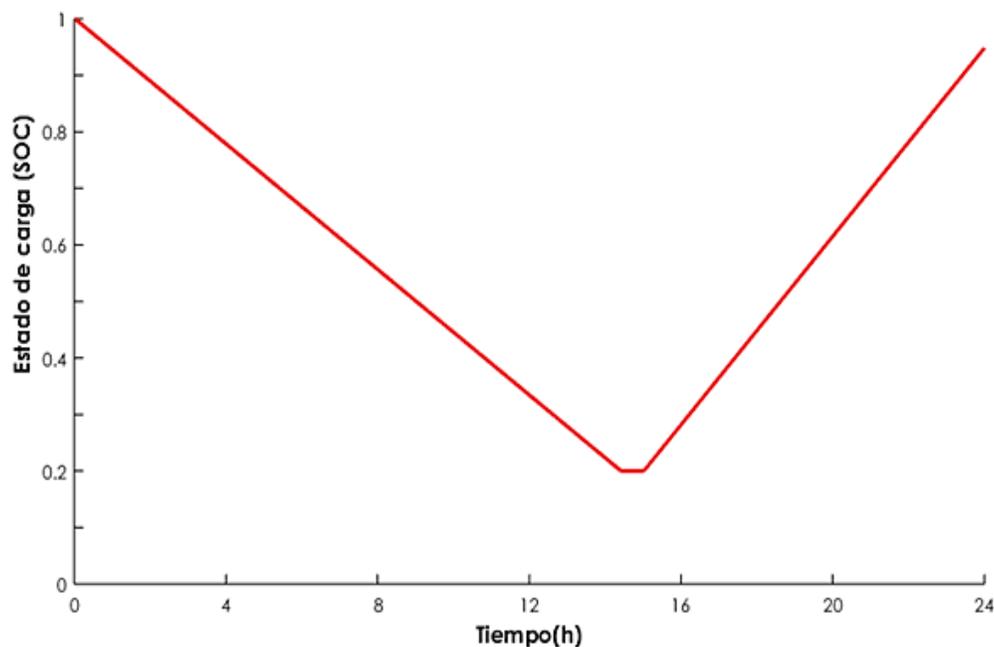


Figura 4.22 Proceso de descarga-carga de la batería.

En la figura 4.23 la batería se carga hasta las 10 horas, donde su nivel de carga es máximo. Al no ser utilizada se mantiene un nivel de carga constante por 5 horas, hasta comenzar su proceso de descarga a partir de las 17 horas.

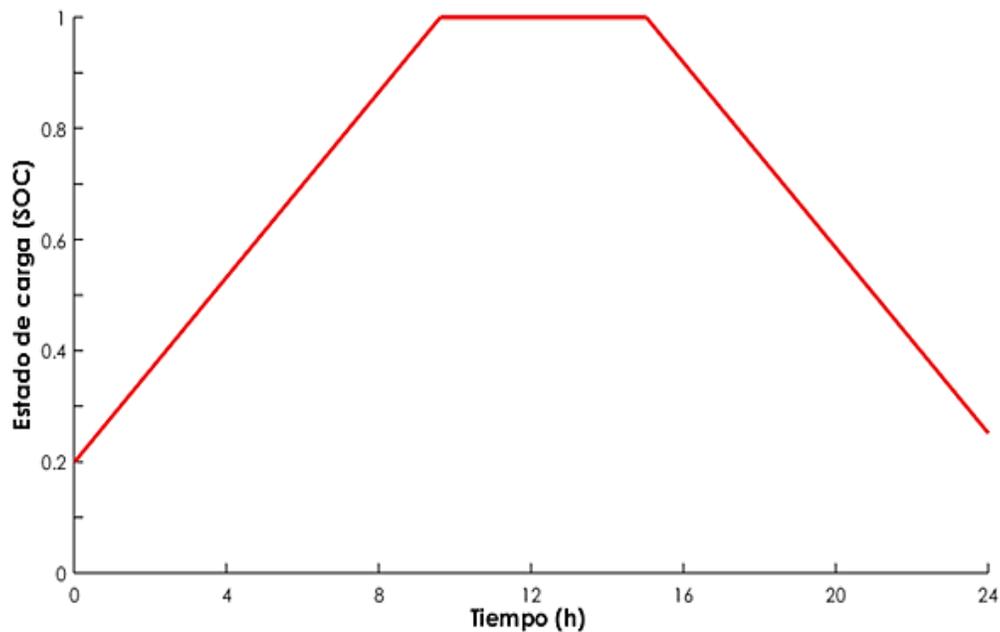


Figura 4.23 Proceso de carga-descarga de la batería.

4.4 Desarrollo del controlador

4.4.1 Entradas y salidas.

El controlador difuso está formado por 2 entradas y 5 salidas que definen cada una de las variables a ser utilizadas. Las entradas representadas por la potencia neta y estado de carga de la batería y las salidas como interruptores que se abren o cierran. El controlador difuso se integra entonces de los siguientes parámetros:

Entradas:

1. Potencia neta (P_{neta}).
2. Estado de carga (SOC).

Salidas:

1. Switch de carga de la batería.
2. Switch de descarga de la batería.
3. Switch Solar 1.
4. Switch Solar 2.
5. Switch Eólico.

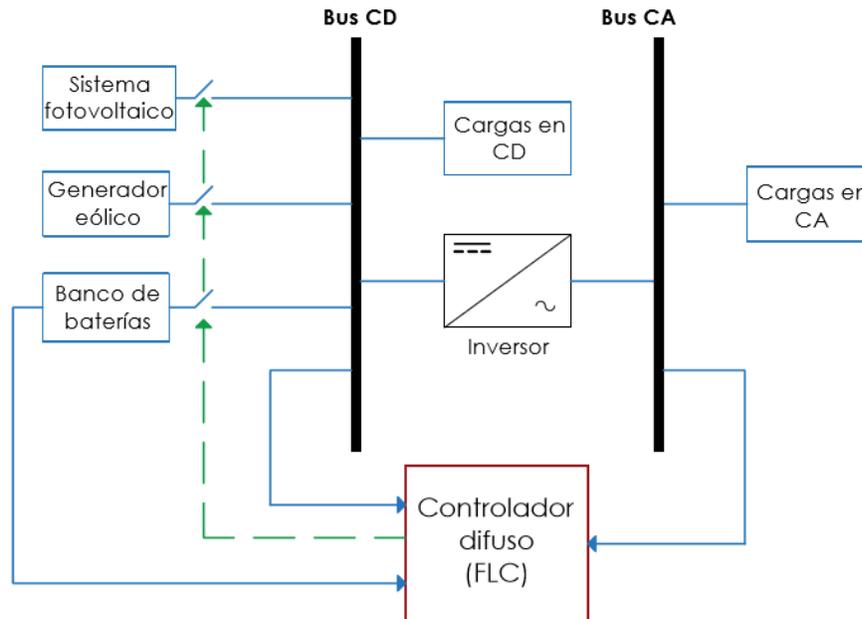


Figura 4.24 Diagrama a bloques de la micro red eléctrica.

La Potencia neta es la diferencia entre la potencia generada y la demandada, este valor puede tomar valores positivos o negativos dependiendo de si existe exceso o déficit de potencia. Mientras que el SOC es la carga de la batería, su estado inicial dependerá del tipo de caso que se esté analizando.

Para las salidas del controlador la micro red está diseñada para funcionar con interruptores que permitan realizar la conexión o desconexión de las diferentes fuentes de generación y del sistema de almacenamiento. A fin de tener un mejor control de la generación y evitar desperdicios, se dividió la planta fotovoltaica en dos arreglos, permitiendo desconectar uno u otro para disminuir el exceso de generación manteniendo la potencia suficiente para satisfacer la demanda.

En la simulación estas salidas sólo podrán tomar dos estados, para indicarle al controlador cuando debe abrir o cerrar cada interruptor. En la tabla 4.4 se presentan los conjuntos difusos para cada una de las variables que conforman el sistema.

Tabla 4.4 Conjuntos difusos.

Variable	Universo de Discurso
Potencia Neta	[-50, 60]kW
SOC	[20, 100]% ó [0.2, 1]p.u.
Switch carga de batería	[0, 1]
Switch descarga de batería	[0, 1]
Switch Solar 1	[0, 1]
Switch Solar 2	[0, 1]
Switch Eólico	[0, 1]

4.4.2 Funciones de membresía.

Para el conjunto difuso correspondiente a la potencia neta se decidió utilizar funciones de membresía tipo triangular, dividiendo el universo de discurso en 6; las cuales se muestran a continuación, se puede observar su representación gráfica en la figura 4.25.

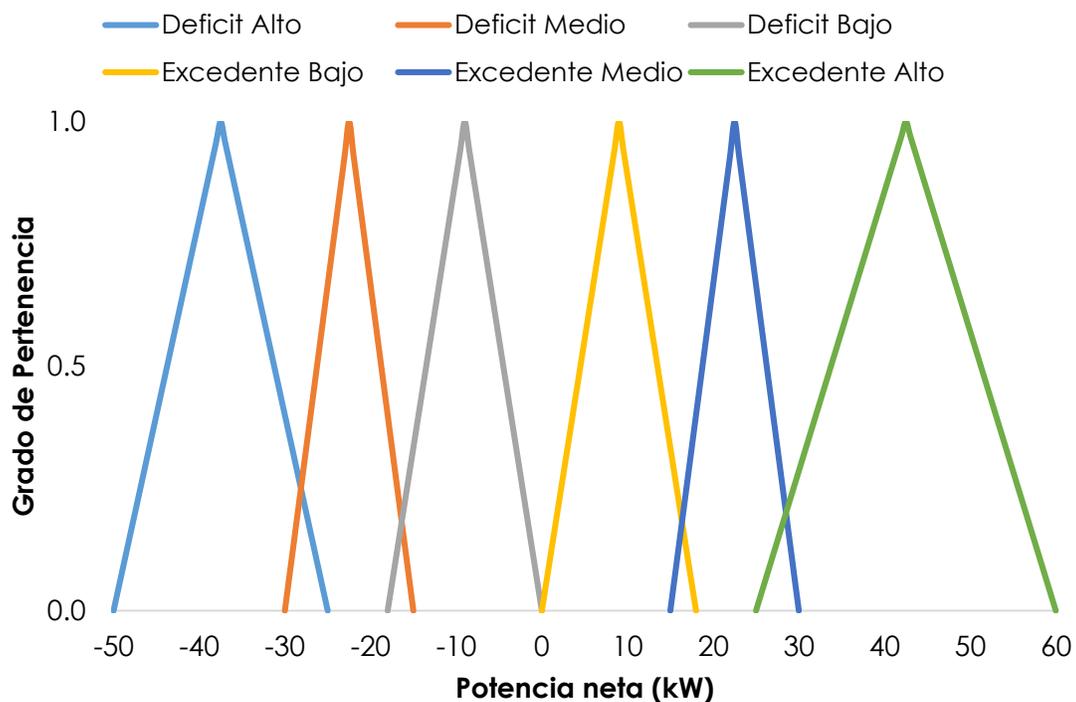


Figura 4.25 Funciones de membresía para la potencia neta.

1. Déficit Alto (DA): Desde -50kW hasta -25kW.
2. Déficit Medio (DM): Desde -30kW hasta -15kW.
3. Déficit Bajo (DB): Desde -18kW hasta 0.
4. Excedente Bajo (EB): Desde 0 hasta 18kW.
5. Excedente Medio (EM): Desde 15kW hasta 30kW.
6. Excedente Alto (EA): Desde 25kW hasta 60kW.

Para el conjunto difuso del estado de carga se optó por utilizar funciones de tipo saturación y trapezoidal que se pueden observar en la figura 4.26, mismas que facilitan la interpretación de los datos al controlador, dividiendo el universo de discurso en 3:

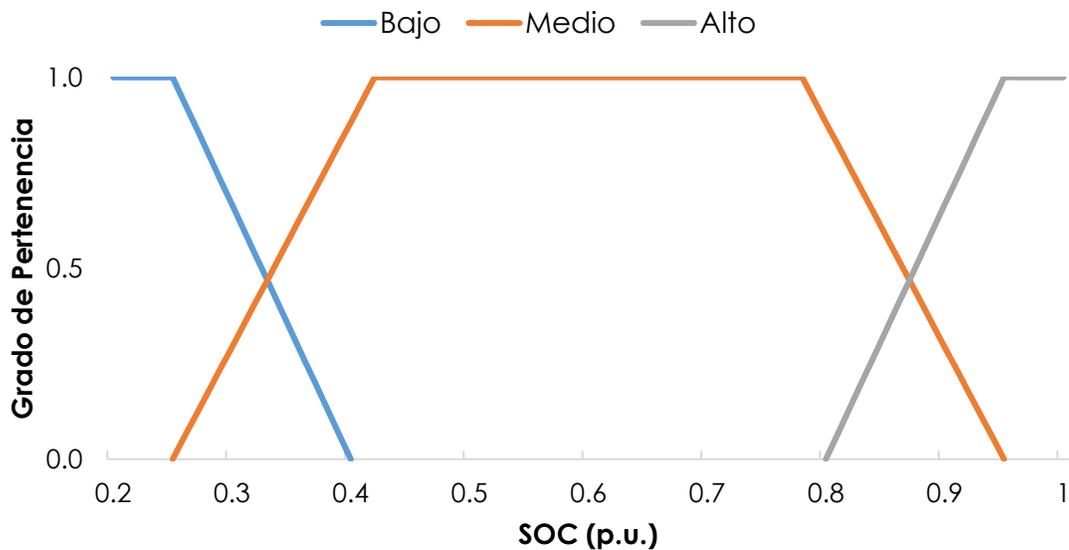


Figura 4.26 Funciones de membresía para la batería.

1. Bajo (B): Desde 0.2 hasta 0.4
2. Medio (M): Desde 0.25 hasta 0.95
3. Alto (A): Desde 0.8 hasta 1

Para el conjunto difuso correspondiente a los switch se optó por utilizar funciones del tipo triangular que se pueden observar en a figura 4.27, dividiendo el universo del discurso en 2 partes:

1. Encendido (ON): Desde 0 hasta 0.5
2. Apagado (OFF): Desde 0.5 hasta 1

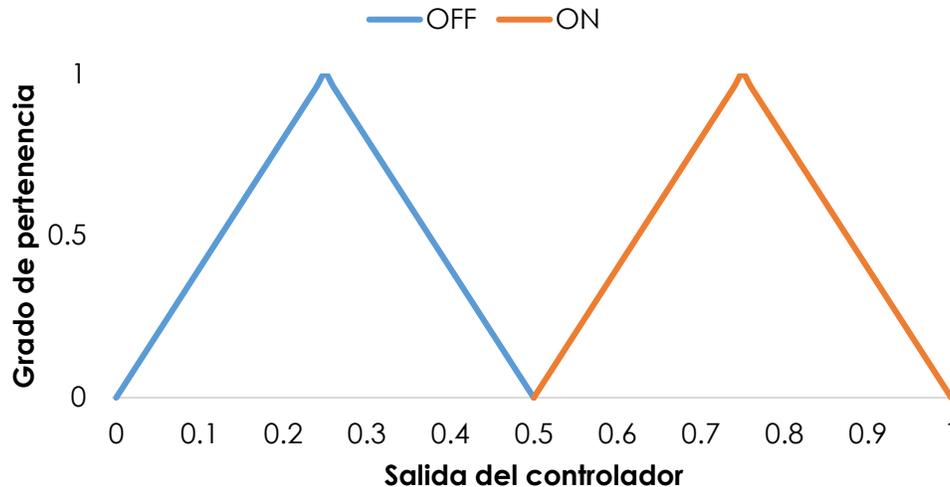


Figura 4.27 Funciones de membresía para las variables de salida.

4.4.3 Base de conocimientos.

Para poder evaluar las condiciones del sistema y generar respuestas eficaces a cada escenario, el controlador difuso estará basado en las 18 reglas que se presentan en la tabla 4.5. Las decisiones tomadas por el controlador buscarán aprovechar al máximo la energía generada en las fuentes de energía renovable, así como también hacer uso de la batería para suplir los momentos donde no se pueda abastecer toda la demanda, cuidando que el sistema de almacenamiento no sufra descargas profundas, es decir, no exceder una profundidad de descarga del 80%, con el fin de ampliar la vida útil de la batería.

Las reglas se han orientado de tal manera que siempre que el estado de carga de una batería sea bajo o medio, se buscará aprovechar la energía excedente al máximo, de forma que cargue más rápido la batería; en ese sentido, no se desconectará ninguna fuente. Para los escenarios donde la batería muestra niveles altos de carga y se tengan excedentes buscará desconectar una o más fuentes dependiendo de la magnitud de la potencia excedente; para este caso las baterías no participan.



