



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
UNIDAD DE POSGRADOS**

**MAESTRÍA EN CONTROL Y
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIALES**

Tesis previa a la obtención
del Grado de Magister
en Control y
Automatización Industriales

**“OPERACIÓN CONFIABLE DE UNA
MICRORRED AISLADA CON GENERADOR
PRINCIPAL DIESEL, APLICANDO UN
SISTEMA DE CONTROL DIFUSO EN EL
DESLASTRE DE SUS CARGAS”**

Autor:
Pablo Miguel Mosquera Tello.

Dirigido por:
Ismael Minchala Ávila, Ph. D.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
UNIDAD DE POSGRADOS

**MAESTRÍA EN CONTROL Y
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIALES**

Autor:
Pablo Miguel Mosquera Tello.

Dirigido por:
Ismael Minchala Ávila, Ph. D.

**“OPERACIÓN CONFIABLE DE UNA
MICRORRED AISLADA CON GENERADOR
PRINCIPAL DIESEL, APLICANDO UN
SISTEMA DE CONTROL DIFUSO EN EL
DESLASTRE DE SUS CARGAS”**

Este trabajo de tesis presenta los resultados de la investigación en base a la implementación de un sistema de control difuso para el deslastre de cargas para la operación confiable de una microrred aislada con generador principal diesel.

El desarrollo de éste trabajo ha sido realizado en el software MATLAB, Simulink con su plataforma de pruebas SimPowerSystems. Se combinan conocimientos de áreas diversas de ingeniería: teoría de sistemas eléctricos de potencia, microrredes eléctricas y sistemas de control difuso.

El controlador difuso centralizado desarrollado en este trabajo de tesis, permite realizar un óptimo deslastre de cargas de una microrred eléctrica en modo aislado propuesta para este estudio. El método de control difuso tipo Mamdani aplicado en la etapa de diseño y en la implementación, logran que el voltaje generado por la fuente principal de generación distribuida, pueda mantener su estabilidad en un valor determinado y obtenga un mejor desempeño de la microrred eléctrica y una óptima distribución y consumo de la energía disponible en ella.

Los resultados de este trabajo y los modelos desarrollados servirán como base para investigaciones posteriores en el campo de las microrredes aisladas, deslastre de cargas y sistemas de control difuso.

**“OPERACIÓN CONFIABLE DE UNA
MICRORRED AISLADA CON GENERADOR
PRINCIPAL DIESEL, APLICANDO UN
SISTEMA DE CONTROL DIFUSO EN EL
DESLASTRE DE SUS CARGAS”**

**“OPERACIÓN CONFIABLE DE UNA MICRORRED
AISLADA CON GENERADOR PRINCIPAL DIESEL,
APLICANDO UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO
EN EL DESLASTRE DE SUS CARGAS”**

AUTOR:

PABLO MIGUEL MOSQUERA TELLO

Ingeniero Eléctrico

Egresado de la Maestría en Control y Automatización Industriales

DIRIGIDO POR:

Ismael Minchala Ávila.

Ingeniero Electrónico

Doctor en Ciencias de Ingeniería en el ITESM

Docente de la Maestría en Control y Automatización Industriales



CUENCA – ECUADOR

Datos de catalogación bibliográfica

MOSQUERA TELLO PABLO MIGUEL

“OPERACIÓN CONFIABLE DE UNA MICRORRED AISLADA CON GENERADOR PRINCIPAL DIESEL, APLICANDO UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO EN EL DESLASTRE DE SUS CARGAS”

Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador, 2014

MAESTRIA EN CONTROL Y AUTOMATIZACION INDUSTRIALES

Formato 170 x 240 mm

Páginas: 82

Breve reseña de los autores e información de contacto



Autor:

PABLO MIGUEL MOSQUERA TELLO

Ingeniero Eléctrico

Egresado de la Maestría en Control y Automatización Industriales

pablo1682@hotmail.com



Director:

LUIS ISMAEL MINCHALA AVILA

Ingeniero Electrónico

Doctor en Ciencias de Ingeniería

Docente de la Maestría en Control y Automatización Industriales

minchalai@ieee.org

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2014 Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR

MOSQUERA TELLO PABLO MIGUEL.

“OPERACIÓN CONFIABLE DE UNA MICRORRED AISLADA CON GENERADOR PRINCIPAL DIESEL, APLICANDO UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO EN EL DESLASTRE DE SUS CARGAS”

IMPRESO EN ECUADOR – PRINTED IN ECUADOR

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Resumen general	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Justificación de la investigación	3
1.5. Estado actual.....	4
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS MICRORREDES ELÉCTRICAS Y LOS CONTROLADORES DE LÓGICA DIFUSA.....	7
2.1. Microrredes eléctricas	8
2.1.1 Introducción a los sistemas eléctricos de potencia.....	8
2.1.1.1 Subsistema de generación.....	10
2.1.1.2 Subsistema de transmisión.....	12
2.1.1.3 Subsistema de distribución	13
2.1.1.4 Subsistema de utilización.....	14
2.1.2 Líneas de subtransmisión y alimentadores (distribución primaria).....	15
2.1.2.1 Líneas de subtransmisión.....	15
2.1.2.2 Alimentadores	16
2.1.3 Subestaciones de distribución.....	18
2.1.3.1 Interruptor bajo carga.....	19
2.1.3.2 Fusible de protección	19
2.1.3.3 Regulador de voltaje	20
2.1.3.4 Sistema de medición	21
2.1.3.5 Interruptor termomagnético en media tensión.....	21
2.1.4 Microrredes eléctricas	22
2.1.4.1 Funcionalidad de microrredes.....	23
2.1.4.2 Modos de operación de microrredes.....	28
2.1.5 Sistemas de Generación Distribuida.....	30
2.2. Controladores de lógica difusa	31

2.2.1 Introducción a la teoría de control de lógica difusa.....	31
2.2.2 Conceptos básicos de conjuntos de lógica difusa.....	32
2.2.2.1 Definición de conjunto difuso.....	32
2.2.2.2 Operaciones con lógica difusa.....	33
2.2.2.3 Función de Membresía.....	37
2.2.3 Estructura de operación de un controlador de lógica difusa.....	39
2.2.3.1 Base de reglas o base del conocimiento.....	39
2.2.3.2 Proceso de fusificación.....	40
2.2.3.3 Mecanismo de inferencia.....	40
2.2.3.4 Proceso de defusificación.....	40
2.2.4 Tipos de controladores de lógica difusa.....	41
2.2.4.1 Controlador tipo Mamdani.....	42
2.2.4.2 Controlador tipo Takagi-Sugeno.....	42
3. ANÁLISIS Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA DESLASTRE DE CARGAS EN EL MODELO DE MICRORRED AISLADA.....	43
3.1 Modelo de referencia de la microrred de análisis.....	44
3.1.1 Justificación de la potencia del generador diesel de referencia.....	48
3.2 Diseño del sistema de control de lógica difusa.....	50
3.2.1 Variables de entrada.....	50
3.2.2 Variables lingüísticas.....	53
3.2.3 Matriz asociativa difusa.....	53
3.2.4 Base de conocimiento.....	55
3.3 Entrenamiento y verificación.....	55
3.3.1 Parametrización del controlador difuso.....	55
3.4 Simulación del comportamiento de la microrred aislada con la implementación del controlador difuso.....	58
3.4.1 Adaptación de la salida del controlador difuso.....	58
3.4.2 Estabilización de la potencia del generador diesel – modelo 1.....	58
3.4.2.1 Análisis de la simulación.....	64
3.4.3 Estabilización de la potencia del generador diesel – modelo 2.....	65
3.4.3.1 Análisis de la simulación.....	65
3.4.4 Estabilización de la potencia del generador diesel – modelo 3.....	66
3.4.4.1 Análisis de la simulación.....	67

3.4.5 Estabilización de la potencia del generador diesel – modelo 4	67
3.4.5.1 Análisis de la simulación.....	68
3.4.6 Estabilización de la potencia del generador diesel – modelo 5	69
3.4.6.1 Análisis de la simulación.....	71
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	73
4.1. Comparación de los resultados obtenidos entre los modelos planteados.....	73
4.2 Análisis del modelo propuesto	74

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2. 2 DIAGRAMA UNIFILAR DE SUBSISTEMAS DE GENERACIÓN, TRANSMISIÓN, DISTRIBUCIÓN Y UTILIZACIÓN (WILDI, 2002).....	10
FIGURA 2. 3 CLASIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES POR NIVEL DE VOLTAJE (PANSINI, 2005) CORTESÍA: MAGNETRÓN-SCHNEIDER ELECTRIC	13
FIGURA 2. 5 TIPOS DE TOPOLOGÍAS DE LÍNEAS DE SUBTRANSMISIÓN. (SHORT, 2006)	16
FIGURA 2. 6 DISPOSICIÓN DE UN ALIMENTADOR PRIMARIO. (GLOVER, 2012).....	17
FIGURA 2. 7 DISPOSICIÓN DE UN ALIMENTADOR SECUNDARIO. (GLOVER, 2012).....	18
FIGURA 2. 8 <i>ESQUEMA DE UNA SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN SIMPLE.</i> (KERSTING, 2002)	19
FIGURA 2. 9 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN FUSIBLE. (NAVARRO, MONTAÑES, & SANTILLAN, 1999)	20
FIGURA 2. 10 ESQUEMA DE UN REGULADOR DE VOLTAJE EN MEDIA TENSIÓN. (PANSINI, 2005)	21
FIGURA 2. 11 ESQUEMA DE UNA MICRORRED Y SUS COMPONENTES. (KROPOSKI, Y OTROS, 2008).....	22
FIGURA 2. 12 TIPOS DE CONFIGURACIÓN DE UNA MICRORRED. (IEEE STD 1547.4, 2011)	24
FIGURA 2. 13 <i>CONFIGURACIÓN LOCAL DE UNA MICRORRED.</i> (IEEE STD 1547.4, 2011)	24
FIGURA 2. 14 CONFIGURACIÓN SECUNDARIA DE UNA MICRORRED. (IEEE STD 1547.4, 2011)	25
FIGURA 2. 15 CONFIGURACIÓN LATERAL DE UNA MICRORRED. (IEEE STD 1547.4, 2011).....	26
FIGURA 2. 16 CONFIGURACIÓN TIPO CIRCUITO DE UNA MICRORRED. (IEEE STD 1547.4, 2011).....	26
FIGURA 2. 17 CONFIGURACIÓN TIPO BARRAJE DE SUBESTACIÓN DE UNA MICRORRED. (IEEE STD 1547.4, 2011)	27
FIGURA 2. 18 CONFIGURACIÓN TIPO SUBESTACIÓN DE UNA MICRORRED. (IEEE STD 1547.4, 2011).....	28
FIGURA 2. 20 REPRESENTACIÓN EN DIAGRAMA DE BLOQUES DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA. (KATIRAEI, IRAVANI, HATZIARGYRIOU, & DIMEAS, 2008)	31
FIGURA 2. 21 DIFERENCIA ENTRE CONJUNTO CLÁSICO Y DIFUSO. (KASABOV, 1998)	33
FIGURA 2. 22 TIPOS DE VALORES LINGÜÍSTICOS (A) CRECIENTE, (B) DECRECIENTE Y (C) UNIMODAL. (MUGICA ALVAREZ, 1995).....	34
FIGURA 2. 23 UNIVERSO DE DISCURSO PARA LOS TRES VALORES LINGÜÍSTICOS: FRÍA, AGRADABLE Y CALUROSA. (MUGICA ALVAREZ, 1995)	34
FIGURA 2. 24 UNIVERSO DE DISCURSO PARA CINCO VALORES LINGÜÍSTICOS: FRÍA, FRESCA, AGRADABLE, CÁLIDA Y CALUROSA. (MUGICA ALVAREZ, 1995)	35
FIGURA 2. 25 OPERACIÓN COMPLEMENTO DIFUSO DEL VALOR LINGÜÍSTICO AGRADABLE. (MUGICA ALVAREZ, 1995)	35
FIGURA 2. 26 OPERACIÓN INTERSECCIÓN DIFUSA ENTRE LOS VALORES LINGÜÍSTICOS FRESCA Y AGRADABLE. (MUGICA ALVAREZ, 1995)	36
FIGURA 2. 27 OPERACIÓN UNIÓN DIFUSA ENTRE LAS VALORES LINGÜÍSTICOS FRESCA Y AGRADABLE. (MUGICA ALVAREZ, 1995).....	37
FIGURA 2. 29 FUNCIÓN DE MEMBRESÍA TRIANGULAR. (ZHANG & LIU, 2006).....	38
FIGURA 2. 30 FUNCIÓN DE MEMBRESÍA TRAPEZOIDAL. (ZHANG & LIU, 2006).....	38
FIGURA 2. 32 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CONTROLADOR DIFUSO	39
FIGURA 2. 33 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL DEFUSIFICADOR MAMDANI. (WANG, 1997)	41
FIGURA 3. 1 RED DE PRUEBA DERIVADA DE UNA RED EN MEDIA TENSIÓN EN ALEMANIA. (RUDION, ORTHS, & STYCZYNSKI, 2006)	45

FIGURA 3. 2 MICRORRED DE REFERENCIA, DIAGRAMA EN SIMULINK. (MINCHALA AVILA, 2014)	47
FIGURA 3. 4 PERFIL DE POTENCIA DEL GENERADOR DIÉSEL PDEG	51
FIGURA 3. 5 PERFIL DE LA DERIVADA DE POTENCIA DEL GENERADOR DIÉSEL DPDEG	52
FIGURA 3. 6 HABILITACIÓN DE MANDO REMOTO DEL INTERRUPTOR CB-L5 PARA EL CONTROL DE CARGA	53
FIGURA 3. 7 ESQUEMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR DIFUSO APLICADO A LA MICRORRED.....	53
FIGURA 3. 8 ESQUEMA DE LA FUNCIÓN DE MEMBRESÍA PARA PDEG. [FUENTE: COMMAND WINDOW MATLAB]	56
FIGURA 3. 9 ESQUEMA DE LA FUNCIÓN DE MEMBRESÍA PARA DPDEG. [FUENTE: COMMAND WINDOW MATLAB]	57
FIGURA 3. 12 PERFIL DE POTENCIA DE GENERADOR DIESEL APLICANDO EL CONTROLADOR DIFUSO – MODELO 1. [FUENTE: SIMULINK MATLAB]	59
FIGURA 3. 14 PERFIL DE OPERACIÓN DEL BIT5 DE DESLASTRE – MODELO 1. [FUENTE: SIMULINK MATLAB]	60
FIGURA 3. 17 PERFIL DE OPERACIÓN DEL BIT3 DE DESLASTRE – MODELO 1. [FUENTE: SIMULINK MATLAB]	61
FIGURA 3. 18 PERFIL DE OPERACIÓN DEL BIT2 DE DESLASTRE – MODELO 1. [FUENTE: SIMULINK MATLAB]	62
FIGURA 3. 20 PERFIL DE OPERACIÓN DEL BIT1 DE DESLASTRE – MODELO 1. [FUENTE: SIMULINK MATLAB]	63
FIGURA 3. 22 PERFIL DE POTENCIA DE GENERADOR DIESEL APLICANDO EL CONTROLADOR DIFUSO – MODELO 2. [FUENTE: SIMULINK MATLAB]	65
FIGURA 3. 23 PERFIL DE POTENCIA DE GENERADOR DIESEL APLICADO CONTROLADOR DIFUSO – MODELO 3. [FUENTE: SIMULINK MATLAB]	66

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3. 1 PARÁMETROS DE LAS CARGAS DE LA MICRORRED DE REFERENCIA. (MINCHALA AVILA, 2014).....	45
TABLA 3. 2 PARÁMETROS INICIALES PARA CÁLCULO DE FLUJO DE POTENCIA DE LA MICRORRED DE REFERENCIA. (MINCHALA AVILA, 2014).....	46
TABLA 3. 3 ESQUEMA DEL CONTROLADOR DIFUSO APLICADO A LA MICRORRED.....	54
TABLA 3. 4 MATRIZ ASOCIATIVA DIFUSA PARA EL CONTROLADOR PROPUESTO	54
TABLA 3. 5 ESQUEMA DEL CONTROLADOR DIFUSO APLICADO A LA MICRORRED.....	54
TABLA 3. 6 VALORES CARACTERÍSTICOS DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA PDEG.....	56
TABLA 3. 7 VALORES CARACTERÍSTICOS DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA DESLASTRE	57
TABLA 3. 8 MATRIZ ASOCIATIVA DIFUSA PARA EL CONTROLADOR PROPUESTO	69
TABLA 4. 1 CARGAS CONECTADAS A LOS INTERRUPTORES TERMOMAGNÉTICOS CON MANDO A DISTANCIA	75

Dedicatoria

A mi amada esposa Ximena, el motor de mi vida quien me apoyó en todo momento para alcanzar este objetivo.

Ing. Pablo Miguel Mosquera Tello.

PREFACIO

Este trabajo de tesis presenta los resultados de la investigación en base a la implementación de un sistema de control difuso para el deslastre de cargas para la operación confiable de una microrred aislada con generador principal diesel.

El desarrollo de éste trabajo ha sido realizado en el software MATLAB, *Simulink* con su plataforma de pruebas SimPowerSystems. Se combinan conocimientos de áreas diversas de ingeniería: teoría de sistemas eléctricos de potencia, microrredes eléctricas y sistemas de control difuso.

El controlador difuso centralizado desarrollado en este trabajo de tesis, permite realizar un óptimo deslastre de cargas de una microrred eléctrica en modo aislado propuesta para este estudio. El método de control difuso tipo Mamdani aplicado en la etapa de diseño y en la implementación, logran que el voltaje generado por la fuente principal de generación distribuida, pueda mantener su estabilidad en un valor determinado y obtenga un mejor desempeño de la microrred eléctrica y una óptima distribución y consumo de la energía disponible en ella.

Los resultados de este trabajo y los modelos desarrollados servirán como base para investigaciones posteriores en el campo de las microrredes aisladas, deslastre de cargas y sistemas de control difuso.

PRÓLOGO

En el presente trabajo de tesis se presentan los resultados de la implementación de un sistema de control difuso tipo Mamdani para el deslastre de cargas para la operación confiable de una microrred aislada con generador principal diesel.

El controlador difuso diseñado se aplica a una microrred de referencia desarrollada en la plataforma de pruebas SimPowerSystems de *Simulink* para simular dos modos de operación distintos, conectado a la red y aislado de la red. El modelo de microrred se basa en investigaciones de modelos de referencia para integrar fuentes de energía distribuida del *CIGRÉ – Task force (TF)C6.04.0*. Ésta microrred está conformada por varias fuentes de generación distribuida como: motor-generador diésel, generador eólico, módulo de celdas fotovoltaicas y bancos de baterías de almacenamiento.

Se propone un controlador difuso, para evitar que el valor de la potencia generada en *p.u.* por el generador principal diesel, sobrepase su valor máximo de 0.2 *p.u.* y ocasione severos daños en su sistema mecánico y de control, además de los daños en la red eléctrica. El sistema de control difuso gobierna íntegramente el proceso de deslastre de cargas

Para el diseño del controlador difuso, fue preciso desarrollar las siguientes etapas:

- Determinación de las variables de entrada del controlador difuso;
- Obtención de la matriz asociativa difusa mediante la cuantificación de los pesos de las variables lingüísticas propuestas;
- Implementación de las reglas obtenidas en la matriz asociativa difusa, en el bloque de control difuso de *Simulink*, *fuzzy logic controller*;
- Implementación de un sistema de conversión decimal – binario para la salida del bloque del controlador difuso en la microrred de referencia, para disponer de señales de control *on/off* para la aplicación de deslastre de cargas.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos a través de las simulaciones correspondientes, se los compara con los trabajos realizados en el estado actual y se verifican los alcances del sistema de control difuso implementado.

Agradecimientos

A mi padre Dios, el ser supremo que gobierna mi vida y guía mis pasos, a mi esposa por el apoyo incondicional y sus palabras de aliento en los momentos más difíciles, a mi familia por la paciencia y comprensión brindadas durante mis estudios de maestría, al Doctor Ismael Minchala, director de tesis, por su excelente don de gentes, su disponibilidad de tiempo y sus recomendaciones para el desarrollo de este trabajo, a mi gran amigo el Ing. Luis Javier Serpa, por su apoyo desinteresado y su predisposición para darme una mano cuando la requerí.

Ing. Pablo Miguel Mosquera Tello.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Resumen general

En el desarrollo de este proyecto, se analiza el funcionamiento de una microrred eléctrica en modo aislado. En casos en los que la operación de la microrred conectada a la red principal exhibe baja calidad del voltaje y frecuencia, pueden presentarse desperfectos en el funcionamiento de la red de distribución de energía eléctrica. Estas anomalías obligan al sistema automático de protecciones a desconectar la red principal; acción que se realiza mediante un seccionador bajo carga en media tensión. Una vez que la microrred queda desconectada de la red principal, la fuente de generación distribuida de energía eléctrica disponible, pasa a convertirse en la fuente principal para suministrar la potencia requerida en coordinación con otras fuentes más pequeñas conectadas en la misma red.

Esta fuente se encarga de proveer el servicio eléctrico prioritario para las cargas más críticas, las cuales se controlan con interruptores termomagnéticos (breakers) que incluyen módulos para control *on/off* a distancia. En caso de que la potencia generada no sea suficiente para la demanda de las cargas de la microrred, será necesario desconectar de ésta las cargas de menor prioridad. Este procedimiento se lo conoce como deslastre de cargas o *load shedding*.

En la microrred objeto de estudio, existen algunos tipos de fuentes de generación distribuida como: motor-generator diésel, generador eólico, módulo de celdas fotovoltaicas y bancos de baterías de almacenamiento; en donde luego de la modelación y simulaciones correspondientes con parámetros eléctricos similares a sistemas reales, se tiene un comportamiento inestable de la fuente principal que es el generador diésel. Para evitar que el valor de la potencia generada en p.u. por este grupo electrógeno sobrepase su valor máximo y ocasionen severos daños en su sistema mecánico y de control, además de los daños en la red eléctrica, se aplica el método de deslastre de cargas.

Para definir cuáles son las cargas con mayor y menor grado de prioridad y tomar una acción de conexión y desconexión de las mismas, se propone desarrollar un sistema de control. Las reglas se proponen en base a los valores lingüísticos de las funciones de membresía tanto para la señal de entrada que es la potencia generada, como para la de salida que es la cantidad de cargas a desconectar.

1.2. Planteamiento del problema

Hasta la actualidad los estudios existentes no ofrecen detalles para casos particulares en los que es necesario analizar el comportamiento de la fuente principal de generación de energía eléctrica distribuida en una microrred en modo aislado; por ende no se ha tomado como un parámetro principal de análisis la potencia principal generada, y tampoco se han encontrado propuestas de sistemas de control basados en la teoría de lógica difusa que tengan como parámetros de ingreso a la potencia de generación de esta microrred, para el desarrollo de un proceso de control en el deslastre de cargas en una microrred.

Algunas investigaciones proponen un deslastre inteligente de cargas en microrredes eléctricas analizando la frecuencia y el voltaje presentes en ellas, de manera que su estabilidad esté garantizada cumpliendo con los valores exigidos dentro de las normativas internacionales vigentes. Los análisis de bajo voltaje y de baja frecuencia son los métodos que más se han desarrollado, ya que involucran el monitoreo del estado de la microrred y proponen una acción de control lo más rápida y concreta posible para el deslastre de cargas. El análisis de la potencia del sistema no ha sido un parámetro tomado en cuenta, debido a que en algunos estudios la consideran estable, pero en el presente caso de estudio es fundamental su control, para evitar en casos de aplicación reales, un colapso en el sistema eléctrico. Un controlador basado en la teoría de control difuso, simplifica el análisis de la microrred eléctrica, ya que del flujo de potencia obtenido, solamente se toma en cuenta la potencia del generador principal conectado en esta microrred en modo aislado de la red principal y la tasa de cambio de esta potencia, para tratar de mantener un valor nominal de 0.2 en p.u. recomendado para la conservación física de la máquina de generación.

El diseño del sistema de control difuso, utiliza como modelo una microrred con varias fuentes de generación de energía distribuida, que puede ser analizada y referenciada para cualquier sistema eléctrico similar, que se puede encontrar en el sector domiciliario, comercial e industrial. En este último sector, se pueden obtener ciertas ventajas, que influyan en la toma de decisiones de empresarios en el país, para utilizar nuevas tecnologías que sean más amigables con el planeta. Las altas potencias de los generadores requeridos para los servicios de sus procesos de producción, pueden estar al servicio de las industrias más pequeñas, e incluso de pequeños usuarios finales y pueden representar un ingreso “extra” por concepto de un despacho de energía adicional.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Diseñar un sistema de control difuso centralizado que gobierne el proceso de deslastre de cargas de una microrred eléctrica, funcionando en modo aislado, garantizando la estabilidad de la potencia activa de la fuente de generación principal.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar las estrategias empleadas para realizar deslastre de cargas que existen en la actualidad, junto con los parámetros que se sujetan al monitoreo constante dentro de una microrred.
- Desarrollar la estrategia de control de lógica difusa, de manera que optimice los tiempos de respuesta en la acción de las cargas, para mantener dentro del parámetro de $0.2 p.u.$ la potencia de salida del generador principal.
- Validar la estrategia de control planteada, mediante algunas simulaciones implementadas en un software de monitoreo, ejemplificando varios escenarios, de manera que se pueda demostrar el alcance y la potencialidad del sistema de control propuesto.

1.4. Justificación de la investigación

Es importante el planteamiento y desarrollo de un sistema de control basado en la teoría de lógica difusa, para el deslastre de cargas en una microrred eléctrica en modo aislado, debido a que es una aplicación que puede ser muy útil en el campo de la automatización de redes eléctricas y redes inteligentes, pudiendo en un futuro cercano ser implementado en los sistemas eléctricos del país.

