



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE CARGA DE UNA
MICRO-RED UTILIZANDO SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN
POTENCIA**

KELVIN ARNALDO PANTALEÓN RIOFRÍO
CRISTHIAN MANUEL PENDOLEMA VALLEJO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a nuestra institución, la cual nos ha llenado de conocimientos y experiencias valiosas para ser capaces de desenvolvernos en el ámbito profesional y social.

Kelvin Arnaldo Pantaleón Riofrío.

Mis más sinceros agradecimientos a Dios por haberme dado la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y por brindarme las fuerzas necesarias para día a día no rendirme ante cada obstáculo de la vida.

Cristhian Manuel Pendolema Vallejo.

DEDICATORIA

El presente trabajo de graduación está dedicado a toda mi familia, en especial a mi madre, quienes durante todos estos años me han apoyado y que con mucho cariño me motivaron para cumplir mis metas.

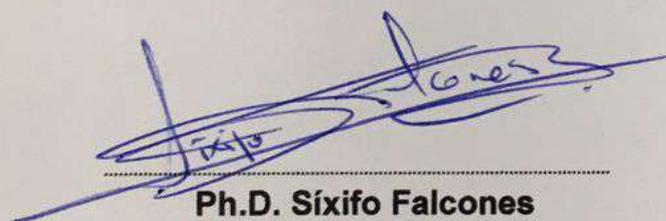
Kelvin Arnaldo Pantaleón Riofrío.

Todo el esfuerzo durante mis años de estudio, lo dedico a mis padres que siempre me apoyaron y creyeron en mí en los momentos más difíciles, brindándome sus buenos consejos.

Dedicado para ustedes Dolores y Mauricio.

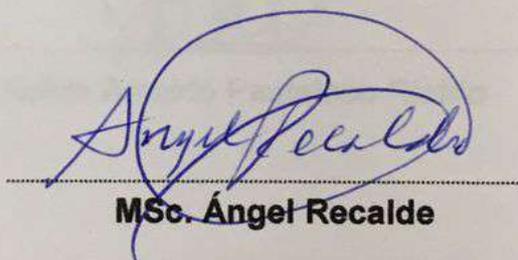
Cristhian Manuel Pendolema Vallejo.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



Ph.D. Síxifo Falcones

PROFESOR EVALUADOR



MSc. Ángel Recalde

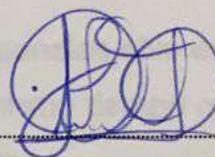
PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual".

En primera instancia, se acordó una autorización de consumo eléctrico de una vivienda que debe ser considerada factores externos que aumenten la carga en la red, así como también se considerará para la instalación requerida por el sistema de generación distribuida.

La generación distribuida consistirá de un sistema de generación que mejorará la confiabilidad del servicio de energía eléctrica al consumidor al reducir el consumo de energía de la red AC, abasteciendo



Kelvin Arnaldo Pantaleón Riofrío

Por último, en esta vivienda se realizará el acondicionamiento de carga para disminuir y controlar la conexión y desconexión de sus circuitos según el consumo que se presente, de tal forma que la energía proporcionada por la generación distribuida sea aprovechada eficientemente.



Cristhian Manuel Pendolema Vallejo

RESUMEN

El presente proyecto muestra el estudio de gestión de carga y generación distribuida para una micro-red, comprende el control y manejo de energía consumida en una urbanización con un número pequeño de viviendas, simulando cargas específicas en cada una de ellas a través de la plataforma "Simulink" del programa Matlab.

En primera instancia, se obtendrá una estimación de consumo eléctrico de una vivienda tipo clase media alta considerando factores externos que aumenten la carga; estos datos serán tabulados y considerados para la aportación requerida por el sistema de generación distribuida.

La generación distribuida constará de un sistema de paneles solares que mejorarán la confiabilidad del servicio de energía eléctrica, al mismo tiempo que disminuye el consumo de energía de la red AC, abaratando su costo.

Por último, en cada vivienda se realizará el seccionamiento de carga para monitorear y controlar la conexión y desconexión de sus circuitos según el escenario que se presente, de tal forma que la energía proporcionada por la generación distribuida sea aprovechada eficientemente.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE GESTIÓN DE CARGA CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	1
1.1. Propuesta.....	2
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. General.....	4
1.2.2. Específicos.....	4
1.3. Alcance.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
2. SISTEMA DE GESTIÓN DE CARGA CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	5
2.1. Sistema de distribución.....	5
2.2. Topologías de los sistemas de distribución.....	6
2.2.1. Sistema Radial.....	6

2.2.2.	Sistema en Anillo.....	6
2.2.3.	Sistema Mallado.....	7
2.3.	Gestión de carga eléctrica.....	8
2.4.	Micro-red.....	9
2.4.1.	Ventajas de las micro-redes eléctricas.....	9
2.4.2.	Desventajas de las micro-redes eléctricas.....	10
2.5.	Generación distribuida.....	10
2.5.1.	Ventajas de las Generación Distribuida.....	12
2.6.	Impactos de la Generación Distribuida en un sistema eléctrico de distribución.....	12
2.6.1.	Efecto sobre la confiabilidad de un sistema eléctrico.....	12
2.6.2.	Efecto en la corriente de falla.....	13
2.6.3.	Efecto sobre la calidad de la energía.....	13
2.6.4.	Efecto en el flujo de carga.....	14
2.7.	Confiabilidad de sistemas de distribución con Generación Distribuida.....	15
2.7.1.	Sistema radial con Generación Distribuida.....	15
2.8.	Generación Distribuida en Ecuador.....	16
CAPÍTULO 3.....		17
3. METODOLOGÍA APLICADA AL DISEÑO DE LA MICRO-RED.....		17
3.1.	Análisis del área en estudio.....	18
3.2.	Análisis de la demanda diaria de una vivienda media.....	19
3.3.	Estudio de la red de distribución.....	24

3.3.1.	Dimensionamiento de los paneles solares y sistemas de baterías.	24
3.3.2.	Dimensionamiento del generador a diésel.	27
3.4.	Estudio de la GD propuesta en el sistema de distribución.	28
3.4.1.	Nivel de dispersión de la GD.	29
3.4.2.	Nivel de penetración de la GD.	29
3.5.	Impacto de la Generación Distribuida en la confiabilidad del suministro eléctrico.	29
3.6.	Simulación del sistema en estado de operación normal de la red de distribución.	33
3.7.	Control de carga para el estado de falla.	34
3.8.	Simulación del sistema en estado de falla.	35
CAPÍTULO 4.		37
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.		37
4.1.	Análisis de los parámetros principales del sistema sin GD.	37
4.2.	Análisis de los parámetros principales para el estado normal del sistema.	38
4.3.	Análisis de los parámetros principales para el estado de falla del sistema.	39
4.4.	Análisis del sistema de monitoreo y control para la micro-red.	40
4.5.	Señales de control en tiempo real para estado normal de la micro-red.	44
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.		46
BIBLIOGRAFÍA.		47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama Unifilar de un conjunto residencial sin GD.....	2
Figura 1.2: Diagrama Unifilar de un conjunto residencial con GD.....	3
Figura 2.1: Sistema de Distribución Radial. Fuente: [14]	6
Figura 2.2: Sistema de Distribución en Anillo. Fuente: [14]	7
Figura 2.3: Sistema de distribución mallado. Fuente: [14]	8
Figura 2.4: Esquema básico de una micro-red eléctrica. Fuente: [7].....	9
Figura 2.5: Esquema de falla con una GD conectada a una red de distribución. Fuente: [13].....	13
Figura 2.6: Diversos casos de la GD conectada a una red de distribución. Fuente: [14].....	14
Figura 2.7: Sistema de Distribución Radial con GD. Fuente: [5].....	15
Figura 2.8: Producción de energía eléctrica e importaciones en el Ecuador. Fuente: [18].....	16
Figura 3.1: Viviendas conectadas a una red de distribución radial con GD..	19
Figura 3.2: Demanda diaria de la Vivienda 1 y Vivienda 2.....	22
Figura 3.3: Demanda diaria de la Vivienda 3 y Vivienda 4.....	23
Figura 3.4: Demanda diaria de la Vivienda 5 y Vivienda 6.....	23
Figura 3.5: Valores para generar las curvas de carga de los consumidores y de los paneles solares.	24
Figura 3.6: Esquema de la micro-red planteada realizada mediante la librería Simulink de Matlab.....	24
Figura 3.7: Elementos de la librería Simulink para generar curvas de carga.	25