Cuando se presenten déficits de generación, no importando la magnitud, todas las fuentes entran en funcionamiento; las baterías siempre y cuando no tenga niveles muy bajos de estado de carga, comenzarán a descargarse para cumplir con la carga faltante.

Se cargará la batería cuando haya excedentes de potencia, mientras no se tengan valores altos de estado de carga, siendo este punto donde se desconectará la batería y de esta manera evitar sobrecargas que puedan dañar al equipo.

Tabla 4.5 Conjunto de reglas incorporadas al controlador difuso.

Número de regla	ENTRADAS		SALIDAS				
	Potencia Neta	SOC	Switch Carga	Switch Descarga	Switch Solar 1	Switch Solar 2	Switch Eólico
1	DA	B	OFF	OFF	ON	ON	ON
2	DA	M	OFF	ON	ON	ON	ON
3	DA	A	OFF	ON	ON	ON	ON
4	DM	B	OFF	OFF	ON	ON	ON
5	DM	M	OFF	ON	ON	ON	ON
6	DM	A	OFF	ON	ON	ON	ON
7	DB	B	OFF	OFF	ON	ON	ON
8	DB	M	OFF	ON	ON	ON	ON
9	DB	A	OFF	ON	ON	ON	ON
10	EB	B	ON	OFF	ON	ON	ON
11	EB	M	ON	OFF	ON	ON	ON
12	EB	A	OFF	OFF	ON	ON	ON
13	EM	B	ON	OFF	ON	ON	ON
14	EM	M	ON	OFF	ON	ON	ON
15	EM	A	OFF	OFF	ON	OFF	ON
16	EA	B	ON	OFF	ON	ON	ON
17	EA	M	ON	OFF	OFF	ON	ON
18	EA	A	OFF	OFF	OFF	OFF	ON

4.4.4 Desarrollo del controlador difuso en la plataforma Simulink – Matlab.

El controlador difuso se desarrolló utilizando el toolbox de fuzzy logic de Matlab. Esta herramienta permitió definir el sistema difuso tipo Mamdani requerido para esta aplicación. Dentro de esta interfaz se definieron las entradas y salidas del sistema, el cual se muestra en la figura 4.28. En esta figura se observa que el controlador cuenta con 2 entradas (P_{neta} y SOC) y 5 salidas (switch carga, switch descarga, switch solar 1, switch solar 2 y switch eólico).

El método mín-máx y centroide se han utilizado para las interfaces de difusificación y desdifusificación, respectivamente.

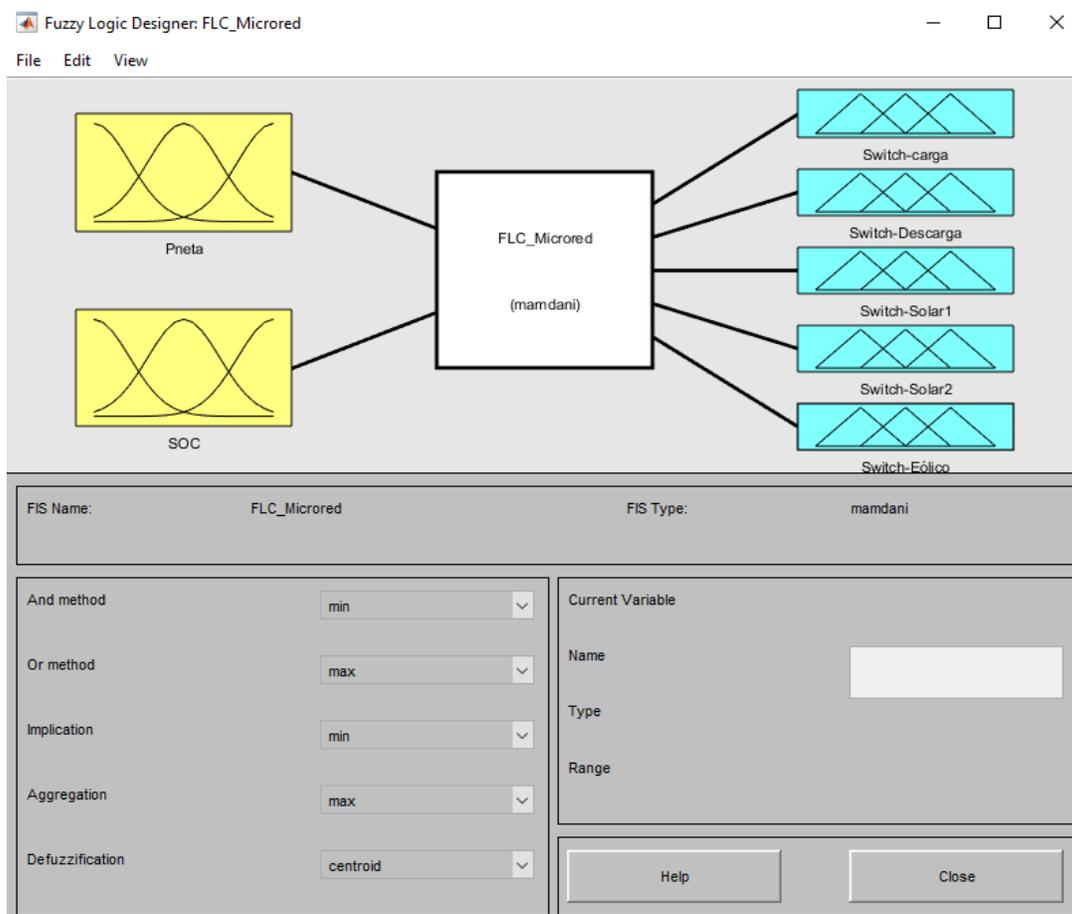


Figura 4.28 Interfaz principal del ToolBox de Fuzzy Logic, para el desarrollo del controlador difuso tipo Mamdani en Matlab.

Con la herramienta de *Fuzzy Logic Designer* (Ver Apéndice A) también se han implementado los conjuntos difusos asociados a cada una de las variables. Asimismo, se definió la base de conocimiento para el sistema generando el conjunto de reglas. El comportamiento que se tendrá en cada una de las salidas es posible visualizarlo mediante las curvas de superficie formadas por el software.

En la figura 4.29 es posible visualizar que la batería será cargada cuando la Potencia neta sea siempre positiva, lo cual es bastante congruente, al existir exceso de energía. Por otra parte, el sistema de almacenamiento estará cargándose hasta que SOC sea igual a 0.95, evitando así, que se tengan sobrecargas que podrían afectar su vida útil.

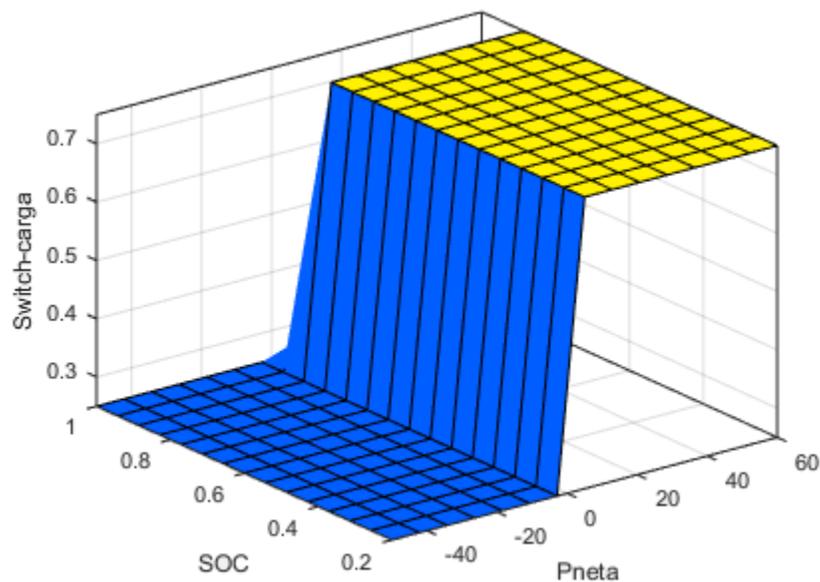


Figura 4.29 Curva de superficie para la salida “Switch de Carga”.

De igual manera, en la figura 4.30 se observa que mientras exista un déficit de potencia, la batería aportará la energía faltante para satisfacer la demanda, y el controlador se encargará de desconectarla hasta que el SOC sea igual a 0.3; de esta manera, se impide que existan descargas profundas que podrían perjudicar el rendimiento de la misma.

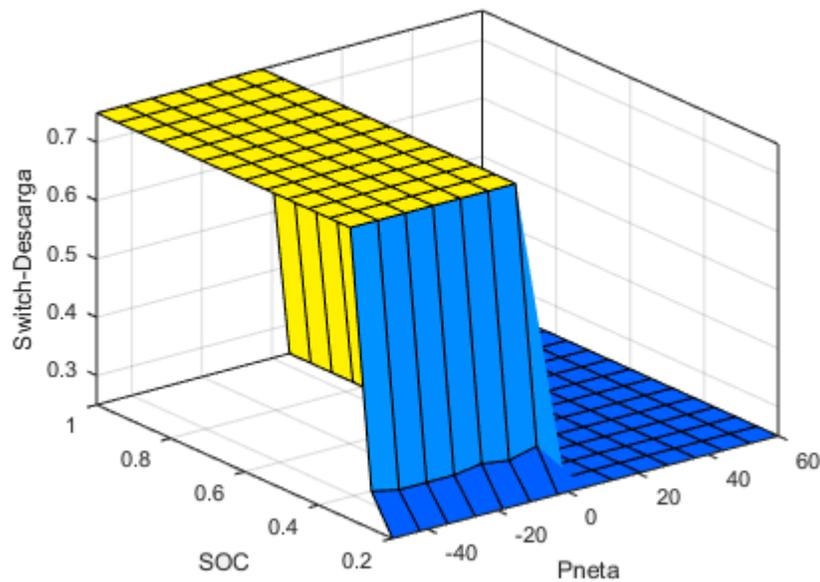


Figura 4.30 Curva de superficie para la salida “Switch de Descarga”.

Las figuras 4.31 y 4.32 representan las salidas para los switch del sistema fotovoltaico. En ellas se observa que el controlador desconectará un arreglo de paneles fotovoltaicos siempre y cuando el SOC se encuentre al menos al 90% de carga de su capacidad, garantizando la disponibilidad de la energía en caso de ser requerida; de otra forma, los arreglos estarán conectados al sistema en todo momento.

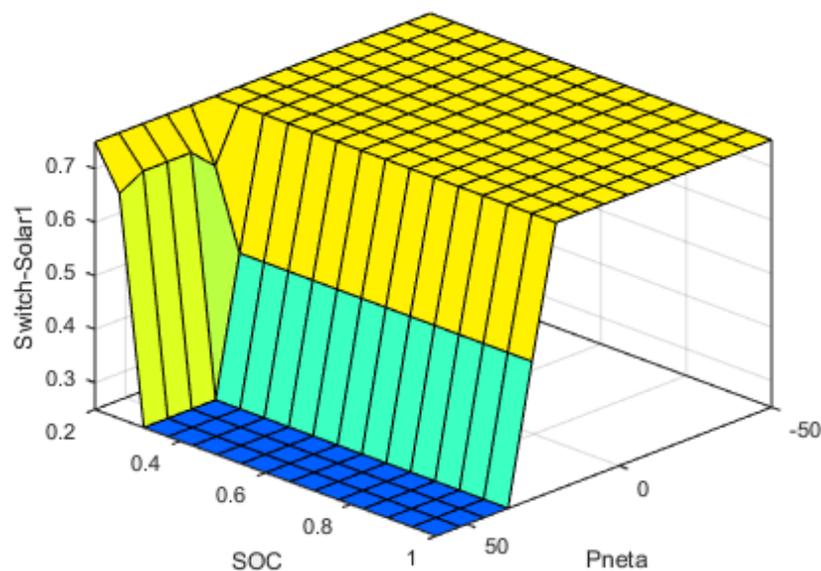


Figura 4.31 Curva de superficie para la salida “Switch Solar 1”.

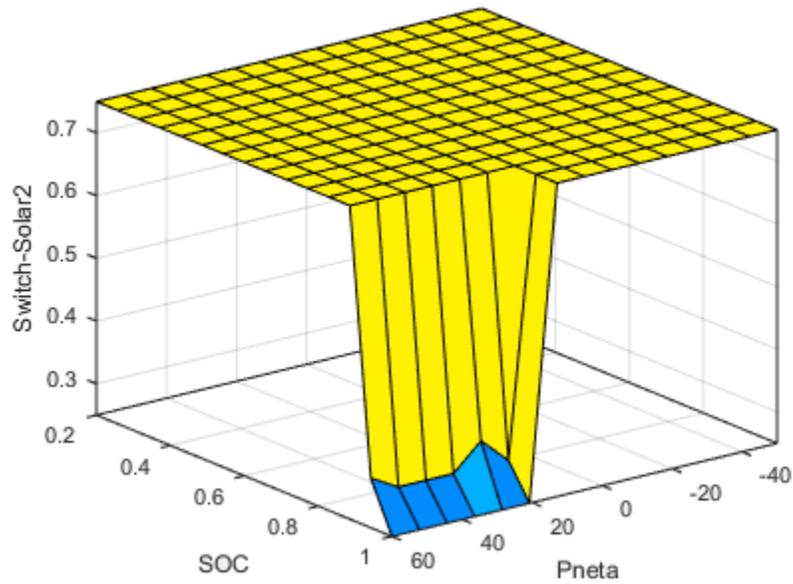


Figura 4.32 Curva de superficie para la salida “Switch Solar 2”.

Finalmente, en la figura 4.33 se muestra que el aerogenerador estará conectado en todo momento, ya que, es el elemento que aporta más energía al sistema y su ausencia provocaría un inevitable déficit de energía.

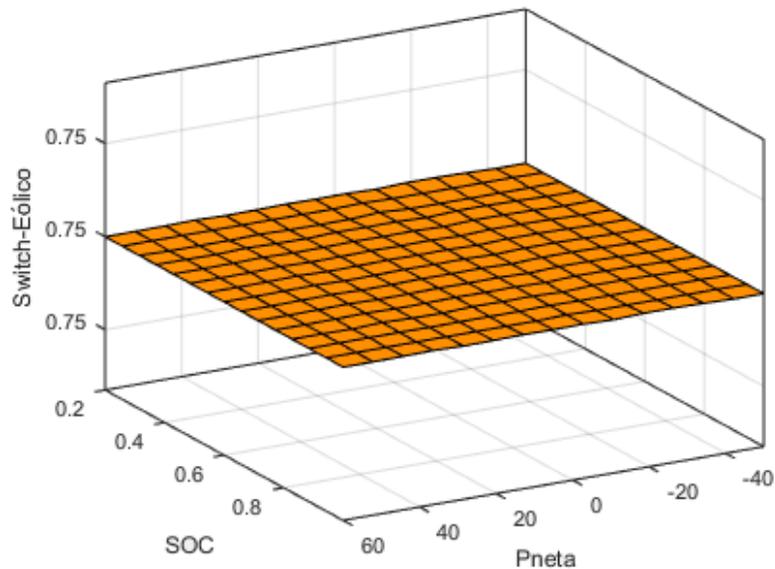


Figura 4.33 Curva de superficie para la salida “Switch Eólico”.



Una vez presentados los modelos de los elementos a utilizar: fuentes de energía renovable, sistema de almacenamiento, y controlador difuso, a continuación, se implementará la simulación del sistema para evaluar la respuesta y determinar si es adecuada para el abastecimiento de energía.



Capítulo V. Simulación de la micro red eléctrica inteligente

De acuerdo con los modelos desarrollados en el capítulo anterior, conocemos las instrucciones otorgadas al controlador y el razonamiento que éste seguirá para conectar o desconectar las diferentes fuentes de generación, o en su defecto, de cargar o descargar el sistema de almacenamiento. Todo esto se llevará a cabo de forma inteligente.

En este capítulo se realizará un análisis para los estudios de simulación, en los que se presentarán tres casos con diferentes condiciones del sistema en los que se analizará el comportamiento del controlador en la micro red. El tiempo de simulación es de 24 horas y se utilizó el mismo perfil de demanda para todos los escenarios planteados, variando únicamente la generación de cada planta. Las capacidades de los elementos que conforman a la micro red son: Aerogenerador (60kW), Sistema solar fotovoltaico (30kW c/u) y banco de baterías (10,000Ah).

5.1 Descripción de la micro red

A continuación, se presenta la configuración completa de la micro red, compuesta de todas las fuentes de generación, sistema de almacenamiento y el controlador.