Es necesario generar electricidad de una forma descentralizada y tener una mayor eficiencia en el manejo de la misma, esto puede dar lugar a nuevas configuraciones de las redes de distribución eléctrica, y puede ser un punto de partida para tener herramientas necesarias para la implementación de soluciones a corto plazo que beneficien y alivien posibles cortes de energía en las redes eléctricas de cualquier localidad, principalmente en el sector industrial.

Un controlador basado en la teoría de lógica difusa, tiene la posibilidad de corregir y adicionar reglas en cualquier etapa de su implementación, permitiendo obtener sistemas controlados con un mejor tiempo de respuesta, evitando cortes de servicio

eléctrico prolongados. Se podrían diseñar controladores pequeños y económicos a manera de relés de protección, como se detalla en (Minchala, Garza, & Calle, 7-9 Nov. 2012), como una aplicación en las estaciones de transformación distribuidas en los alimentadores, sean éstas aéreas o cabinadas, con el fin de realizar el control de las cargas conectadas a ellas, ya sea domiciliarias, comerciales y sobre todo industriales.

La implementación de un controlador difuso en la microrred objeto de estudio, tiene como beneficio principal el que su procedimiento de diseño es heurístico y es un modelo libre de aproximaciones. Las reglas de diseño están basadas en una experiencia previa obtenida, en este caso de estudio con la microrred aislada, en la tendencia del perfil de la potencia del generador diesel. El análisis y la obtención de estas reglas se realizan mediante la comparación del comportamiento de la potencia y del cambio de ésta en el tiempo, variables que esta técnica de control permite considerar y manipular.

Por otro lado, puede ser de mucha utilidad, el estudio de las microrredes, en escenarios de operación con fuentes de generación distribuida, sobre todo con fuentes de energía renovables, ya que pueden ofrecer un abanico de oportunidades de ahorro y contribución al medio ambiente. El procedimiento de deslastre de cargas, puede ser un tema de aplicación general en Ecuador a corto plazo, interés de muchos profesionales en el área eléctrica y electrónica para su desarrollo.

La propuesta a futuro de algunos modelos de sistemas pequeños de generación eléctrica autosustentables, puede aliviar la alta demanda de servicio de energía eléctrica que debe ser despachada por las Empresas Eléctricas, encargadas de suministrarla al usuario final, esto a pesar de que nos es un problema actual por la inversión que está realizando Ecuador en la construcción de varias plantas de generación hidroeléctrica.

1.5. Estado actual

Hasta ahora existen algunas publicaciones sobre diferentes diseños y propuestas de sistemas de control para el deslastre de cargas en microrredes eléctricas en modo aislado utilizando técnicas de control proporcional-derivativo, digital, robusto, etc. La mayoría de ellos plantean como objetivo el mantener los valores de frecuencia y voltaje de la microrred estables, con valores de calidad exigidos en las normativas vigentes en cada país.

Entre algunos métodos para mejorar el proceso de deslastre de cargas, están: de baja frecuencia, de bajo voltaje.

- Para el caso de baja frecuencia, existen algunos algoritmos para incrementar la adaptabilidad de esta estrategia, utilizando la tasa de cambio de la frecuencia dependiente de la localización del disturbio, el estado del voltaje del sistema y la disminución de la frecuencia, para determinar la velocidad

y cantidad requerida de deslastre, como se describe en (Saffarian & Sanaye-Pasand, 2010).

- Existe también, una estrategia inteligente de deslastre de cargas de baja frecuencia, que propone un controlador basado en lógica difusa junto con un módulo de control de deslastre, pero basado en la medición constante de la frecuencia y la tasa de cambio de la misma (df/dt), para determinar la carga a ser deslastrada y lograr la estabilidad de la misma. En (Laghari, Mokhlis, Halim Abu Bakar, Karimi, & Shahriari, 2012) se detalla la metodología de esta estrategia.
- Adicionalmente, existen dos estrategias adaptivas centralizadas de deslastre de cargas, con el fin de proteger la estabilidad del sistema y prevenir el colapso del mismo, para disturbios mucho mayores. Los algoritmos centralizados que se han planteado, seleccionan las cargas a ser desconectadas, basados en la magnitud de los voltajes de los alimentadores de sub-transmisión y también en los márgenes de estabilidad del voltaje de los mismos. Estos algoritmos han logrado disminuir la cantidad de carga a ser desconectada, comparados con las técnicas o estrategias de deslastre indicadas antes, como se detalla en (Seyedi & Sanaye-Pasand, 2009).

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS MICRORREDES ELÉCTRICAS Y LOS CONTROLADORES DE LÓGICA DIFUSA

En este capítulo se presentan los siguientes conceptos relacionados a redes eléctricas inteligentes: sistemas eléctricos de potencia, líneas de subtransmisión, alimentadores y subestaciones de distribución, microrredes eléctricas y generación distribuida.

Un sistema eléctrico de potencia, es una red interconectada de subsistemas eléctricos, que tienen la misión de generar, transformar, transportar, entregar y consumir energía eléctrica, que se puede obtener gracias a los recursos naturales existentes en nuestro planeta que pueden ser renovables y no renovables.

La estructura de un sistema eléctrico de potencia se compone de subsistemas de generación, transmisión y subtransmisión, distribución y consumo de energía eléctrica. Un sistema de generación es una parte importante dentro de esta estructura, ya que es en donde se origina la energía eléctrica que se desea transmitir y consumir. Se compone de generadores que son máquinas eléctricas dinámicas, que se encargan de tomar energía mecánica de algún recurso natural como agua, viento, combustible fósil y generar energía a partir de este movimiento en un alternador; y de los transformadores que son máquinas eléctricas estáticas que tienen la misión de elevar la tensión de generación a valores que permitan su transmisión a través de conductores eléctricos.

Las líneas de subtransmisión y alimentadores son conductores eléctricos que forman una red eléctrica que sirve para transmitir la energía disponible desde una subestación de generación hacia las subestaciones de distribución en distancias moderadas, generalmente sus valores de voltaje oscilan entre los 60 y 100 kV. Para distancias más grandes estos valores están entre los 100 y 500 kV (alta tensión). (Von Meier, 2006)

Una subestación de distribución, se encarga de enlazar dentro de una red eléctrica, la energía transportada por las líneas de subtransmisión en media y en algunos casos alta tensión, hacia los alimentadores primarios de distribución, los cuales entregan ésta energía en baja tensión (127 ó 220V) a las cargas destinadas a consumirla, en un área determinada. Sus componentes esenciales son: el transformador reductor de distribución de media-baja tensión, los interruptores de protección y seccionadores de operación tanto en alta como en baja tensión, pueden incluir también equipos de medición y monitoreo de energía.

Una microrred eléctrica, es un sistema eléctrico de potencia de media-baja tensión de pequeña escala, que tiene al menos una fuente de energía distribuida y cargas de consumo asociadas y puede formar intencionalmente islas en los sistemas de distribución eléctricos.

Un sistema de generación distribuida está formado por fuentes de energía distribuida, incluyen sistemas de generación y almacenamiento distribuido (DG) y (DS) por sus siglas en inglés, respectivamente. Son fuentes de energía ubicadas cerca de las cargas locales y pueden proveer una variedad de beneficios incluyendo altos índices de confiabilidad del sistema eléctrico, si son correctamente operados dentro del sistema de distribución eléctrico. (Glover, 2012)

2.1. Microrredes eléctricas

2.1.1 Introducción a los sistemas eléctricos de potencia

Dentro del campo industrial, un sistema eléctrico ha jugado un papel muy importante desde su descubrimiento en el siglo pasado. En el año 1878 Thomas Edison realizó sus primeros trabajos con la luz eléctrica, definió el primer concepto de una estación de potencia y la creó para entregar luz a su vecindario. (Glover, 2012). Desde entonces los sistemas eléctricos han evolucionado constantemente.

Estados Unidos, país que desarrolló sus primeros sistemas eléctricos en corriente continua gracias a la invención de sus motores Sprague Electric, para distribuir luz eléctrica en espacios de hasta 2.5 Km² y a la invención del primer transformador en 1885 por parte de William Stanley, ha mejorado considerablemente el mercado de los sistemas eléctricos de potencia.

Actualmente se encuentra un sinnúmero de definiciones para un sistema eléctrico de potencia, casi todas ellas detallan su estructura y los aspectos más importantes de cada uno. Para definir este concepto para el presente estudio, se toma como referencia el emitido por la IEEE, que es el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, entidad que en la actualidad rige el sector eléctrico mundial; este concepto resalta lo siguiente: “*Un sistema eléctrico de potencia es una red formada por unidades generadoras eléctricas, cargas y/o líneas de transmisión de potencia, incluyendo el equipo asociado, conectado de forma eléctrica o mecánica a la red*”. (IEEE std, 100-1992).

Un sistema eléctrico de potencia debe cumplir con algunos requerimientos esenciales para poder cumplir con su objetivo de entregar energía eléctrica a los consumidores para su utilización, dichos requerimientos son (Wildi, 2002):

- Proveer ininterrumpidamente la potencia que necesitan los consumidores
- Mantener el voltaje nominal estable, con una variación de $\pm 10\%$
- Mantener la frecuencia estable, con una variación de ± 0.1 Hz
- Suministrar energía a un precio razonable
- Cumplir con estándares de seguridad
- Mantener estándares de cuidado ambiental

Un sistema eléctrico de potencia se encuentra formado a su vez por un conjunto de subsistemas que se los clasifica como: generación, transmisión y subtransmisión, distribución y utilización, como se indican en las figuras 2.1 y 2.2, en donde se aprecia el proceso de subsistemas, y la forma de cómo llega la energía eléctrica desde la generación, hasta su utilización, tanto en un esquema real como en un diagrama unifilar respectivamente.

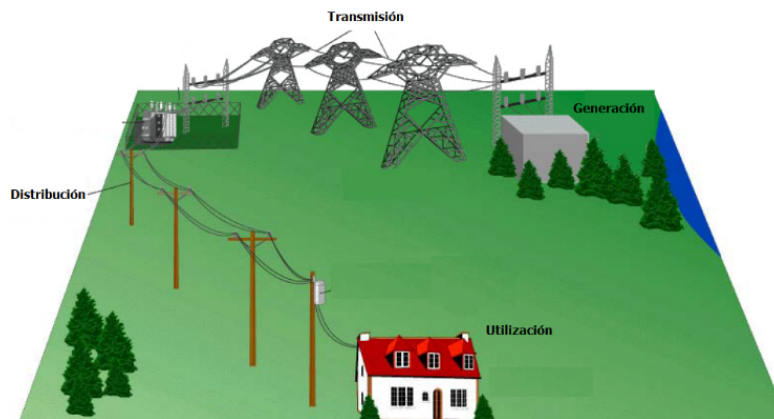


Figura 2.1 Descripción de un Sistema Eléctrico de Potencia (Gonzalez - Longatt, 2008)

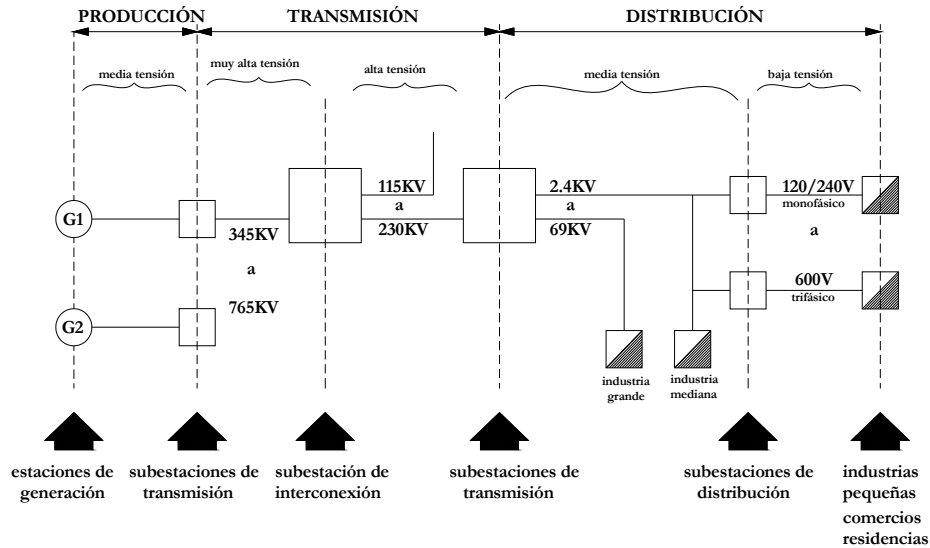


Figura 2.2 Diagrama unifilar de subsistemas de generación, transmisión, distribución y utilización (Wildi, 2002).

2.1.1.1 Subsistema de generación

Un subsistema de generación se compone de máquinas eléctricas como generadores y transformadores eléctricos.

- **Generador**

Un generador eléctrico conocido también como generador síncrono trifásico o alternador, es la parte esencial de un sistema eléctrico de potencia, es un dispositivo diseñado a partir del fenómeno de inducción electromagnética, que convierte el movimiento de una fuente primaria, en electricidad.

Un generador síncrono, tiene dos campos rotacionales en sincronismo, el primero es producido por un rotor que gira a una velocidad síncrona y es excitado por una corriente continua y el segundo es producido en los devanados preformados en doble capa que forman el estator y son alimentados por una corriente trifásica. El sistema de excitación mantiene el voltaje y controla el flujo de potencia. Un generador de corriente alterna genera altas potencias a niveles altos de voltaje, alrededor de los 30kV. (El-Hawary, 2000).

La fuente de potencia mecánica, suministra el movimiento al generador síncrono a partir de turbinas hidráulicas, turbinas de vapor, turbinas de gas y en

algunas ocasiones motores de combustión interna, las tres últimas energías primarias son generadas a partir de la combustión de carbón, gas, energía nuclear y derivados del petróleo. (El-Hawary, 2000).

En los últimos años para cumplir con las nuevas regulaciones y normativas para el cuidado del medio ambiente y la conservación del combustible fósil, se han considerado algunas fuentes de energía alternativa que se pueden obtener a partir de la energía del sol, geotérmica, del viento, mareomotriz y biomasa. (El-Hawary, 2000).

Por otro lado se puede resaltar que un subsistema de generación, puede estar conformado por varias unidades de generación, a estas uniones se las conoce con el nombre de centrales o plantas de generación. De aquí se puede destacar una clasificación de centrales de generación a partir del tipo de energía primaria utilizada: (Gonzalez - Longatt, 2008)

Centrales de generación clásicas

- Generación hidráulica
- Generación térmica
- Generación nuclear

Centrales de generación alternativas

- Generación solar
- Generación eólica
- Generación mareomotriz
- Generación geotérmica
- Generación por biomasa

Los generadores que trabajan con energías renovables o alternativas, han facilitado en gran medida la independencia de ciertos sistemas eléctricos de potencia. El tamaño cada vez más reducido de éstas fuentes de generación permiten su instalación en áreas cercanas a los circuitos de consumo, por lo que han dado lugar a nuevos conceptos en el manejo y administración de las redes eléctricas.

• Transformador

Un transformador es una máquina eléctrica estática, diseñada para cambiar *“potencia eléctrica alterna de un nivel de voltaje a potencia eléctrica alterna a otro nivel de voltaje, gracias a la acción de un campo magnético”*. Este dispositivo está conformado por dos o más bobinas de un conductor de electricidad, enrolladas

alrededor de un núcleo de un material ferromagnético común, alojado al interior de un núcleo. (Chapman, 2000)

Una de las bobinas también llamadas devanados, se conecta a una fuente de energía eléctrica alterna y el segundo devanado se conecta al circuito de la carga. El primer devanado se conoce con el nombre de devanado primario y el del otro extremo se conoce como devanado secundario.

Existen varios tipos de transformadores, se los clasifica de acuerdo a la potencia que manejan, a los circuitos y a los sistemas de voltaje que están conectados y de acuerdo al tipo de refrigeración que poseen. (Ras Oliva, 1978).

Por la potencia que manejan, se los puede dividir en:

- **Transformadores de potencia**
 - Transformador por unidad (Estación de Generación -30kV)
 - Transformador de subestación (138kV)
 - Transformador de distribución (22kV)

Por los sistemas de voltaje a los que están conectados, como se indica en la figura 2.3, se los divide en:

- **Transformadores por sistemas de voltaje**
 - Monofásicos
 - Trifásicos

2.1.1.2 Subsistema de transmisión

Los sistemas de transmisión y subtransmisión están constituidos por los circuitos que suministran energía eléctrica a las subestaciones de distribución. Algunas de estos subsistemas son de voltajes entre 34.5kV hasta los 138kV. Se debe tener especial atención en distinguir entre transmisión y subtransmisión, a pesar de que no existe una diferencia clara en cuanto a niveles de voltaje, pues el primero de éstos cumple la función de distribuir potencia eléctrica desde los subsistemas de generación con voltajes según la norma ANSI de 69kV, 115kV, 138kV, 161kV, 230kV, 345kV y 500kV, y un subsistema de subtransmisión alimenta las subestaciones de distribución con voltajes desde 69kV hasta los 138kV (El-Hawary, 2000). En algunas aplicaciones en los sistemas de las empresas eléctricas de distribución, es común encontrar un sistema de transmisión que cumpla las dos funciones. (Short, 2006)

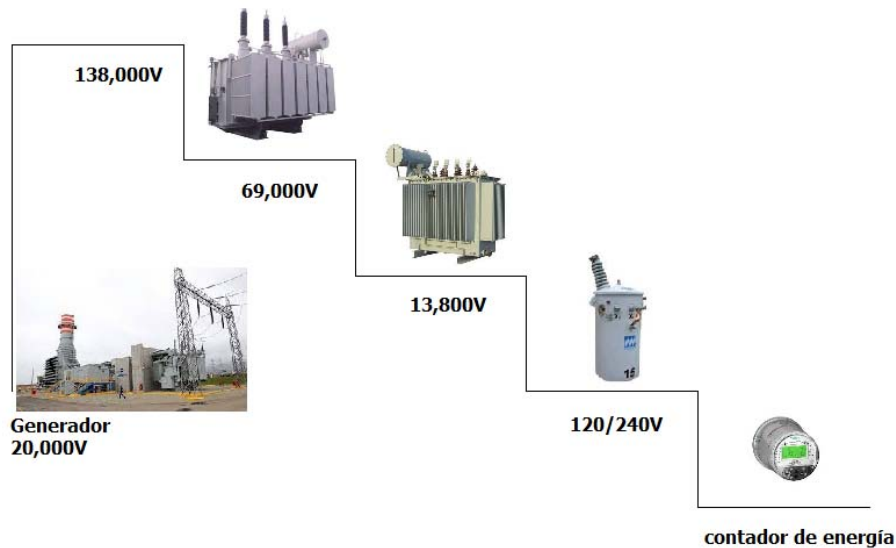


Figura 2.3 Clasificación de transformadores por nivel de voltaje (Pansini, 2005) cortesía: Magnetron-Schneider Electric

Las líneas de transmisión en algunos casos también permiten la interconexión entre empresas eléctricas cercanas, logrando con esto un despacho económico de energía eléctrica cuando las condiciones de funcionamiento sean normales, y permite además la transferencia de potencia en casos de emergencia. (El-Hawary, 2000)

2.1.1.3 Subsistema de distribución

Un subsistema de distribución es el conjunto de equipamiento y redes eléctricas que enlaza directamente las subestaciones de distribución con la carga de los consumidores finales.

Un sistema de distribución por sus niveles de voltaje, se los puede clasificar en dos grupos, como un sistema de distribución primario o alimentadores primarios con voltajes desde los 4kV hasta los 34.5kV y un sistema de distribución secundario o alimentadores secundarios con voltajes monofásicos y trifásicos de 240/120V y 220/127V respectivamente. En el primer caso, las aplicaciones principales se las encuentra en el sector industrial y la segunda prácticamente a nivel comercial y domiciliario. En la figura 2.4 se indican los sistemas de distribución, primario y secundario.

Los sistemas de distribución además se pueden encontrar en dos formas de acuerdo a su requerimiento en instalación: sistemas aéreos o subterráneos. En los últimos años con el descubrimiento de nuevos materiales aislantes, se han abaratado los costos del material y accesorios para poder realizar instalaciones subterráneas, mismas que elevan aún más el nivel de seguridad en el manejo y la distribución de la energía para los operadores de estas redes y para los usuarios.

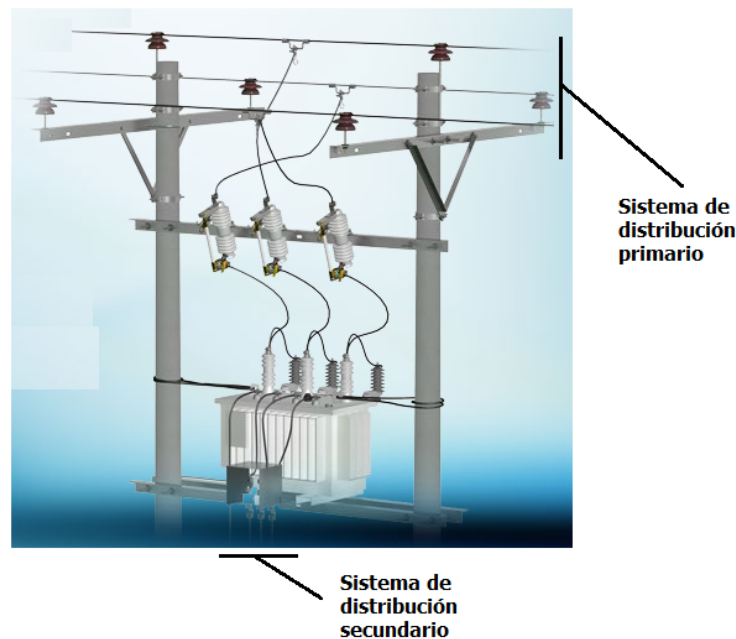


Figura 2.4 Subestación de Distribución Trifásica, sistemas primario y secundario. (MEER Ecuador, 2013)

2.1.1.4 Subsistema de utilización

Un subsistema de utilización o también conocido como sistema de consumo o cargas, es el conjunto de clientes o usuarios que son los destinatarios de la energía eléctrica que ha pasado por todas las etapas anteriores dentro de un sistema eléctrico de potencia.

Este sistema puede clasificarse por el tipo de cargas que tengan los usuarios finales dentro de sus instalaciones eléctricas para su consumo, pudiendo ser éstas residenciales, comerciales e industriales. Las instalaciones residenciales y comerciales contienen cargas básicas como aparatos de alumbrado, cocción y ambientación. Las

instalaciones industriales en cambio se caracterizan por tener cargas como motores de inducción, transformadores, etc.

La naturaleza de funcionamiento de estas cargas es variante en el transcurso de un día normal, por lo que la energía eléctrica necesaria en una cantidad suficiente, debe estar disponible todo el tiempo para los usuarios y las empresas eléctricas deben tener mucha precaución y cuidado para que esto se cumpla con altos estándares de calidad. La diversidad de las cargas existentes en un sistema eléctrico de consumo, hace que su análisis de estabilidad sea un punto muy importante dentro del monitoreo de la empresa de distribución de energía eléctrica, es por esto que, se han creado algunos parámetros para determinar el correcto funcionamiento de este subsistema. Conceptos como demanda, factor de carga, factor de coincidencia, factor de diversificación y factor de responsabilidad, se deben monitorear todo el tiempo, para asegurar la disponibilidad de energía para los usuarios.

Adicional a estos conceptos, existen equipos y sistemas necesarios para operar y proteger de una manera adecuada este subsistema. Entre los equipos que se pueden mencionar están los interruptores automáticos, que involucran a su vez a algunos equipos como transformadores de medida, interruptores termomagnéticos, clavijas desconectoras, fusibles y pararrayos. Estos componentes son necesarios en el sistema para facilitar la operación del mismo en caso de eventualidades u ocurrencia de fallas. (El-Hawary, 2000)

2.1.2 Líneas de subtransmisión y alimentadores (distribución primaria)

2.1.2.1 Líneas de subtransmisión

Un sistema de subtransmisión difiere de un sistema de transmisión en que el primero no cumple la función de interconexión entre varios sistemas eléctricos de potencia. (Gonzalez - Longatt, 2008)

Una línea de subtransmisión puede manejar potencias que oscilan entre los 5 y 50MVA a media tensión, generalmente valores entre 22kV y 69kV.

Como se indica en la figura 2.5, el arreglo de circuitos de subtransmisión comprende dos tipos, el primero una configuración o topología radial y una configuración tipo malla.

Un sistema de líneas de subtransmisión tipo radial es el más barato y simple, pero estas condiciones lo hacen de éste poco confiable. En el caso de existir una falla en una línea de esta topología, puede originar una interrupción del servicio tanto de varias subestaciones de distribución, así como de algunos clientes conectados a ella. Debido a estos problemas de inestabilidad, estos circuitos de subtransmisión han evolucionado y

se han encontrado métodos redundantes como son las topologías en malla o también los circuitos duales. (Short, 2006)

Para aplicar estas configuraciones se deben tomar en cuenta algunas características del sistema que se desea obtener como resultado, por ejemplo un factor determinante es conocer la posición y la existencia de cargas en el presente y en el futuro de la red, cuáles son los niveles de voltaje necesarios, en donde se puede encontrar el sistema de transmisión más cercano que suministre la potencia requerida a futuro, si existe el espacio suficiente para realizar un montaje de este tipo y el monto de inversión a realizar por la construcción de esta topología. (Short, 2006)

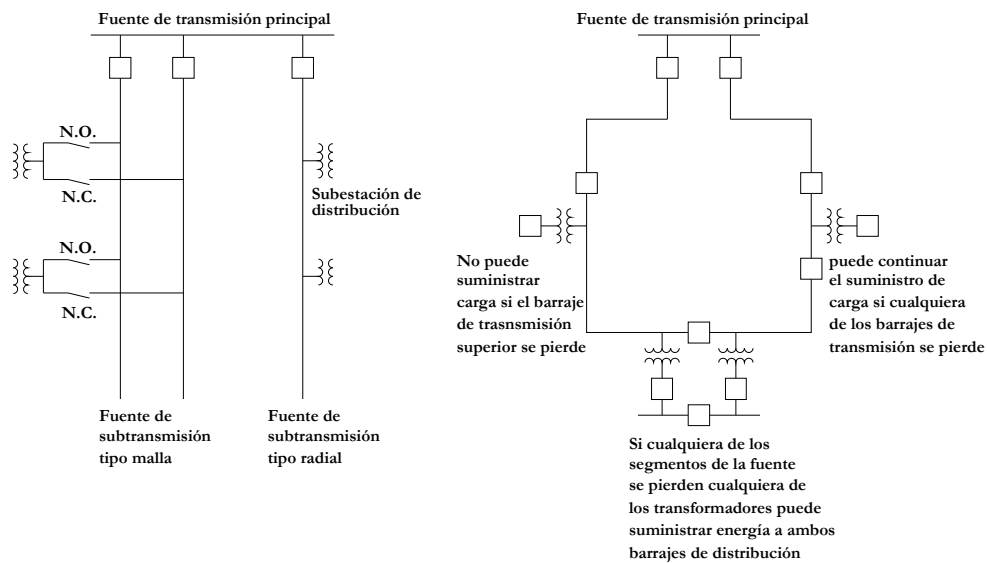


Figura 2.5 Tipos de Topologías de líneas de subtransmisión. (Short, 2006)

La mayoría de líneas de subtransmisión van dispuestas en la parte superior en el espacio físico de una red. Son instaladas a lo largo de carreteras o calles, semejantes a una línea de distribución; otras de niveles de voltaje superior van dispuestas en espacios exclusivos y últimamente con los descubrimientos de nuevos materiales aislantes para altos niveles de voltaje, van instaladas de forma subterránea, lógicamente con un costo superior a las formas convencionales dispuestas a nivel aéreo.