Figura 3.8: Conexión de elementos que simulan la curva de carga dentro de la red.....	25
Figura 3.9: Elementos de la librería Simulink para generar curvas del panel fotovoltaico.....	26
Figura 3.10: Conexión de los elementos que simulan a un panel fotovoltaico.	26
Figura 3.11: Curva generada por el panel fotovoltaico obtenido en Matlab. .	27
Figura 3.12: Bloque del sistema del generador a diésel en Simulink.....	28
Figura 3.13: Modelo de generador de diésel utilizado.	28
Figura 3.14: Diagrama unifilar sin GD.....	31
Figura 3.15: Diagrama unifilar con GD.....	32
Figura 3.16: Interfaz gráfica de la micro-red cuando la red de distribución opera en estado normal.	33
Figura 3.17: Bloques de carga e interruptor de la librería Simulink.....	34
Figura 3.18: Bloque que contiene las señales para operar los elementos del sistema.	35
Figura 3.19: Interfaz gráfica de la micro-red cuando la red de distribución opera en estado de falla.....	36
Figura 4.1: Curva de la demanda total del sistema sin Generación Distribuida.	37
Figura 4.2: Curva de la demanda total del sistema con Generación Distribuida.	38
Figura 4.3: Curva de corriente del sistema en operación normal cuando ocurre una falla.	39
Figura 4.4: Interfaz gráfica del SCADA, Sistema en operación normal.....	41

Figura 4.5: Diagrama esquemático del sistema en operación normal.	41
Figura 4.6: Interfaz gráfica del SCADA, sistema en estado de falla en el día.	42
Figura 4.7: Interfaz gráfica del SCADA, sistema en estado de falla en la noche.	43
Figura 4.8: Diagrama esquemático del sistema en estado de falla.....	44
Figura 4.9: Señal de estado de la red eléctrica pública y generador a diésel.	45
Figura 4.10: Señales de estado de los paneles fotovoltaicos y baterías.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cuadro comparativo de las principales características de la Generación Distribuida. Fuente: [15]	11
Tabla 2: Datos de equipos eléctricos en una vivienda promedio.	20
Tabla 3: Demanda de Viviendas por hora.....	22
Tabla 4: Datos del alimentador y de la GD.	30
Tabla 5: Estados posibles para el escenario 1: un alimentador, una carga variable, sin GD.	31
Tabla 6: Estados posibles para el escenario 2: un alimentador, una carga variable, con GD.	32
Tabla 7: Valores de Voltaje rms de las fases del sistema sin GD.	38
Tabla 8: Valores de Voltaje rms de las fases del sistema con GD en estado normal.....	39
Tabla 9: Valores de Voltaje rms de las fases del sistema con GD cuando falla el sistema de distribución.....	40

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE GESTIÓN DE CARGA CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA.

En la actualidad se ha aumentado el interés en la implementación de las energías renovables, lo que hace necesario la aportación de nuevos estudios en todo lo que implique el uso de estas tecnologías.

El usar fuentes de generación renovables tiene sus limitaciones ya que dependen mucho de las condiciones climáticas y el lugar. Para evitar estas limitaciones, se ha pensado como solución un sistema híbrido de generación distribuida; es decir, usar varios tipos de generación y además analizar la implementación de un sistema de baterías que almacenen energía eléctrica para poder satisfacer la demanda en un cierto el tiempo y con ello tener un sistema más confiable. [9]

Los sistemas híbridos o micro-redes generalmente son usados en lugares donde es casi imposible el acceso a la red eléctrica pública.

El presente trabajo estudia el control de las cargas en un sistema con generación distribuida, pretendiendo realizar un trabajo de control completo desde una base para la conexión y desconexión de las cargas del sistema ante algunos posibles escenarios de falla en el mismo.

El propósito del presente trabajo es mejorar la calidad de la energía eléctrica y reducir el tiempo de caída del servicio al menor posible, mas no se realiza un estudio económico entre el uso de generación distribuida y el servicio de energía eléctrica local.

Entre los principales problemas que pueden presentar los sistemas se tienen el corte inesperado del servicio de energía eléctrica, variación de voltaje en la red, aparición de armónicos, entre otros, los cuales pueden causar molestias en los consumidores y en algunos casos estos desperfectos producen daños y averías en los artefactos eléctricos. [14]

1.1. Propuesta.

Debido a las ocasionales fallas, interrupciones del servicio de energía eléctrica y otros problemas que pueden presentarse en la red, que afectan a los consumidores generando molestias y daños dentro de sus domicilios, se plantean el uso de pequeñas centrales de micro-red que garanticen una mayor confiabilidad, buena calidad y la continuidad del servicio eléctrico. La contaminación producida por la generación eléctrica es otro problema que en la actualidad se busca mitigar con el uso de micro-redes.

Se planteará un sistema para que los abonados estén dotados del servicio de energía eléctrica de forma continua; de ocurrir alguna falla el sistema se restablecerá el suministro energía en el menor tiempo posible, con ello se mejoran los parámetros que indican la calidad de la energía. En la Figura 1.1 se muestra el diagrama unifilar de un grupo de viviendas conectadas a la red eléctrica pública como única fuente de energía.

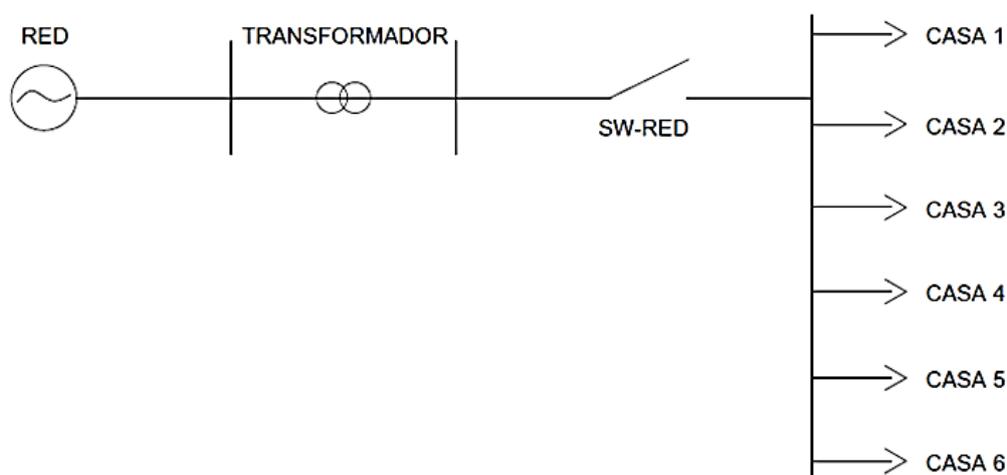


Figura 1.1: Diagrama Unifilar de un conjunto residencial sin GD.

Esto conlleva a plantear un sistema con generación distribuida para satisfacer al menos una parte de la demanda total, con ello se logra disminuir los picos de la curva de demanda en el sistema.

En la Figura 1.2 se muestra el diagrama unifilar del mismo grupo de viviendas junto con un sistema fotovoltaico y un grupo de baterías conectados en cada casa, además de un generador que se encuentra conectado en paralelo a la red pública eléctrica.