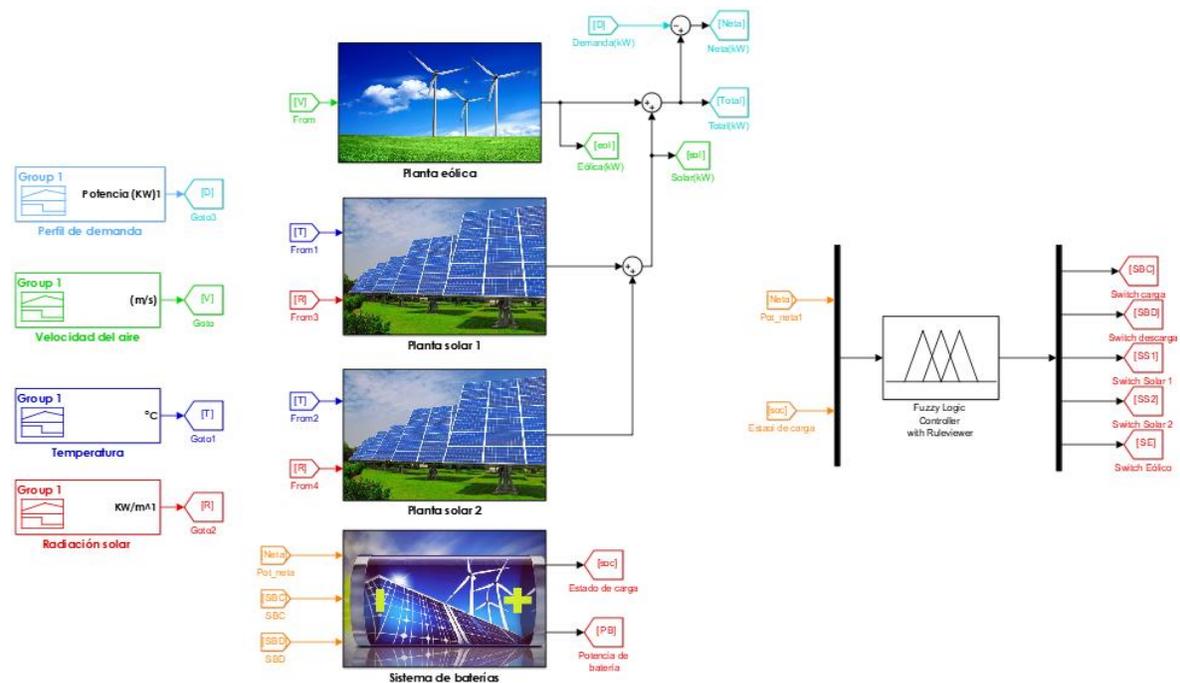


Figura 5.1 Simulación de la micro red eléctrica en Simulink.

Las condiciones de operación de las fuentes de generación se agrupan en el lado izquierdo de la figura 5.1, a partir de estos se generan las magnitudes de potencias de cada una. En la parte superior se encuentran los operadores para obtener el primer valor de entrada al controlador, la potencia neta. Las salidas del controlador, situadas en el lado derecho de la figura, retroalimentan a las plantas a partir de las decisiones tomadas por el controlador para conectarlas o desconectarlas. Las salidas de las fuentes son de donde se obtendrán las gráficas a analizar en cada uno de los casos de estudio (Ver Apéndice B).

5.2 Perfil de demanda

Para llevar a cabo la simulación del sistema, se ha propuesto un perfil de carga como el mostrado en la figura 5.2. Dicho perfil presenta variaciones de la demanda a lo largo del día. La demanda de energía depende de manera directa de la carga conectada a la micro red. Se observa que a las 18:00 horas se tiene una demanda máxima y la demanda mínima se presenta a las 01:00 horas.

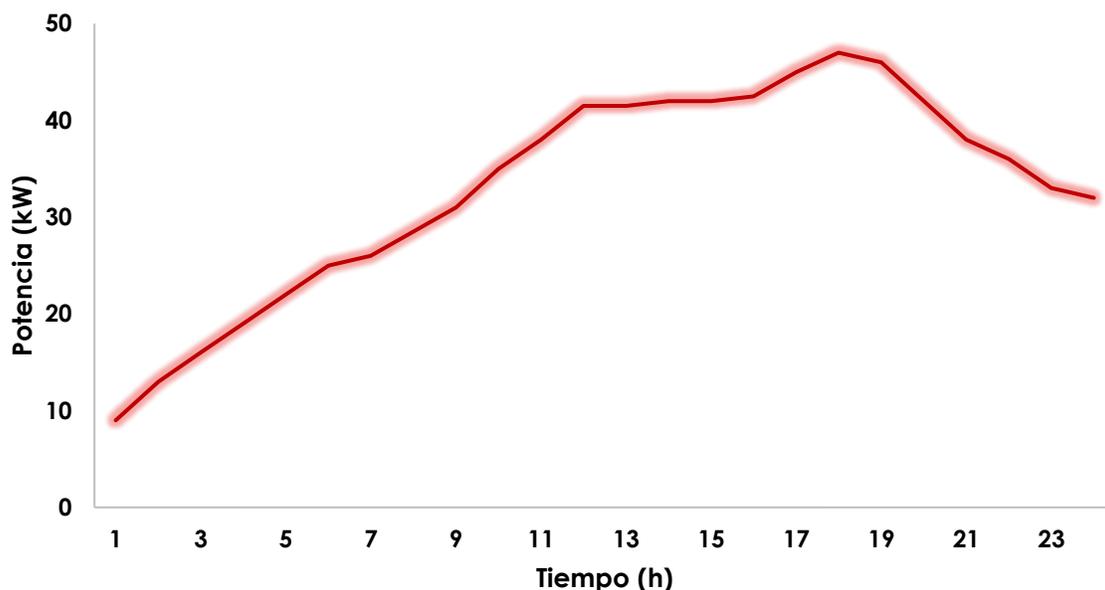


Figura 5.2 Perfil de demanda empleado en la simulación del sistema.

5.3 Casos de estudio

El propósito de este sistema de control difuso es garantizar el abastecimiento de la energía bajo diferentes modos de operación, y al mismo tiempo proteger las baterías de estados de descarga profundos y sobrecargas. Para ello, se han propuesto tres casos críticos en régimen permanente, donde el controlador deberá ser capaz de responder adecuadamente.

En el capítulo anterior se definió la base de conocimientos que permitirá que se cumplan estos objetivos en la micro red, sin embargo, a continuación, se mencionarán los criterios más importantes que se tomaron en cuenta para plantear la conexión o desconexión de las fuentes de generación:

1. Actualmente se requiere que los parques eólicos permanezcan conectados a la red en caso de falla para que de esa forma contribuyan a la estabilidad del sistema. Se requiere que los aerogeneradores contribuyan con potencia reactiva cuando ocurre una falla para dar soporte de voltaje y mientras pueden absorber potencia activa. Cuando se libera la falla son libres de consumir potencia reactiva y vuelven a aportar potencia activa. (Suárez, 2010, p.128).
2. Por otra parte, el sistema de generación solar no presenta picos en el arranque o cuando hay variaciones de intensidad solar. También se puede ver que al ocurrir una falla prácticamente el sistema de generación solar deja de producir potencia, por lo que no contribuye a la falla.
3. Al interpretar los estudios realizados, Suárez (2010) concluyó que se puede observar que los generadores solares fotovoltaicos prácticamente no aportan corriente de falla, esto se debe en parte a que los paneles solares no pueden aportar mucha más energía de la que están generando, es decir, su corriente de cortocircuito está muy cerca de la nominal, y además la instalación fotovoltaica tiene incorporado un inversor que limita esta corriente (p.153).

Caso I. Excedente de generación.

En este primer escenario se estudia la situación de excedente de generación durante todo el día, las baterías estarán completamente cargadas y no serán requeridas en ningún momento. El objetivo es observar la conexión y desconexión de algunas de las plantas de energía en cuanto la potencia alcance un valor elevado.

En la figura 5.3 se presenta la energía que se habría generado de no existir ninguna desconexión en el sistema (línea verde), la potencia generada después de la acción del controlador es la que se ve remarcada (área azul). Como se observa alrededor de las 6 horas de funcionamiento ocurre la desconexión de uno de los arreglos de la fuente fotovoltaica, durante las 10 horas siguientes esta planta se encuentra desconectada y es poco después de las 16 horas cuando vuelve a conectarse para abastecer la demanda. Esto demuestra que existe una respuesta satisfactoria de controlador en el momento en que la generación es excedente.

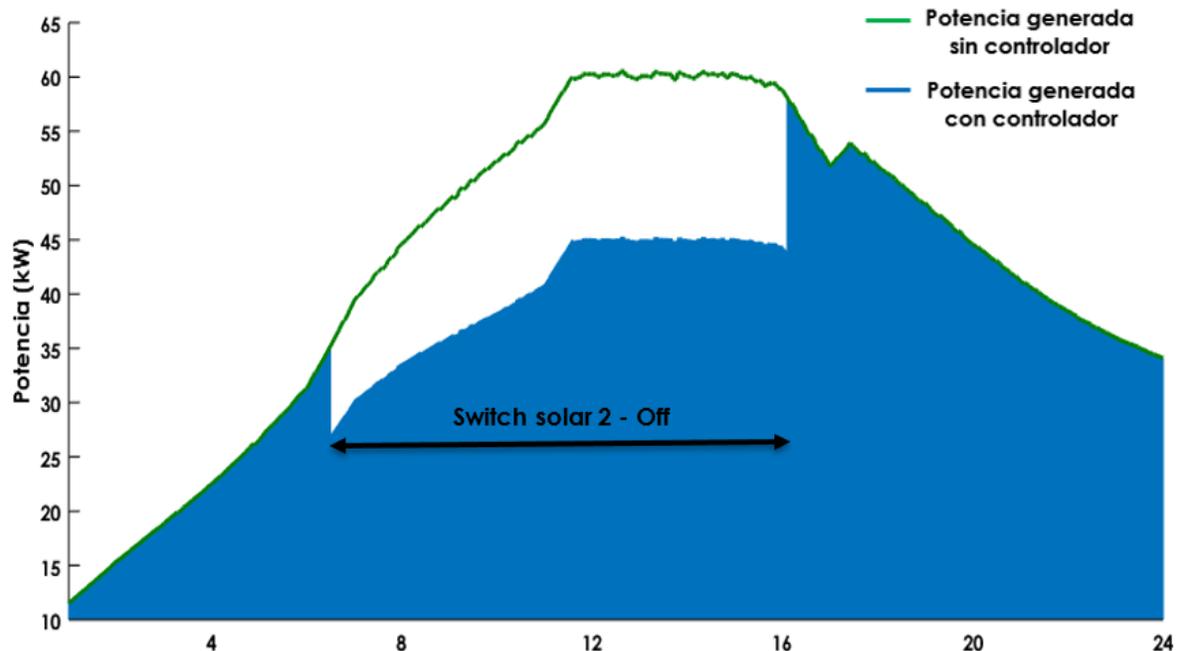


Figura 5.3 Potencia total generada en el caso 1.

En la figura 5.4 se pueden observar los momentos de conexión y desconexión de la planta solar, confirmando que la potencia neta siempre es excedente, indicando que en ningún momento existe un déficit de energía. Analizando ambas gráficas (figura 5.3 y 5.4), el controlador conecta adecuadamente la planta para abastecer la energía en cuanto comienza a aumentar la demanda.

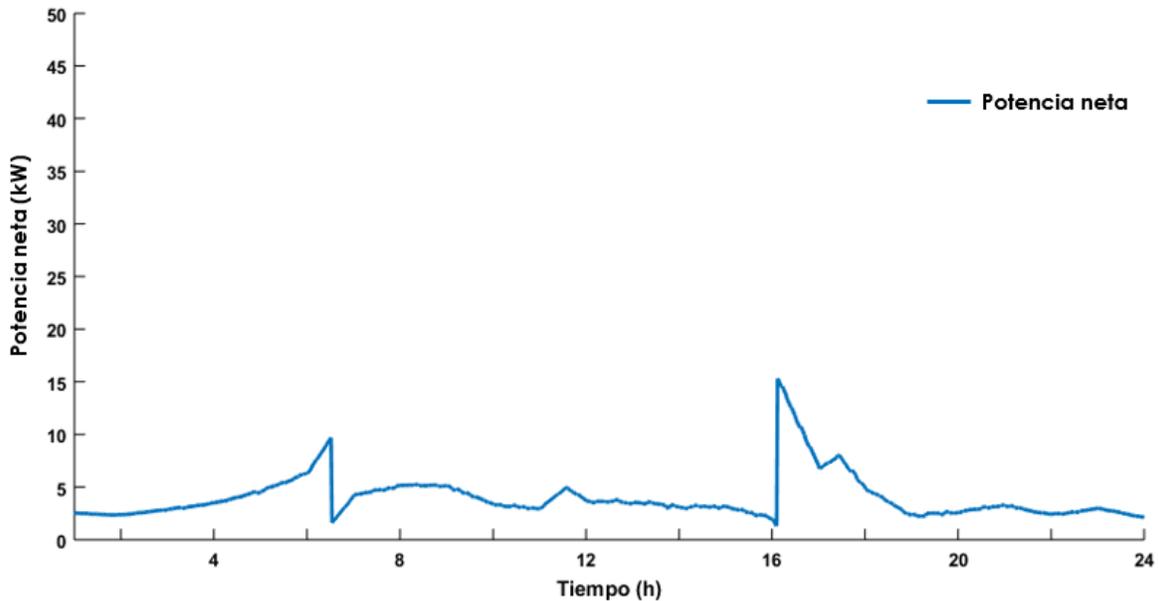


Figura 5.4 Potencia neta en el caso 1.

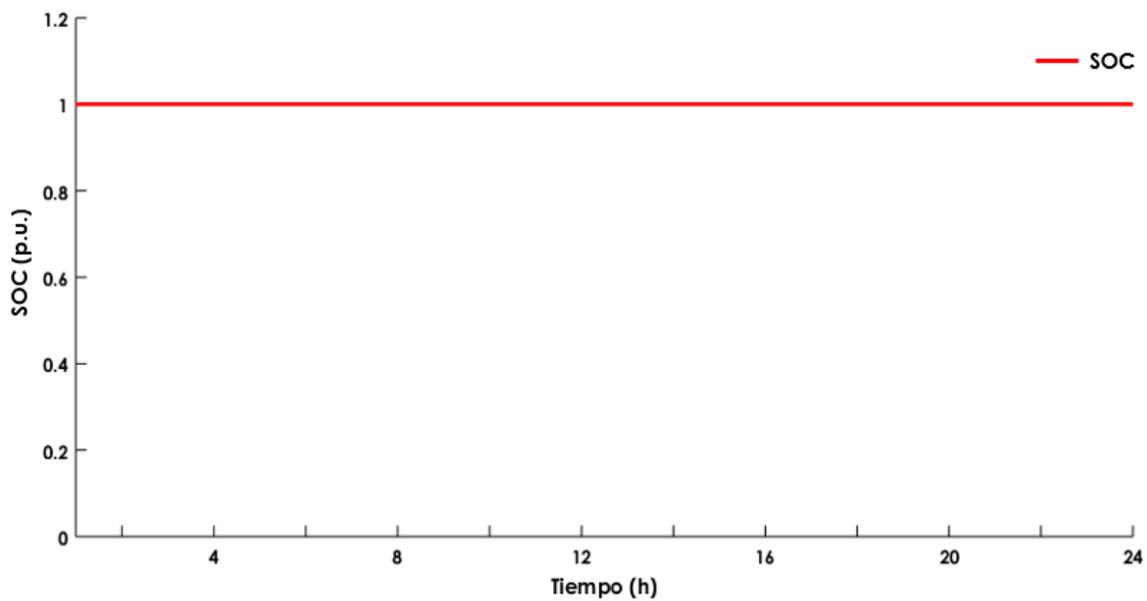


Figura 5.5 Estado de carga de la batería (SOC) en el caso 1.

En las figuras 5.5 y 5.6 se observa que los estados de la batería se mantienen, ya que, al estar completamente cargada, el controlador pasa directamente a desconectar fuentes en lugar de administrarle potencia. Las gráficas confirman su estado durante la simulación, el cual permanece constante.