2.1.2.2 Alimentadores

En los sistemas de distribución, existen dos tipos de alimentadores, primarios y secundarios.

Las líneas de distribución primaria o alimentadores primarios se ramifican desde las subestaciones hasta las áreas de servicio local, todas ellas llevan energía eléctrica trifásica. Comúnmente un alimentador primario tiene una longitud entre los 2 y los 8 kilómetros en zonas urbanas y en rurales, donde la demanda de electricidad es ligeramente inferior, pueden estar alrededor de los 15 y 20 kilómetros. (Pansini, 2005)

Los valores típicos que maneja un alimentador primario tanto en potencia como en voltaje son: 4MVA para 4.16kV, 12MVA para 13.8kV, 20MVA para 22.9kV y 30MVA para 34.5kV. Estos alimentadores generalmente están dispersos en varias secciones trifásicas conectadas entre sí a través de seccionadores fusible o switches. La figura 2.6 detalla la configuración de este tipo de alimentador y sus interconexiones mediante equipos de maniobra.

Dentro de un alimentador primario también se pueden encontrar alimentadores laterales, que pueden ser alimentadores de una fase y están conectados al sistema a través también de seccionadores fusibles. Adicionalmente se pueden encontrar alimentadores laterales de tres fases, pero estos están conectados en el sistema a través de seccionadores tripolares o reconectores. En algunos casos especiales estos alimentadores primarios pueden ser dedicados específicamente para clientes industriales, donde su demanda requiere el suministro de potencias más elevadas a voltajes también altos.

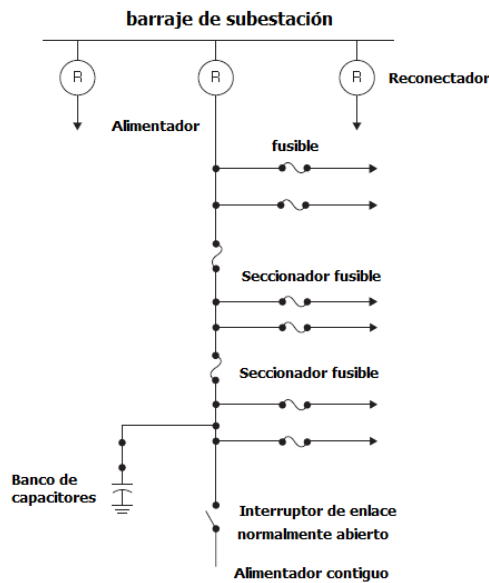


Figura 2.6 Disposición de un alimentador primario. (Glover, 2012)

Por otro lado las líneas de distribución secundaria o alimentadores secundarios, son los circuitos destinados a suministrar energía a los consumidores a valores bajos de voltaje que proviene de los transformadores de distribución conectados en las redes eléctricas aguas arriba. La figura 2.7 muestra la configuración de un alimentador secundario.

Los transformadores de distribución al ser claves dentro de este campo, son los que determinan el voltaje de los alimentadores secundarios. Para sistemas monofásicos 3 hilos (2 fases + neutro), por ejemplo en Ecuador, se manejan voltajes de 240/120V y para sistemas bifásicos 3 hilos (2 fases + neutro) y trifásicos 4 hilos (tres fases + neutro) se manejan voltajes 220/127V. Estos voltajes son muy útiles para consumidores bajo la clasificación, según sus cargas, como residenciales y comerciales. (Glover, 2012)

Estos alimentadores pueden ser parte de algunas configuraciones de sistemas de distribución secundarios. Por ejemplo, este circuito puede ser dedicado para un solo consumidor que tiene su transformador de distribución propio para suplir la energía requerida por sus cargas. Otros alimentadores pueden estar conectados entre sí formando una pequeña red que puede liberar potencia en caso de que alguna porción de estos alimentadores tenga una falla y pueda suministrar la energía de un transformador de distribución a ese alimentador por otra ruta, y existe otra topología de alimentadores secundarios conectados entre sí y alimentados por varios transformadores de distribución.

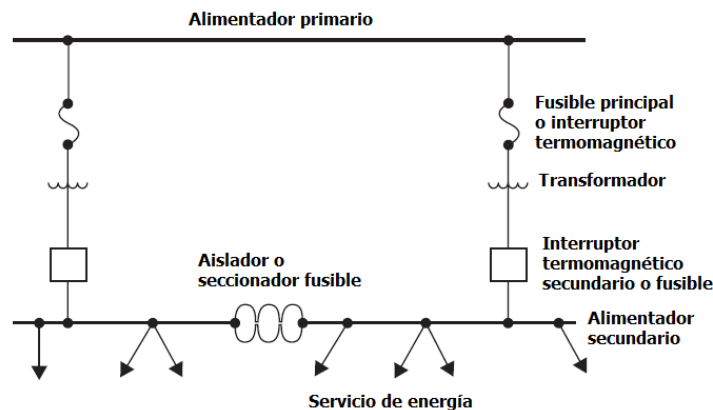


Figura 2.7 Disposición de un alimentador secundario. (Glover, 2012)

2.1.3 Subestaciones de distribución

Una subestación de distribución es el primer eslabón dentro de un sistema de distribución, pues es el sistema encargado de disminuir el voltaje de la energía eléctrica

transmitida a través de las redes de transmisión y subtransmisión desde la subestación de generación.

Las subestaciones de distribución pueden ser de varios tamaños, esto se define por la potencia del transformador que es la parte esencial de este sistema. Pueden ir desde 5MVA en el caso de sectores rurales, hasta aplicaciones urbanas con potencias del orden de 20-40MVA en el caso de Ecuador.

Como se indica en la figura 2.8, adicionales al transformador, existen algunos equipos necesarios que están dispuestos dentro de una subestación tales como: interruptor en media tensión bajo carga, fusibles de protección, regulador de voltaje, sistema de medición y circuitos de interruptores termomagnéticos en media tensión.

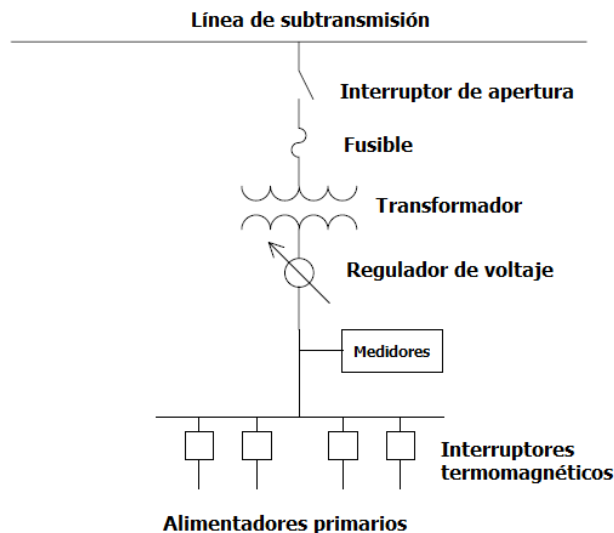


Figura 2. 8 Esquema de una subestación de Distribución simple. (Kersting, 2002)

2.1.3.1 Interruptor bajo carga

Es un aparato mecánico de corte o interrupción de corriente, que se puede maniobrar manualmente en condiciones normales y de sobrecorriente durante un tiempo determinado.

2.1.3.2 Fusible de protección

El fusible es un dispositivo de protección con la misión de operar muy rápidamente para desconectar un circuito cuando existe una sobrecorriente debido a

sobrecargas o cortocircuitos que ponen en peligro los equipos e instalaciones del sistema.

Este corte se produce gracias a la fusión de un alambre contenido dentro de este dispositivo y que está a su vez colocado dentro de un aparato conectado en serie a un circuito. El paso de una sobrecorriente de un valor determinado, calienta en gran medida este alambre, haciendo que se funda, con lo que se logra el corte de la falla. (Navarro, Montañes, & Santillan, 1999)

Dos conceptos fundamentales para elegir un fusible adecuado, como se detalla en la figura 2.9, son la curva de mínima fusión que indica el tiempo mínimo de fusión y la curva máxima de fusión, que indica el tiempo máximo de despeje de la falla.

Los fusibles en media y alta tensión más utilizados son el de alto poder de ruptura, que se caracterizan por la rapidez de actuación ante un cortocircuito y los cortacircuitos de expulsión, que al momento de producirse un arco con generación de gases, provoca la expulsión de una trencilla que se alarga y sopla el arco extinguiéndolo de manera inmediata. (Navarro, Montañes, & Santillan, 1999)

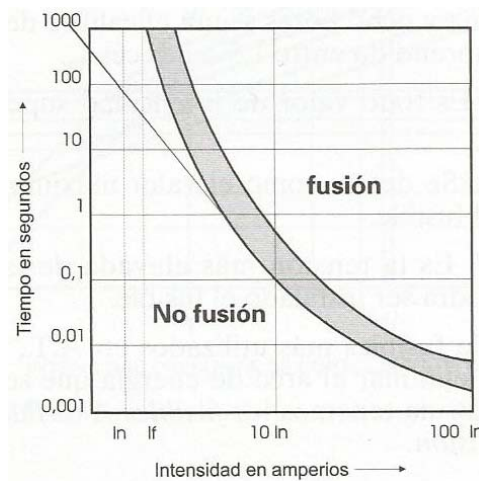


Figura 2.9 Curvas características de un fusible. (Navarro, Montañes, & Santillan, 1999)

2.1.3.3 Regulador de voltaje

Un regulador de voltaje es una máquina eléctrica, muy similar a un transformador convencional que sirve para mantener estable el voltaje de una línea de distribución o trasmisión. Esta regulación es necesaria cuando existe una corriente muy alta en el alimentador, lo cual hace que exista un valor de tensión menor a lo largo del mismo, no existiendo, en consecuencia, un nivel óptimo de voltaje para la alimentación

de los bobinados primarios de los transformadores de distribución conectados a dicho alimentador.

Un regulador de voltaje está conformado por dos bobinados, el bobinado primario, que está conectado en paralelo al alimentador y el bobinado secundario conectado en serie. La constitución de un regulador de voltaje se indica en la figura 2.10. El bobinado secundario está provisto de varios puntos de conexión, mediante los cuales se obtienen varios niveles de voltaje que sirven para proveer al alimentador de voltaje deseado. (Pansini, 2005)

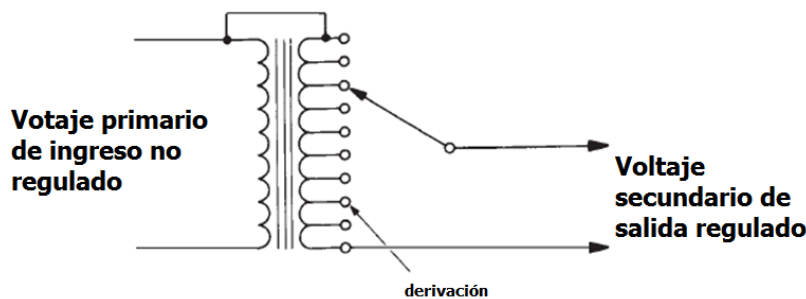


Figura 2. 10 Esquema de un regulador de voltaje en media tensión. (Pansini, 2005)

2.1.3.4 Sistema de medición

Existen varios tipos de sistemas de medición para subestaciones. Se pueden encontrar del tipo analógico como digital, esto depende de cuan preciso deba ser el registro de la magnitud eléctrica que se desea monitorear. La principal medición que se realiza en una subestación es la corriente máxima y mínima que está circulando, en un periodo de tiempo determinado, por los alimentadores de entrada y salida de una subestación.

Es necesario monitorear y medir otros parámetros eléctricos como voltaje, potencia, factor de potencia, frecuencia, etc. De igual manera es necesario registrar de cada uno de ellos su valor máximo, mínimo, promedio, eficaz, utilizándose para ello equipos de medición digitales más sofisticados que incluyen registro de memoria y comunicación con sistemas de automatización.

2.1.3.5 Interruptor termomagnético en media tensión

Un interruptor termomagnético es un dispositivo eléctrico capaz de interrumpir o habilitar el flujo de potencia desde una fuente de generación hacia una carga. Este dispositivo se encarga de mantener continua la corriente de la carga de un circuito y tiene la capacidad de desconectar la carga de un circuito bajo condiciones normales de funcionamiento y ante una condición de falla en el mismo. Bajo esta última condición,

el interruptor puede operar mediante instrucciones de algún dispositivo de control y protección como un relé de protección de manera automática y puede ser operado a distancia mediante accesorios adicionales como bobinas de apertura a distancia, mediante alguna acción de un operador.

Al ser un dispositivo de maniobra y protección en media tensión, debido a la generación de un arco eléctrico al momento de su operación bajo carga, existe una clasificación por el medio de interrupción de este arco. Entre los tipos de interruptores de media tensión se tienen: Interruptores en aceite, en aire, en vacío y en hexafluoruro de azufre (SF6). (Hewitson, Brown, & Ramesh, 2004)

2.1.4 Microrredes eléctricas

Las microrredes son sistemas pequeños y autónomos con una combinación de tecnologías de energías renovables y convencionales adaptadas a cada caso particular, que permitan a individuos, comunidades y empresas generar su propia electricidad, así como vender los excedentes a la red principal. (AFME, 2002)

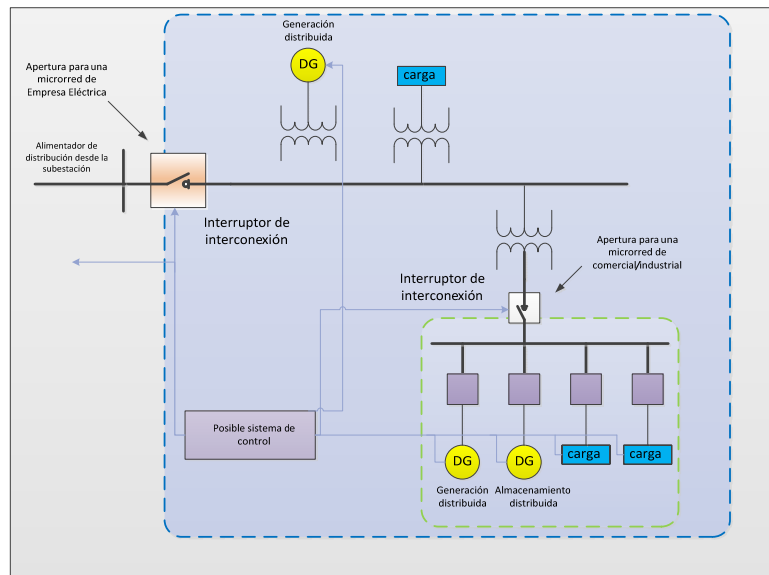


Figura 2. 11 Esquema de una microrred y sus componentes. (Kroposki, y otros, 2008)

Una microrred se define también como una parte de un sistema eléctrico de potencia que tiene fuentes distribuidas, almacenamiento distribuido y cargas que tienen la habilidad para desconectarse y ponerse en paralelo con el sistema eléctrico de potencia

al que pertenece. Las microrredes involucran sistemas eléctricos de potencia locales y pueden incluir porciones de éste, sus maniobras son programadas e intencionales. (IEEE std 1547.4, 2011)

Dentro de una microrred, las cargas y las fuentes de energía pueden ser desconectadas y reconectadas a una parte o a todo el sistema eléctrico de potencia principal, con un mínimo de perturbaciones en las cargas locales mediante un único punto de conexión, que debe tener una estrategia para gestionar el flujo de energía dentro de la microrred, así como el intercambio de potencia con el sistema de distribución. La figura 2.11 detalla la configuración de una microrred, en donde se destacan los interruptores de interconexión, vitales para la operación del sistema descrito.

Para que una microrred aislada trabaje correctamente, el seccionador de cabecera que está instalado aguas arriba de la microrred debe abrirse ante condiciones bajas de calidad de la potencia del sistema y la fuente de energía distribuida debe ser capaz de abastecer la carga de la sección aislada. Este proceso debe ser llevado a cabo manteniendo los niveles adecuados de voltaje y frecuencia de la carga aislada. (Glover, 2012)

2.1.4.1 Funcionalidad de microrredes

El estándar IEEE 1547.4-2011 presenta siete configuraciones diferentes de microrredes eléctricas. La figura 2.12 contiene la descripción de todas éstas configuraciones.

- **Configuración local**

Una configuración local está formada por una o más fuentes de generación y un conjunto de cargas conectadas dentro de la instalación de un cliente. Su conexión debe ser en paralelo al sistema eléctrico de potencia principal, para que no exista una desconexión de la microrred. La figura 2.13 muestra este tipo de configuración. (IEEE std 1547.4, 2011)

- **Configuración secundaria**

Una microrred con aislamiento de configuración secundaria, tiene una o más fuentes distribuidas y varias cargas conectadas al secundario de un transformador de distribución. La figura 2.14 indica una microrred con una configuración secundaria. El conjunto de varias microrredes secundarias pueden formar una microrred de configuración lateral. (IEEE std 1547.4, 2011)

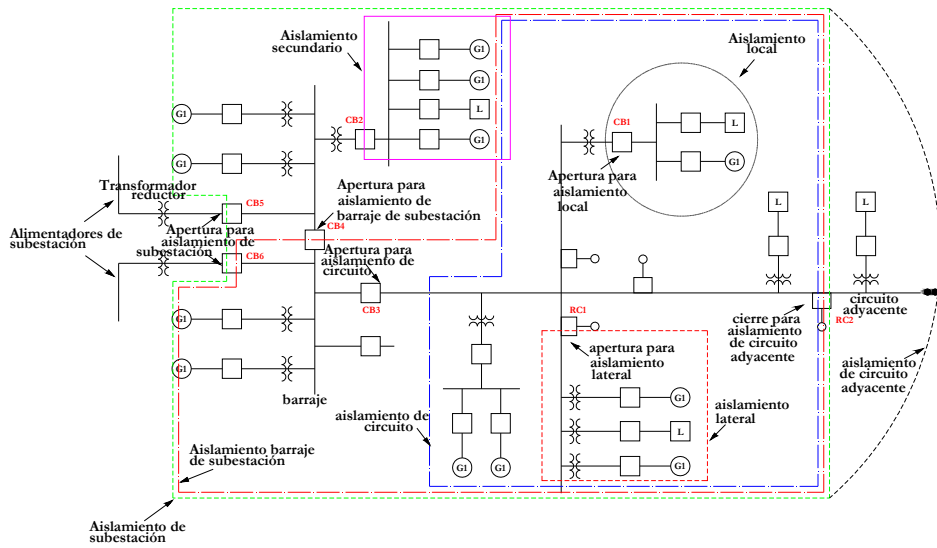


Figura 2.12 Tipos de configuración de una microrred. (IEEE std 1547.4, 2011)

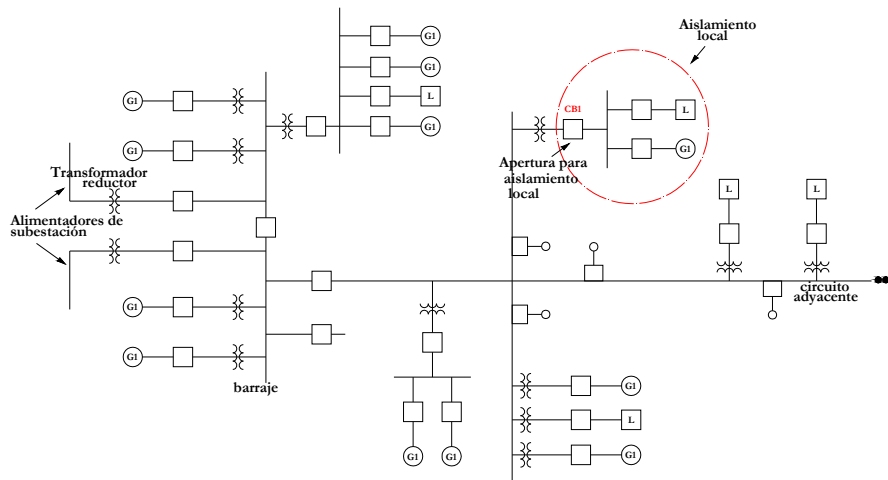


Figura 2.13 Configuración local de una microrred. (IEEE std 1547.4, 2011)

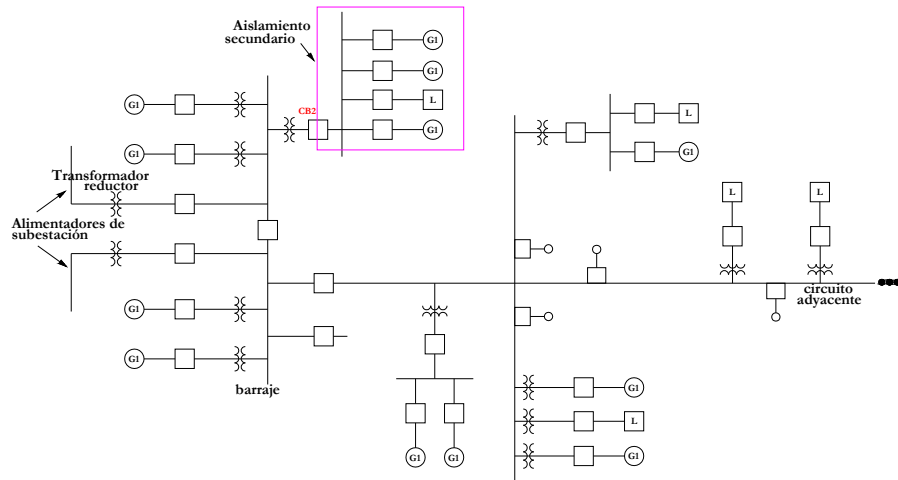


Figura 2. 14 Configuración secundaria de una microrred. (IEEE std 1547.4, 2011)

- **Configuración lateral**

Una microrred aislada en configuración lateral tiene sus cargas conectadas y servidas desde un alimentador lateral de un circuito de distribución. Como se aprecia en la figura 2.15, en caso de producirse la desconexión de toda la microrred a través de un interruptor, seccionador, etc., la fuente de generación distribuida existente en la microrred, puede suministrar la potencia requerida por las cargas. (IEEE std 1547.4, 2011)

- **Configuración tipo circuito**

Este tipo de configuración está formado por cargas que están conectadas normalmente a un circuito alimentador único. Al momento de realizar la desconexión de la microrred mediante un interruptor o seccionador único conectado en serie al alimentador, las fuentes de generación distribuida pueden suministrar la potencia requerida por todos los circuitos existentes en la microrred. En la figura 2.16 se aprecia la configuración de una microrred tipo circuito. (IEEE std 1547.4, 2011)

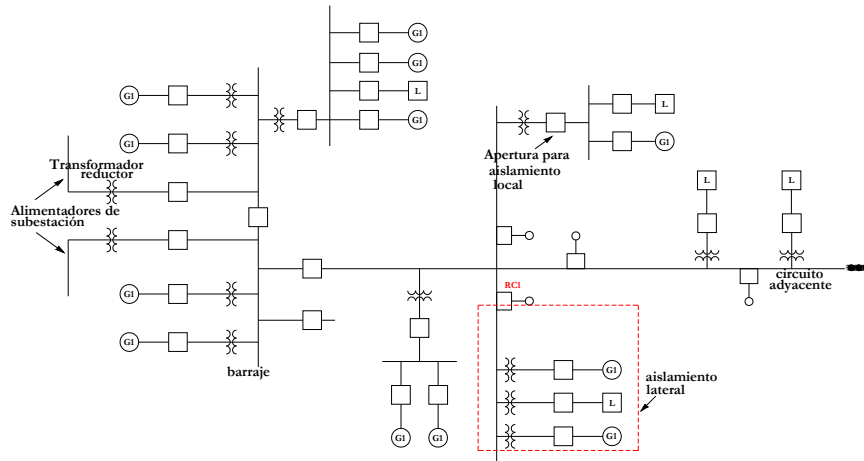


Figura 2. 15 Configuración lateral de una microrred. (IEEE std 1547.4, 2011)