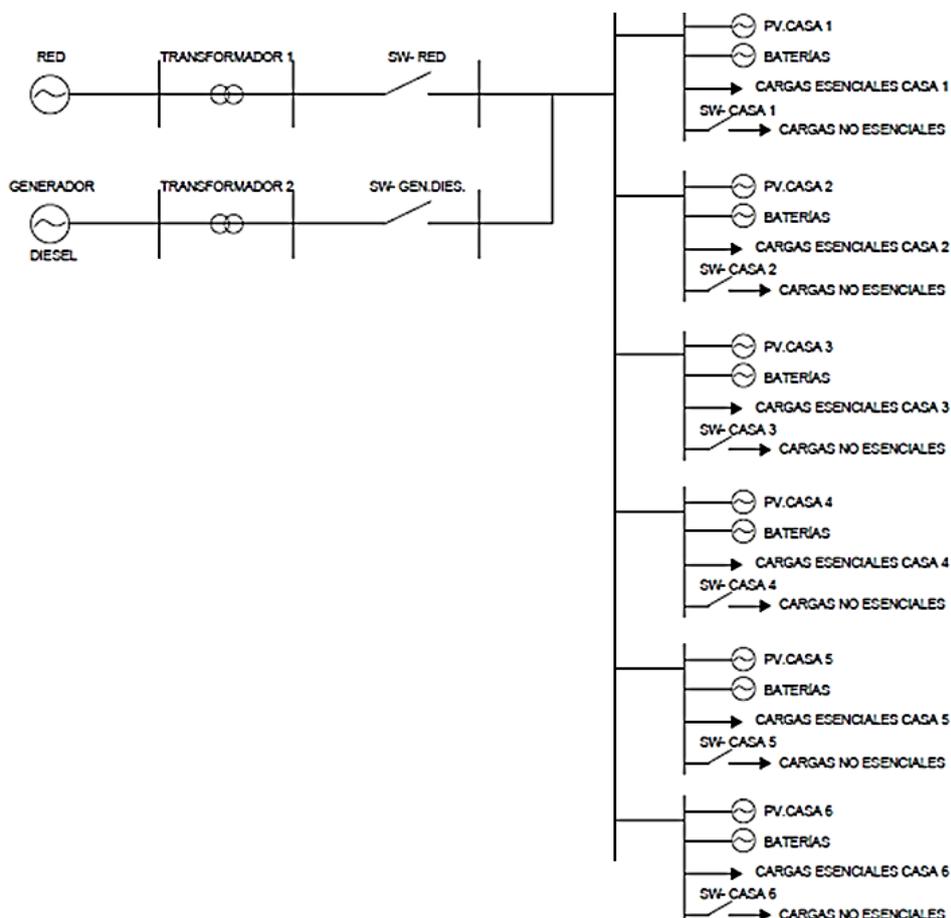


Figura 1.2: Diagrama Unifilar de un conjunto residencial con GD.

Para las demandas de cada vivienda se consideraron valores de demanda de cargas reales en viviendas pertenecientes a distintas urbanizaciones y con ello estimar un valor promedio general de carga para las urbanizaciones pequeñas o con poca demanda de energía.

Para la gestión de carga se la ha clasificado en dos tipos: cargas esenciales y cargas no esenciales. Las cargas esenciales siempre estarán energizadas, mientras que las no esenciales estarán desconectadas cuando no exista suficiente generación de energía.

1.2. Objetivos.

1.2.1. General.

Diseñar un sistema de control para carga y generación distribuida dentro de una micro-red que garantice el suministro de energía eléctrica a cargas prioritarias cuando falle el sistema de alimentación de la red de distribución.

1.2.2. Específicos.

- Simular un sistema de generación distribuida para una micro-red de consumo residencial.
- Utilizar el equipo de simulación en tiempo real OPAL-RT.
- Mejorar la confiabilidad del sistema en términos generales, manteniendo conectados un número significativo de consumidores el mayor tiempo posible.

1.3. Alcance.

El presente trabajo abarca el monitoreo y control de consumo de carga para una pequeña red de consumidores conectados al sistema eléctrico, a través del diseño de una micro-red de distribución visualizado en una interfaz gráfica, usando un simulador en tiempo real.

La generación provendrá de la red eléctrica pública, de paneles fotovoltaicos y de un generador a diésel, todas estas fuentes de generación serán controladas con el fin de mantener energizada principalmente las cargas prioritarias, todo esto se lo realizará con ayuda del software Matlab.

Para una mejor visualización se empleará una interfaz gráfica con ayuda del software LabView, esta interfaz nos permitirá observar el estado de los interruptores presentes en el sistema.

El proyecto fue totalmente simulado en tiempo real por medio de Rt-Lab, no se hizo uso de ningún hardware dentro del proyecto, sin embargo, se lo puede implementar en la vida real utilizando el hardware necesario.

CAPÍTULO 2

2. SISTEMA DE GESTIÓN DE CARGA CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA.

El presente trabajo involucra actividades y situaciones que se podrían presentar cuando se cuenta con fuentes de generación distribuida en una micro-red, las cuales en la actualidad son usadas con mayor frecuencia dada las nuevas implementaciones de estas fuentes de energía al sistema eléctrico.

La acción más importante del sistema es el seccionamiento de carga en la micro-red en los casos en que la única fuente de alimentación sea la del sistema de generación distribuida. Esta gestión de carga permite que parte de ella esté conectada a la generación distribuida, de no ser así la energía producida no será la suficiente para alimentar las cargas en su totalidad, produciendo ineficiencia en la micro-red, todo con la finalidad de optimizar el uso de la energía disponible.

2.1. Sistema de distribución.

La función principal de los sistemas de distribución es la de suministrar energía eléctrica a los usuarios finales por medio de las redes de distribución, las cuales constan de diversos elementos tales como transformadores, interruptores, seccionadores, alimentadores, entre otros; los que permiten reducir el nivel de voltaje a rangos aptos para su uso.

Actualmente, en el país existen veinte empresas distribuidoras de energía eléctrica, de las cuales diez son empresas eléctricas distribuidoras y diez son gerencias regionales, las cuales constituyen la Corporación Nacional de Electricidad (CNEL). Se conoce que “el total del área de concesión de todas las empresas distribuidoras es de 256370 Km² [1], por lo tanto, cubre toda el área superficial del país en su totalidad.

2.2. Topologías de los sistemas de distribución.

Se refieren al esquema de las redes de distribución, es decir en cómo se distribuye la energía a través de los circuitos eléctricos hasta llegar al usuario final.

2.2.1. Sistema Radial.

El sistema radial muestra un único recorrido por el que fluye la energía hacia las cargas, tal como se muestra en la Figura 2.1. Son mayormente usados en las redes de distribución debido a su sencillez, son simples y económicos. El mayor inconveniente que presenta este tipo de sistema son las fallas eléctricas, debido a que retira del sistema gran parte de la carga. [2]

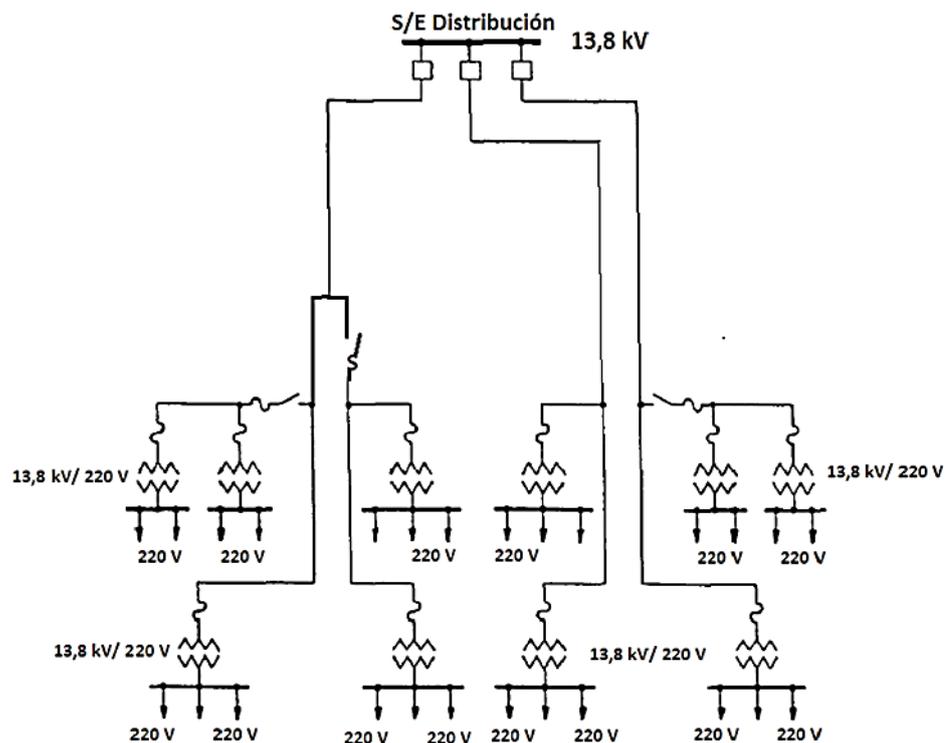


Figura 2.1: Sistema de Distribución Radial. Fuente: [14]