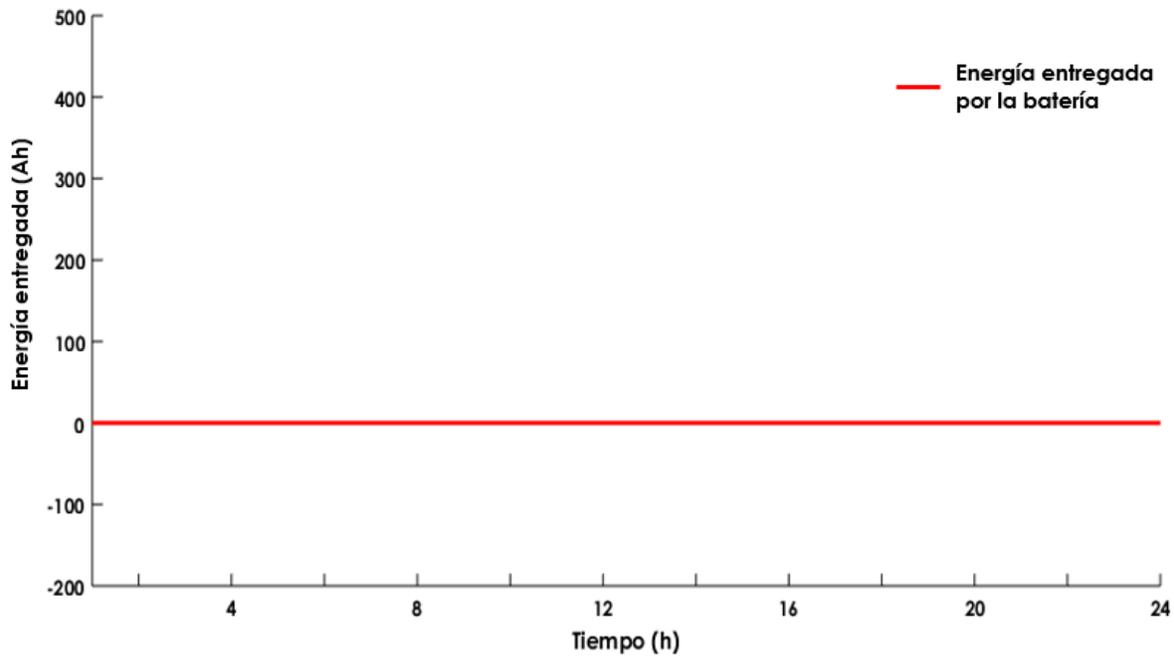


Figura 5.6 Energía entregada por la batería en el caso 1.

Caso II. Déficit de generación.

En este caso se representará un escenario crítico en el que las condiciones iniciales propuestas no permitan que la generación pueda satisfacer los requerimientos de la demanda, siendo que el generador eólico no está en funcionamiento, la radiación solar captada por los paneles fotovoltaicos es menor a las condiciones normales y la batería contará con carga completa al iniciar el día.

En la figura 5.7 se puede observar que la energía generada es igual al comportamiento de la energía captada por un sistema fotovoltaico a lo largo de un día, siendo que incrementa durante las primeras horas hasta llegar a un valor de 15kW al mediodía mismo que desciende paulatinamente hasta llegar a 1.5kW a media noche.

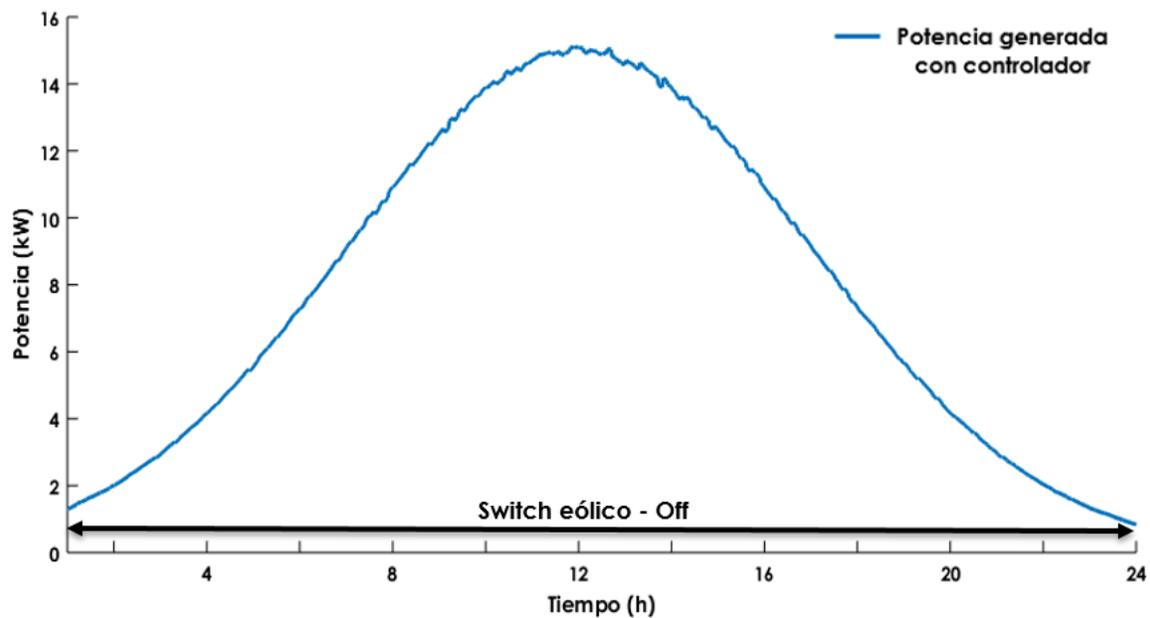


Figura 5.7 Potencia total generada en el caso 2.

La figura 5.8 muestra el comportamiento de la potencia neta a lo largo del día, mostrando que en todo momento se presenta un déficit en la generación; teniendo un valor máximo de -41kW entre las 18 y 20 horas.

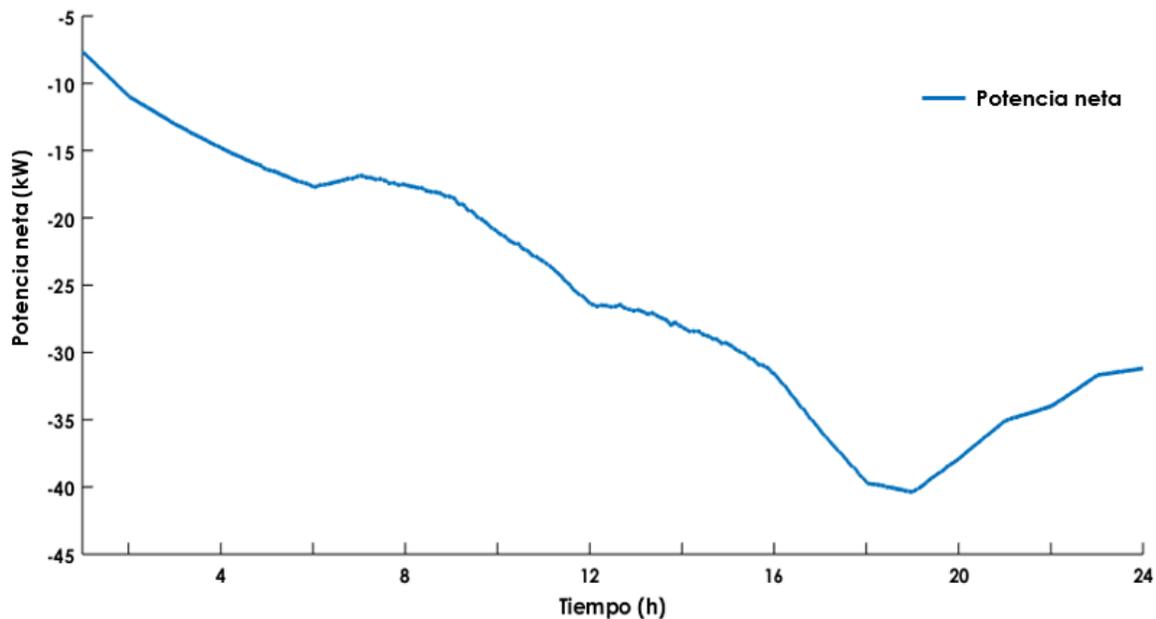


Figura 5.8 Potencia Neta en el caso 2.

Ya que la energía generada no satisface la demanda en ningún momento, el controlador toma la acción de descargar la batería y suplir esta deficiencia. Se puede observar en la figura 5.9 como a partir de la primera hora la batería comienza a descargarse constantemente, hasta llegar a un estado de carga final de 71% mismo que representa una energía entregada al sistema de 2900Ah como se muestra en la figura 5.10.

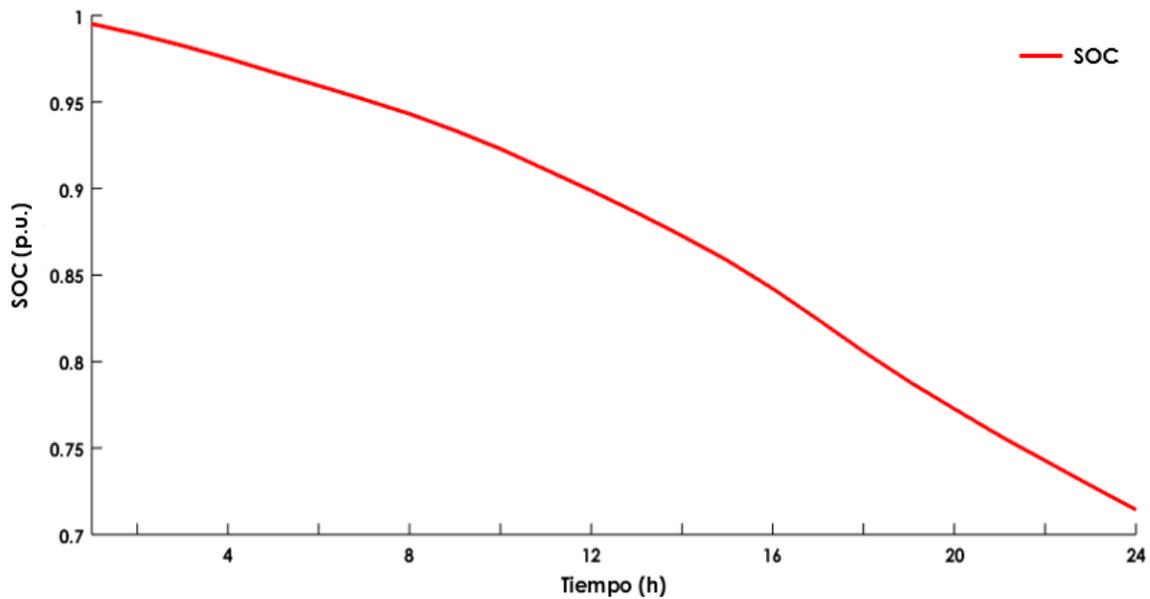


Figura 5.9 Estado de carga de la batería (SOC) en el caso 2.

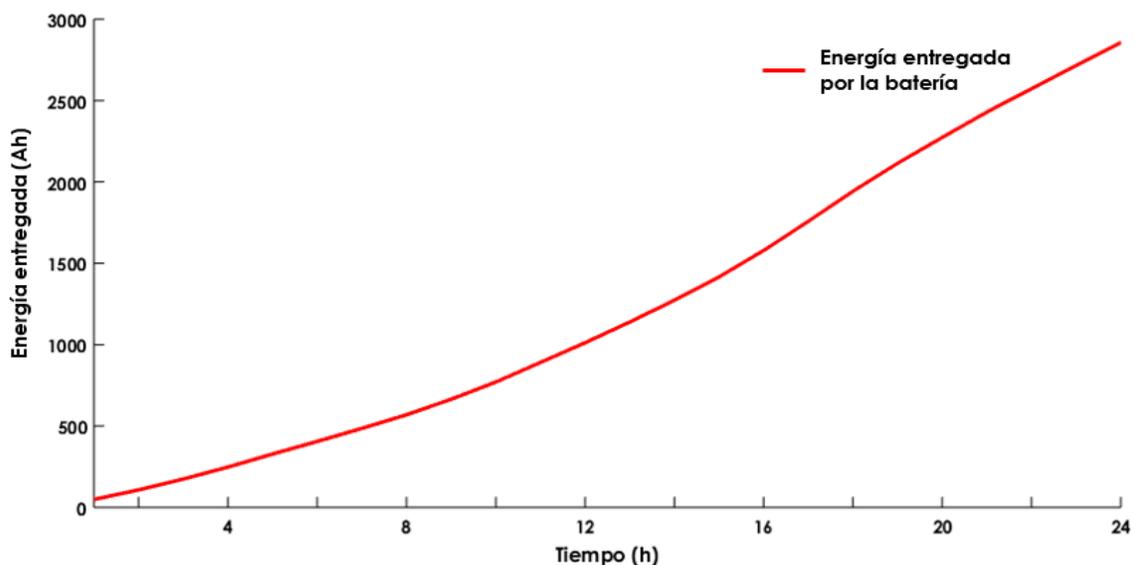


Figura 5.10 Energía entregada por la batería en el caso 2.

Caso III. Excedente de generación y déficit de energía.

Para este caso se estudiará una combinación de los dos anteriores, presentándose un excedente de generación por parte de las fuentes de energía renovables hasta medio día, y después se asumirá que no hay producción de potencia. También, se propone que el estado de carga de la batería se encuentre en la mitad de su capacidad como condición inicial.

En la figura 5.11 se observa que, durante las primeras doce horas del día, las plantas de generación renovable se encuentran operando con normalidad, produciendo un máximo de potencia de 60kW, suficiente para poder suplir la demanda durante este lapso. Sin embargo, inmediatamente después de mediodía, las plantas de generación renovable dejan de producir energía eléctrica.

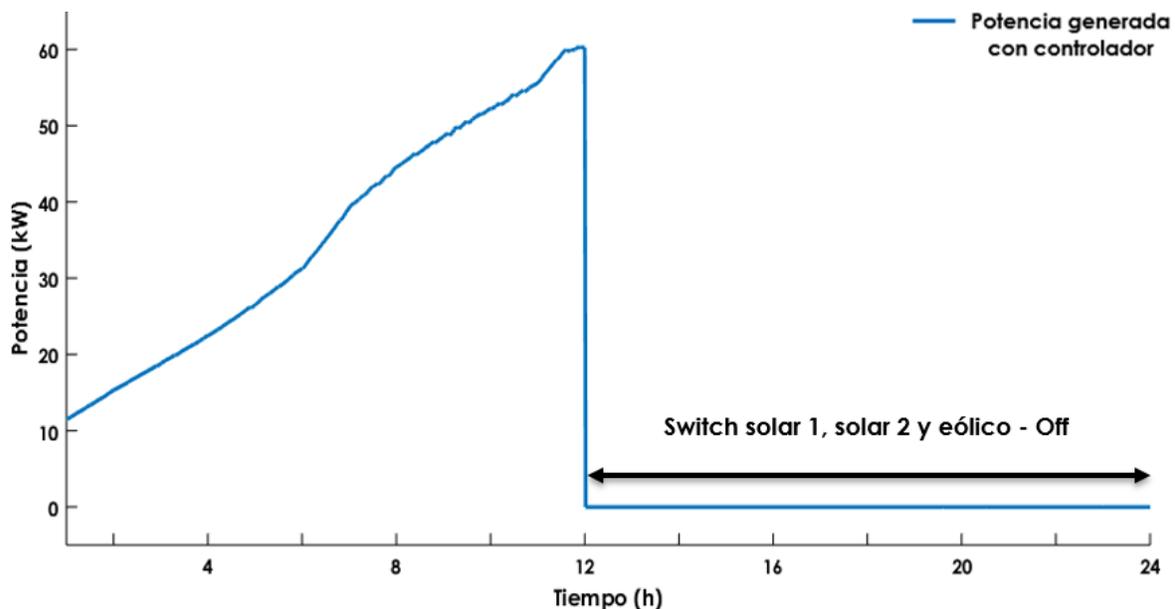


Figura 5.11 Potencia total generada en el caso 3.

En la figura 5.12 se observa que existe un excedente de energía la primera mitad del día, y dado que, la condición inicial del estado de carga de la batería es 0.5, el controlador determina cargar la batería sin desconectar ningún generador, como se muestra en la figura 5.13. De esta manera se aprovecha el recurso energético disponible al máximo, obteniéndose un SOC de 0.55.

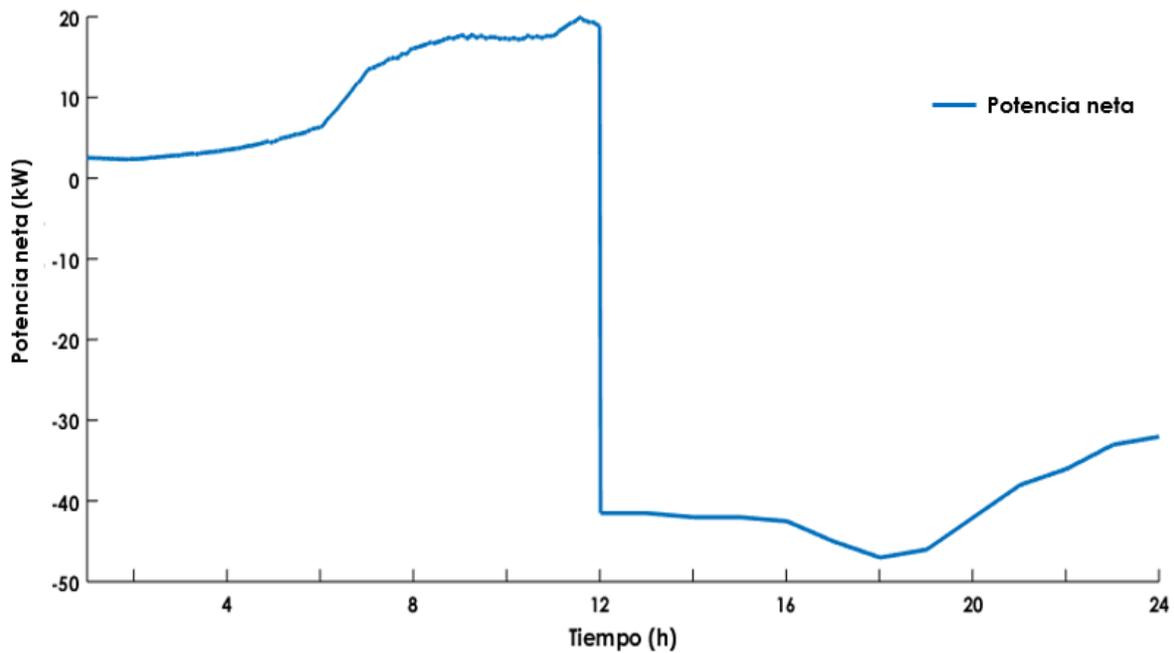


Figura 5.12 Potencia neta en el caso 3.