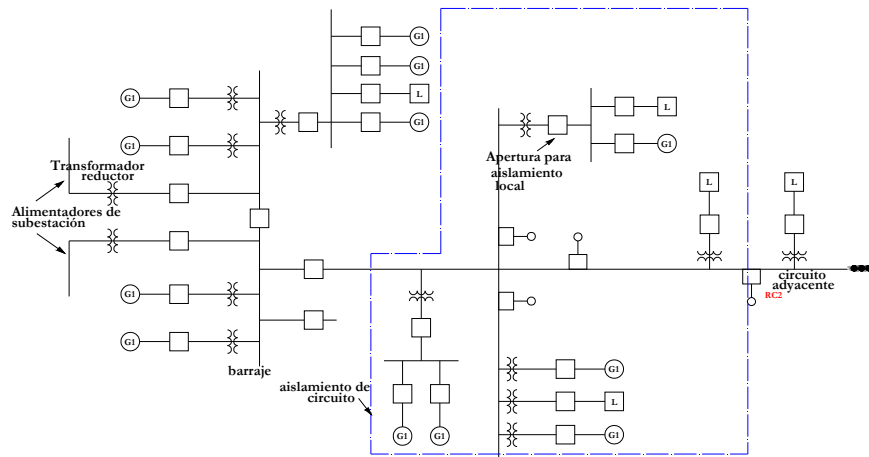


Figura 2. 16 Configuración tipo circuito de una microrred. (IEEE std 1547.4, 2011)

- **Configuración tipo barraje de subestación**

Una microrred tipo barraje de subestación, indicada en la figura 2.17, tiene sus cargas conectadas a un solo alimentador dentro de una subestación. Existen algunos barrajes que pueden conectarse a las cargas desde la subestación. Esta configuración permite la operación de la fuente de generación distribuida en el momento que se desconecta el interruptor o seccionador que opera aguas abajo en el secundario del transformador de la subestación. (IEEE std 1547.4, 2011)

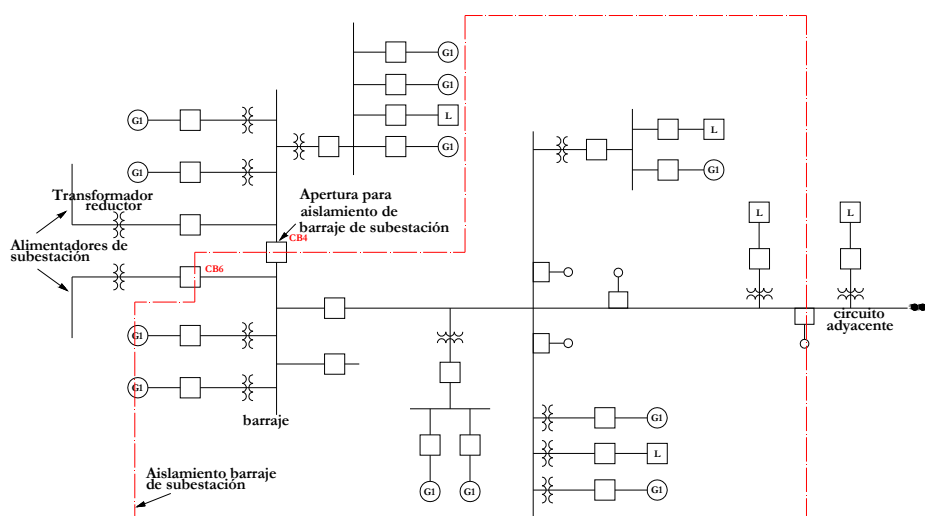


Figura 2.17 Configuración tipo barraje de subestación de una microrred. (IEEE std 1547.4, 2011)

- **Configuración tipo subestación**

En una microrred con un aislamiento tipo subestación, las cargas están conectadas a una sola subestación, la figura 2.18 detalla ésta conexión. Esta configuración se utiliza cuando la subestación de distribución está fuera de servicio o cuando uno de los transformadores que alimenta por otra vía los barrajes del circuito de distribución está fuera de servicio y el restante no tiene la capacidad de suministrar potencia a la carga instalada en el sistema. Este tipo de aislamiento sirve para aliviar problemas de sobrecarga o sobrevoltaje en los alimentadores de la subestación o aliviar una sobrecarga en los transformadores reductores de distribución. (IEEE std 1547.4, 2011)

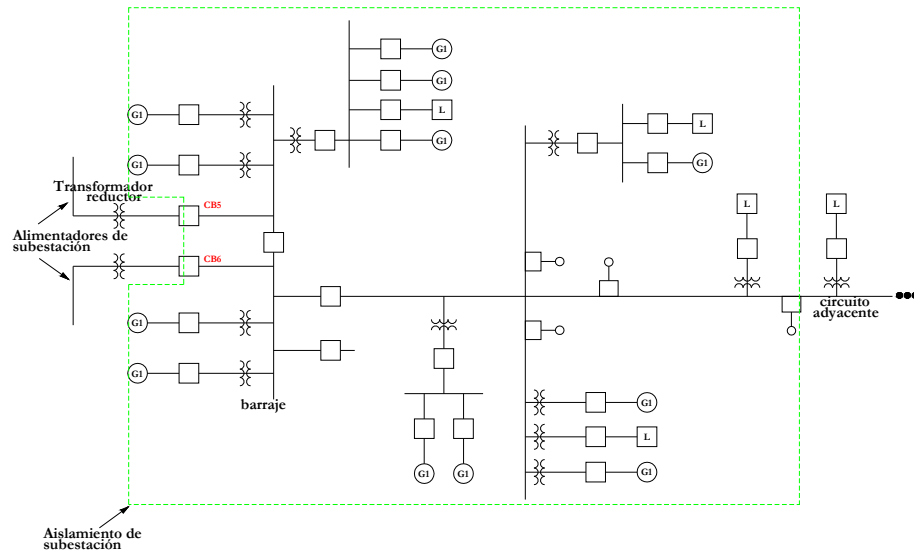


Figura 2. 18 Configuración tipo subestación de una microrred. (IEEE std 1547.4, 2011)

- **Configuración tipo circuito colindante**

En este tipo de aislamiento de microrred, las cargas existentes en un circuito adjunto pueden ser conectadas al suministro de potencia de la microrred aislada adyacente. Este tipo de configuración es bastante útil cuando existe una pérdida de potencia en los alimentadores de la subestación principal. La figura 2.19 muestra una microrred con una configuración de tipo circuito colindante. (IEEE std 1547.4, 2011)

2.1.4.2 Modos de operación de microrredes

Una microrred dentro de su operación normal para gestionar una desconexión y una reconexión al sistema eléctrico de potencia al que pertenece, debe tener un sistema de monitoreo de algunos parámetros eléctricos como voltaje, frecuencia, etc., y un sistema de control sofisticado para controlar la operación en aislamiento de la red y la transición de modo normal de conexión a modo aislado y su retorno. Existen cuatro modos de operación normal al momento de realizar la gestión para la desconexión de una microrred de un sistema eléctrico de potencia (IEEE std 1547.4, 2011).

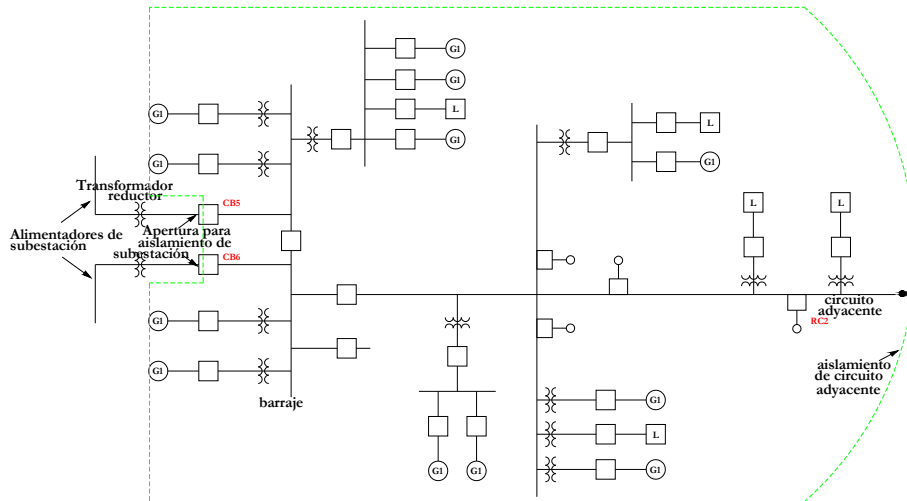


Figura 2.19 Configuración tipo circuito colindante de una microrred. (IEEE std 1547.4, 2011)

1. Modo de paralelaje normal

Una microrred que opera en modo normal de paralelaje, está conectada de forma regular a un sistema eléctrico de potencia. Para una operación normal de las fuentes distribuidas diseñadas para un funcionamiento en modo aislado, éstas deben cumplir con el estándar *IEEE std. 1547-2003* y es necesario contar con la mayor cantidad de información disponible para lograr un correcto aislamiento de la red de acuerdo a la planificación correspondiente. (IEEE std 1547.4, 2011)

2. Modo de transición para aislamiento

En el modo de transición para aislar una microrred de un sistema eléctrico de potencia, existen eventos programados que son creados intencionalmente con un tiempo de duración planificado y los no programados que se originan por alguna pérdida de potencia en el sistema o por alguna eventualidad asociada a fallas en los equipos. En esta transición las fuentes distribuidas deben estar disponibles y tener la capacidad suficiente para suministrar el voltaje y la frecuencia necesarios para el correcto funcionamiento de las cargas en modo aislado. En este modo de transición son muy importantes los dispositivos de interconexión en modo aislado y los relés de protección, mismos que deben operar exitosamente en todo momento. (IEEE std 1547.4, 2011)

3. Modo aislado

Una microrred en modo aislado debe proveer potencia activa y reactiva a las cargas conectadas en ella de manera que se garanticen las condiciones normales de operación de éstas, además del rango de voltaje y frecuencia perfectamente regulados. En este modo de operación la microrred aislada tiene un adecuado margen de reserva de cargabilidad, de magnitud, de confiabilidad de cargas y de disponibilidad de fuentes distribuidas. Adicionalmente este modo de operación usa diferentes técnicas para balancear la carga y la generación, por ejemplo la administración, el deslastre y el monitoreo de cargas.

4. Modo de reconexión

Una microrred debe operar en reconexión para formar parte nuevamente del sistema eléctrico de potencia principal. Para ellos deben existir las condiciones necesarias para que exista la sincronización de la microrred aislada con el sistema eléctrico. Esta sincronización debe cumplir con el estándar *ANSI C84.1-2006* que detalla los rangos de voltaje, frecuencia y ángulo de fase de los dos sistemas, una vez que estos valores estén dentro de los límites permitidos, se inicia la reconexión. Algunos equipos de reconexión tienen un retardo en el inicio de la reconexión una vez que se ha reestablecido el servicio eléctrico en el sistema principal para asegurar un óptimo funcionamiento posterior del sistema.

Una vez que se ha logrado el paralelaje de la microrred, las fuentes distribuidas deben regresar al estado de funcionamiento óptimo según IEEE 1547, con los requerimientos de tiempo del sistema eléctrico de potencia principal.

2.1.5 Sistemas de Generación Distribuida

Un sistema de generación distribuida, es un sistema de generación de energía eléctrica que está geográficamente distribuida a través de una red, generalmente más pequeña en escala que una planta de generación tradicional y ubicada en las cercanías de las cargas de los consumidores, incluso en las locaciones de éstas. El diagrama de bloques detallado en la figura 2.20, permite conocer la constitución de éste sistema.

Los sistemas convencionales de generación de energía eléctrica, como la generación hidráulica, la generación térmica, por biomasa o nuclear, que por lo general son plantas de generación de gran tamaño, son sistemas dedicados a la generación de energía eléctrica con potencias del orden de las decenas de MVAs y a los servicios de grandes consumidores como ciudades capitales y grandes industrias.

Los sistemas de generación distribuida han motivado el desarrollo de tecnologías alternativas de generación de energía eléctrica, pero a una escala menor, debido a su alto costo y a su desarrollo mediano, que involucra rendimientos aún menores

comparados a los sistemas convencionales. Dentro de estas energías alternativas se encuentran la eólica, solar, micro hidráulicas, celdas de carga, las cuales difieren de las anteriores en las propiedades eléctricas del generador y la disponibilidad de las fuentes de energía.

Los sistemas de generación distribuida necesitan de interfaces de electrónica de potencia para convertir la energía obtenida en potencia de corriente alterna acorde a la red principal existente. Los rectificadores e inversores de voltaje son lo que tienen mayor presencia en estos sistemas. Adicionalmente estas interfaces deben contener funciones de protección para los dos sistemas tanto para la microrred, así como también para el sistema eléctrico de potencia, para permitir la desconexión y el paralelaje entre sí.

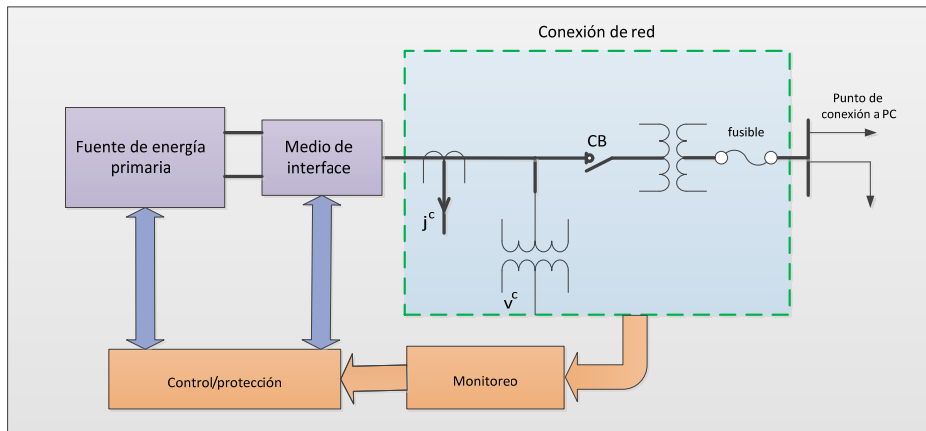


Figura 2. 20 Representación en diagrama de bloques de una unidad de generación distribuida. (Katiraei, Irvani, Hatziargyriou, & Dimeas, 2008)

2.2. Controladores de lógica difusa

2.2.1 Introducción a la teoría de control de lógica difusa

La teoría de lógica difusa, se fundamenta en el significado de la palabra “difusa”, que como definición se puede citar que: se caracteriza como algo que puede ser definido de forma imprecisa, un estado de información borroso o confuso.

A partir de este concepto se puede destacar que un sistema difuso es un sistema precisamente definido mientras que un controlador difuso es un tipo de control no lineal que también es precisamente definido, a pesar de que en el contexto de su definición se describe como algo no preciso. Sin embargo, se utiliza esta imprecisión para dar a conocer ciertas acciones del mundo real que son muy difíciles de definir con una alta precisión y para las cuales se utilizan aproximaciones para obtener modelos razonables.

Los sistemas difusos son sistemas basados en reglas o conocimientos. La base de estos sistemas, está compuesta por las reglas SI-ENTONCES (*IF-THEN*). Las reglas son enunciadas de tal manera que algunas palabras son caracterizadas por funciones de pertenencia continuas. Estas reglas pasarán a ser luego la base del conocimiento del sistema de control difuso. (Wang, 1997)

Un controlador difuso se define como un mecanismo de toma de decisiones artificial que provee una metodología formal para representar, manipular e implementar el conocimiento heurístico humano acerca de cómo controlar un sistema. (Passino & Yurkovich, 1998)

2.2.2 Conceptos básicos de conjuntos de lógica difusa

La lógica difusa prácticamente se convierte en una generalización de la lógica booleana. En estas dos teorías es necesario revisar conceptos de teoría de conjuntos, que para este análisis se transforman en clásicos y difusos, la definición de elementos y el universo al cual pertenecen.

En un conjunto clásico se puede definir la función de pertenencia que rige para los elementos del universo. Esta función de pertenencia tiene un valor de 1 cuando el elemento está dentro del conjunto y un valor de cero cuando está fuera de él. Los límites de un conjunto clásico son muy rígidos y excluyentes.

En un conjunto difuso se cumple parcialmente esta función de pertenencia, puesto que un elemento puede estar dentro de un conjunto o estar dentro del complemento de él, en este caso los valores de pertenencia varían en un intervalo [0,1]. Este intervalo para definir al elemento de un conjunto en el universo de discurso permite considerar opciones, ya que los límites del conjunto son suaves e imprecisos. La figura 2.21 indica la diferencia entre un conjunto clásico y un conjunto difuso.

El grado de pertenencia o membresía, es el valor numérico que se asigna como pertenencia a un conjunto difuso para una variable lingüística.

La variable lingüística es una palabra que toma un valor lingüístico debido a la acción que representa, en lugar de un valor numérico. En una función de membresía los conjuntos tienen relación con las variables lingüísticas.

2.2.2.1 Definición de conjunto difuso

Si A representa un conjunto difuso del universo de discurso U , su función de membresía denotada por la letra μ , se puede expresar como:

$$\mu_{A_i}: U_i \rightarrow \{0,1\} \quad (2.1)$$

Al valor de $\mu_{A_i^j}(u_i)$ para el conjunto difuso A se denomina función o grado de membresía, donde $u_i \in U$.

Un conjunto difuso A_i^j en U_i se representa por un conjunto de pares ordenados de un elemento cualquiera u_i y el valor de su función de membresía:

$$A_i^j = \{(u_i, \mu_{A_i^j}(u_i))\} \mid u_i \in U_i \quad (2.2)$$

Cuando U es continuo:

$$A = \int_U \mu_{A_i^j}(u_i) / u_i \quad (2.3)$$

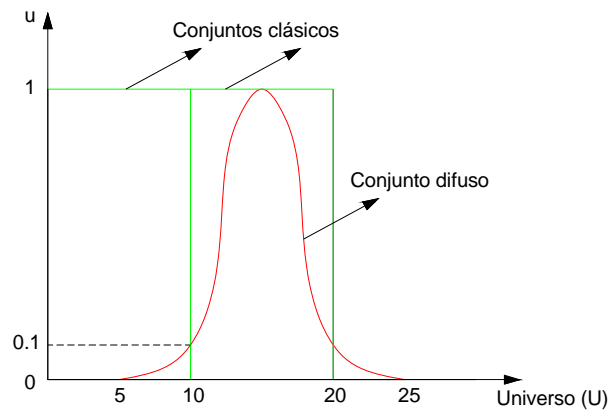


Figura 2. 21 Diferencia entre conjunto clásico y difuso. (Kasabov, 1998)

2.2.2.2 Operaciones con lógica difusa

Las operaciones básicas de lógica clásica también aplican para lógica difusa, pero tomando en cuenta el concepto de grado de pertenencia de conjuntos. Se toma como ejemplo la variable lingüística temperatura interior de un ambiente detallada en la figura 2.22, con ello se definen los valores lingüísticos fría, agradable y calurosa mostradas en la figura 2.23, las cuales están dentro de la clasificación por su monotonía como creciente, decreciente y unimodal. Un universo de discurso más detallado para este mismo ejemplo, se indica en la figura 2.24 (Mugica Alvarez, 1995)

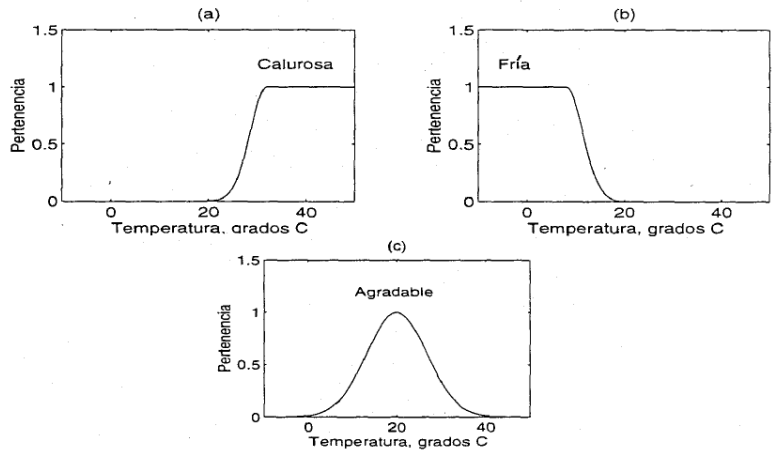


Figura 2.22 Tipos de valores lingüísticos (a) creciente, (b) decreciente y (c) unimodal. (Mugica Alvarez, 1995)

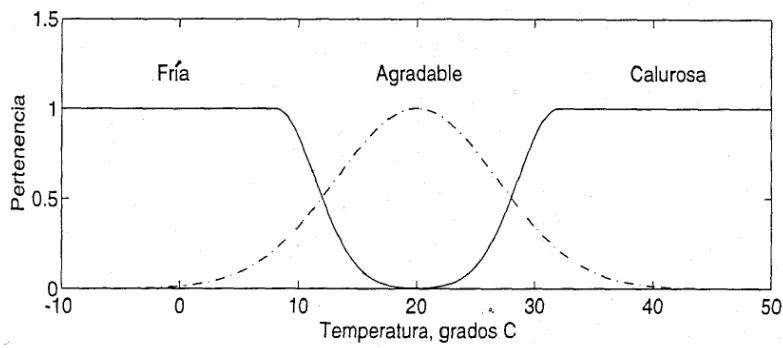


Figura 2.23 Universo de discurso para los tres valores lingüísticos: fría, agradable y calurosa. (Mugica Alvarez, 1995)

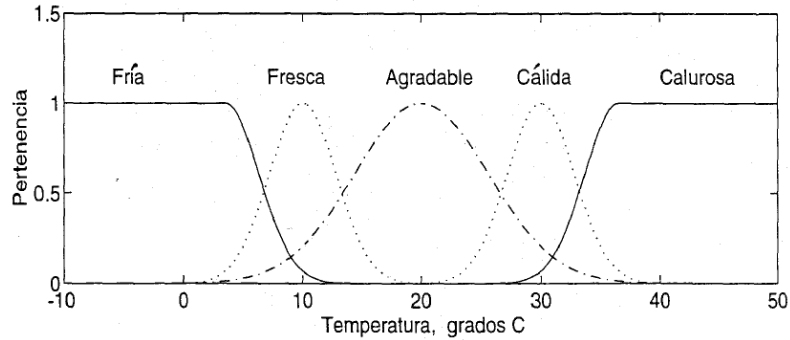


Figura 2.24 Universo de discurso para cinco valores lingüísticos: fría, fresca, agradable, cálida y calurosa. (Mugica Alvarez, 1995)

a) Complemento difuso

El complemento difuso de un conjunto A_i^1 tiene una función de membresía detallada por la ecuación e indicada por la figura 2.25: (Passino & Yurkovich, 1998)

$$1 - \mu_{A_i^1}(u_i) \quad (2.4)$$

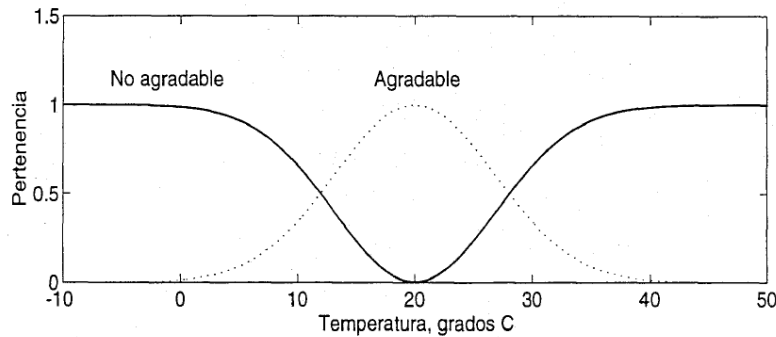


Figura 2.25 Operación complemento difuso del valor lingüístico agradable. (Mugica Alvarez, 1995)

b) Intersección difusa (conjunción)

La intersección difusa entre dos conjuntos difusos $A_i^1 \cap A_i^2$, se expresa a través de dos operadores, de acuerdo al ejemplo, en la figura 2.26, como el mínimo y el producto entre estos conjuntos: (Passino & Yurkovich, 1998)

- Mínimo $\mu_{A_i^1 \cap A_i^2}(u_i) = \min \{ \mu_{A_i^1}(u_i), \mu_{A_i^2}(u_i) \}$ (2.5)

- Producto $\mu_{A_i^1 \cap A_i^2}(u_i) = \mu_{A_i^1}(u_i) \mu_{A_i^2}(u_i)$ (2.6)

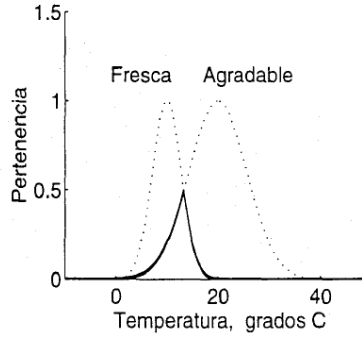


Figura 2.26 Operación intersección difusa entre los valores lingüísticos fresca y agradable. (Mugica Alvarez, 1995)

c) Unión difusa (disyunción)

La unión difusa entre dos conjuntos difusos $A_i^1 \cup A_i^2$, se expresa a través de dos operadores: Máximo y mínimo como se indica en (2.7) y (2.8) respectivamente y detallada en la figura 2.27 para el ejemplo utilizado. (Passino & Yurkovich, 1998)

$$\mu_{A_i^1 \cup A_i^2}(u_i) = \max \{ \mu_{A_i^1}(u_i), \mu_{A_i^2}(u_i) \} \quad (2.7)$$

$$\mu_{A_i^1 \cup A_i^2}(u_i) = \mu_{A_i^1}(u_i) + \mu_{A_i^2}(u_i) - \mu_{A_i^1}(u_i), \mu_{A_i^2}(u_i) \quad (2.8)$$

d) Subconjunto difuso

Se tienen dos conjuntos A_i^1 y A_i^2 de la variable $u_i \in U_i$ con funciones de membresía $\mu_{A_i^1}(u_i)$ y $\mu_{A_i^2}(u_i)$, los cuales cumplen con lo siguiente: $A_i^1 \subset A_i^2$ si $\mu_{A_i^1}(u_i) \leq \mu_{A_i^2}(u_i)$ para todo $u_i \in U_i$. (Passino & Yurkovich, 1998)

e) Producto cartesiano difuso

Sirve para realizar operaciones en varios universos, su aplicación es importante en las premisas de las reglas ya que las variables son de distintos universos. La figura 2.28 esquematiza el producto cartesiano entre los valores lingüísticos del ejemplo, fresca y agradable. (Passino & Yurkovich, 1998)

$$\mu_{A_i^1 \times A_i^k \dots \times A_i^l}(u_i) = \mu_{A_i^1}(u_1) * \mu_{A_i^k}(u_2) * \dots * \mu_{A_i^l}(u_n) \quad (2.9)$$

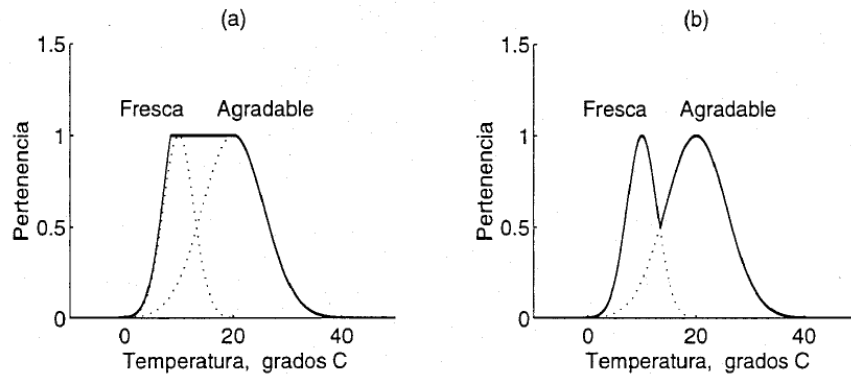


Figura 2. 27 Operación unión difusa entre las valores lingüísticos fresca y agradable. (Mugica Alvarez, 1995)

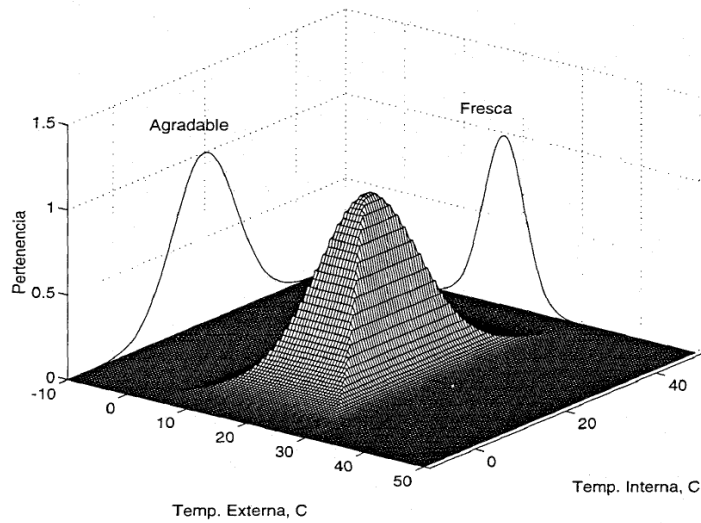


Figura 2. 28 Producto cartesiano difuso entre los valores lingüísticos fresca y agradable. (Mugica Alvarez, 1995)

2.2.2.3 Función de Membresía

Se conoce como función de membresía a la función μ_i asociada a una variable lingüística A_i^j y que mapea el universo de discurso U_i a valores en el intervalo $[0,1]$ dentro de la gráfica de dominios. Estas funciones generalmente son escogidas de manera heurística, es decir de acuerdo a la experiencia. Existen algunos modelos de funciones

para representar una función de membresía, las más utilizadas quizá por su simplicidad en el análisis matemático son: triangular, trapezoidal y gaussiana.