2.2.2. Sistema en Anillo.

El sistema en anillo es un sistema confiable en cuanto al servicio de entrega al usuario final, ya que de presentar una falla eléctrica se

mantiene el servicio desde otro alimentador, lo cual aumenta la confiabilidad en las cargas, pero su costo es más elevado que el sistema radial, la configuración de este sistema se muestra en la Figura 2.2. [2]

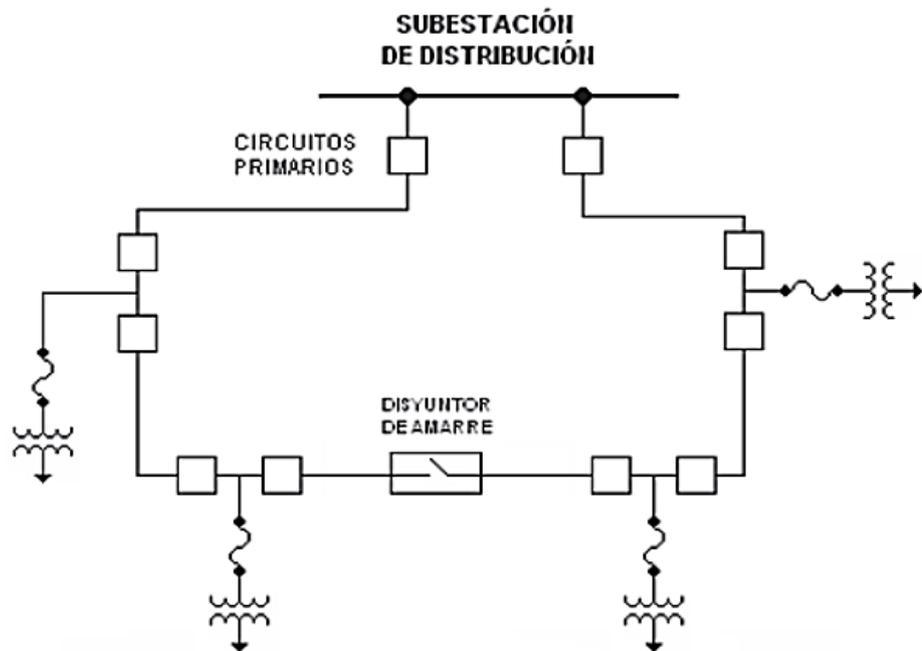


Figura 2.2: Sistema de Distribución en Anillo. Fuente: [14]

2.2.3. Sistema Mallado.

El sistema mallado tiene más de un recorrido simultáneo por el que fluye la energía hacia las cargas, tal como se muestra en la Figura 2.3. Este tipo de sistemas mejora la distribución de los alimentadores secundarios, presenta un mejor balance en lo que respecta a cargas en los transformadores, mejora la regulación del voltaje en el sistema de potencia. Es un sistema muy costoso, por lo que únicamente ciertas zonas que requieren un alto grado de confiabilidad lo poseen. [2]

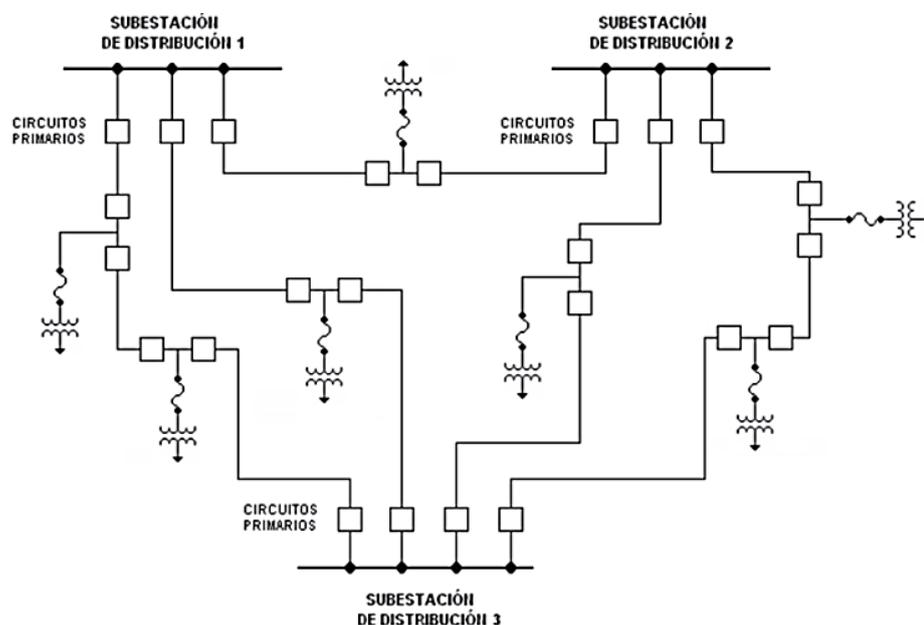


Figura 2.3: Sistema de distribución mallado. Fuente: [14]

2.3. Gestión de carga eléctrica.

La gestión de la carga eléctrica (Electric Load Management o LM) es el conjunto de acciones que permiten cambiar la curva de carga con la finalidad de conseguir reducir la carga pico del sistema total para que sea lo más uniforme posible.

Este proceso lleva a cabo varias etapas, tales como planificar el proceso de la producción para evitar conectar cargas simultáneamente a la red, almacenar energía para cubrir la demanda de ciertos equipos en horas pico, aplicar medidas de eficiencia energética y corregir el factor de potencia para reducir la energía reactiva entrante.

La optimización del perfil de carga no implica directamente un ahorro energético, pero la observación del patrón de consumos sí puede llevarle a racionalizar y renegociar su tarificación eléctrica con la empresa eléctrica. [3]

2.4. Micro-red.

Una micro-red eléctrica es un “sistema de suministro de energía que consiste en cargas, fuentes de generación distribuidas y equipos de almacenamiento que funcionando como un sistema integrado pueden operar conectados al sistema eléctrico o de forma aislada” [4], con capacidad para operar de forma independiente al presentarse una interrupción mínima del servicio eléctrico. Están conformadas por fuentes de generación eléctrica que aprovechan recursos renovables tal como se muestra en la Figura 2.4, favorece en el ahorro de energía y aumenta la confiabilidad del sistema, ya que poseen sistemas de monitorización y control del flujo de potencia. [4]

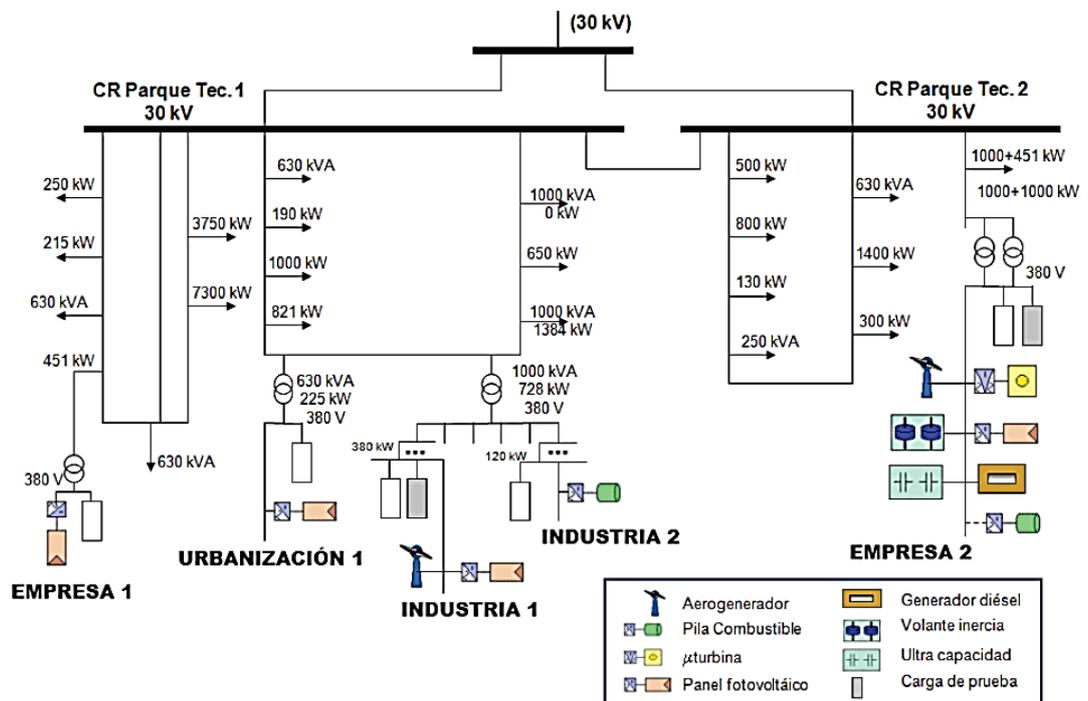


Figura 2.4: Esquema básico de una micro-red eléctrica. Fuente: [7]

2.4.1. Ventajas de las micro-redes eléctricas.

Las principales ventajas de las micro-redes son [7]:

- Proporciona una alta calidad del servicio eléctrico, un mayor ahorro y una menor dependencia de la red de distribución, ya que cuenta con el control de la potencia reactiva y del voltaje.