Por otra parte, después de las 12 horas la potencia neta ahora es negativa, es decir, se requiere de potencia para poder suplir la demanda. Por tal motivo, la batería comienza a descargarse hasta llegar a un SOC final de 0.33 (figura 5.13).

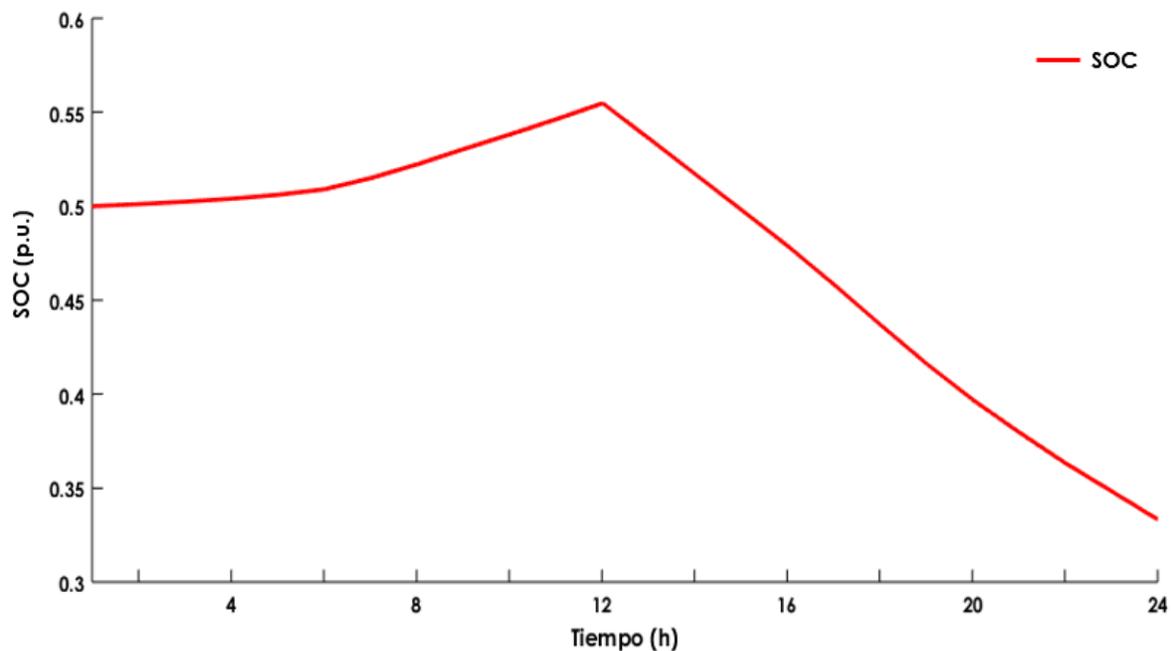


Figura 5.13 Estado de carga de la batería (SOC) en el caso 3.

Finalmente, en la figura 5.14 se observa que no existe energía entregada al sistema por parte del sistema de almacenamiento mientras no sea requerida. Es hasta las 15 horas del día, cuando la batería comienza a aportar la energía faltante al sistema. Se puede ver que el sistema de almacenamiento aportó un total de 1660 Ah al final del día.

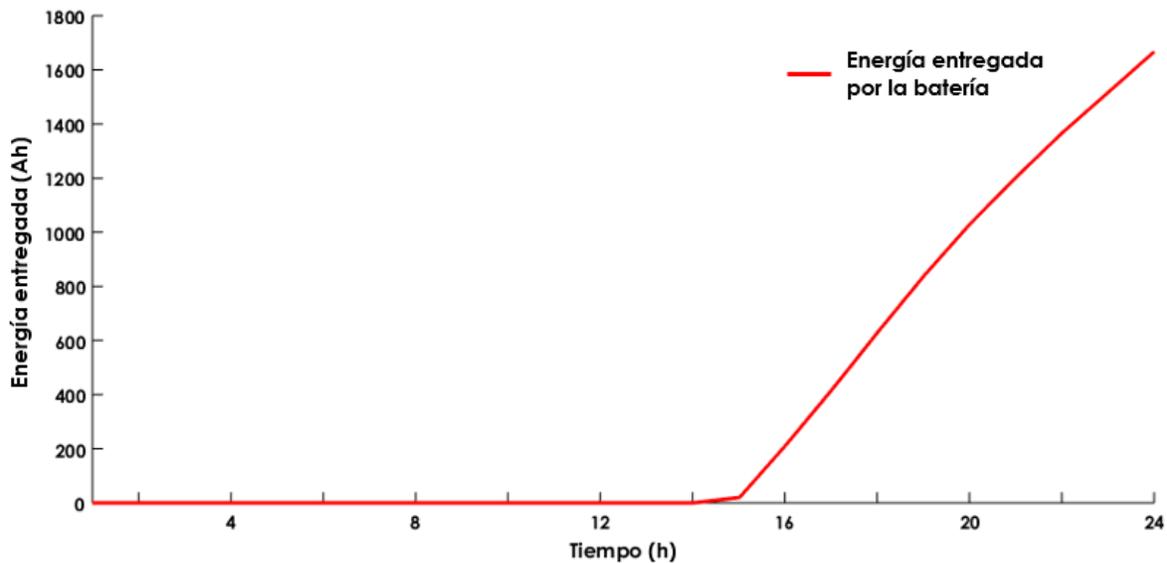


Figura 5.14 Energía entregada por la batería en el caso 3.

Todas las simulaciones mostradas previamente reflejan la complejidad del diseño, dimensionado y control de energía de una micro red eléctrica inteligente. A pesar de que las condiciones del sistema propuestas en cada uno de los casos tengan poca probabilidad de ocurrencia, hacen reflexionar que el controlador responderá aún en esos casos críticos. Ahora, se mencionarán de manera concisa si los resultados obtenidos satisfacen los objetivos planteados en este trabajo, así como una serie de recomendaciones para hacer un análisis más completo sobre la gestión de la energía en redes inteligentes.



Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

1. A lo largo de esta investigación se pudo desarrollar un controlador utilizando lógica difusa en el software Simulink de Matlab, mismo que al ponerse a prueba generó resultados óptimos.
2. Las micro redes inteligentes son un tema relativamente nuevo y poco conocido en México, ya que la mayor parte de la información teórica fue extraída de trabajos de origen extranjero, sin embargo, la popularidad de este tema ha ido en crecimiento en los últimos años. En la pequeña revisión de la normatividad que tienen las micro redes inteligentes en México, se averiguó que también es un campo con muy poca regulación y las guías al respecto son principalmente importadas hasta ahora.
3. Comparando el funcionamiento del modelo matemático del generador solar ante curvas de potencia y tensión de modelos comerciales, se observaron resultados similares, generando resultados más fiables. Con el generador eólico se pudo observar un caso similar, donde el comportamiento observado ante parámetros similares a los reales dio como resultado mucha similitud a equipos comerciales.
4. El sistema presentado permite el abastecimiento de la carga de manera autónoma, ya que las baterías respaldan la insuficiencia de generación, y el controlador buscará siempre ahorrar la energía cuando ésta sobre, por lo que la micro red propuesta podría ser útil para lugares donde es difícil el acceso y la visita de personal, de tal manera que se pueda realizar una gestión mediante el uso de sistemas de comunicación a distancia.
5. El desarrollo del controlador se realizó a través de una serie de propuestas, ya que el principio de funcionamiento de la lógica difusa proviene de “la indagación de un experto”. La simulación permitió elegir la que respondiera mejor en el sistema. Con esto se logró que el controlador alcanzara una mayor calidad de funcionamiento, proporcionando los resultados deseados en los casos presentados.



6. El sistema también contaba con algunas restricciones como el SOC de la batería y los límites de velocidad de los aerogeneradores que debían ser tomadas en cuenta fuera del controlador. Para ello se hizo uso de las herramientas del software, que permitió adecuar los datos para someterse a estas restricciones.

7. El objetivo del trabajo se cumplió al realizar el análisis de los casos, donde se obtuvieron resultados satisfactorios para cada uno. El controlador fue capaz de realizar una administración de la energía satisfactoria, no solo cubriendo las necesidades de la red, sino también ahorrando recursos, cuidando los niveles de almacenamiento y sobre producción.

6.2 Recomendaciones y trabajos futuros

1. El modelo matemático del sistema de baterías es uno de los enfoques que se pueden emplear para representar su comportamiento ante la carga y descarga; sin embargo, en esta tesis se trabajó con los perfiles de potencia considerando constante el voltaje hasta el 20% de estado de carga. De acuerdo con lo anterior, se podrían considerar más variables para hacer un mejor análisis, desde el tipo de batería hasta las variables de tensión y corriente.

2. La simulación se realizó en un lapso de 24 horas para evitar tiempos de compilación largos, sin embargo, se pudo realizar un análisis concreto de cada caso presentado y se observó la respuesta que tenía el controlador. Una alternativa es realizar la simulación con un periodo de tiempo más extenso, por ejemplo, de una semana, con el objetivo de tener una mayor variedad de escenarios en una misma simulación y analizar la respuesta que tenga el controlador durante ese lapso.

3. El trabajo que se tiene pensado realizar próximamente es desarrollar una metodología para la administración de la energía en redes inteligentes implementando los sistemas electrónicos de potencia: convertidor e inversor, utilizando técnicas de inteligencia artificial y considerando el caso de un sistema interconectado a la red, donde se deberá determinar los lapsos en que sea más conveniente la venta o compra de energía eléctrica.



Referencias

- AMDEE. (2014). *El potencial eólico mexicano*. México.
- Carta González, J., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M. A. (2009). *Centrales de energías renovables*. Madrid: Pearson.
- CRE. (septiembre de 2014). *Marco Regulatorio de la Red Eléctrica Inteligente (REI) en México*. Obtenido de <http://www.cre.gob.mx/documento/3978.pdf>
- DOF. (2008). *Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos*. México.
- DOF. (2014). *Ley de la Industria Eléctrica*. México.
- Flores, P., Flores, Q., & Hernández, C. (2016). *Modelado de un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani para el diagnóstico de envejecimiento de motores eléctricos*. International journal of innovation and scientific research.
- Gascó González, M. V. (2013). *Integración de energías renovables en redes eléctricas inteligentes*. (Tesis de doctorado). Universidad de Alicante: Alicante.
- Gauchía, L. (2011). *Smart Grids. Sistemas electroquímicos para Vehículos eléctricos*. Madrid: Leganés.
- General electric. (5 de Enero de 2017). *GE Reports Latinoamérica*. Obtenido de <https://gereportslatinoamerica.com/la-energ%C3%ADa-del-futuro-las-microrredes-y-los-sistemas-digitales-est%C3%A1n-transformando-las-redes-el-f52f81827e94>
- González López, Á. (2012). *Gestión de la energía en una red inteligente*. (Tesis de licenciatura). Universidad Carlos III de Madrid: Madrid.
- González López, Á. J. (2012). *Gestión de la energía en una red inteligente*. Madrid: Leganés.



- Iglesias, R., Lago, A., Nogueiras, A., & Martínez, C. (2012). *Modelado y simulación de una batería de Ion-Litio comercial multicelda*. Universidad de Vigo: España.
- J. Ross, T. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications*. Nuevo México: Wiley.
- Karthick, R., & Manoharan, S. (2017). *Fuzzy based optimized energy management strategy of renewable energy sources for stand alone applications*.
- Lagunas Mendoza, J. (2004). *Control supervisorio difuso para un sistema híbrido de generación eléctrica*. Cuernavaca: Morelos.
- León Viltre, L., Dos Santos Neves, F., & Vilaragut Llanes, M. (Mayo de 2014). *SciELO Cuba*. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012014000200003
- Manzar, A., Uzma, A., Suhail, A., & Zaki, A. (2013). *Integration of Renewable Energy Resources in Microgrid*.
- Martínez Bertran, J. (2017). *Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas*. Barcelona: Escola Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- MathWorks, I. (2017). *Fuzzy logic toolbox, user's guide*. Natick: MathWorks.
- Mírez, J. (21 de Enero de 2012). *Matlab/Simulink and Renewable Energy*. Obtenido de <https://jmirez.wordpress.com/2012/01/21/j401-ventajas-tecnicas-y-economicas-de-la-microgrid-microred-electrica/>
- Mohan, N., & M., T. (2009). *Electronica de potencia, convertidores, aplicaciones y diseño*. México: Mc. Graw Hill.
- Muhamad H., R. (1995). *Electronica de potencia circuitos y aplicaciones*. México: Prentice Hall.



- Obasi, J., Kihato, P., Ngoo, L., & Muriithi, C. (2016). *Fuzzy Logic Energy Management for a Renewable Hybrid Energy System*.
- Ponce Cruz, P. (2010). *Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingeniería*. México: Alfaomega.
- Saranya, S., Sathyamoorthi, S., & Gandhiraj, R. (2015). *A fuzzy logic based energy management system for a microgrid*.
- SENER. (2015). *Prospectiva de energías renovables 2016-2030*. México.
- SENER. (2016). *Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2016-2030*. México.
- SENER. (mayo de 2016). *Programa de redes inteligentes*. Obtenido de <https://www.gob.mx/sener/acciones-y-programas/programa-de-redes-electricas-inteligentes-30839>.
- Suárez Velázquez, P. (2010). *Impacto de la generación eólica y solar en el sistema eléctrico de Baja California norte*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Talayero Navales, A. P., & Telmo Martínez, E. (2011). *Energía eólica*. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Weedy, B., Cory, B., Jenkins, N., Ekanayake, J., & Strbac, G. (2012). *Electric power systems*. Chichester: Wiley.
- William Motto Jr., J. (1977). *Introduction to solid state power electronics*. Younwood.



Apéndice A. Fuzzy Logic Toolbox.

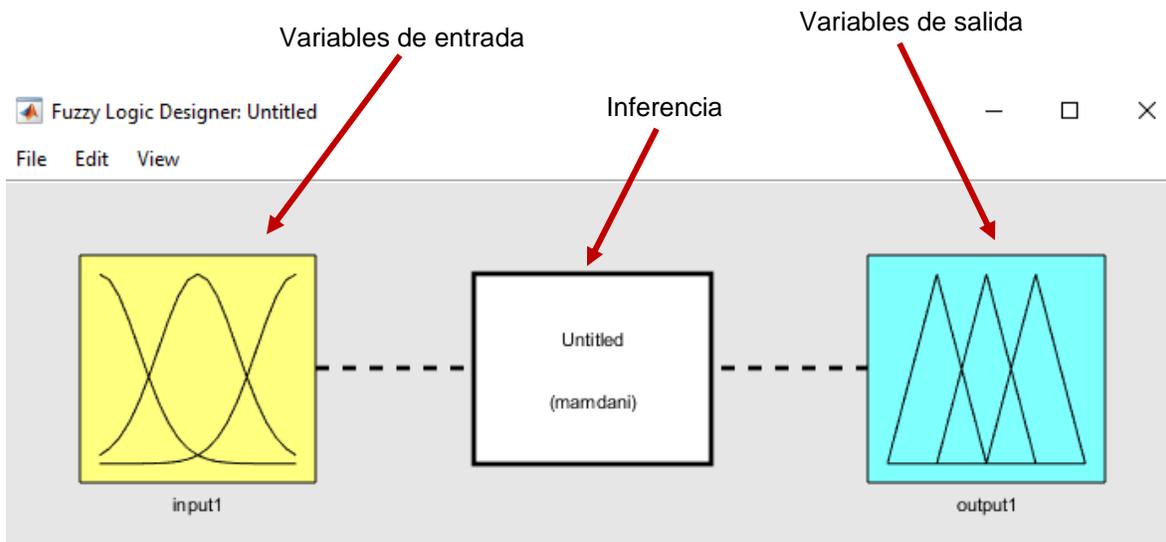
En esta sección se mostrará cómo diseñar un sistema de inferencia difuso utilizando el *Fuzzy Logic Toolbox*, tomando como ejemplo el caso planteado en el desarrollo de esta tesis. La herramienta que proporciona el software de Matlab consta de las siguientes partes:

1. Fuzzy Logic Designer: En ella se visualizan las entradas y salidas del sistema. Además, se podrá elegir entre una lista desplegable de opciones los métodos de inferencia, así como también el método de desdifusificación.
2. Membership functions: En esta sección se definen las formas de cada función de membresía, así como el universo de discurso asociado a cada variable.
3. Rule editor: Aquí se podrá editar la lista de reglas que definirá el comportamiento del sistema.
4. The rule viewer: Se utiliza como diagnóstico para observar qué reglas se activan, o cómo las funciones de membresía afectan al resultado.
5. The surface viewer: Se utiliza para observar la dependencia de cada salida respecto a cualquier entrada, generando un mapa de superficie para el sistema en estudio.