- **Función de membresía triangular**

$$\mu_{A_i}(u_i) = \begin{cases} \frac{u_i - a}{b - a}, & a \leq u_i \leq b; \\ \frac{c - u_i}{c - b}, & b < u_i \leq c; \\ 0, & u_i < a \text{ o } u_i > c \end{cases} \quad (2.10)$$

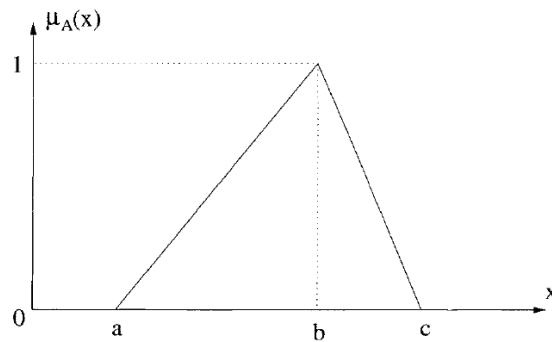


Figura 2. 29 Función de membresía triangular. (Zhang & Liu, 2006)

- **Función de membresía trapezoidal**

$$\mu_{A_i}(u_i) = \begin{cases} 0, & u_i < a; \\ \frac{u_i - a}{b - a}, & a \leq u_i < b; \\ 1, & b \leq u_i \leq c; \\ \frac{d - u_i}{d - c}, & c < u_i \leq d; \\ 0, & u_i > d \end{cases} \quad (2.11)$$

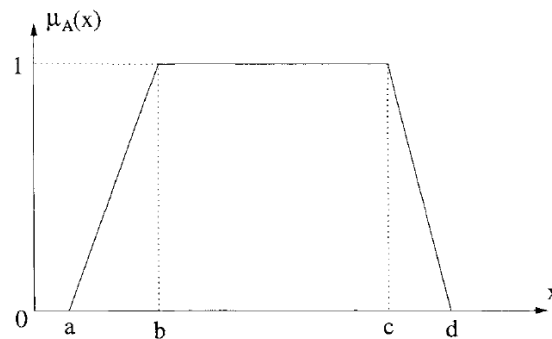


Figura 2. 30 Función de membresía trapezoidal. (Zhang & Liu, 2006)

- **Función de membresía de distribución normal o gaussiana**

$$\mu_{A_i}(u_i) = e^{-\left(\frac{u_i - a}{b}\right)^2}, \quad b > 0 \quad (2.12)$$

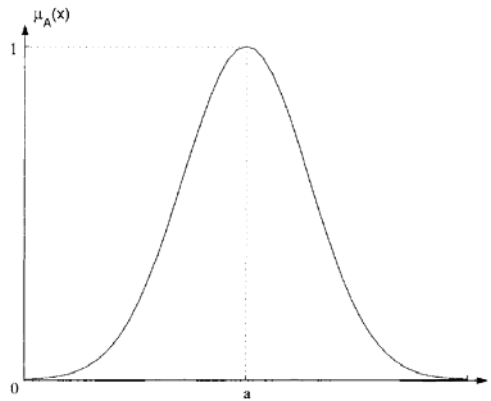


Figura 2.31 Función de membresía gaussiana. (Zhang & Liu, 2006)

2.2.3 Estructura de operación de un controlador de lógica difusa

En la arquitectura de un controlador difuso se distinguen 4 componentes que tienen una función específica para el desarrollo del proceso de control, estos componentes están especificados en la figura 2.32.

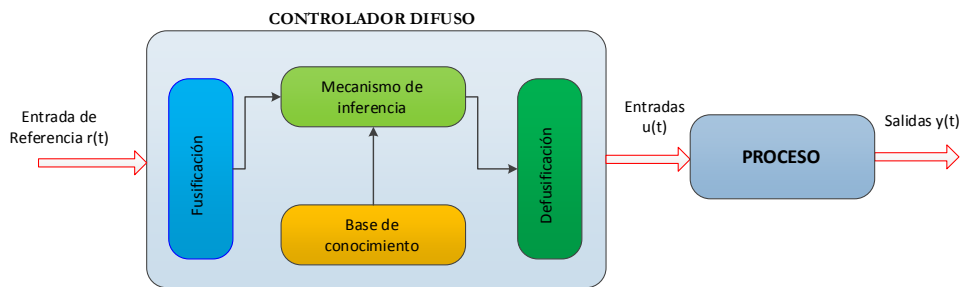


Figura 2.32 Diagrama de bloques de un controlador difuso

2.2.3.1 Base de reglas o base del conocimiento

Contiene el conocimiento en forma de conjunto de reglas, para determinar cuál es la mejor para controlar el sistema. Las reglas tienen el esquema de Si **premisa** entonces **consecuencia**.

Para determinar estas reglas es importante la experiencia y el conocimiento del

ingeniero de control, en este proceso es de vital importancia la información que pueda brindar el operador a través de su conocimiento de la dinámica del mismo, junto con la modelación a partir de los datos de entrada y salida del proceso.

2.2.3.2 Proceso de fusificación

Convierte los valores leídos de las variables del proceso necesarias para el control del proceso, a grados de membresía o pertenencia a un conjunto difuso. Existen tres tipos de fusificadores: (Wang, 1997)

- Fusificador singleton, que por su facilidad, simplifica en gran medida el cálculo llevado a cabo en el mecanismo de inferencia para algún tipo de función de membresía que puedan adoptar las reglas *si-entonces*.
- Fusificador gaussiano, simplifica también el cálculo en el mecanismo de inferencia solamente si las funciones de membresía son del tipo gaussiano
- Fusificador triangular, al igual que el anterior, facilita el cálculo solamente si las funciones de membresía son del tipo triangular.

Los fusificadores gaussiano y triangular, pueden suprimir el ruido en el ingreso, en cambio el singleton no.

2.2.3.3 Mecanismo de inferencia

Evalúa cada una de las reglas *si-entonces* de inferencia difusa y determina cuales son las más importantes en el transcurso de un tiempo determinado y decide cual debe ser la salida hacia la planta.

Existen dos formas para inferir una base de reglas: Inferencia basada en composición e inferencia basada en una regla individual. (Wang, 1997)

- En la inferencia basada en composición todas las reglas de un conjunto son combinadas en una sola relación difusa la cual es vista como una sola regla difusa *si-entonces*.
- En la inferencia basada en una regla individual, cada regla del conjunto difuso determina un conjunto difuso de salidas y la salida de todo el mecanismo de inferencia es la combinación de un número de conjuntos difusos individuales.

2.2.3.4 Proceso de defusificación

Esta interface convierte los resultados alcanzados por el mecanismo de inferencia en las entradas a la planta. (Passino & Yurkovich, 1998). Los dos métodos

más importantes para defusificar son:

- **Método Mamdani (centroide)**

Este método obtiene la salida del controlador de lógica difusa, calculando el centro de gravedad y^* de la función resultante de salida; este método es muy utilizado porque entrega una solución única.

$$y^* = \frac{\int_V y \mu_{B'}(y) dy}{\int_V \mu_{B'}(y) dy} \quad (2.13)$$

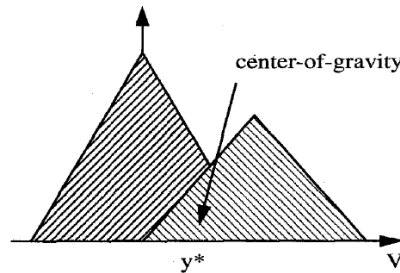


Figura 2. 33 Representación gráfica del defusificador Mamdani. (Wang, 1997)

- **Método del máximo valor de membresía**

El método de máximo valor de membresía, escoge el pico máximo de la función generada de salida de todos los grupos. Es un método sencillo y de cálculo simple, pero un pequeño cambio en el conjunto B' origina variaciones de magnitudes altas de y^* .

$$y^* = \frac{\int_{hgt(B')} y dy}{\int_{hgt(B')} dy} \quad (2.14)$$

2.2.4 Tipos de controladores de lógica difusa

Existen varios tipos de controladores de lógica difusa, incluso pueden ser combinados con los conceptos básicos de controladores convencionales como PI, PD y PID. Básicamente existen dos tipos de controladores de lógica difusa de los cuales nace toda la información disponible sobre control difuso, el controlador tipo Mamdani y el controlador tipo Takagi-Sugeno. Estos modelos se caracterizan por las bases de reglas difusas, ya que las premisas de cada regla representan conjuntos difusos.

2.2.4.1 Controlador tipo Mamdani

Un controlador tipo Mamdani se basa en un conjunto de reglas de lógica difusa, en el cual se determinan variables lingüísticas que serán analizadas a partir de una valorización de la acción que representan. Estas reglas son del tipo Si *premisa* entonces *consecuencia*. Este resultado que no es numérico, se lo debe transformar a uno que sí lo sea, con ello la salida del controlador podrá controlar la planta para el cual fue diseñado. El sistema a controlarse debe ser un sistema de múltiples entradas, una sola salida, MISO. Matemáticamente una regla de controlador Mamdani tiene el siguiente modelo:

$$SI A_i^1(\mu_1), A_i^2(\mu_2), \dots, A_i^j(\mu_i) \text{ ENTONCES } B_i^j$$

La consecuencia de las reglas de este controlador siguen siendo variables lingüísticas que tienen un valor simbólico por la acción que significan y siguen formando un conjunto difuso.

2.2.4.2 Controlador tipo Takagi-Sugeno

En un controlador tipo Takagi-Sugeno, el conjunto de reglas de lógica difusa se mantiene, las variables lingüísticas de igual manera, solamente existe un cambio en los valores de salida, pues a diferencia del controlador tipo Mamdani, éste controlador tiene como consecuencia de sus reglas un valor numérico, que es representado por una función lineal a partir de las entradas, cada regla tiene una ecuación lineal.

Dentro de su esquema, este controlador ya no necesita un bloque defusificador, pues las variables de salida son numéricas y se las envía directamente a la planta.

$$SI A_i^1(\mu_1), A_i^2(\mu_2), \dots, A_i^j(\mu_i) \text{ ENTONCES } Y_i^j = f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_i)$$

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA DESLASTRE DE CARGAS EN EL MODELO DE MICRORRED AISLADA

En este capítulo se propone el diseño de un controlador difuso para aplicarlo en una microrred modelo. Se detallan las especificaciones técnicas de la microrred, su comportamiento mediante una simulación utilizando el software computacional *MATLAB* y su entorno de diagrama de bloques *Simulink*.

Esta microrred representa la planta para la arquitectura de control propuesta y ofrece facilidades para generar un aislamiento del sistema eléctrico de potencia del que forma parte. Gracias a ello se pueden generar escenarios adecuados para la aplicación de deslastre de cargas y mantener estable la microrred en modo aislado.

La planta modelo se caracteriza por estar parametrizada con variables eléctricas y mecánicas similares a las de un sistema real. Está conformada por varias fuentes de generación distribuida como: motor-generador diésel, generador eólico, módulo de celdas fotovoltaicas y bancos de baterías de almacenamiento.

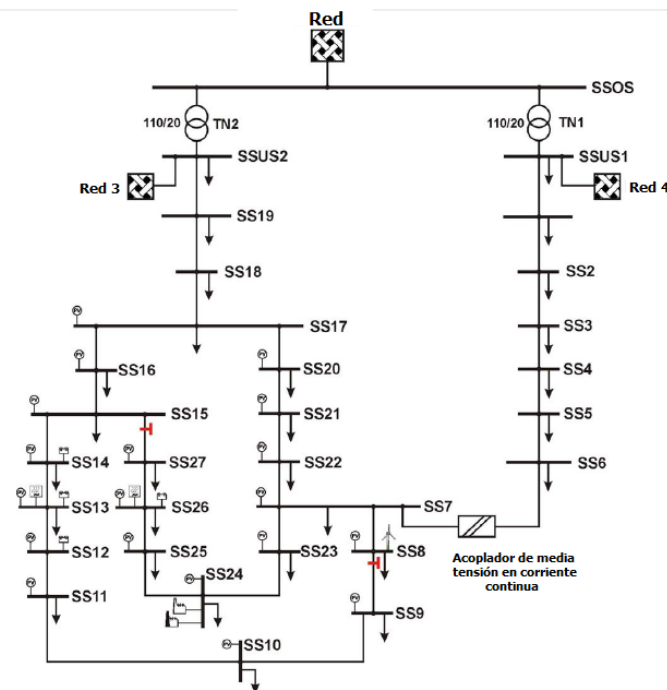
El objetivo principal con el diseño del controlador difuso, es evitar que el valor de la potencia generada en *p.u.* por el generador principal diésel, sobrepase su valor máximo de 0.2 p.u. y ocasione severos daños en su sistema mecánico y de control, además de los daños en la red eléctrica. El sistema de control gobernará íntegramente el proceso de deslastre de cargas.

Posteriormente se realiza un entrenamiento y verificación de su comportamiento y se culmina el capítulo con las simulaciones de la microrred modelo aplicando el controlador difuso diseñado para el efecto.

3.1 Modelo de referencia de la microrred de análisis

El modelo de la microrred en media tensión sobre la cual se realiza la implementación del controlador difuso, es un modelo de referencia presentado en (Minchala Avila, 2014). El modelo está desarrollado en la plataforma de pruebas SimpowerSystems de Simulink, con el fin de tener una planta que pueda ser utilizada para la implementación en diferentes escenarios de sistemas de control no lineal.

Esta plataforma de pruebas está diseñada para simular dos modos de operación distintos de una microrred, conectado a la red y aislado de la red, y se basa en investigaciones de modelos de referencia para integrar fuentes de energía distribuida bajo la filosofía del *CIGRÉ – Task force (TF)C6.04.02.*, tanto de baja como de media tensión, como se indica en la figura 3.1. Este modelo de referencia de red de distribución rural en media tensión es una parte de un sistema eléctrico real instalado en Alemania. Los parámetros de la red, de las cargas y de las unidades de generación distribuida en *p.u.*, se han tomado de éste modelo y se resumen en las tablas 3.1 y 3.2. (Rudion, Orths, & Styczynski, 2006)



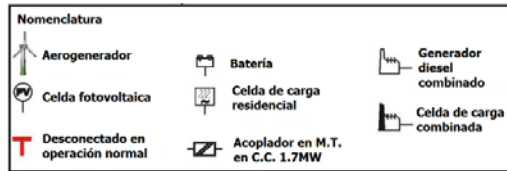


Figura 3. 1 Red de prueba derivada de una red en media tensión en Alemania. (Rudion, Orths, & Styczynski, 2006)

POTENCIA INDIVIDUAL		
# Carga	Tipo de carga	Pmax (p.u.)
1	Domiciliaria	0.15000
2	Industrial	0.05000
3	Domiciliaria	0.00276
4	Industrial	0.00224
5	Domiciliaria	0.00432
6	Domiciliaria	0.00725
7	Domiciliaria	0.00550
8	Industrial	0.00077
9	Domiciliaria	0.00588
10	Industrial	0.00574
11	Industrial	0.00068
12	Domiciliaria	0.00477
13	Domiciliaria	0.00331
14	Domiciliaria	0.15000
15	Industrial	0.05000
16	Industrial	0.00032
17	Industrial	0.00330
18	Domiciliaria	0.00207

Tabla 3. 1 Parámetros de las cargas de la microrred de referencia. (Minchala Avila, 2014)

En esta microrred el flujo de potencia está acoplado, de manera que la estabilidad del sistema está garantizada. El éxito de operación de esta microrred está en asegurar que las cargas críticas tengan prioridad en el suministro de energía mientras la red esté operando. Durante la operación normal de conexión de la red, si la calidad de energía es baja, un seccionador de operación bajo carga aislará intencionalmente la microrred del sistema eléctrico principal. Este aislamiento intencional también puede ser

planificado, en este caso para efectos de simulación, la desconexión de la red principal de la microrred sucederá a las 02:00 AM y se realiza mediante la desconexión de los interruptores termomagnéticos CB1-1 y CB-2. (Minchala Avila, 2014)

V	δ (grados)	Potencia real generada	Potencia reactiva generada	Consumo de potencia real	Consumo de potencia reactiva	# barraje	Tipo de barraje
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	B
1.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0410	1	PQ
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0088	0.0024	10	PQ
1.0	0.0	0.0	0.0	0.2000	0.0470	11	PQ
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0003	0.0002	12	PQ
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0054	0.0026	13	PQ
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0000	0.0000	2	PQ
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0030	0.0021	3	PQ
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0043	0.0011	4	PQ
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0073	0.0018	5	PQ
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0055	0.0014	6	PQ
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0008	0.0005	7	PQ
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0059	0.0015	8	PQ
1.0	0.0	0.05	0.0	0.0057	0.0036	9	PQ

Tabla 3. 2 *Parámetros iniciales para cálculo de flujo de potencia de la microrred de referencia.*
(Minchala Avila, 2014)

Este modelo de referencia está diseñado de manera que cuando exista la desconexión para modo aislado, la principal fuente de generación distribuida, un generador diésel, pase a convertirse en la fuente principal y será la encargada de regular el voltaje y la frecuencia de la microrred, garantizando que la potencia generada cubra la demanda; en caso de que ésta no sea suficiente, es necesario aplicar el deslastre de cargas. (Minchala Avila, 2014)

La figura 3.2, muestra la configuración de la microrred de referencia. Está constituida por dos alimentadores con voltaje nominal de 22kV, suministrados por la potencia proveniente de una subestación de distribución a 110kV. Adicionalmente en el alimentador de la izquierda se incorpora una red de fuentes de energía renovables como: celdas fotovoltaicas, aerogenerador, sistemas de almacenamiento de baterías, y un generador distribuido de energía. Cada generador distribuido tiene su propio controlador distribuido. En esta microrred, no se considera la influencia del retardo por propagación

en las líneas de subtransmisión, puesto que sus longitudes se consideran menores a 30 Km. (Minchala Avila, 2014)

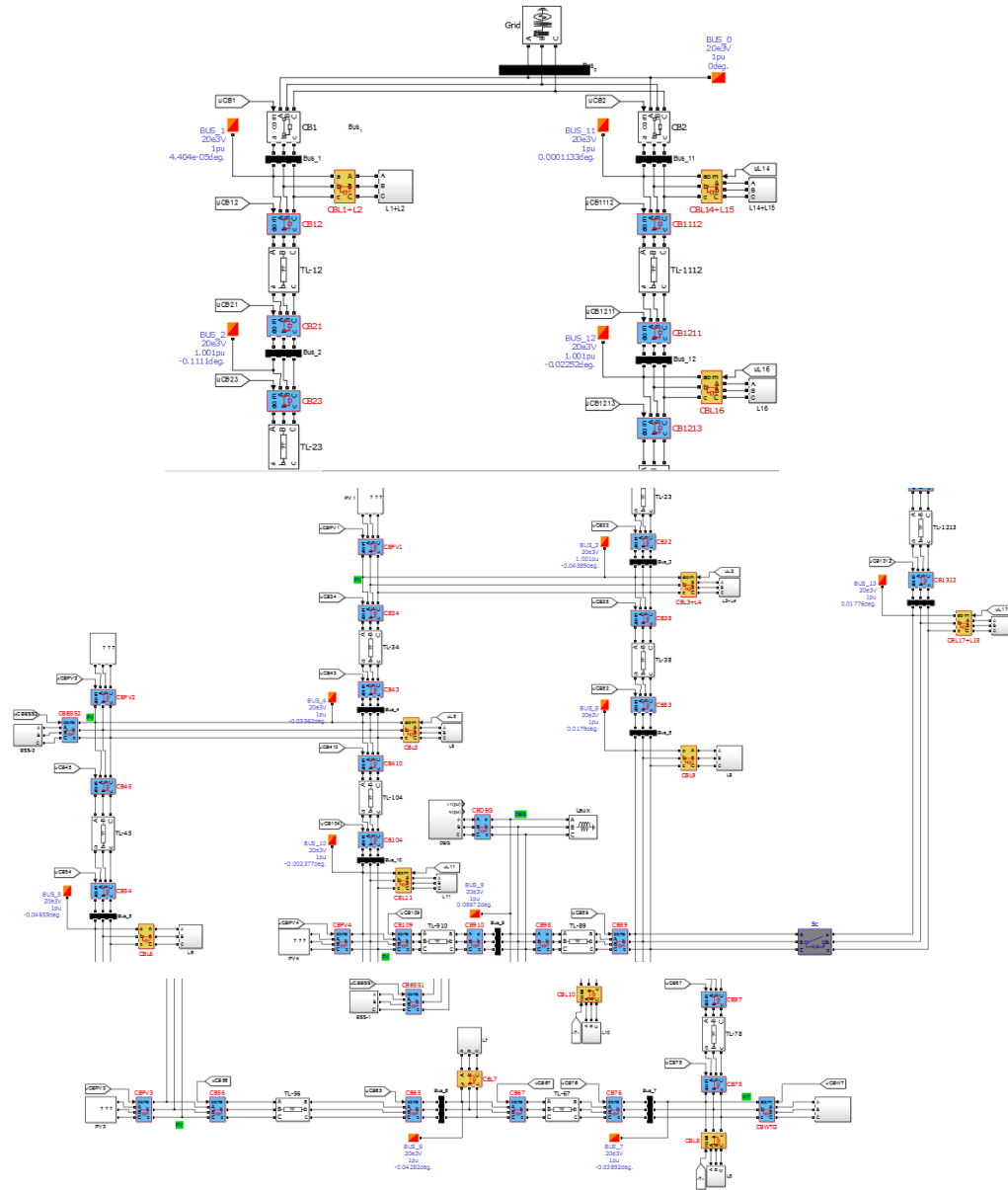


Figura 3. 2 Microrred de referencia, diagrama en Simulink. (Minchala Avila, 2014)

3.1.1 Justificación de la potencia del generador diesel de referencia

La potencia del generador diesel de referencia para la microrred objeto de este estudio, tiene un valor de 0.2 en p.u. Este valor se obtiene a partir de los resultados del análisis del flujo de potencia del alimentador que opera en modo aislado. (Minchala Avila, 2014)

Este análisis se basa en el estudio del índice de estabilidad del voltaje estático del generador diesel. La figura 3.3 indica las variables del modelo simplificado generador-carga, de él se obtienen las relaciones para calcular éste índice.