- Operan tanto conectados a la red eléctrica de distribución como sistemas aislados, supliendo la carga en caso de existir una falla.
- Cuenta con generación en las cercanías de las cargas, aumentando la eficiencia energética de la red.
- Reducen las pérdidas de energía por transporte a largas distancias.
- Reducen las emisiones de gases de efecto invernadero al implantar métodos de generación eléctrica por fuentes renovables.
- Reduce las inversiones para repotenciar las redes eléctricas.
- Ayuda a la estabilidad del sistema, al suplir la carga en exceso en las horas pico, ya que cuenta con potencia de reserva.

2.4.2. Desventajas de las micro-redes eléctricas.

Las principales desventajas de las micro-redes son [7]:

- Falta de una normativa específica que impide su generalización.
- Al tratarse de una tecnología que todavía no está implantada en los mercados, resultan sistemas energéticos excesivamente caros.

2.5. Generación distribuida.

La generación a pequeña escala es considerada como generación distribuida (GD), la cual está ubicada cerca del sitio de consumo, para su compra y venta. Al contrario de la generación convencional la cual es unidireccional y está conectada al sistema de transmisión para su transporte a diferentes lugares del país recorriendo largas distancia, la GD tiene sus fuentes de generación conectadas directamente a los sistemas de distribución, por lo cual se la considera una parte fundamental de las micro-redes.

La GD “engloba la generación de electricidad mediante instalaciones que son suficientemente pequeñas (3 KW – 10 MW) en relación con las grandes centrales de generación” [7], por ello este sistema se puede acoplar en cualquier punto del sistema de distribución eléctrica, lo cual lo hace un sistema eficiente. A continuación, en la Tabla 1 se muestra la comparación entre las principales características de la GD:

EVALUACIÓN	ESCALA RESIDENCIAL	PEQUEÑA ESCALA COMERCIAL	GRAN ESCALA COMERCIAL
Conexión	Carga de usuarios	Carga de usuarios	Red de distribución
Venta de electricidad	Generación excedente	Toda la generación	Toda la generación
Sectores	Residencial, no residencial	No residencial	No residencial
Principales tecnologías de energía renovable	Solar fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica, geotérmica	Cogeneración industrial	Solar fotovoltaica, eólica, cogeneración con biomasa
Capacidad aproximada	Hasta 100 KW	Hasta 1 MW	Superior a 1 MW

Tabla 1: Cuadro comparativo de las principales características de la Generación Distribuida. Fuente: [15]

Analizando a la Tabla 1, se observa que la GD a pequeña escala se conecta directamente a la carga del usuario, vende su excedente de generación, pero esto dependerá de la normativa de cada país, por lo general es implementado en residencias cuya generación no suela ser mayor a 100 KW. La GD a pequeña y gran escala comercial suele conectarse a la red de distribución, vende toda la generación de forma continua, aprovecha la cogeneración industrial aprovechando al máximo la producción de energía. En todos los casos se muestra las tecnologías típicas usadas de GD renovable.

2.5.1. Ventajas de las Generación Distribuida.

Existen algunas ventajas de la generación distribuida, las cual son similares a las de las micro-redes debido a que la generación distribuida es una característica intrínseca de las micro-redes. Entre ellas, encontramos que [7]:

- Aumenta la confiabilidad del sistema de distribución, en especial en lugares donde los apagones son comunes, convirtiéndose en un sistema no interrumpible.
- Mejora la calidad de la energía eléctrica.
- Reduce de pérdidas eléctricas en las redes de transmisión y distribución.
- Cuenta con generación de respaldo en caso de emergencia, supliendo las cargas en la red de distribución en las horas pico.
- Suministra energía en lugares alejados donde no puede llegar la generación convencional.
- Reduce las emisiones de dióxido de carbono y con ello los gases de efecto invernadero.

2.6. Impactos de la Generación Distribuida en un sistema eléctrico de distribución.

Existen algunos efectos sobre el sistema de distribución al implementar un GD, tales como un aumento de la complejidad de la operación del sistema, un aumento de la confiabilidad del sistema, disminución de las cargas en las redes de transmisión y subtransmisión, modificación de las corrientes de falla, reducción de las pérdidas, variación de la regulación de voltaje y variación de la calidad de la energía. Estos efectos dependen directamente de la ubicación y el tipo de GD a usar, la potencia que de inyección al sistema de distribución y la forma en que se distribuye la carga debido a que deja de ser un sistema radial.

2.6.1. Efecto sobre la confiabilidad de un sistema eléctrico.

Al existir alimentación de una GD desde un punto diferente al de fuente principal del sistema de distribución, el tiempo de interrupción causado por

una falla permanente disminuye, debido a que la GD cubre la carga hasta que se restablezca el servicio de energía eléctrica. El tiempo de espera para los usuarios se reduce al tiempo que conllevaría despejar el tramo fallado. [11]

2.6.2. Efecto en la corriente de falla.

Con la implementación de la GD el sistema de distribución deja de ser radial, por lo tanto, el esquema de protección debe ser modificado, aumentando la complejidad. Al ocurrir una falla se debe considerar que es alimentada tanto de la subestación de distribución como desde el nodo en el que está conectada la GD, este esquema se muestra en la Figura 2.5. [13]

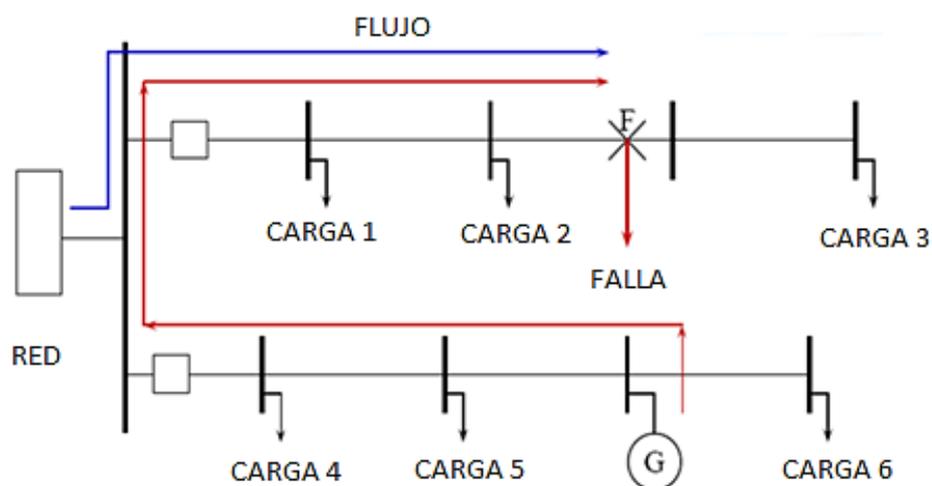


Figura 2.5: Esquema de falla con una GD conectada a una red de distribución. Fuente: [13]

2.6.3. Efecto sobre la calidad de la energía.

La calidad de energía en los sistemas de distribución es de gran importancia, ya que de esta depende la vida útil de los equipos eléctricos. Entre las principales afectaciones están la presencia de armónicos, sags, swells y flickers en el suministro eléctrico. [13]

- **Armónicos:** Una GD conectada al sistema de distribución puede aumentar la inyección de armónicos en las señales de corriente y voltaje, debido a que sus componentes son de carácter electrónico.
- **Sags:** Las fallas y los arranques de las máquinas de la GD producen sags en el sistema de distribución. Además, que existen componentes electrónicas que no operan en la presencia de sags por lo que pueden desencadenar otro tipo de problemas.
- **Flicker:** Se producen al arrancar las máquinas eléctricas como generadores o por variaciones en la tensión.