1. Fuzzy Logic Designer

Para visualizar y abrir la interfaz principal, es necesario escribir el comando *fuzzyLogicDesigner* en el command window de Matlab. A continuación, se abrirá una ventana donde se encontrará un diagrama de inferencia difuso.

Para elegir el tipo de inferencia, que para este caso es Mamdani, es necesario dar clic en **File > New FIS > Mamdani**. Del lado izquierdo (bloque amarillo) se muestran las variables de entrada, del lado derecho se encuentran las de salida (bloque azul). Asimismo, se muestran las opciones para modificar los métodos de inferencia y el método de desdifusificación.



Abajo del diagrama se encuentra el nombre del sistema y el tipo de inferencia utilizado. El sistema de control difuso propuesto se compone de dos entradas y cinco salidas; es importante decir que el software no limita la cantidad de variables, sin embargo, hay que considerar que entre mayor sea el número, el proceso para evaluar las reglas puede ser más tardado. Para agregar más entradas y salidas en la interfaz principal, así como cambiar los nombres de cada variable, se debe realizar lo siguiente:

The screenshot shows the configuration dialog for a Fuzzy Inference System (FIS). At the top, it displays "FIS Name: Untitled" and "FIS Type: mamdani". Below this, there are several sections: "And method" (min), "Or method" (max), "Implication" (min), "Aggregation" (max), and "Defuzzification" (centroid). To the right, the "Current Variable" section has a "Name" field with a text input box, and "Type" and "Range" fields. At the bottom, there are "Help" and "Close" buttons. A status bar at the very bottom reads "System 'Untitled': 1 input, 1 output, and 0 rules".

Ajustes de las funciones de inferencia, así como el método de desfuzzificación.

Describe el estado actual del sistema.

Nombre de la variable de entrada o salida.

1. Seleccionar **Edit > Add variable > Input**.
2. Modificar nombre en **Current variable > Name**.
3. Editar el nombre *Input1* e *Input2* por *Pneta* y *SOC*.
4. Seleccionar **Edit > Add variable > Output**.
5. Modificar nombre en **Current variable > Name**.
6. Editar el nombre *Output1*, *Output2*, *Output3*, *Output4* y *Output5* por *Switch-Carga*, *Switch-Descarga*, *Switch-Solar1*, *Switch-Solar2* y *Switch-Eólico*.

Ahora, se definirán los métodos de inferencia de acuerdo a lo siguiente:

1. And method: min.
2. Or method: max.
3. Implication: min.
4. Aggregation: max.
5. Defuzzification: Centroid.

A continuación, se muestra la configuración de las variables de entrada y la salida en el *Fuzzy Logic Designer*:

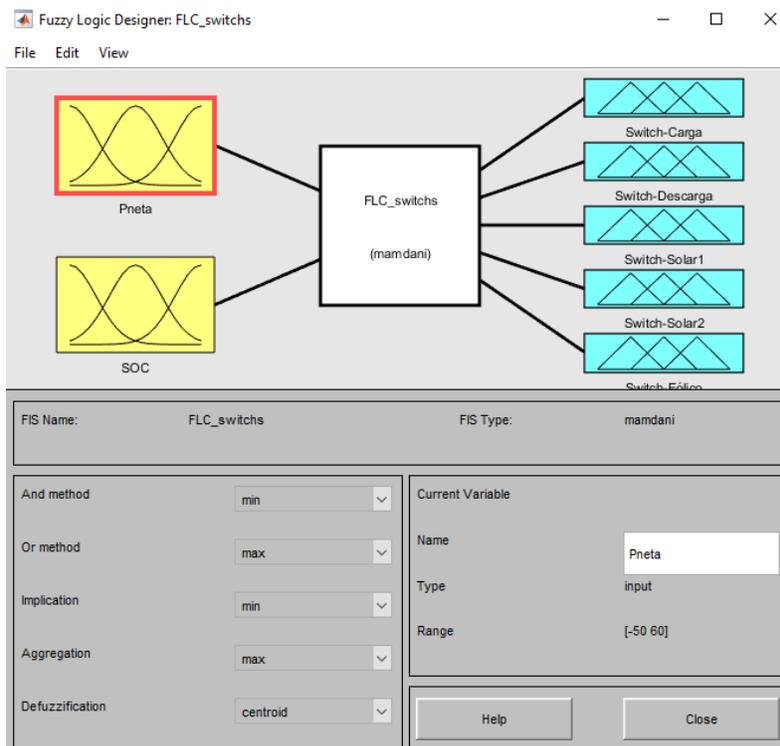


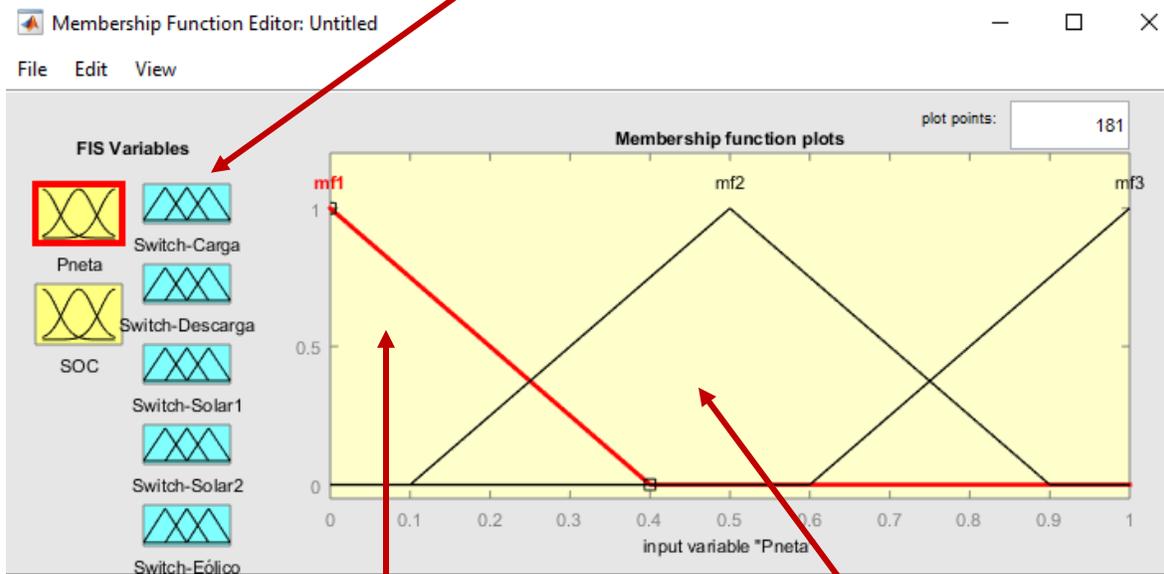
Figura A.1 Interfaz principal de Fuzzy Logic Designer.

2. Membership functions

El editor de funciones de membresía es la herramienta que permite mostrar y editar todas las funciones de membresía asociadas a todas las variables de entrada y salida del sistema de inferencia difuso. Además, permite ingresar los valores del universo de discurso para cada una de ellas. Se puede abrir el editor a través de tres formas diferentes:

1. En la ventana de *Fuzzy Logic Designer*, seleccionar **Edit > Membership functions**.
2. En la ventana de *Fuzzy Logic Designer*, doble clic en el bloque de entradas (amarillo) o de salidas (azul).
3. Mediante el comando *mfedit* en el command window de Matlab.

Variables del sistema difuso. Hacer clic en una variable para editar sus funciones de membresía.



Hacer clic en la curva, para modificar sus propiedades: Nombre, tipo, y rango de la función de membresía.

El área gráfica permite visualizar todas las funciones de membresía asociadas a la variable.

Rango (universo de discurso) de la variable actual.

Nombre y tipo de la variable actual.

Nombre de la función de membresía actual (variable lingüística).

Rango de ploteo para el visualizador de superficie.

Localización de los puntos de cada función de membresía.

Tipo de la función de membresía actual.

Para crear nuevas funciones de membresía es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar **Edit > Remove All MFs**, para eliminar las funciones de membresía que están cargadas por default.
2. Seleccionar **Edit > Add MFs**, y posteriormente seleccionar el tipo y el número de funciones de membresía que se desean insertar. Para la variable de entrada SOC se tendrán tres funciones tipo trapezoidal.
3. En el rango (universo de discurso) y en el rango de ploteo se insertará el siguiente: [0.2 1].
4. La primera función se llamará "B" (Bajo) y tendrá los siguientes parámetros: [0.05 0.2 0.25 0.4].
5. La segunda función se llamará "M" (Medio) y tendrá los siguientes parámetros: [0.25 0.42 0.78 0.95].
6. La tercera función se llamará "A" (Alto) y tendrá los siguientes parámetros: [0.8 0.95 1 1.1].

7. Se realizará el mismo proceso para cada una de las variables involucradas en el sistema.

A continuación, se muestra la variable de entrada SOC y sus funciones de membresía.

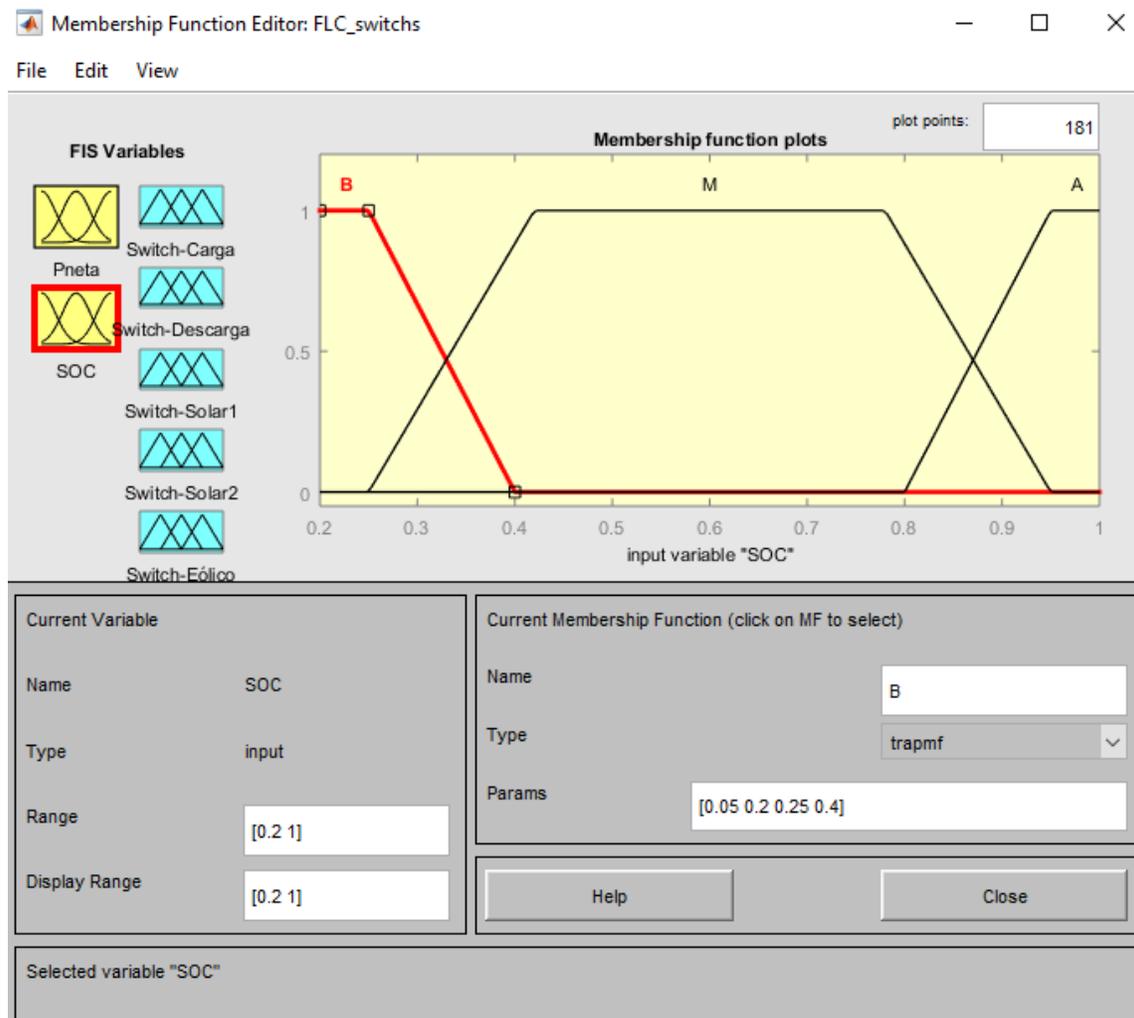


Figura A.2 Interfaz de membership function editor.

3. Rule editor

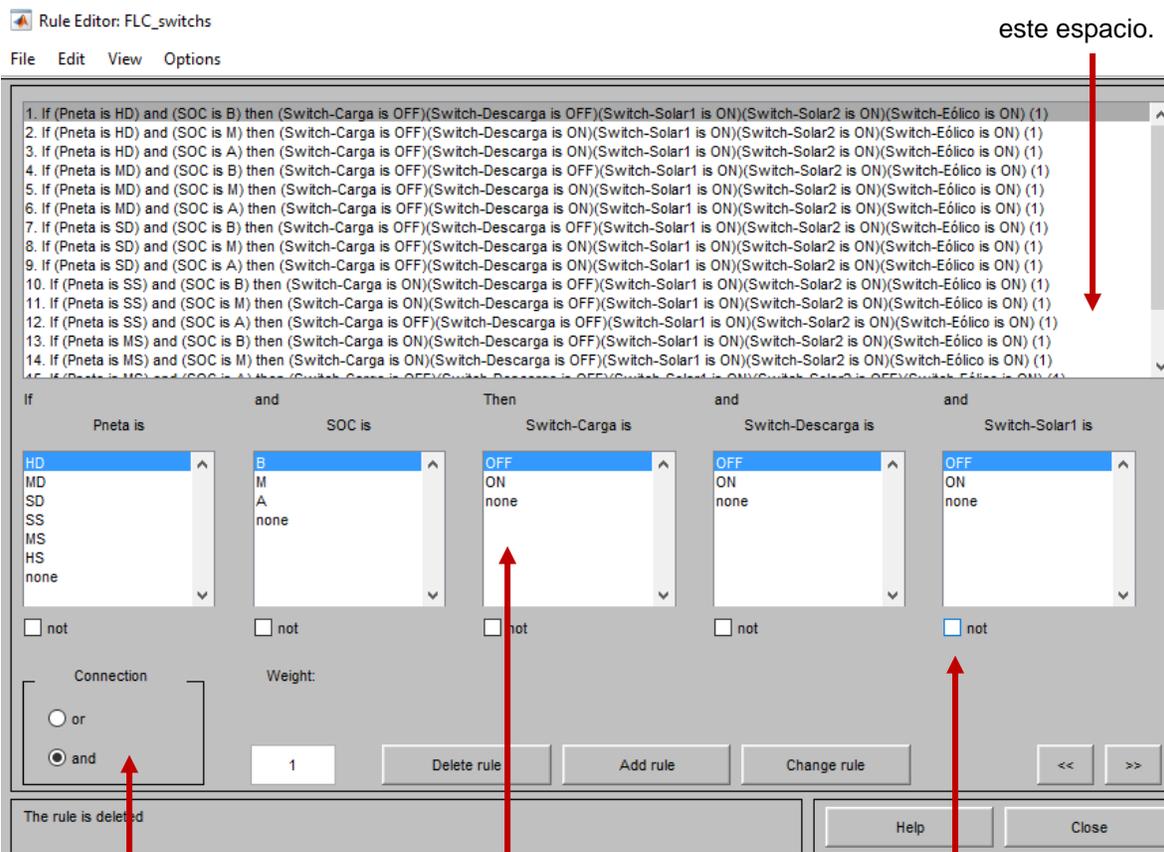
Establecer las reglas utilizando el editor es sumamente sencillo. Cada una de ellas se definirá utilizando las variables lingüísticas previamente definidas en la sección de Membership functions. Para ingresar a esta opción se tienen dos formas:

1. En la ventana de *Fuzzy Logic Designer*, seleccionar **Edit > Rules**.

2. En la ventana de *Fuzzy Logic Designer*, doble clic en el bloque de inferencia (blanco).

Una vez seleccionadas las variables, y haciendo uso de los conectores (And, Or y Not) se dará clic en *Add rule* para agregar una nueva regla. En su defecto, si se desea modificar, se dará clic en *Change rule*. Finalmente, para eliminar una regla basta con hacer clic en *Delete rule*. A continuación, se muestran las reglas establecidas para el sistema de control difuso propuesto:

Las reglas se ingresan automáticamente en este espacio.