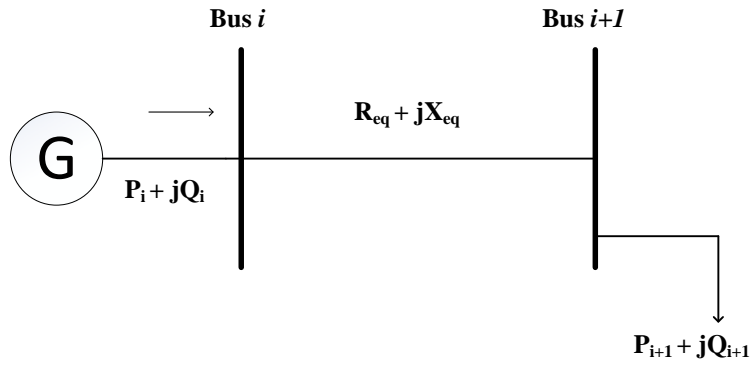


Figura 3.3 Modelo simplificado generador-carga

$$P_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} R_{eq} + P_{i+1} \quad (3.1)$$

$$Q_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} X_{eq} + Q_{i+1} \quad (3.2)$$

$$Q_i = \frac{X_{eq}}{R_{eq}} (P_i - P_{i+1}) + Q_{i+1} \quad (3.3)$$

Reemplazando (3.2) en (3.1):

$$P_i = \frac{R_{eq}}{V_i^2} \left[P_i + \left(\frac{X_{eq}}{R_{eq}} (P_i - P_{i+1} + Q_{i+1}) \right)^2 \right] + P_{i+1} \quad (3.4)$$

Para $V_i = 1$, se tiene:

$$a = (R_{eq}^2 + X_{eq}^2) \quad (3.5)$$

$$b = -(2X_{eq}^2 P_{i+1} - 2R_{eq} X_{eq} Q_{i+1} + R_{eq}) \quad (3.6)$$

$$c = X_{eq}^2 P_{i+1}^2 + R_{eq}^2 Q_{i+1}^2 - 2R_{eq} X_{eq} + R_{eq} P_{i+1} \quad (3.7)$$

$$P_i = -\frac{b}{2a} \pm \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.8)$$

Las ecuaciones para P_i y Q_i deben cumplir con la particularidad de $b^2 - 4ac > 0$, para garantizar raíces reales. A partir de estas ecuaciones se precisa obtener L , que es el índice de estabilidad de voltaje estático como:

$$L = 4(X_{eq} P_L - R_{eq} Q_L)^2 + X_{eq} Q_L + R_{eq} P_L \quad (3.9)$$

Donde P_L y Q_L son las potencias totales activa y reactiva de la carga del sistema de distribución.

Esta última ecuación es mejorada por (Chen, Chen, Shi, & Duan, 2006) incluyendo una dependencia de las magnitudes de voltaje de los nodos del sistema, como lo indica (Minchala Avila, 2014).

$$L_{i+1} = 4 \frac{(X_{eq} P_L - R_{eq} Q_L)^2 + (X_{eq} Q_L + R_{eq} P_L) V_i^2}{V_i^4} \quad (3.10)$$

A partir de todas estas ecuaciones, se establece el valor recomendado para la potencia del generador diesel. Los resultados del análisis del flujo de potencia para el alimentador en modo aislado son (Minchala Avila, 2014):

$$P_{GEN} = 2.42 \text{ MW} \quad Q_{GEN} = 0.01 \text{ MVAR} \quad P_{loss} = 0.01 \text{ MW} \quad Q_{loss} = 0.0 \text{ MW}$$

$$V_B = 20 \text{ kV} \quad S_B = 5 \text{ MVAR} \quad Z_B = 80 \Omega$$

$$Z_{eq} = 165.3 \Omega \quad R_{eq} = 2.0661 \quad X_{eq} = 0.0085$$

Según la ecuación de balance de potencias:

$$P_{DEG} + P_{WT} + P_{PV1,2,3} \pm P_{BSS1,2} = P_L$$

Donde:

P_{DEG} = Potencia del generador principal diesel
 P_{WT} = Potencia de los generadores eólicos
 $P_{PV1,2,3}$ = Potencia de las celdas fotovoltaicas
 $P_{BSS1,2}$ = Potencia de las baterías
 P_L = Potencia de la carga

Con los valores promedio en p.u. para cada fuente de generación de (Minchala Avila, 2014):

$$P_{WT} = 0.15 \quad P_{PV1,2,3} = 0.045$$

$$P_{BSS1,2} = 0.035 \text{ en modo descarga}$$

$$P_{BSS1,2} = -0.015 \text{ en modo carga}$$

$$\text{Los límites de la magnitud del voltaje } 0.95 \leq |V| \leq 1.05$$

El máximo valor de la potencia del generador, se calcula mediante un procedimiento de optimización aplicado al índice de estabilidad del voltaje. Este algoritmo de optimización está indicado en (Minchala Avila, 2014).

$$\text{Minimizar } |1 - L| P_L Q_L V$$

Sujeto a:

$$0 < P_L < P_{max}$$

$$0 < Q_L < Q_{min}$$

$$0.95 \leq |V| \leq 1.05$$

De aquí se obtiene que el rango de la potencia del generador diesel debe estar entre los valores:

$$0.12 \leq P_{DEG} \leq 0.17$$

3.2 Diseño del sistema de control de lógica difusa

3.2.1 Variables de entrada

El controlador difuso está formado por 4 bloques que se definen de acuerdo a las variables a ser analizadas. Según su diagrama de bloques, es necesario especificar a partir de la microrred modelo, las siguientes variables:

- Entradas de referencia
- Bloque de fusificación
- Base de reglas
- Mecanismo de inferencia
- Bloque de defusificación
- Salida hacia el proceso

La microrred de referencia, es un sistema tipo SIMO, una entrada, múltiples salidas. A partir del flujo de potencia de la microrred, se obtiene el perfil de potencia del generador de energía distribuida. El aislamiento de la red está programado para las 02:00 AM.

En la figura 3.4 se muestra el perfil de la potencia entregada a la microrred por el generador diésel. Se observa que la microrred se desconecta del sistema cuando $t = 16.65$ segundos, el generador diésel empieza el suministro de energía a las cargas conectadas en la microrred. Se observa además que la potencia generada supera el valor de 0.2 p.u. en $t = 50$ segundos y se mantiene con una aleatoriedad durante toda la simulación hasta $t = 190$ segundos. Para efectos de esta simulación se denomina a la variable de entrada como PDEG.

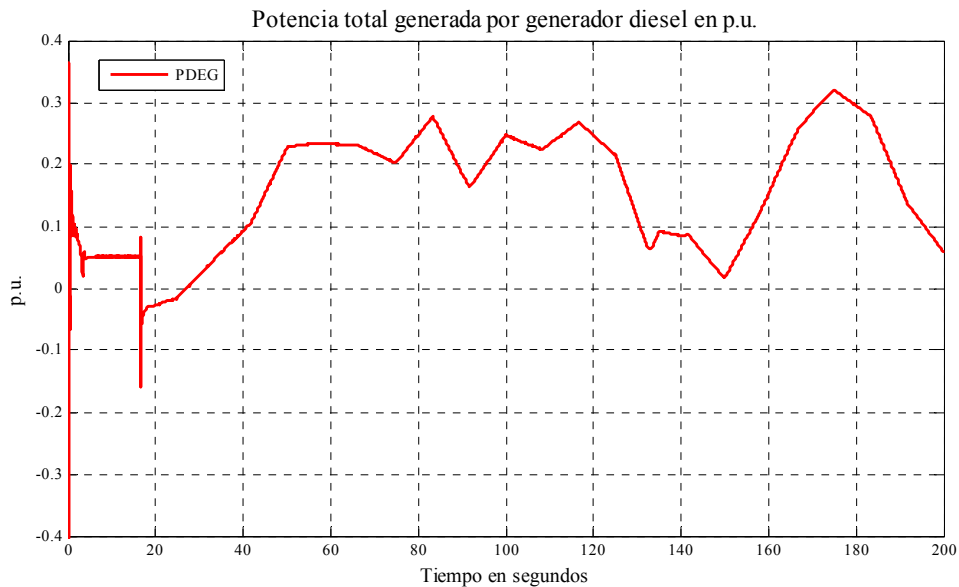


Figura 3. 4 Perfil de potencia del generador diésel PDEG

Para el diseño del controlador difuso, es necesario analizar también la variación en el tiempo de la potencia del generador. La figura 3.5 muestra el perfil de ésta variación $\frac{dP_{DEG}}{dt}$, con esto se obtiene la segunda variable para el proceso que para efectos de simulación se denomina con dPDEG.

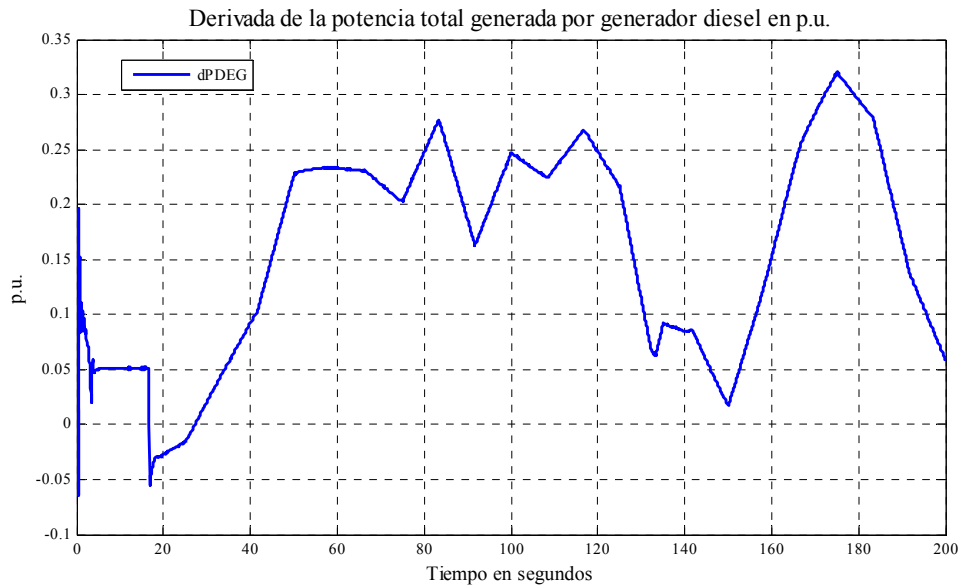


Figura 3.5 Perfil de la derivada de potencia del generador diésel dPDEG

La microrred está diseñada con interruptores termomagnéticos con mando remoto como lo indica la figura 3.6, un mecanismo motorizado que funciona eléctricamente, permite realizar la conexión y desconexión del equipo. En esta simulación, es necesario setear el contacto del dispositivo motorizado con un valor de 0 o 1 para realizar el deslaste de cargas según la prioridad asignada siempre monitoreando que el valor de la potencia del generador diésel no sobrepase su punto de equilibrio de 0.2 p.u. del generador diésel.

La figura 3.7 muestra el esquema de bloques para simular el controlador difuso en la microrred, se ha aplicado un bloque de conversión analógico – digital de 32 bits, con este valor se pueden operar remotamente 5 cargas, las señales que las comandan son uL1, uL3, uL5, uL6, uL7.

Por efectos demostrativos del presente trabajo, se ha decidido operar solamente con cinco cargas, pues según como se puede observar más adelante en la tabla 4.1, existen disponibles en la microrred de referencia, 12 señales de control que se pueden manipular para alcanzar el objetivo planteado.

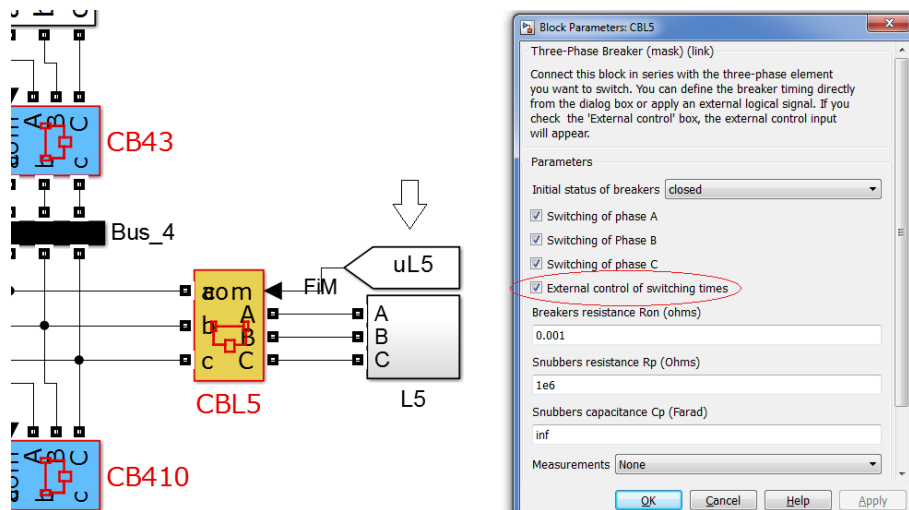


Figura 3. 6 *Habilitación de mando remoto del interruptor CB-L5 para el control de carga*

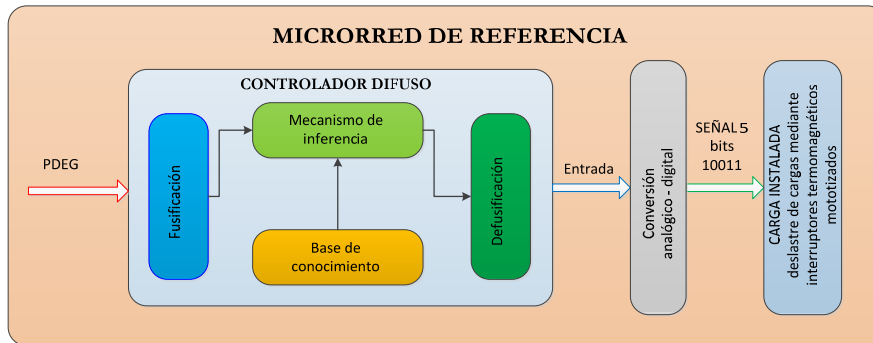


Figura 3. 7 *Esquema de bloques del controlador difuso aplicado a la microrred*

3.2.2 Variables lingüísticas

La tabla 3.3 detalla las variables lingüísticas con una cuantificación adoptada para la simulación. Se han seleccionado 2 variables, la potencia y la derivada de la potencia y se han asignado 5 valores lingüísticos a cada una de ellas.

3.2.3 Matriz asociativa difusa

La tabla 3.4 muestra los valores de la matriz asociativa difusa en donde se han analizado los dos perfiles de potencia y se han asignado valores de peso en la medida

de cuanto se desea que el control recompense una caída en el perfil o descompense un aumento.

Las asignaciones de peso indican el valor con el cual el controlador puede realizar el deslastre de carga necesario.

Potencia (PDEG)		derivada de Potencia (dPDEG)	
cuantificación	valor	cuantificación	valor
muy positiva (MP)	>1	muy positiva (MP)	>1
positiva (P)	$0 \leq P \leq 0.99$	positiva (P)	$0 \leq dP \leq 0.99$
cero (Z)	no generación	cero (Z)	no generación
negativa (N)	$-0.1 \leq P \leq 0$	negativa (N)	$-0.1 \leq dP \leq 0$
muy negativa (MN)	≤ -0.1	muy negativa (MN)	≤ -0.1

Tabla 3.3 Cuantificación de las variables lingüísticas

carga a deslastrar (salida)		cambio en la potencia dPDEG (entrada 2)				
		muy positivo (MP)	positivo (P)	cero (Z)	negativo (N)	muy negativo (MN)
potencia PDEG (entrada 1)	muy positiva (MP)	-1	-1	-1	-1	-1
	positiva (P)	-1	1	-2	2	-1
	cero (Z)	1	1	1	1	2
	negativa (N)	2	2	2	1	1
	muy negativa (MN)	2	2	1	1	0

Tabla 3.4 Matriz asociativa difusa para el controlador propuesto

Dónde:

carga a deslastrar (salida del controlador)	
2	muy alta (MA)
1	alta (A)
0	media (M)
-1	baja (B)
-2	muy baja (MB)

Tabla 3.5 Valores numéricos de pesos asignados a los valores lingüísticos

3.2.4 Base de conocimiento

Las bases del conocimiento o reglas se obtienen a partir de la matriz asociativa difusa, al tener 5 valores lingüísticos para cada una de las variables lingüísticas del controlador, se tienen 25 reglas.

- 1) Si PDEG es **muy positiva** y dPDEG es **muy positiva** entonces el deslastre es **bajo**
- 2) Si PDEG es **muy positiva** y dPDEG es **positiva** entonces el deslastre es **bajo**
- 3) Si PDEG es **muy positiva** y dPDEG es **cero** entonces el deslastre es **bajo**
- 4) Si PDEG es **muy positiva** y dPDEG es **negativa** entonces el deslastre es **bajo**
- 5) Si PDEG es **muy positiva** y dPDEG es **muy negativa** entonces el deslastre es **bajo**
- 6) Si PDEG es **positiva** y dPDEG es **muy positiva** entonces el deslastre es **alto**
- 7) Si PDEG es **positiva** y dPDEG es **positiva** entonces el deslastre es **alto**
- 8) Si PDEG es **positiva** y dPDEG es **cero** entonces el deslastre es **muy bajo**
- 9) Si PDEG es **positiva** y dPDEG es **negativa** entonces el deslastre es **muy alto**
- 10) Si PDEG es **positiva** y dPDEG es **muy negativa** entonces el deslastre es **bajo**
- 11) Si PDEG es **cero** y dPDEG es **muy positiva** entonces el deslastre es **alto**
- 12) Si PDEG es **cero** y dPDEG es **positiva** entonces el deslastre es **alto**
- 13) Si PDEG es **cero** y dPDEG es **cero** entonces el deslastre es **alto**
- 14) Si PDEG es **cero** y dPDEG es **negativa** entonces el deslastre es **alto**
- 15) Si PDEG es **cero** y dPDEG es **muy negativa** entonces el deslastre es **muy alto**
- 16) Si PDEG es **negativa** y dPDEG es **muy positiva** entonces el deslastre es **muy alto**
- 17) Si PDEG es **negativa** y dPDEG es **positiva** entonces el deslastre es **muy alto**
- 18) Si PDEG es **negativa** y dPDEG es **cero** entonces el deslastre es **muy alto**
- 19) Si PDEG es **negativa** y dPDEG es **negativa** entonces el deslastre es **alto**
- 20) Si PDEG es **negativa** y dPDEG es **muy negativa** entonces el deslastre es **alto**
- 21) Si PDEG es **muy negativa** y dPDEG es **muy positiva** entonces el deslastre es **muy alto**
- 22) Si PDEG es **muy negativa** y dPDEG es **positiva** entonces el deslastre es **muy alto**
- 23) Si PDEG es **muy negativa** y dPDEG es **cero** entonces el deslastre es **alta**
- 24) Si PDEG es **muy negativa** y dPDEG es **negativa** entonces el deslastre es **alto**
- 25) Si PDEG es **muy negativa** y dPDEG es **muy negativa** entonces el deslastre es **medio**

3.3 Entrenamiento y verificación

Para el entrenamiento de la matriz asociativa difusa, se utiliza el bloque de control difuso de *Simulink*, “*fuzzy logic controller*”, en donde se ha modificado toda la información para el mecanismo de inferencia.

Se han modificado las funciones de membresía de las entradas y la salida del controlador, PDEG, dPDEG y deslastre respectivamente; además se ingresaron las 25 reglas detalladas en el punto 3.2.4. Se seleccionó el defusificador tipo Mamdani, para que la aplicación convierta los resultados alcanzados por el mecanismo de inferencia, en la entrada de la planta de una manera simple.

3.3.1 Parametrización del controlador difuso

La figura 3.8 muestra las funciones de membresía para la entrada *PDEG*. Los límites obtenidos a partir del perfil de potencia en *p.u.* son [-0.2, 0.4]. Todas las

funciones de membresía son de configuración triangular ya que ofrecen un control más simple. La tabla 3.6 detalla los valores característicos de las funciones de membresía a lo largo del eje de la potencia.

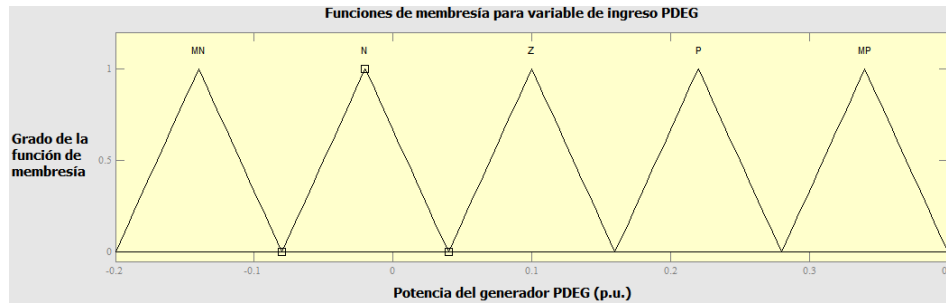


Figura 3. 8 Esquema de la función de membresía para PDEG. [Fuente: command window MATLAB]

La figura 3.9, indica las funciones de membresía para la segunda variable lingüística dPDEG. Al ser la variación de la potencia en el tiempo, se mantiene la misma configuración y los valores característicos de primera variable lingüística PDEG para esta segunda variable lingüística.

Valor lingüístico	Límites eje x	Límites eje y
muy positiva (MP)	[0.28 0.34 0.4]	[0 1 0]
positiva (P)	[0.16 0.22 0.28]	[0 1 0]
cero (Z)	[0.04 0.1 0.16]	[0 1 0]
negativa (N)	[-0.08 -0.02 0.04]	[0 1 0]
muy negativa (MN)	[-0.2 -0.14 -0.08]	[0 1 0]

Tabla 3. 6 Valores característicos de las funciones de membresía para PDEG

La figura 3.10 muestra las funciones de membresía para la salida “deslastre”, que es una variable de tipo decimal. Es necesario convertir este valor en binario, por lo que se ha realizado la transformación a un número de 5 bits correspondiente a 32 en numeración decimal. Los límites obtenidos a partir de esta declaración son [0, 32].

Todas las funciones de membresía son de configuración triangular ya que de la misma manera, se diseñaron las variables de entrada. La tabla 3.7 detalla los valores característicos de las funciones de membresía a lo largo del eje de deslastre.

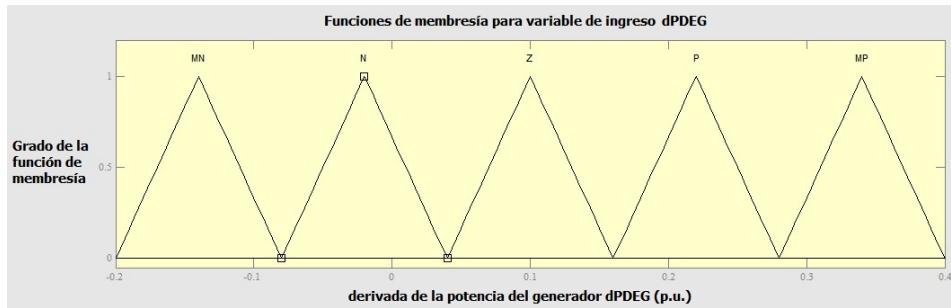


Figura 3. 9 Esquema de la función de membresía para dPDEG. [Fuente: command window MATLAB]

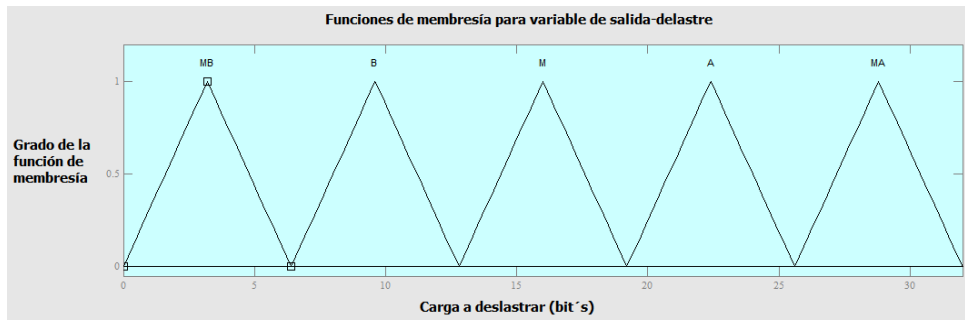


Figura 3. 10 Esquema de la función de membresía para deslastre. [Fuente: command window MATLAB]

Valor lingüístico	Límites eje x	Límites eje y
muy alta (MA)	[25.6 28.8 32]	[0 1 0]
alta (A)	[19.2 22.4 25.6]	[0 1 0]
media (M)	[19.2 22.4 25.6]	[0 1 0]
baja (B)	[6.4 9.6 12.8]	[0 1 0]
muy baja (MB)	[0 3.2 6.4]	[0 1 0]

Tabla 3. 7 Valores característicos de las funciones de membresía para deslastre

3.4 Simulación del comportamiento de la microrred aislada con la implementación del controlador difuso

3.4.1 Adaptación de la salida del controlador difuso

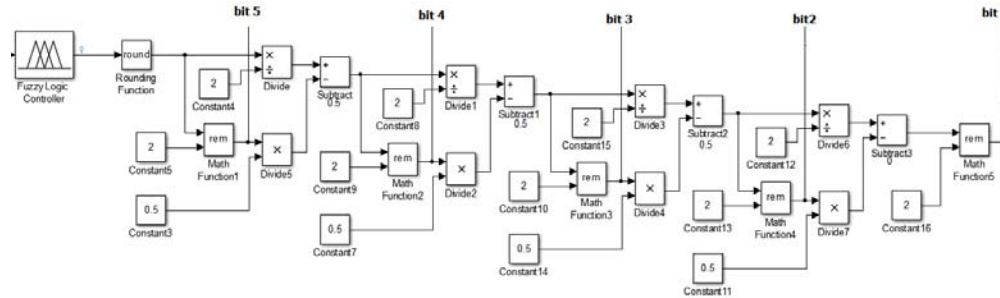


Figura 3. 11 Sistema de conversión decimal a binario. [Fuente: Simulink MATLAB]

La figura 3.11 muestra el diseño en *Simulink* del sistema de conversión del valor decimal de la salida del controlador difuso a un número binario de 5 bits. La simulación cuenta con 5 cargas que operan mediante la alimentación de estos bits.