2.6.4. Efecto en el flujo de carga.

La GD puede alterar el sentido del flujo de potencia, esto se da si la energía producida por la GD es mayor a la carga.

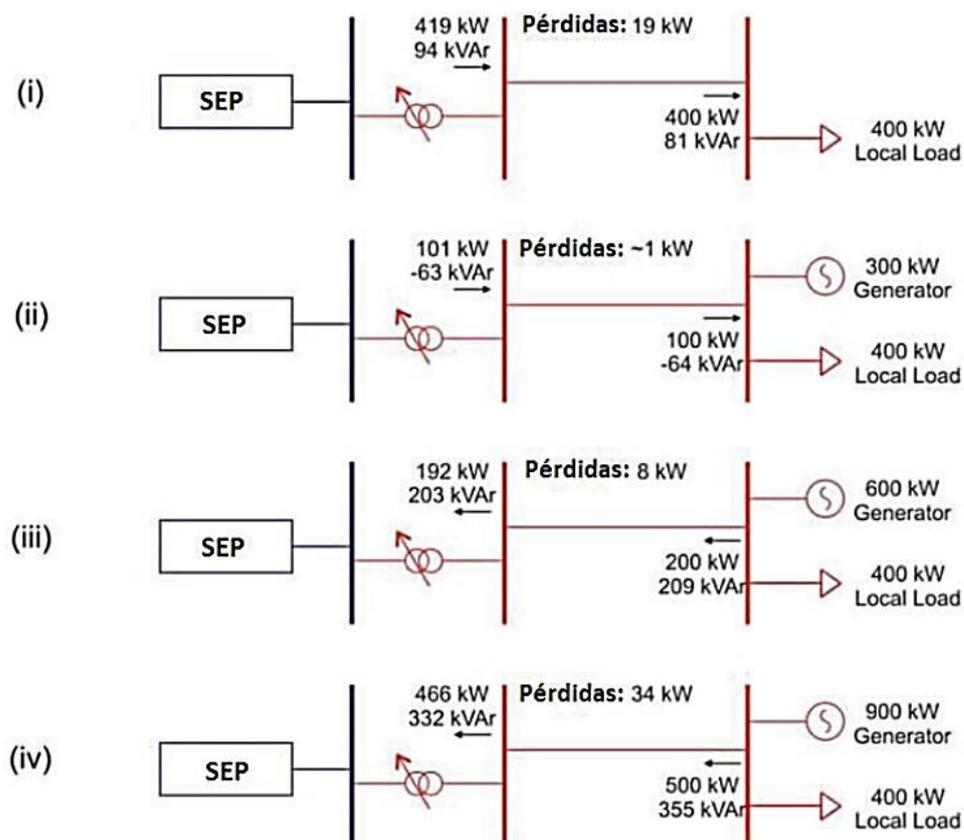


Figura 2.6: Diversos casos de la GD conectada a una red de distribución. Fuente: [14]

En la Figura 2.6 se muestra cuatro diferentes casos en los que la red posee una carga de 400 KW conectada en cada uno de ellos, en el caso (i) no existe influencia de la GD, en el caso (ii) la GD produce potencia menor a la requerida por la carga y en los casos (iii) y (iv) la GD produce mayor potencia que la requerida por la carga, por lo cual ese exceso de potencia se transmite directamente al sistema eléctrico de potencia (SEP). [14]

2.7. Confiabilidad de sistemas de distribución con Generación Distribuida.

La confiabilidad en los sistemas de distribución es “la capacidad para abastecer de servicio de energía eléctrica con el mínimo de interrupciones” [11], el cual puede ser cuantificado mediante índices probabilísticos que indican cual es la calidad de servicio eléctrico.

2.7.1. Sistema radial con Generación Distribuida.

El sistema radial de la Figura 2.7, tiene una fuente de alimentación en la subestación eléctrica 1 (S/E1), y una fuente de alimentación adicional en la subestación eléctrica 2 (S/E2), una forma de mejorar la confiabilidad es añadiendo a la red mostrada una fuente de generación distribuida GD de cualquier tipo. [5]

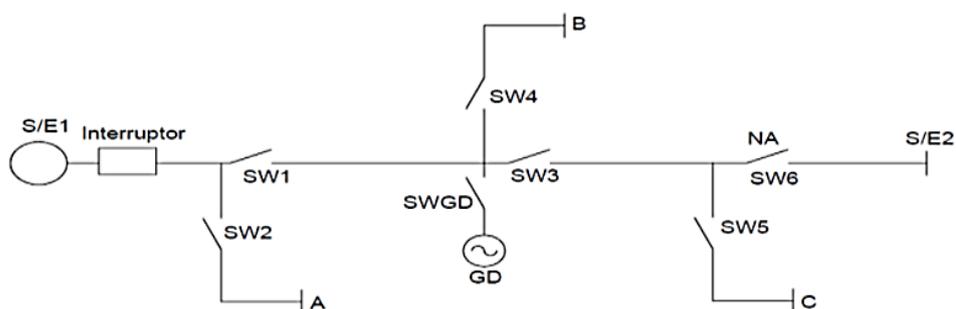


Figura 2.7: Sistema de Distribución Radial con GD. Fuente: [5]

Analizando el caso en que ocurra una falla en la S/E1, se dispondría de dos fuentes alternativas: la S/E2 y GD, para suplir el requerimiento de energía de los usuarios. De esta manera se mejora la confiabilidad y la calidad de servicio de la energía eléctrica.

2.8. Generación Distribuida en Ecuador.

En Ecuador, actualmente se obtiene energía eléctrica mediante un sistema de generación centralizada para abastecer de electricidad a la mayoría de poblaciones y ciudades tanto rurales como urbanas.

A pesar de que el país cuenta con una gran cantidad de recursos naturales que pueden ser aprovechables para el desarrollo de tecnologías de generación mediante fuentes renovables no convencionales en distintos puntos geográficos, es en estos últimos años en que se está implementando un plan donde se apliquen proyectos que integren la tecnología de los sistemas de generación distribuida. [12]

Con el cambio de la matriz energética en el país se están desarrollando proyectos de carácter tanto hidráulico, eólico, solar, biomasa y geotérmico, entre los cuales constan: Los parques eólicos Villonaco y San Cristóbal, los proyectos de biomasa en San Carlos, Ecoelectric y Eculos, el proyecto fotovoltaico Yatsa Li Etsari y los proyectos geotérmicos Chacana, Chachimbiro y Tufiño.

La Figura 2.8 muestra la producción de energía eléctrica e importaciones aplicados en el país, en que se destaca el uso de recursos renovables no convencionales y convencionales con un 51.78% representando 13.638,89 gigavatios hora (GWh) distribuidos como GD, entre ellos consta la hidráulica, la biomasa, la eólica y la fotovoltaica. [18]

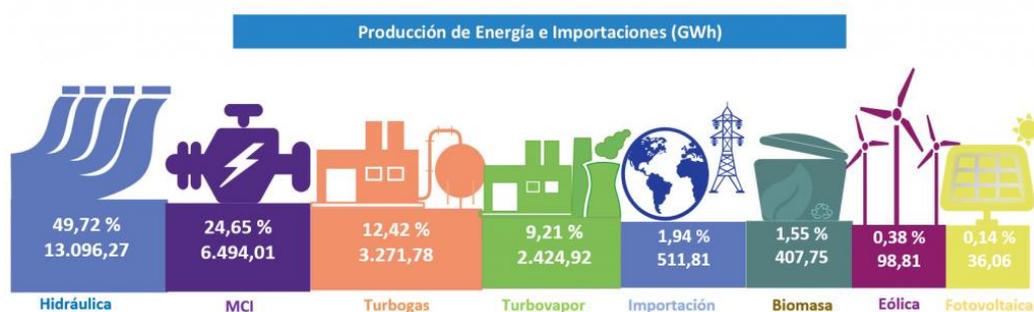


Figura 2.8: Producción de energía eléctrica e importaciones en el Ecuador.

Fuente: [18]

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA APLICADA AL DISEÑO DE LA MICRO-RED.