Conectores para las entradas, Or y And en la declaración de las reglas.

Funciones de membresía de cada variable del sistema.

Negación de las entradas o salidas en las declaraciones de las reglas.

Hasta este punto, el sistema de inferencia difuso ha sido completamente definido. Ahora, es necesario verificar que todo ha sido llenado adecuadamente de acuerdo a lo establecido en cada sección. El siguiente paso será observar el comportamiento del controlador variando sus parámetros de entrada, utilizando el Rule viewer.

4. The rule viewer

El visualizador de reglas permite mostrar el comportamiento del sistema de inferencia difuso a través de la evaluación de las reglas paso por paso. Es decir, de acuerdo al valor de entrada se hará el proceso de difusificación, asignando variables lingüísticas y se procederá a la evaluación de reglas. Finalmente, se obtendrá un valor nítido de salida a través del método de centroide para el proceso de desdifusificación. Para observar el Rule viewer, se debe dar clic en **View > Rules** en la interfaz de *Fuzzy Logic Designer*.

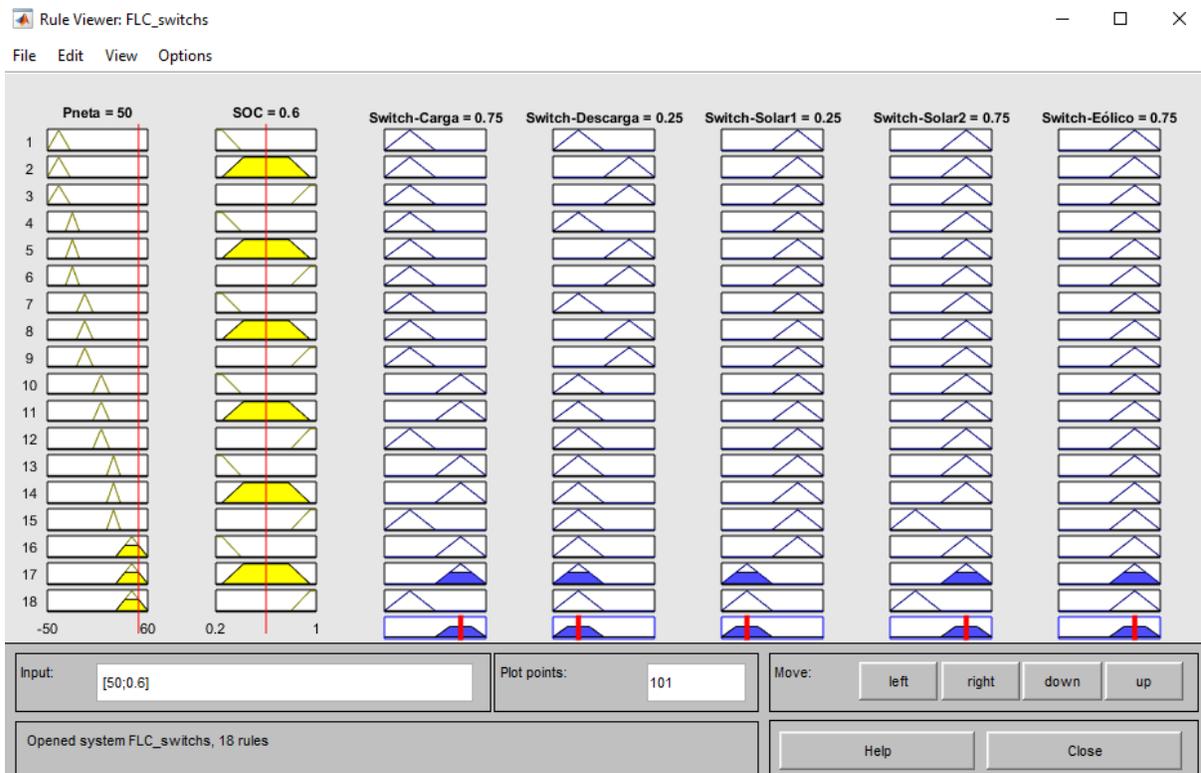


Figura A.3 Interfaz de rule viewer.

En el lado izquierdo de la ventana de Rule viewer, se encuentran las reglas definidas previamente. Las primeras columnas representan a las variables de entrada (amarillo) y las restantes representan a las salidas (azul). En el lado inferior se encuentra la sección Input, la cual es un vector, donde cada columna representa a los valores de entrada del sistema. Presionando **Enter**, observaremos el valor nítido de salida.

5. The Surface viewer

Para poder abrir la ventana de surface viewer es necesario dar clic en **View > Surface** en la interfaz de *Fuzzy Logic Designer*. En ella se puede visualizar un mapeo tridimensional del sistema. Los ejes X, Y son variables de entrada, y el eje Z es variable de salida. En cada uno de los ejes se encuentra un menú desplegable con todas las variables del sistema, sólo es cuestión de elegir las que están sujetas a análisis. Esta interfaz es muy útil si se desea analizar el comportamiento del sistema para todos los escenarios posibles y es ideal para aquellos que cuentan con diversas entradas y salidas.

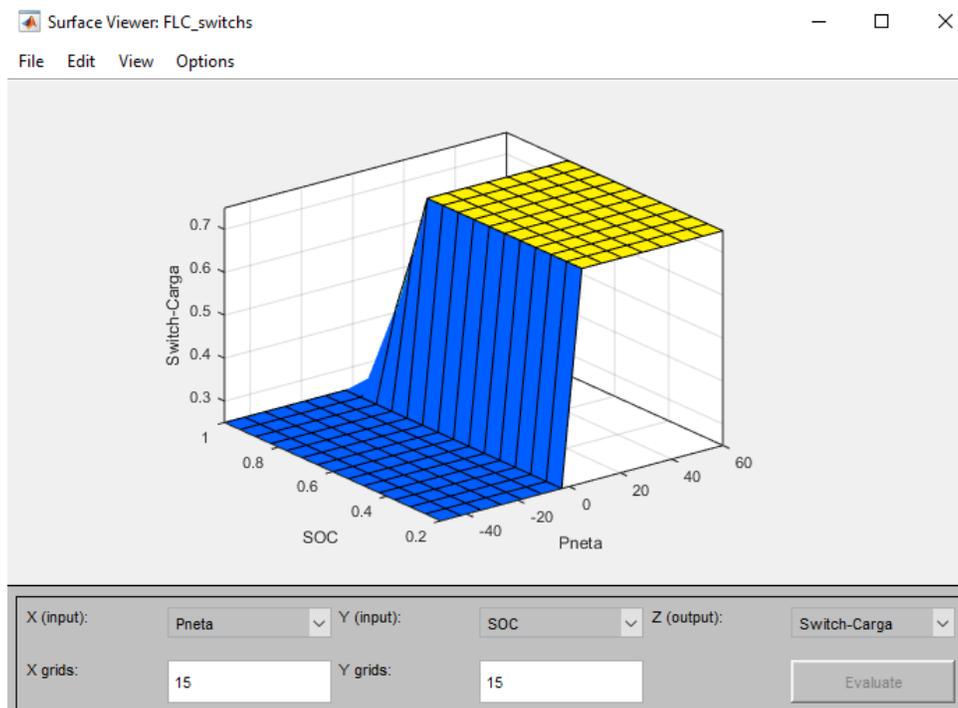


Figura A.4 Interfaz de surface viewer.

Apéndice B. Comunicación entre Fuzzy Logic Toolbox y Simulink.

Es posible crear y editar sistemas de inferencia difusos utilizando la herramienta *Fuzzy Logic Toolbox*. Sin embargo, es posible crearlos también a través de funciones o líneas de comandos en archivos M (archivo de Matlab). Ahora bien, si se trabaja en el software Simulink, es viable probar el sistema difuso en un ambiente de simulación con diagramas de bloque. Por lo tanto, es necesario conocer los pasos para establecer comunicación entre el sistema diseñado con ayuda de la herramienta *Fuzzy Logic Toolbox* y el software Simulink.

1. Como primer paso se guardará y exportará el sistema desarrollado en el *Apéndice I* de la siguiente manera: Seleccionar **File > Export > to File**. De esta manera se estará guardando nuestro archivo en formato **.fis**; ahora bien, para exportarlo y poder utilizarlo en el ambiente de Simulink se realizará lo siguiente: Seleccionar **File > Export > to Workspace**. Aparecerá una ventana donde se deberá escribir el nombre de la variable a exportar.

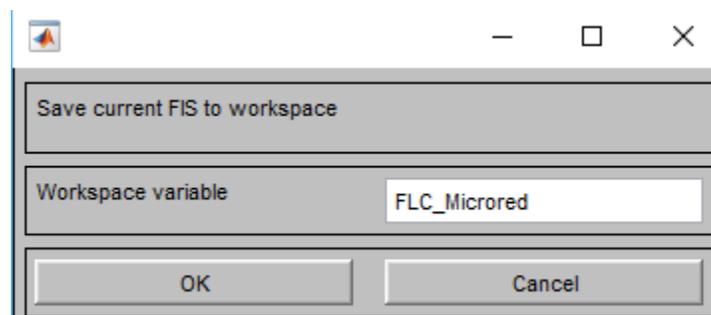


Figura B.1 Variable exportada a workspace de Matlab.

2. Ahora, en el ambiente de Simulink se identificará el bloque *Fuzzy Logic Controller* o *Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer*.

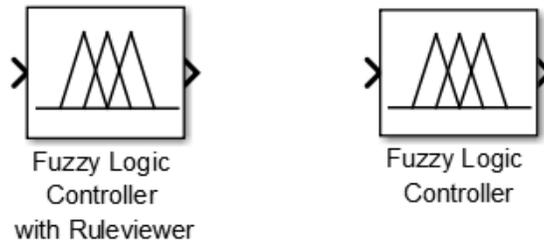


Figura B.2 Bloques de Simulink correspondientes a un sistema difuso.

3. Finalmente, se ingresará haciendo doble clic en cualquiera de los dos bloques y se escribirá el nombre de la variable previamente exportada al Workspace de Matlab, clic en **Apply** y posteriormente en **Ok**. De esta manera, estarán en comunicación los ambientes de *Fuzzy Logic ToolBox* y el software Simulink.

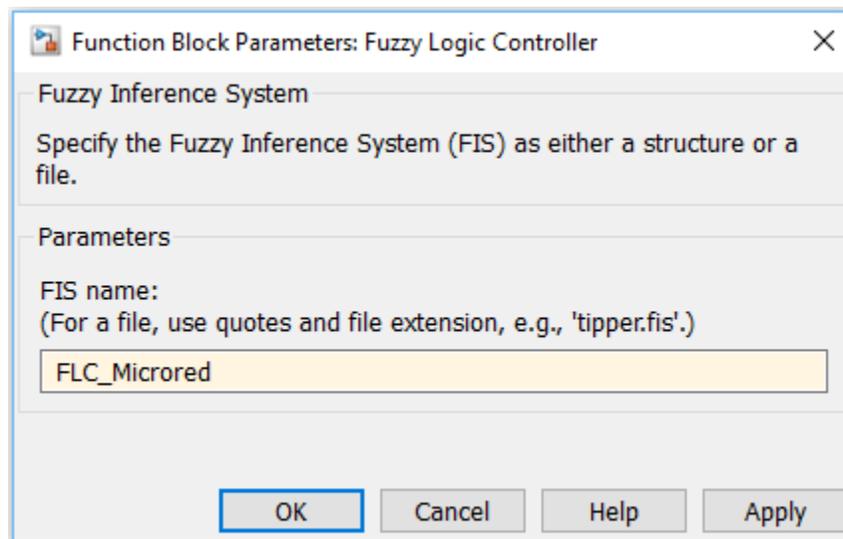


Figura B.3 Comunicación entre Fuzzy logic toolbox y Simulink.

Anexo C. Ejemplo de cálculo del proceso de inferencia tipo Mamdani.

Para entender de mejor manera el proceso que se debe realizar en un sistema inferencia difuso tipo Mamdani, a continuación, se desarrollará un ejemplo paso a paso, donde se utilizarán los siguientes datos:

- $P_{\text{neta}} = 25$ (kW).
- $\text{SOC} = 0.85$ (p.u.).

Primero, se utilizan los valores de entrada para asignar el grado de pertenencia correspondiente a cada función de membresía, como se muestran en las figuras C.1 y C.2.

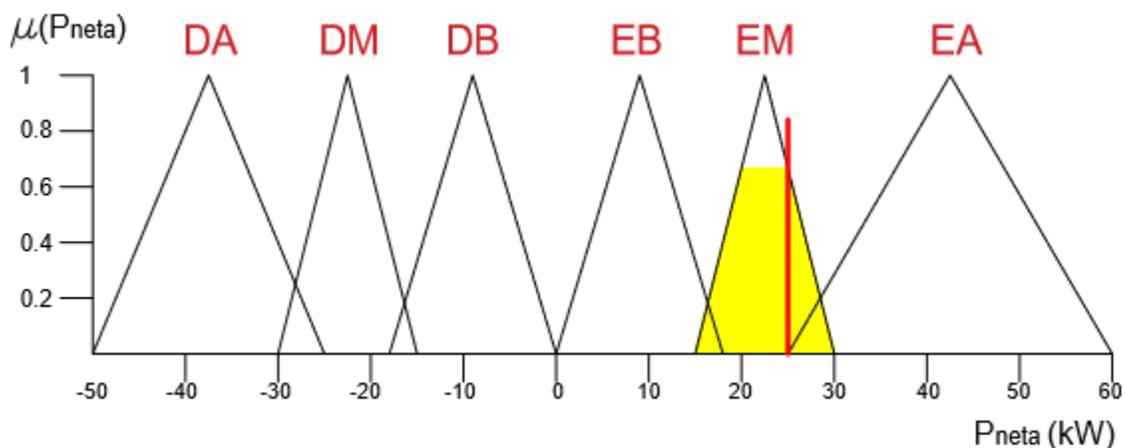


Figura C.1 Valor de entrada P_{neta} (25kW).

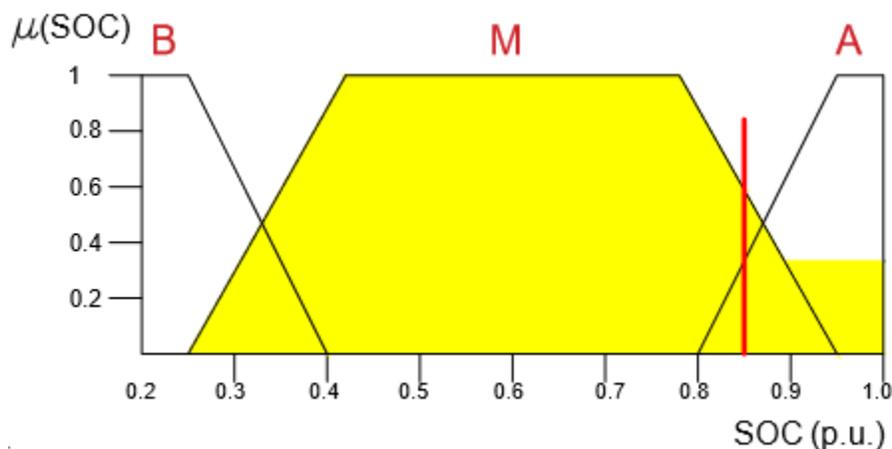


Figura C.2 Valor de entrada SOC (0.85).

De acuerdo a lo anterior, se asignan los siguientes grados de pertenencia a las funciones de membresía en los valores de entrada:

- Para el valor de entrada $P_{\text{neto}} = 25$, se tiene un grado de pertenencia de 0.7 en la función de membresía EM (Exceso medio).
- Para el valor de entrada SOC = 0.85, se tienen dos grados de pertenencia: 0.6 para la función de membresía M (Medio) y 0.3 para la función de membresía A (Alto).