3.4.2 Estabilización de la potencia del generador diesel – modelo 1

La figura 3.12 muestra el resultado de la simulación con el controlador difuso diseñado con las funciones de membresía y los pesos de los valores lingüísticos propuestos en la sección 3.2.3 con la matriz asociativa difusa. Se observa que el controlador fuerza al generador diesel a mantener su potencia por debajo del valor de 0.2 p.u. durante la simulación. Este resultado se obtiene asignando prioridades a las cargas de mayor valor de potencia a los bits de control más significativos, estas asignaciones cumplen con las condiciones de carga de $uL14=1$ (conectado permanentemente), $uL1$ = señal bit5, $uL11$ = señal bit4, $uL6$ = señal bit3, $uL9$ = señal bit2, $uL10$ = señal bit1. La figura 3.13 muestra la superficie de salida del sistema difuso con respecto a las entradas para el modelo 1 planteado.

Las figuras desde la 3.13 a la 3.17 muestran el comportamiento de las señales ON/OFF a la salida del controlador para el deslastre de las 5 cargas propuestas.

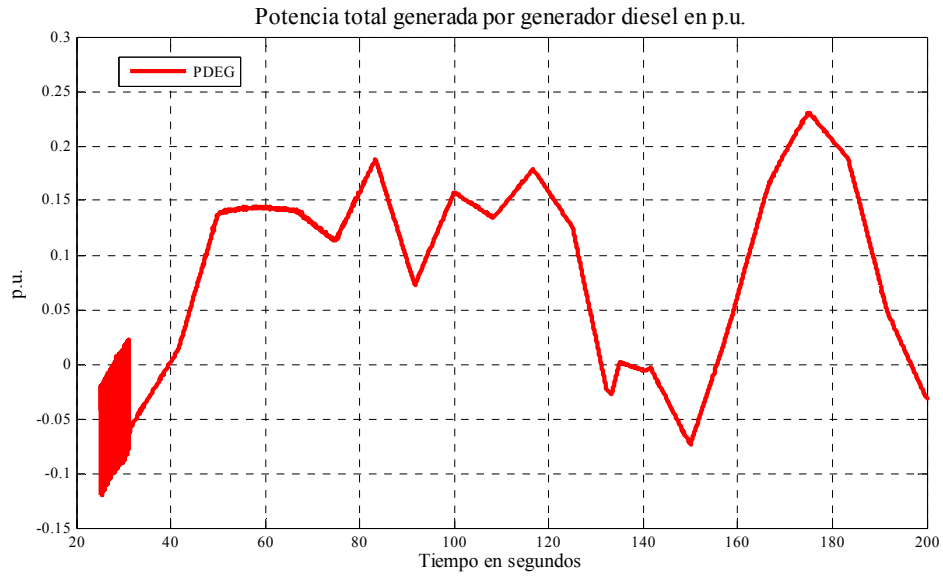


Figura 3. 12 Perfil de potencia de generador diesel aplicando el controlador difuso – modelo 1. [Fuente: Simulink MATLAB]

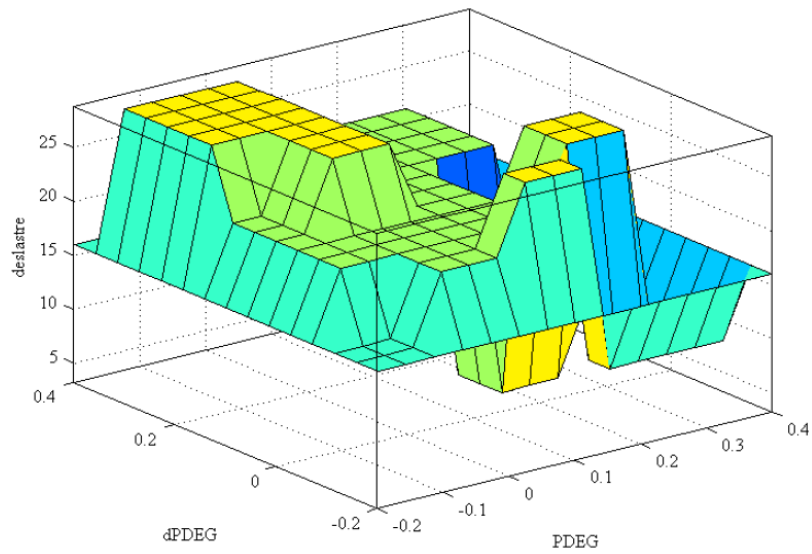


Figura 3. 13 Superficie de salida del sistema difuso – modelo 1 con respecto a las entradas. [Fuente: Simulink MATLAB]

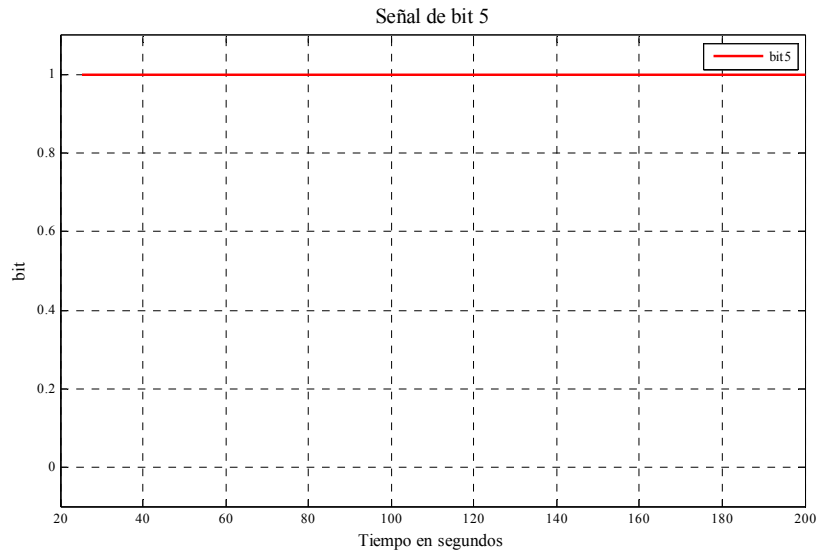


Figura 3. 14 Perfil de operación del bit5 de deslastre – modelo 1. [Fuente: Simulink MATLAB]

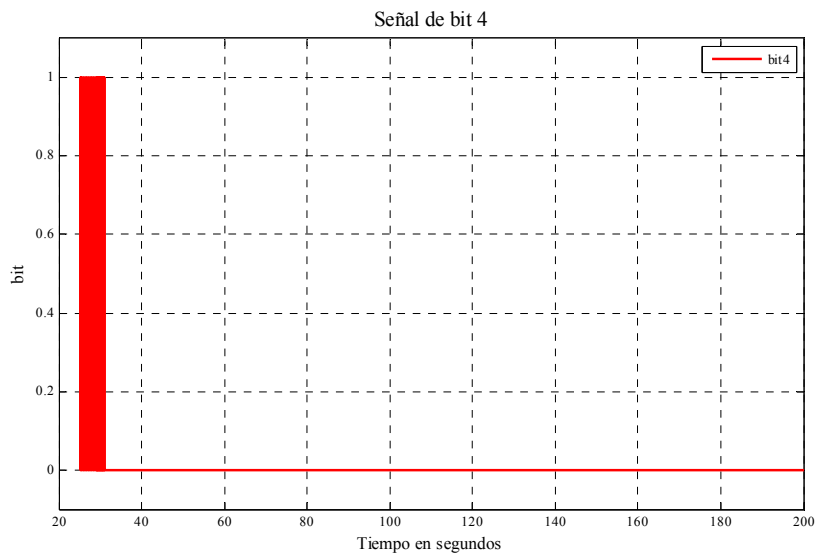


Figura 3. 15 Perfil de operación del bit4 de deslastre – modelo 1. [Fuente: Simulink MATLAB]

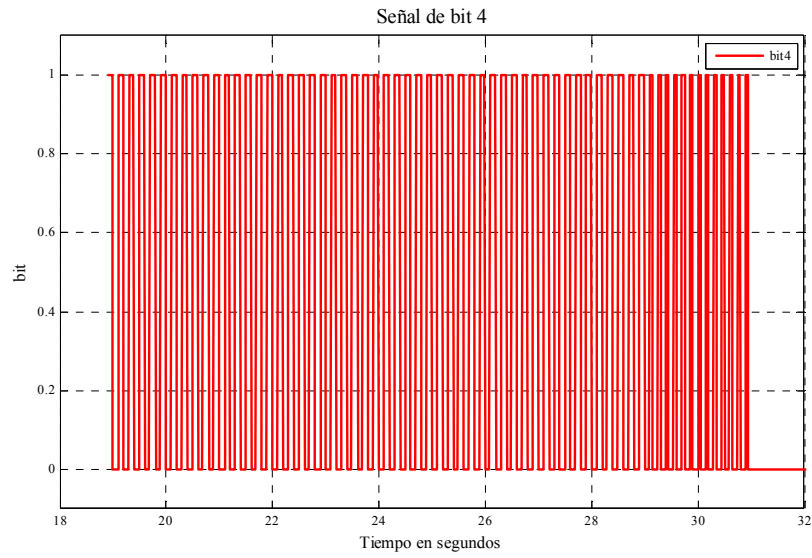


Figura 3. 16 Acercamiento del perfil de operación del bit4 de deslastre – modelo 1. [Fuente: Simulink MATLAB]

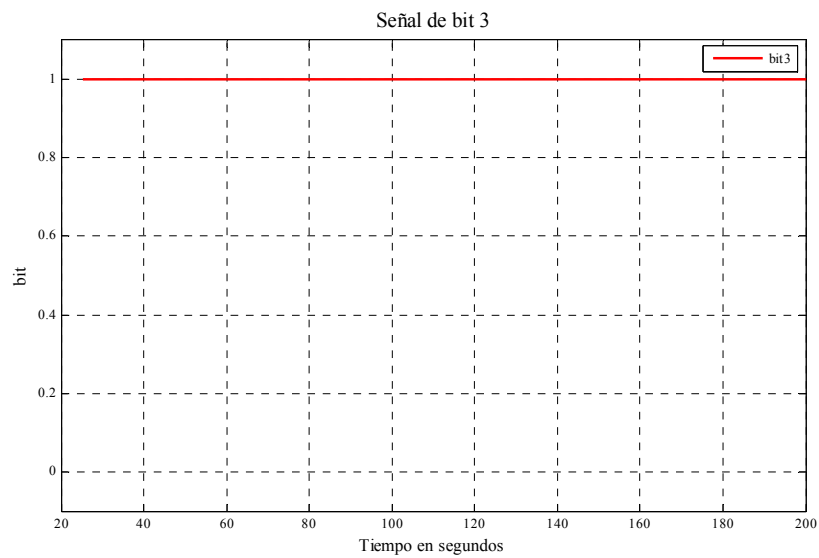


Figura 3. 17 Perfil de operación del bit3 de deslastre – modelo 1. [Fuente: Simulink MATLAB]

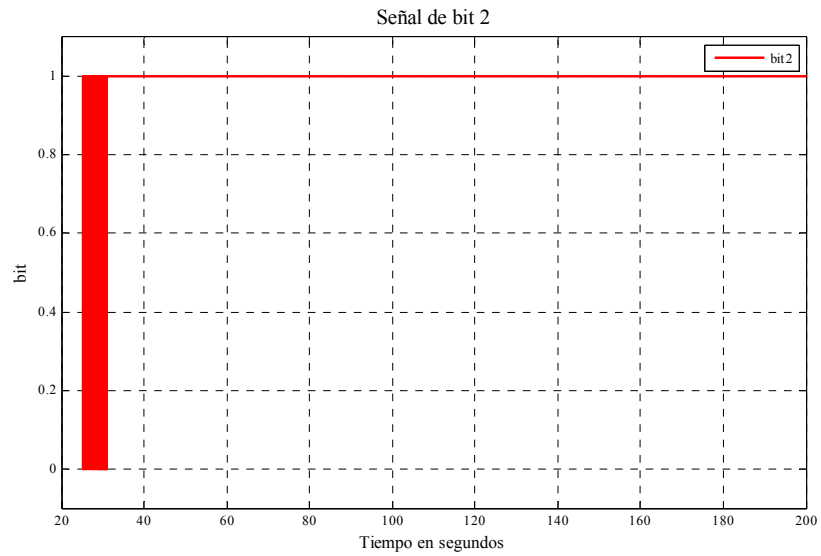


Figura 3.18 Perfil de operación del bit2 de deslastre – modelo 1. [Fuente: Simulink MATLAB]

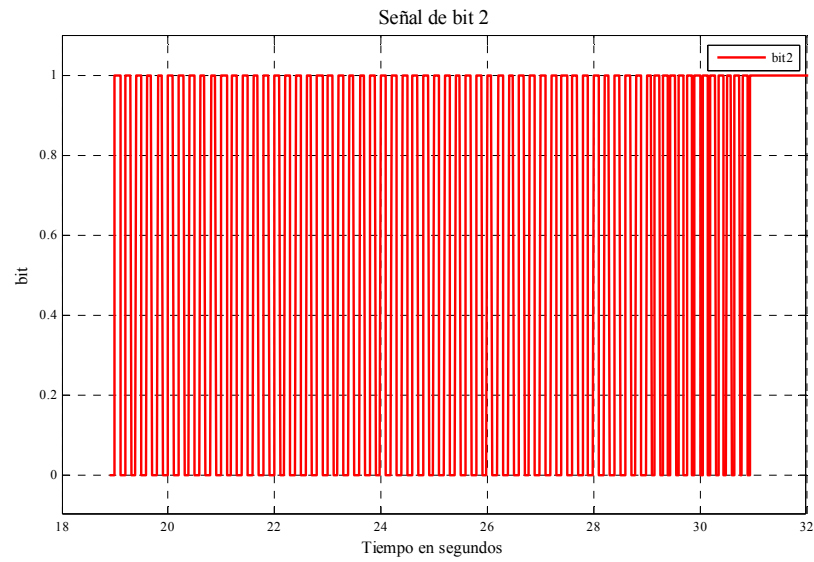


Figura 3.19 Acercamiento del perfil de operación del bit2 de deslastre – modelo 1. [Fuente: Simulink MATLAB]

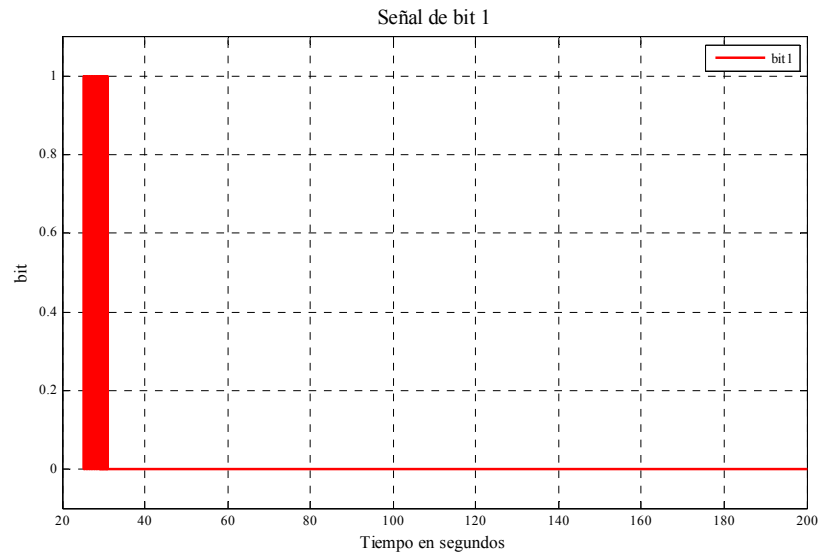


Figura 3. 20 Perfil de operación del bit1 de desastre – modelo 1. [Fuente: Simulink MATLAB]

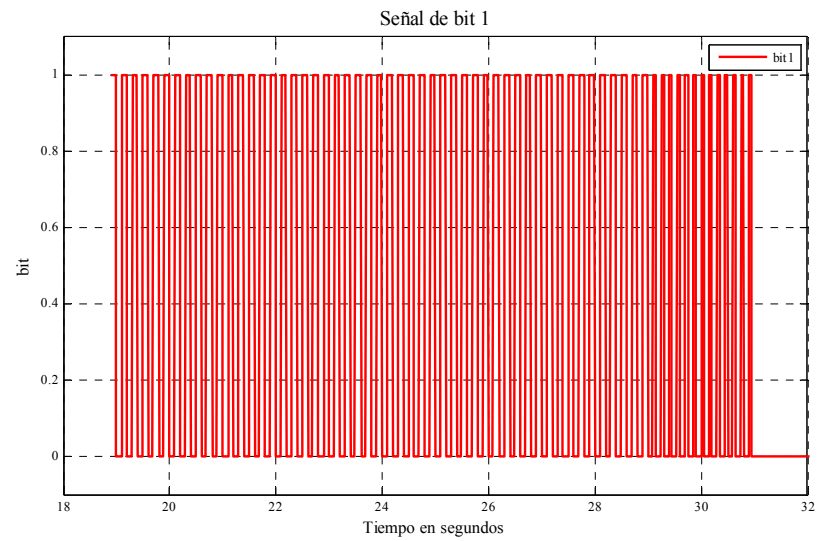


Figura 3. 21 Acercamiento del perfil de operación del bit1 de desastre – modelo 1. [Fuente: Simulink MATLAB]

3.4.2.1 Análisis de la simulación

- El sistema logra mantener el valor de la potencia generada en 0.2 p.u. con la valoración de pesos para los valores lingüísticos propuestos. Se puede apreciar en la figura 3.12 que la potencia del generador diesel se mantiene por debajo del valor de 0.2 p.u. deseado.
- En $t = 170$ segundos, el valor de la potencia generada sobrepasa el valor de 0.2 p.u., esto se debe a que es un momento en el que se acumula toda la potencia del sistema.
- Para que se cumpla la condición para el control se debería tomar otro procedimiento adicional de desconexión de las fuentes de generación como por ejemplo la eólica, fotovoltaica, pero estos procedimientos no se contemplan dentro del alcance de este trabajo.
- La microrred de referencia está diseñada para que la fuente de generación diesel, genere una potencia de 0.3 p.u., con ello, no se pone en peligro la integridad el generador principal.
- Se puede determinar también en la figura 3.12 que en $t = 21$ segundos, cuando sucede la desconexión de la microrred, el sistema entra en un estado de recuperación para la generación de potencia.
- Se evidencia que algunas cargas se han desconectado, logrando el objetivo de deslastre de cargas con el controlador difuso planteado.
- Las conmutaciones evidenciadas en las figuras 3.15, 3.18 y 3.20 en el intervalo de tiempo entre los 19 segundos y 31 segundos son el resultado de la variación del convertidor analógico – digital.
- La rapidez con la que ocurren estas variaciones puede ocasionar una inestabilidad del sistema en cuanto al proceso de deslastre de cargas en cada uno de los interruptores termomagnéticos que gobiernan las cargas, pero como su ocurrencia es muy rápida, en una aplicación real por tratarse de potencias grandes, estas variaciones pueden ser tomadas como un único valor de señal por parte del interruptor termomagnético.
- En el caso del bit 4, tiene un valor de 1 entre los 19 y los 31 segundos. En el caso del bit 2, tiene un valor de 1 a partir de los 19 segundos. Para el caso del bit 1, tiene un valor

- Para aplicaciones con potencias de menor valor, estas variaciones son de gran utilidad, pues se comprueba que el controlador si opera ante las variaciones de los valores o pesos asignados para las 2 variables lingüísticas en la matriz asociativa difusa, con esto las cargas se indistintamente se pueden conectar y desconectar según el requerimiento de control.

3.4.3 Estabilización de la potencia del generador diesel – modelo 2

La figura 3.22 muestra la simulación de la potencia del generador diesel aplicado un cambio en el orden de los bits que deslastran las cargas, se han invertido las entradas.

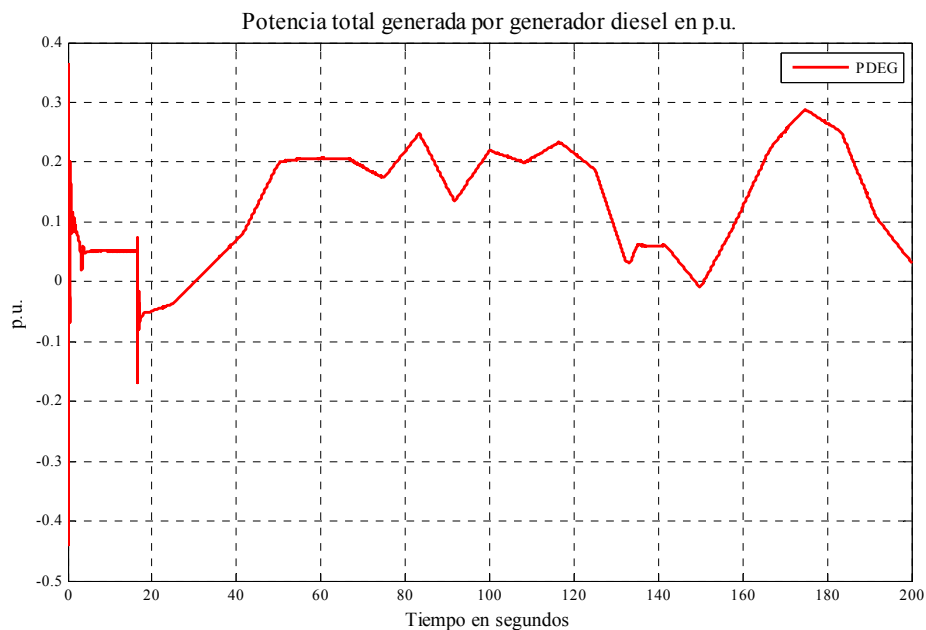


Figura 3.22 Perfil de potencia de generador diesel aplicando el controlador difuso – modelo 2. [Fuente: Simulink MATLAB]

3.4.3.1 Análisis de la simulación

- El sistema continúa con su intento en mantener el nivel generación alrededor de los 0.2 p.u., conservando el perfil de la potencia del generador diesel.

- En $t = 165$ segundos, el valor de la potencia generada sobrepasa el valor de 0.2 p.u. , esto se debe a que es un momento en el que se acumula toda la potencia del sistema.
- Para que se cumpla la condición de mantener la potencia en un valor igual o menor a 0.2 p.u. , se debe tomar otro procedimiento adicional de desconexión de otras fuentes de generación existentes en el sistema, como por ejemplo la eólica, fotovoltaica, pero estos procedimientos no se contemplan dentro del alcance de este trabajo.
- La microrred de referencia está diseñada para que la fuente de generación diesel, genere una potencia de 0.3 p.u. , con ello, no se pone en peligro la integridad el generador principal

3.4.4 Estabilización de la potencia del generador diesel – modelo 3

La figura 3.23 muestra la simulación de la potencia del generador diesel aplicado un cambio en el orden de los bits que deslastran las cargas, se hizo una inversión de las entradas comparado con el modelo anterior y adicionalmente se mantuvieron las señales de las cargas uL1, uL7 y uL8 conectadas permanentemente.

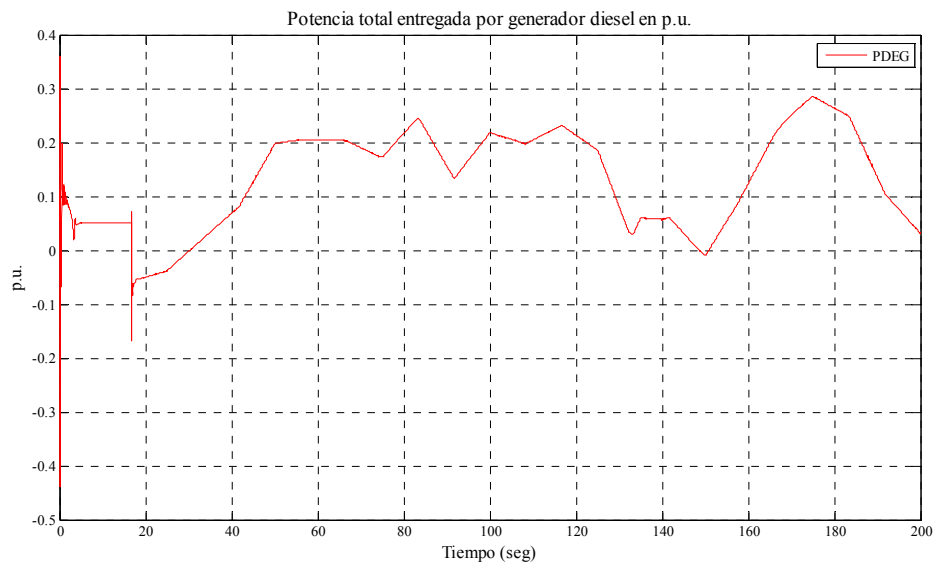


Figura 3. 23 Perfil de potencia de generador diesel aplicado controlador difuso – modelo 3. [Fuente: Simulink MATLAB]

3.4.4.1 Análisis de la simulación

- El sistema presenta una pequeña variación con respecto a los 2 modelos anteriores, dicha variación mejora el perfil de la potencia del generador, acercándolo aún más a los 0.2 p.u.
- En $t = 165$ segundos, el valor de la potencia generada sobrepasa el valor de 0.2 p.u., esto se debe a que es un momento en el que se acumula toda la potencia del sistema.
- Para que se cumpla la condición de mantener la potencia en un valor igual o menor a 0.2 p.u., se debe tomar otro procedimiento adicional de desconexión de otras fuentes de generación existentes en el sistema, como por ejemplo la eólica, fotovoltaica, pero estos procedimientos no se contemplan dentro del alcance de este trabajo.
- La microrred de referencia está diseñada para que la fuente de generación diesel, genere una potencia de 0.3 p.u., con ello, no se pone en peligro la integridad el generador principal

3.4.5 Estabilización de la potencia del generador diesel – modelo 4

La figura 3.24 muestra la simulación de la potencia del generador diesel aplicado un cambio en las cargas que permanecen conectadas con prioridad, se dejó sin efecto a las cargas constantes uL14 y uL15 y se mantuvieron las señales de las cargas uL1, uL7 y uL8 conectadas permanentemente.