El proceso para lograr el diseño de un sistema para una micro-red es el siguiente:

- Construir una base de datos con los valores de potencia para las 24 horas de un día, dichos valores de potencia simularán el consumo de las viviendas en una red pequeña.
- Dimensionar los valores de la potencia generada para los paneles fotovoltaicos, considerando las cargas de cada consumidor.
- Seleccionar el programa a utilizar para realizar el diseño de la micro-red y la interfaz de monitoreo e ingresar estos valores en el software como variables según correspondan.
- Construir el sistema de distribución con las respectivas cargas de consumidores sin generación distribuida, con el fin de medir los parámetros importantes del sistema cuando opera en estado normal.
- Ejecutar el sistema realizado para alcanzar un correcto funcionamiento del sistema de la micro-red previo al ingreso de la generación distribuida en el mismo.
- Ingresar en el diseño construido los elementos de generación distribuida para completar el sistema de micro-red planteado.
- Ejecutar nuevamente el sistema construido en el software, modificando el diseño de ser el caso hasta que pueda ejecutarse correctamente.
- Guardar los valores de los parámetros de voltajes y corrientes en la entrada de la red cuando esta funciona en modo normal, para un posterior análisis comparativo con la simulación en estado de falla.
- Introducir en el diseño del sistema realizado con la librería Simulink los elementos que permitirán el cambio de estados de la red de distribución, es decir estado normal y estado de falla. Además, introducir sensores e interruptores, que realizarán aperturas y seccionamientos de los elementos a operar en dichos estados.

- Introducir el diseño del sistema realizado en un bloque de control, el cual va a realizar las actividades de gestión y comunicación con el bloque de señales, lo que permitirá ejecutar este sistema en el simulador en tiempo real.
- Realizar un bloque de señal con los respectivos elementos que permitirán enviar estas señales a la interfaz de monitoreo requerida.
- Realizar un listado de señales de entradas y salidas para la control y lectura del sistema realizado anteriormente.
- Acondicionar el sistema realizado en Simulink colocando los bloques de entradas y salidas correspondientes a estas señales.
- Crear scripts para comunicar el sistema realizado en Simulink, el cual va a ser simulado en Rt-Lab para que se pueda ejecutar y mostrar en el software LabView que sirve de interfaz gráfica para monitorear y controlar el diseño.
- Realizar el diseño en el software LabView del sistema planteado, para ello se colocarán los bloques que estarán vinculados a las variables de entrada y salida de nuestro sistema.
- Para ejecutar el sistema se debe compilar el diseño creado en el software Rt-Lab, el cual permite la comunicación con el simulador en tiempo real. Luego, mediante la interfaz realizada en LabView ejecutar el sistema creado.
- Archivar los gráficos y resultados de la micro-red, mostrados por la interfaz creada.

3.1. Análisis del área en estudio.

Para el presente estudio se consideró un conjunto residencial conformado por 6 viviendas conectadas a una misma red de distribución, las viviendas cuentan con GD por medio de un sistema fotovoltaico individual conectado en cada una de ellas y un generador a Diesel para el grupo en conjunto, tal como se muestra en la Figura 3.1.

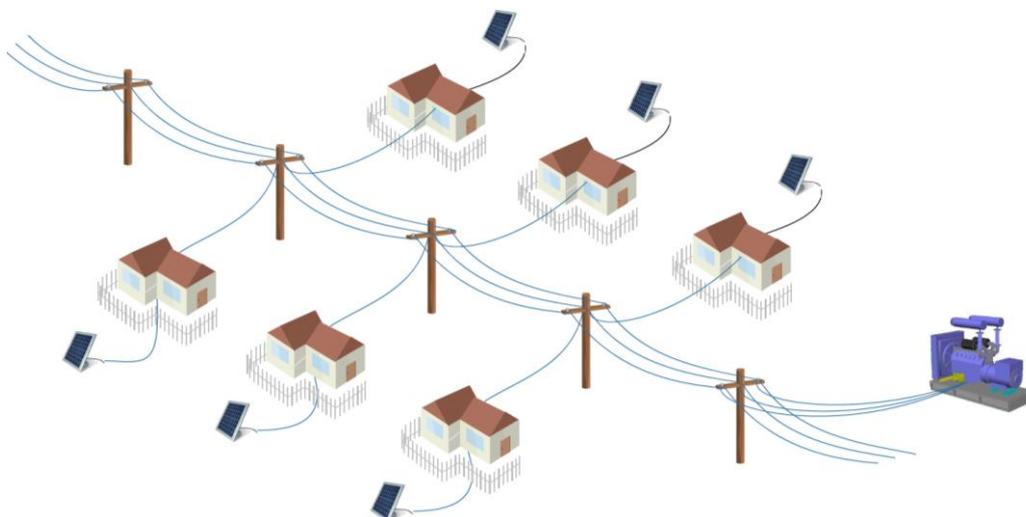


Figura 3.1: Viviendas conectadas a una red de distribución radial con GD.

La GD cubre una parte de la demanda de la vivienda, en caso de suspenderse el suministro eléctrico de la red por alguna falla de cualquier tipo, la GD cubre la carga o las cargas más importantes hasta que se restablezca el servicio de energía eléctrica.

3.2. Análisis de la demanda diaria de una vivienda media.

La demanda eléctrica fue considerada mediante un análisis de carga por hora, en el que se seleccionaron diversos equipos y artefactos eléctricos pertenecientes a una vivienda que influyen directamente en su consumo normal diario.

La Tabla 2 muestra la cantidad y la demanda de ciertos electrodomésticos y artefactos eléctricos típicos que son de uso común dentro de una vivienda media, finalmente el consumo total se obtiene del producto de las dos variables antes mencionadas, de acuerdo a la ecuación 2.1:

$$\text{Consumo Total} = \text{Cantidad} \times \text{Consumo por hora} \quad (2.1)$$

EQUIPO ELÉCTRICO	CANTIDAD	CONSUMO POR HORA (VATIOS)	CONSUMO TOTAL (VATIOS)
Refrigeradora	1	660	660
Lavadora	1	600	600
Secadora	1	1000	1000
Cocina de inducción	1	4000	4000
Acondicionador de aire	3	935	2805
Aspiradora	1	1200	1200
Batidora	1	250	250
Computadora	2	100	200
TV	3	400	1200
Microonda	1	1200	1200
Foco	22	15	330
Licuada	1	400	400
Equipo DVD	2	200	400
Bomba de 1/2 HP	1	552	552
Extractor de aire	1	300	300
Horno eléctrico	1	1200	1200
Plancha eléctrica	1	1000	1000
Ducha eléctrica	1	1200	1200
Otros (Celulares, Módem, etc.)	1	100	100

Tabla 2: Datos de equipos eléctricos en una vivienda promedio.

Especulando la hora de uso de los equipos seleccionados en la Tabla 2, se obtendrían las demandas por hora de estas, es decir el consumo por hora, estos resultados se muestran en la Tabla 3.

TIEMPO (HORA)	DEMANDA VIVIENDA 1 Y 2 (W)	DEMANDA VIVIENDA 3 Y 4 (W)	DEMANDA VIVIENDA 5 Y 6 (W)
1	1595	1360	1200
2	1035	100	200
3	1035	760	850
4	760	100	150
5	1595	660	500
6	1695	100	150
7	4050	2360	2000
8	1885	3650	3000
9	2145	1175	1100
10	1250	1052	1150
11	1652	2960	2050
12	3515	1400	1500
13	1190	2275	2500
14	1695	600	750
15	1275	2095	1800
16	800	952	1052
17	760	2095	1800
18	2250	760	810
19	3837	600	750

20	3447	2660	3000
21	2795	1535	1570
22	3130	2095	2000
23	3030	1550	1700
24	2370	2195	2500

Tabla 3: Demanda de Viviendas por hora.

Una vez establecidas las demandas por hora, procedemos a graficar la curva de demanda diaria de cada una de las viviendas. La Figura 3.2 muestra la curva de demanda diaria de la vivienda 1 y la vivienda 2, la Figura 3.3 muestra la curva de demanda diaria de la vivienda 3 y la vivienda 4, la Figura 3.4 muestra la curva de demanda diaria de la vivienda 5 y la vivienda 6, esto nos será de utilidad para visualizar cómo evoluciona la demanda de acuerdo al tiempo transcurrido.