Una vez asignados los grados de pertenencia, es necesario determinar las reglas del controlador que se activarán ante estas condiciones y, con éstas, conocer las salidas esperadas ante cada escenario. De acuerdo con la figura C.3, se puede observar que se activan las reglas 14 y 15, las cuales se describen a continuación:

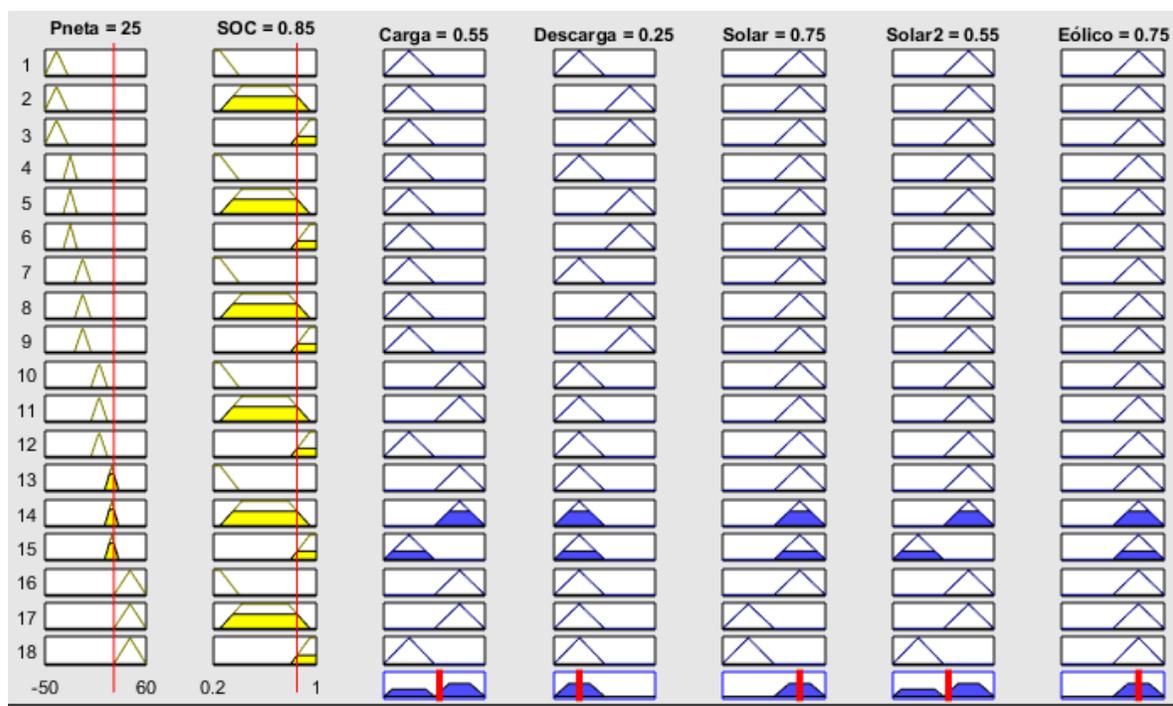


Figura C.3 Interfaz Rule viewer de Matlab.

- Regla 14. - If P_{neto} is “EM” **AND** SOC is “M” then: Carga is “on”, descarga is “off”, Solar1 is “on”, Solar2 is “on” and eólico is “on”.
- Regla 15. - If P_{neto} is “EM” **AND** SOC is “A” then: Carga is “off”, descarga is “off”, Solar1 is “on”, Solar2 is “off” and eólico is “on”.

En la imagen C.4 se pueden observar las respuestas que da el sistema a estas condiciones. Ahora, se mostrará el cálculo para cada salida: El primer paso es asignar valores nítidos a los valores de entrada. En este sistema de control difuso se utiliza el mínimo (mín) para el proceso de difusificación.

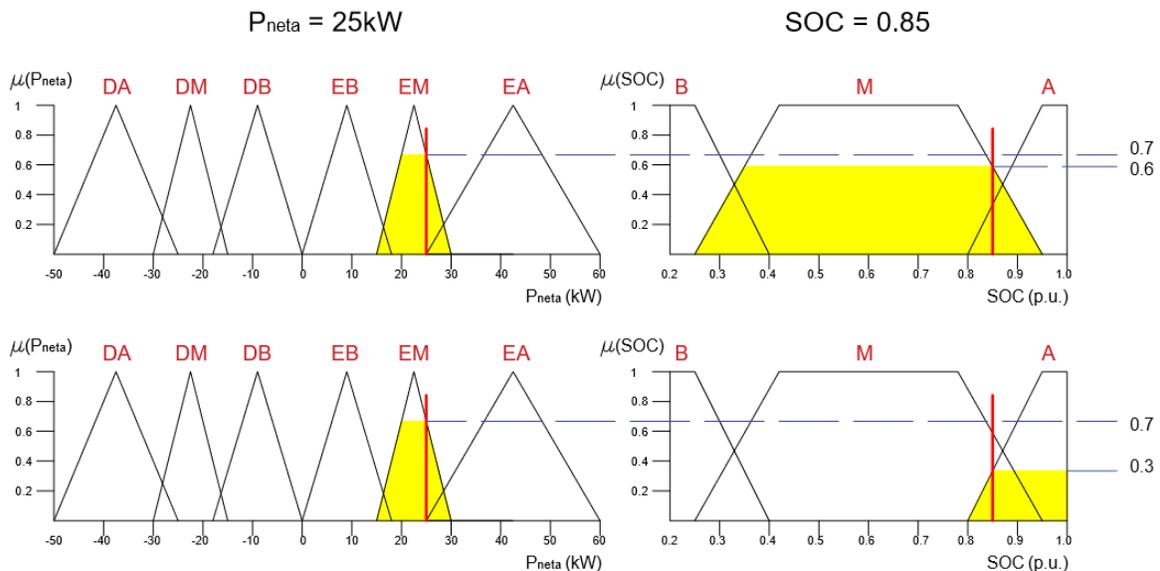


Figura C.4 Proceso de difusificación para las condiciones propuestas.

Para obtener los valores nítidos, se analizan los grados de pertenencia de ambas entradas y el valor mínimo de estos dos será utilizado para establecer las salidas, teniendo como resultado lo siguiente:

- Para la regla numero 14 el valor nítido será de 0.6.
- Para la regla numero 15 el valor nítido será de 0.3.

Tomando en cuenta esto, los valores nítidos se utilizarán para establecer los rangos de pertenencia de acuerdo con las salidas especificadas en las reglas. Por efectos prácticos, solamente se analizarán tres salidas, sin embargo, el proceso es el mismo para cada caso.

Como se puede observar en la figura C.5 los valores nítidos son utilizados para establecer los grados de pertenencia a cada función de membresía en cada una de las distintas salidas.

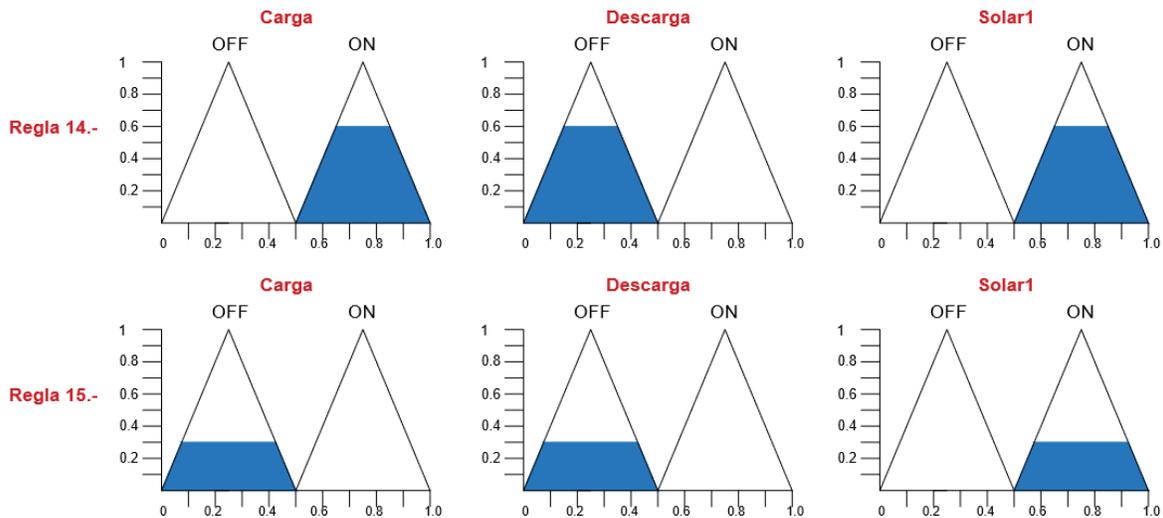


Figura C.5 Salidas para las reglas 14 y 15.

El método de desdifusificación elegido para el sistema de control es a través del centroide, el cual se basa en los centros de gravedad de las figuras usando como base la suma de las respuestas en cada salida; por lo tanto, la figura a la que se calculará el centroide es la siguiente:

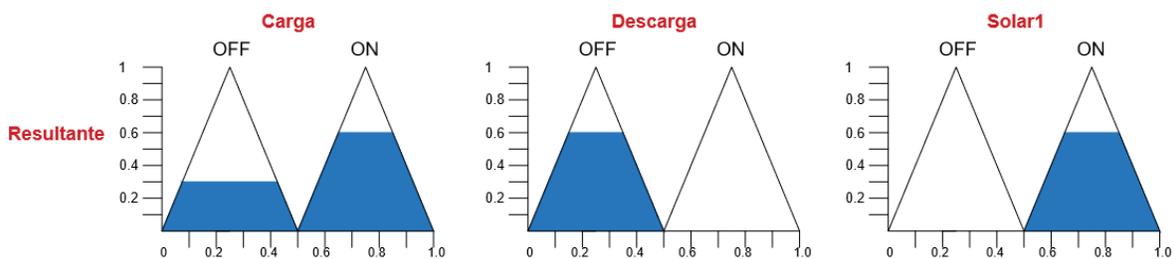


Figura C.6 Figura resultante para cada salida.

Como se muestra en la figura C.6 se tienen respuestas con forma de trapecio y también figuras compuestas, que se dan por la unión de dos o más figuras, como es el caso de la salida "Carga", por lo tanto, será necesario calcular el centroide de cada una de ellas de manera individual. A continuación, se realizará el proceso para obtener el valor nítido de salida utilizando el método de centroide. Es importante aclarar que los resultados obtenidos de manera analítica, son los mismos que los obtenidos por el software, los cuales se encuentran en la parte superior de cada salida en la figura C.3.

Cálculo de centroide para la salida "Carga"

Para calcular el centroide en la primera salida "Carga", la figura resultante se dividirá en 6, como se muestra en la figura C.7:

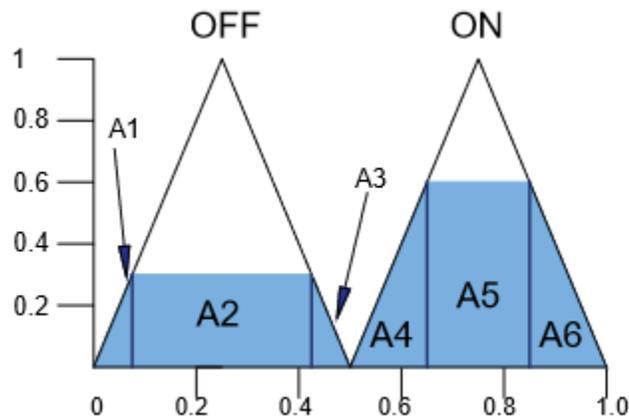


Figura C.7 Cálculo de centroide para la salida "Carga".

El centroide de una salida será calculado utilizando la siguiente formula:

$$\text{Centroide} = \frac{(A_1 \cdot C_1) + (A_2 \cdot C_2) + (A_3 \cdot C_3) + (A_4 \cdot C_4) + (A_5 \cdot C_5) + (A_6 \cdot C_6)}{A_{total}}$$

Donde:

- A_x = Área de la figura parcial.
- C_x = Centroide de la figura parcial.

Primeramente, se realiza el cálculo para obtener las áreas parciales:

$$A_1 = \frac{0.08 \cdot 0.3}{2} = 0.012$$

$$A_2 = \frac{0.34 \cdot 0.3}{2} = 0.102$$

$$A_3 = \frac{0.08 \cdot 0.3}{2} = 0.012$$

$$A_4 = \frac{0.15 \cdot 0.6}{2} = 0.045$$

$$A_5 = \frac{0.2 \cdot 0.6}{2} = 0.12$$



$$A_6 = \frac{0.2 * 0.6}{2} = 0.045$$

$$A_{Total} = 0.336$$

Ahora, se procede a realizar el cálculo de los centroides parciales:

$$C_1 = 0.08 - \frac{0.08}{3} = 0.0533$$

$$C_2 = 0.08 + \frac{0.34}{2} = 0.25$$

$$C_3 = 0.25 + \frac{0.08}{3} = 0.276$$

$$C_4 = 0.65 - \frac{0.15}{3} = 0.6$$

$$C_5 = 0.85 - \frac{0.2}{2} = 0.75$$

$$C_6 = 0.85 + \frac{0.15}{3} = 0.9$$

Realizando el cálculo para obtener el centroide de la figura C.7, se obtiene:

$$\mathbf{Centroide = 0.5564}$$

De esta manera se concluye el proceso de inferencia tipo Mamdani del sistema de control difuso. Ahora, se procederá a realizar el mismo procedimiento para el resto de las salidas.

Cálculo de centroide para la salida "Descarga"

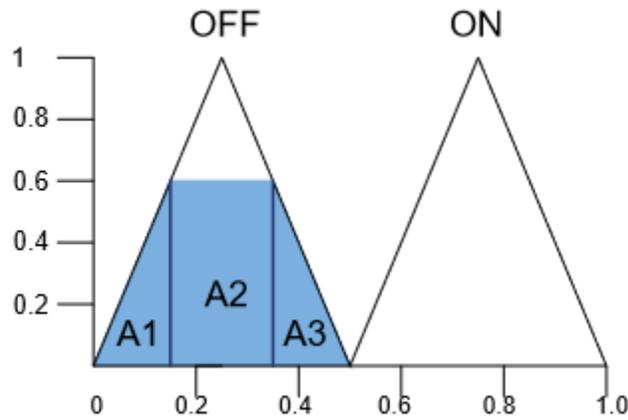


Figura C.8 Cálculo de centroide para la salida "Descarga".

Primeramente, se realiza el cálculo para obtener las áreas parciales:

$$A_1 = \frac{0.15 * 0.6}{2} = 0.045$$

$$A_2 = 0.2 * 0.6 = 0.12$$

$$A_3 = \frac{0.15 * 0.6}{2} = 0.045$$

$$A_{Total} = 0.21$$

Ahora, se procede a realizar el cálculo de los centroides parciales:

$$C_1 = 0.15 - \frac{0.15}{3} = 0.1$$

$$C_2 = 0.15 + \frac{0.2}{2} = 0.25$$

$$C_3 = 0.35 + \frac{0.15}{3} = 0.4$$

Realizando el cálculo para obtener el centroide de la figura C.8, se obtiene:

$$\mathbf{Centroide = 0.25}$$

Cálculo de centroide para la salida "Solar1"

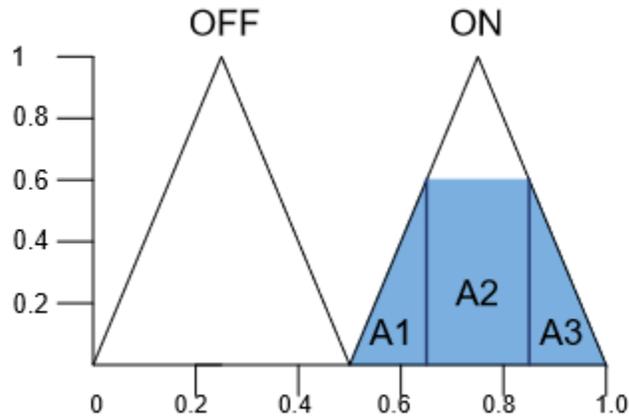


Figura C.9 Cálculo de centroide para la salida "Solar1".

Primeramente, se realiza el cálculo para obtener las áreas parciales:

$$A_1 = \frac{0.15 * 0.6}{2} = 0.045$$

$$A_2 = 0.2 * 0.6 = 0.12$$

$$A_3 = \frac{0.15 * 0.6}{2} = 0.045$$

$$A_{Total} = 0.21$$

Ahora, se procede a realizar el cálculo de los centroides parciales:

$$C_1 = 0.65 - \frac{0.15}{3} = 0.6$$

$$C_2 = 0.65 + \frac{0.2}{2} = 0.75$$

$$C_3 = 0.75 + \frac{0.15}{3} = 0.9$$

Realizando el cálculo para obtener el centroide de la figura C.9, se obtiene:

$$\text{Centroide} = 0.75$$