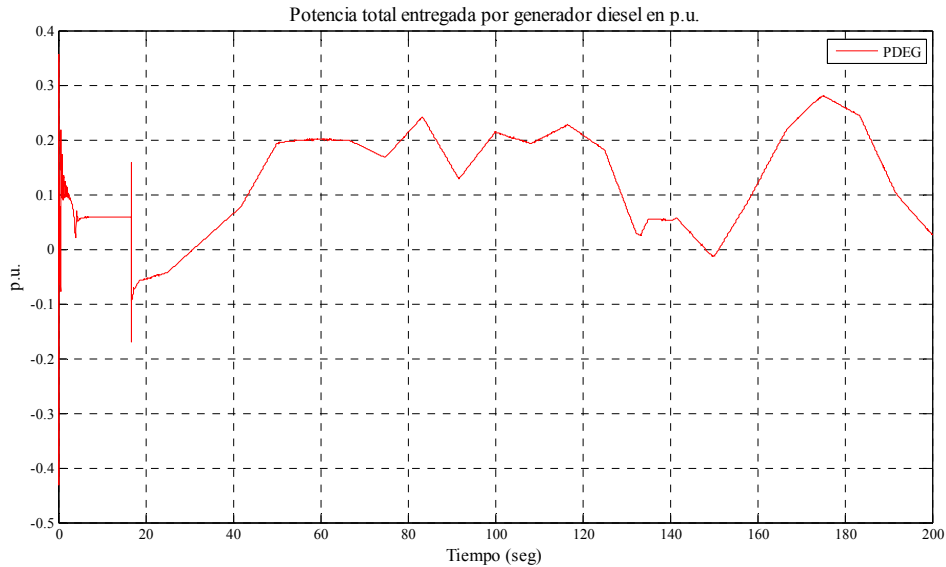


Figura 3. 24 Perfil de potencia de generador diesel aplicando el controlador difuso – modelo 4. [Fuente: Simulink MATLAB]

3.4.5.1 Análisis de la simulación

- El sistema empieza a responder favorablemente en $T = 55$ segundos, se evidencia que trata de mantenerse estable en su valor de 0.2 p.u. hasta un $T = 68$ segundos y nuevamente empiezan pequeñas variaciones
- Las cargas que antes demandaban un mayor consumo se están desconectando conforme las reglas creadas en el controlador.
- En $t = 165$ segundos, el valor de la potencia generada sobrepasa el valor de 0.2 p.u. , esto se debe a que es un momento en el que se acumula toda la potencia del sistema.
- Para que se cumpla la condición de mantener la potencia en un valor igual o menor a 0.2 p.u. , se debe tomar otro procedimiento adicional de desconexión de otras fuentes de generación existentes en el sistema, como por ejemplo la eólica, fotovoltaica, pero estos procedimientos no se contemplan dentro del alcance de este trabajo.

- La microrred de referencia está diseñada para que la fuente de generación diesel, genere una potencia de 0.3 p.u., con ello, no se pone en peligro la integridad el generador principal

3.4.6 Estabilización de la potencia del generador diesel – modelo 5

La figura 3.25 muestra la simulación de la potencia del generador diesel aplicado una nueva matriz asociativa difusa, con un cambio en los pesos de la primera condición de la potencia de generador cuando es muy positiva. Las condiciones son las mismas que en el modelo 1. Se escoge el modelo con resultados satisfactorios para tener un modelo de referencia y poder contrastar los resultados obtenidos. Las asignaciones cumplen con las condiciones de carga de uL14=1 (conectado permanentemente), uL1 = señal bit5, uL11 = señal bit4, uL6 = señal bit3, uL9 = señal bit2, uL10 = señal bit1. La figura 3.26 muestra la superficie de salida del sistema difuso con respecto a las entradas para el modelo 5 planteado.

Las reglas obtenidas de la matriz asociativa difusa con sus pesos, son:

- 1) Si PDEG es **muy positiva** y dPDEG es **muy positiva** entonces el deslastre es **muy bajo**
- 2) Si PDEG es **muy positiva** y dPDEG es **positiva** entonces el deslastre es **muy bajo**
- 3) Si PDEG es **muy positiva** y dPDEG es **cero** entonces el deslastre es **muy bajo**
- 4) Si PDEG es **muy positiva** y dPDEG es **negativa** entonces el deslastre es **muy bajo**
- 5) Si PDEG es **muy positiva** y dPDEG es **muy negativa** entonces el deslastre es **muy bajo**

carga a deslastrar (salida)		cambio en la potencia dPDEG (entrada 2)				
		muy positivo (MP)	positivo (P)	cero (Z)	negativo (N)	muy negativo (MN)
potencia PDEG (entrada 1)	muy positiva (MP)	-2	-2	-2	-2	-2
	positiva (P)	-1	1	-2	2	-1
	cero (Z)	1	1	1	1	2
	negativa (N)	2	2	2	1	1
	muy negativa (MN)	2	2	1	1	0

Tabla 3. 8 Matriz asociativa difusa para el controlador propuesto

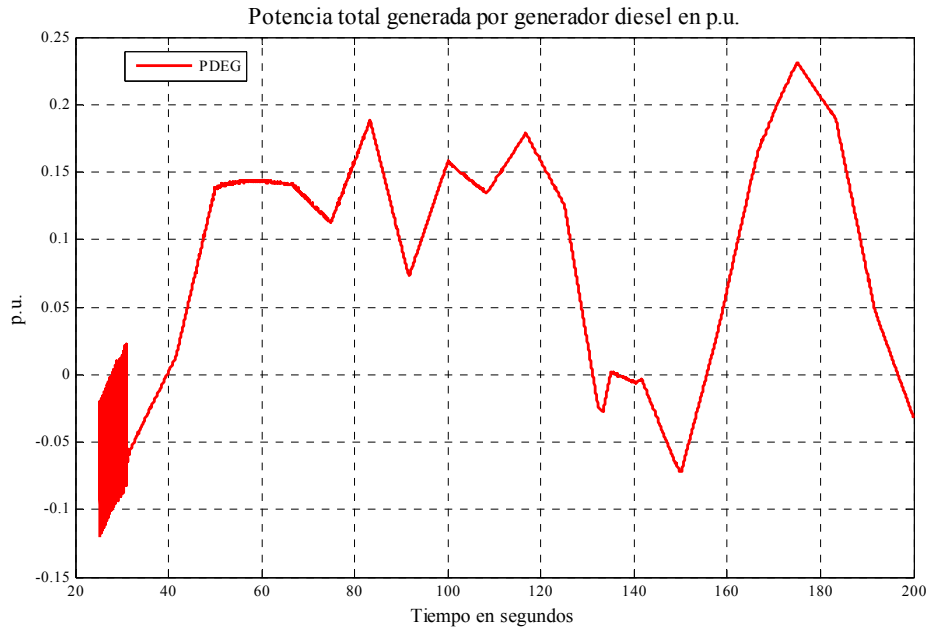


Figura 3. 25 Perfil de potencia de generador diesel aplicando el controlador difuso – modelo 5. [Fuente: Simulink MATLAB]

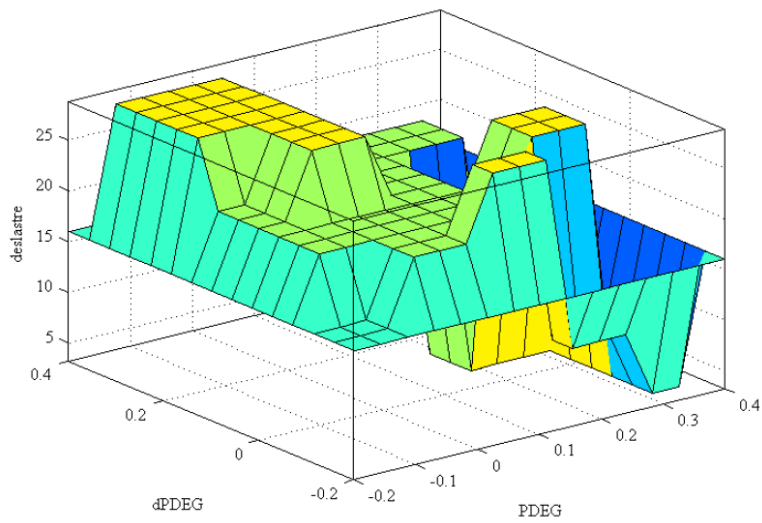


Figura 3. 26 Superficie de salida del sistema difuso – modelo 5 con respecto a las entradas. [Fuente: Simulink MATLAB]

3.4.6.1 Análisis de la simulación

- El sistema empieza a responder favorablemente en $T = 55$ segundos, se evidencia que trata de mantenerse dentro del valor de $0.2 p.u.$ hasta un $T = 170$ segundos y nuevamente existe una pequeña variación.
- La variación que sobrepasa el valor de $0.2 p.u.$ en $T = 170$ segundos se debe al igual que en los modelos anteriores, por la acumulación de la potencia total generada por todas las fuentes de generación distribuidas existentes en la microrred de referencia. Este hecho no implica un peligro en la integridad del generador principal, ya que por diseño del sistema, el generador tiene una potencia nominal de generación de $0.3 p.u.$
- Las cargas que antes demandaban un mayor consumo se están desconectando conforme las reglas creadas en el controlador.
- No existe mayor diferencia comparado con la matriz asociativa difusa planteada en el modelo 1. La matriz planteada cumple con el requerimiento inicial de mantener la potencia del generador diesel hasta un valor de $0.2 p.u.$

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Comparación de los resultados obtenidos entre los modelos planteados

Los resultados obtenidos luego de la aplicación de un controlador difuso planteado con diferentes modelos para el deslastre de cargas en una microrred aislada, para mantener la potencia del generador estable en un valor de 0.2 en *p.u.*, han sido satisfactorios. Existen algunos parámetros inherentes en una microrred debido al equipamiento instalado, al comportamiento no lineal de algunas de las fuentes de generación y almacenamiento distribuidas, y una ligera inestabilidad que puede ofrecer el deslastre continuo de cargas en respuesta al controlador aplicado.

Algunos autores referidos en el estado actual de este trabajo de tesis, desarrollan sus investigaciones en controlar la frecuencia de generación en las microrredes y el deslastre de cargas se realiza gracias al monitoreo constante de la baja frecuencia del sistema.

Al monitorear la potencia entregada a una microrred por un generador diesel es también importante analizar la frecuencia de generación, ya que dentro de un sistema eléctrico de potencia un desajuste en la frecuencia del sistema, puede ocasionar serios problemas de estabilidad y ocasionar daños irreparables en las redes de subtransmisión y distribución.

En las simulaciones obtenidas se evidencia que una microrred puede depender de la naturaleza y de la prioridad de las cargas que están conectadas al sistema. La importancia de tener cargas con una semejanza en cuanto a su aplicación y a la cantidad de potencia que consumen, es un factor determinante al momento de diseñar un sistema de control para deslastre de cargas.

En el caso del modelo 1, existe un periodo de tiempo que empieza en $T = 21$ segundos en el cual el sistema se desconecta y pasa a formar una microrred aislada. El perfil de la potencia del generador demuestra que la máquina empieza a suministrar toda la potencia necesaria de la microrred. Luego el perfil de potencia se mantiene debajo del valor de 0.2 en *p.u.*, esto demuestra que el controlador sí está ejerciendo la acción de control, desconectando las cargas de acuerdo a la tabla de pesos planteada.

Es importante además destacar que, el modelo de controlador con el que se obtuvieron resultados satisfactorios tuvo que ser analizado desde una perspectiva de asignaciones de prioridades en las cargas a deslastar. Estas prioridades se analizaron a

partir de los valores de cada carga, dando una prioridad muy alta a las potencias mayores ya sean estas domiciliarias o industriales. Dichas prioridades además deben manejarse en base a la posición de los bits asignados a tal efecto dentro del controlador difuso planteado, desde el más significativo al menos significativo.

Es importante destacar adicionalmente, que cada una de las señales de control para controlar las cargas son señales binarias de 0 y 1, mismas que son determinadas para controlar los interruptores termomagnéticos que gobiernan las cargas en la planta de simulación de la microrred aislada.

De la tabla 3.1 y 4.1, se han obtenido las siguientes prioridades: uL14=1 (conectado permanentemente 0.2 p.u.), uL1 = señal bit5 (0.2 p.u.), uL11 = señal bit4 (0.00876 p.u.), uL6 = señal bit3 (0.00725 p.u.), uL9 = señal bit2 (0.00588 p.u.), uL10 = señal bit1 (0.00574 p.u.).

4.2 Análisis del modelo propuesto

El modelo de controlador difuso aplicado en este trabajo es un modelo tipo Mamdani mismo que utiliza las funciones de membresía de forma triangular, que es la forma más sencilla para encontrar el grado de pertenencia de una variable.

El controlador ofrece una aplicación del conjunto de reglas *Si premisa entonces consecuencia*, siendo ésta última una palabra resultante que se la debe valorizar por la acción que representa.

La propuesta de los valores lingüísticos tanto para la potencia del generador así como también de su derivada han sido estudiados de acuerdo a ciertas aplicaciones que han servido como ejemplos para resolver problemas con no linealidades. Se han escogido cinco valores lingüísticos para las variables lingüísticas: Muy positiva, positiva, cero, negativa y muy negativa, esperando abarcar todas las posibilidades en relación a la variabilidad del perfil de la potencia del generador diesel y de la misma manera de su derivada.

Por otro lado, por lo mencionado en el apartado 3.2.1, con respecto a la microrred de referencia, de todas las señales disponibles para controlar el deslastre de cargas para efectos de este trabajo se decidió operar solamente con cinco de ellas, pues según como se observa en la tabla 4.1 existen 12 señales de control que se pueden manipular para alcanzar un objetivo de deslastre de cargas en el sistema.

Para efectos de simulación del controlador difuso, en la microrred de referencia que está diseñada y probada en su totalidad en el toolbox de *Simulink*, *SimpowerSystems*; se implementó el bloque Fuzzy Logic para diseño de controladores difusos y se ajustaron todos los parámetros necesarios de acuerdo al requerimiento de control para el modelo tipo Mamdani.

CARGAS CONECTADAS A LOS INTERRUPTORES TERMOMAGNETICOS DE LA MICRORRED DE REFERENCIA		
# INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO	ETIQUETA DE LA SEÑAL DE CONTROL	COMENTARIOS
CBL1+L2	uL1	carga variable
CBL3+L4	uL3	carga constante
CBL5	uL5	carga constante
CBL6	uL6	carga variable
CBL7	uL7	carga variable
CBL8	uL8	carga constante
CBL9	uL9	carga variable
CBL10	uL10	carga constante
CBL11+L12+L13	uL11	carga constante
CBL14+L15	uL14	carga constante
CBL16	uL16	carga constante
CBL17+L18	uL17	carga constante

Tabla 4. 1 Cargas conectadas a los interruptores termomagnéticos con mando a distancia

CONCLUSIONES

La operación confiable de la microrred de referencia se ha logrado gracias a la respuesta satisfactoria del controlador difuso diseñado para el efecto, cumpliendo el objetivo principal de mantener el valor de la potencia del generador principal.

El controlador difuso propuesto pone de manifiesto la necesidad de contar previamente con la experiencia necesaria para determinar las variables lingüísticas correctas en número y en su valor lingüístico y de peso al momento de formar la matriz asociativa difusa.

Se ha propuesto un sistema de control difuso para gobernar el deslastre de cargas cuando la microrred entra a funcionar en modo aislado del sistema eléctrico de potencia al que pertenece.

El controlador difuso propuesto ha cumplido con el objetivo de mantener estable la potencia del generador diesel en la microrred en modo aislado en un valor de 0.2 p.u. Se han analizado varios escenarios de comportamiento con el cambio en la asignación de prioridades en las cargas a deslastrar, comprobando que es un factor determinante el asignar prioridades altas a las cargas con un valor importante de potencia. Esto permite que el deslastre tenga el éxito deseado de acuerdo al objetivo planteado.

Este sistema de control solamente gobierna cinco señales de deslastre de cargas en la microrred ya que por efectos de simulación del presente trabajo se escogieron solamente 5 cargas. El comportamiento de este mismo proceso, cuando el controlador gobierne todas las señales para el control de cargas, debe mejorar dependiendo de las prioridades que se asignen a las cargas restantes que no fueron tomadas en cuenta para este análisis, su aplicación debe ser un complemento del presente trabajo.

Las funciones de membresía de forma triangular son una alternativa simple y viable para lograr determinar el grado de pertenencia de las variables lingüísticas de la potencia del generador diesel. Pueden ser o no traslapadas, esto depende del criterio del diseñador y de su experiencia para determinar en qué grado se desea obtener la pertenencia a determinado conjunto para las variables lingüísticas de entrada y salida. Si no existe traslape, no significa que deje de ser un sistema difuso.

Aunque no fueron parte de este estudio, las funciones de membresía del tipo trapezoidal o gaussiano pueden ser una buena alternativa, su aplicación podría mejorar el desempeño del controlador difuso propuesto. Este análisis involucra un trabajo integral de planteamiento y desarrollo de un nuevo controlador.

Se puede trabajar en la microrred de referencia con todas las señales de las cargas para el proceso de deslastre, debido a que existe mucha diferencia en valor entre unas y otras, por lo que al dejar conectadas ciertas cargas con prioridad, se reduce la capacidad del controlador de tomar acciones de control con pequeños cambios de potencia. Esto no permite visualizar la estabilidad del perfil de la potencia del generador diesel.

Es importante identificar el tipo de sistema al cual se va a aplicar el controlador difuso, los controladores tipo Mamdani y Takagi-Sugeno dan diferentes resultados en varios sistemas tipo SIMO y MIMO respectivamente.

Dificultades como la imprecisión y errores de interpretación, pueden hacerse presentes cuando se analizan la variable y el cambio en el tiempo de la misma, para poder determinar con un mayor grado de certeza cuál sería la acción que debe realizar el controlador para lograr el objetivo deseado.

Como trabajos futuros, se propone desarrollar con esta misma microrred de referencia para entrenamiento, controladores difusos basados en distintas funciones de membresía, trapezoidal o gaussiana incrementando los valores lingüísticos para el análisis más minucioso del comportamiento del perfil de la potencia del generador.

Otro estudio interesante puede aplicarse en el desarrollo de un controlador tipo Takagi-Sugeno para esta microrred, junto con el análisis de todas las señales de control para deslastre de cargas existentes en el sistema.

Finalmente se puede ampliar el diseño de un controlador difuso pero tomando en cuenta la frecuencia de generación del sistema de generación distribuido principal de la microrred en modo aislado. Sería muy interesante determinar el comportamiento del sistema ante las variaciones de su frecuencia y comprobar que tan robusto es ante perturbaciones mecánicas de las fuentes de generación distribuidas

BIBLIOGRAFÍA

- 1547.2-2008, I. S. (2008). IEEE application guide for IEEE std 1547, IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems.
- AFME, A. d. (2002). Contribución del material eléctrico en baja tensión. *Smart Grids*.
- Arulampalam, A., & Kumar Saha, T. (2010). Fast and Adaptive Under Frequency Load Shedding and Restoration Technique using Rate of Change of Frequency to Prevent Blackouts. *ARC Discovery project found*.
- Barsali S., C. M. (2002). Control techniques of Dispersed Generators to improve the continuity of electricity supply. *IEEE*.
- Chapman, S. J. (2000). *Máquinas Eléctricas*. Bogotá: Nomos S.A.
- Chen, H., Chen, J., Shi, D., & Duan, X. (2006). Power flow study and voltage stability analysis for distribution systems with distributed generation. *IEEE Power Engineering Society General Meeting* , (pág. 8).
- El-Hawary, M. E. (2000). *Electrical Energy Systems*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Etemadi A., D. E. (2012). A Decentralized Robust Control Strategy for Multi-DER Microgrids - Part I: Fundamental Concepts. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*.
- Faruque O., Z. Y. (2006). Detailed Modeling of CIGRÉ HVDC Benchmark System Using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*.
- Glover, J. D. (2012). *Power System Analysis & Design*. Stamford: Cengage Learning.
- Gonzalez - Longatt, F. M. (2008). Sistemas de Potencia I. *Introducción a los Sistemas de Potencia*, (pág. 57). Venezuela.
- Guerrero J.M., H. L. (2008). Control of distributed uninterruptible power supply systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.*
- Hewitson, L., Brown, M., & Ramesh, B. (2004). *Practical Power Systems Protection* . Burlington: Elsevier.

- Huang, W.-T. (2010). Study on the Operation of a Low-Voltage AC Microgrid with Multiple Distributed Generations.
- IEEE std. (100-1992). *Glossary of Terms and Definitions*. IEEE.
- IEEE std 1547.4. (2011). *IEEE std 1547.4-2011 Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems*. New York: IEEE.
- Kao, Y. W.-N. (2009). An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid. *IEEE Trans. Power Electron.*
- Kasabov, N. K. (1998). *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering*. Massachusetts: Asco Trade Typesetting Ltd.
- Katiraei F., I. M. (2006). Power Management Strategies for a Microgrid With Multiple Distributed Generation Units. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*.
- Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N., & Dimeas, A. (2008). Microgrids Management, Controls and Operation Aspects of Microgrids. *IEEE power & energy magazine*, 12.
- Kersting, W. H. (2002). *Distribution System Modeling & Analysis*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Kroposki, B., Lasseter, R., Ise, T., Morozumi, S., Papathanassiou, S., & Hatziargyriou, N. (2008). A look of Microgrid Technologies and Testing Projects from Around the World. *IEEE power & energy magazine*, 14.
- Laghari, J. A., Mokhlis, H., Halim Abu Bakar, A. B., Karimi, M., & Shahriari, A. (2012). An Intelligent Under Frequency Load Shedding Scheme for Islanded Distribution Network. *IEEE International Power Engineering and Optimization Conference* (pág. 6). Melaka: IEEE.
- Larsen G. K. H., S. J. (2011). Distributed control in a network of households with μ chp. *PROC. 18TH IFAC WORLD CONGRESS*. Milan.
- Mao B., Z. B. (2010). Dynamic Modelling for Distribution Networks Containing Dispersed Generations and Energy Storage Devices. *POWER SYSTEM TECHNOLOGY (POWERCON)*.
- Margaris I., P. S. (2008). Frequency Control in Autonomous Power Systems With High Wind Power Penetration. *COLCIENCIAS ISA*.

- MEER Ecuador. (20 de septiembre de 2013). *Catálogo Digital*. Obtenido de Redes de Distribución de Energía Eléctrica: http://www.unidadesdepropiedad.com/index.php?option=com_content&view=article&id=514&Itemid=823
- Minchala Avila, I. (2014). Model-Based Control Algorithms For A Secure Integration Of Distributed Generation Into Microgrids. (pág. 164). Mexico: ITESM.
- Minchala Avila, I. (2014). *Voltaje stability criteria for the microgrid*. Mexico.
- Minchala, L., Garza, L., & Calle, E. (7-9 Nov. 2012). An Intelligent Control Approach for Designing o Low Voltage DC Breaker. *Andean Region International Conference (ANDESCON)*, (págs. 163,166).
- Mugica Alvarez, F. (1995). *Diseño Sistemático de Controladores Difusos usando Razonamiento Inductivo*. Cataluña: Independiente.
- Navarro, J. A., Montañes, A., & Santillan, A. (1999). *Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión*. Madrd: Paraninfo.
- Paauw J., R. B. (2009). Energy Pattern Generator; understanding the effect of user behaviour on energy systems. *FIRST EUROPEAN CONFERENCE ENERGY EFFICIENCY AND BEHAVIOUR*.
- Pansini, A. J. (2005). *Guide to Electrical Power Distribution Systems*. Lilburn: The Fairmont Press Inc.
- Passino, K. M., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison - Wesley.
- Ras Oliva, E. (1978). *Transformadores*. Barcelona, España: Marcombo.
- Reznik, L. (1997). *Fuzzy Controllers*. Melbourne, Australia: NEWNES.
- Rudion, K., Orths, A., & Styczynski, Z. A. (2006). Design of Benchmark of Medium Voltage Distribution Network for Investigation of DG Integration. (pág. 6). IEEE.
- Saffarian, A., & Sanaye-Pasand, M. (2010). Enhancement of Power Systems Stability Using Adaptive Combinational Load Shedding Methods. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*. IEEE.
- Seyedi, H., & Sanaye - Pasand, M. (2008). Performance Investigation of New Combinational Load Shedding Schemes.

- Seyedi, H., & Sanaye-Pasand, M. (2009). New Centralised Adaptive Load-Shedding Algorithms to Mitigate Power System Blackouts. *IET PROCEEDINGS ON GENERATION TRANSMISSION & DISTRIBUTION* (pág. 15). Tehran: IETDL.
- Shokooh, F., Dai, J., Tasted, J., Castro, H., Khandelwa, T., & Donner, G. (2005). An intelligent load shedding (ILS) system application in a large industrial facility. *IEEE*.
- Short, T. A. (2006). *Electric Power Distribution Equipment and Systems*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Styczynski Z., O. A. (2006). Benchmark for an Electric Distribution System with Dispersed Energy Resources. *TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION*.
- Tomohiko S., T. S. (2011). Modeling and Control of a Benchmark Microgrid with Vehicle-to-grid smart Connection. *CONTROL CONFERENCE (CCC)*. 30th Chinese.
- Ula, K. M. (2009). Simulation Study of the Cigre HVDC Benchmark Model with the WSCC nine-bus Power System Network. *IN POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION*.
- Von Meier, A. (2006). *Electric Power Systems*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Wang, L.-X. (1997). *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Detroit: Prentice-Hall International, Inc.
- Wildi, T. (2002). *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*. New Jersey: Pearson Education Inc.
- Zhang, H., & Liu, D. (2006). *Fuzzy Modeling and Fuzzy Control*. Boston: Birkhauser.