Figura 3.2: Demanda diaria de la Vivienda 1 y Vivienda 2.

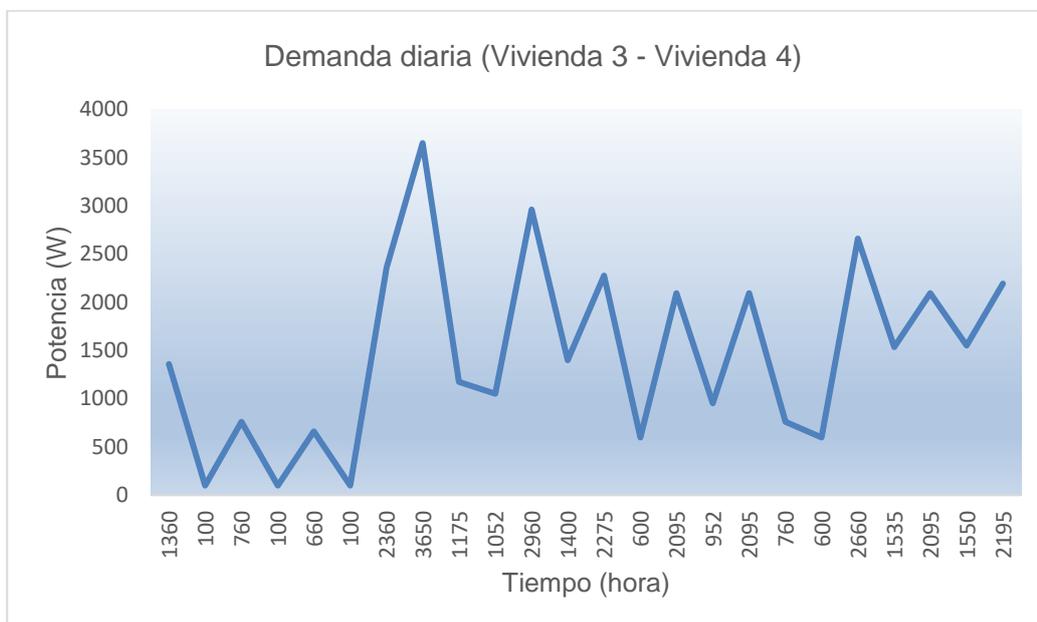


Figura 3.3: Demanda diaria de la Vivienda 3 y Vivienda 4.

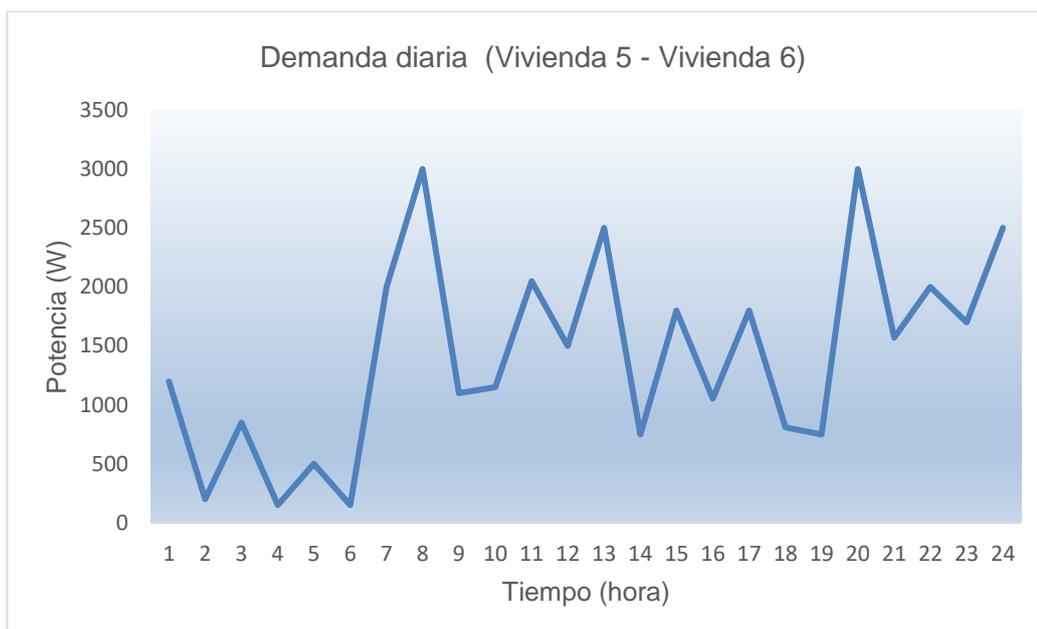


Figura 3.4: Demanda diaria de la Vivienda 5 y Vivienda 6.

Estos valores de carga fueron introducidos en el programa Matlab como vectores para la simulación de la curva de carga, tal como se muestra en la Figura 3.5. Cada uno de estos valores representa una demanda de potencia de consumo por

hora de acuerdo al día asignado. Los valores de potencia que genera el panel fotovoltaico también fueron introducidos de la misma forma.

```

22 %Consumidor1
23 - C1=[1595;1035;1035;760;1595;1695;4050;1885;2145;1250;1652;3515;.
24     1190;1695;1275;800;760;2250;3837;3447;2795;3130;3030;2370];
25 %Consumidor2
26 - C2=[1360;100;760;100;660;100;2360;3650;1175;1052;2960;1400;...
27     2275;600;2095;952;2095;760;600;2660;1535;2095;1550;2195];
28 %Consumidor3
29 - C3=[1200;200;850;150;500;150;2000;3000;1100;1150;2050;1500;...
30     2500;750;1800;1052;1800;810;750;3000;1570;2000;1700;2500];
31 %Panel Photovoltage
32 - CPV=[0;0;0;0;0;0;800;800;800;800;800;800;800;800;800;800;800;...
33     800;800;0;0;0;0;0;0];

```

Figura 3.5: Valores para generar las curvas de carga de los consumidores y de los paneles solares.

3.3. Estudio de la red de distribución.

Para diseñar el sistema de distribución se utilizó la librería Simulink de Matlab y en la Figura 3.6 se muestra el diagrama trifilar de la micro-red planteada. Con mayor detalle se muestra el diagrama en el Anexo F.

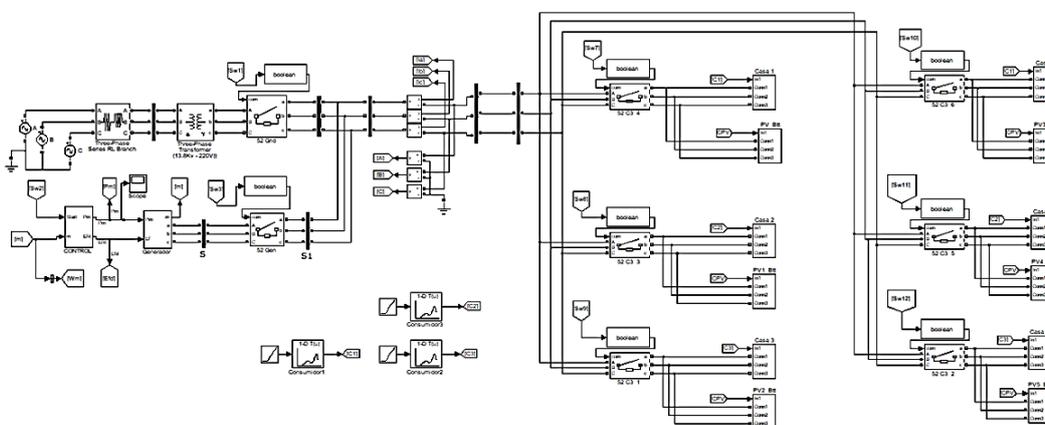


Figura 3.6: Esquema de la micro-red planteada realizada mediante la librería Simulink de Matlab.

3.3.1. Dimensionamiento de los paneles solares y sistemas de baterías.

Se consideró el valor de los paneles solares en 800 vatios para que estos puedan abastecer las cargas mínimas de cada consumidor. Por otro lado,

se consideró las condiciones del espacio físico que estos requieren. Se estimó que para cubrir este valor de potencia se requieren 4 paneles de 200 W, mismos que requieren un espaciamento físico de 0.8 x 1.50 metros cada uno, lo que equivale un área de 4.8 metros cuadrados por cada consumidor. Las Figuras 3.7 y 3.8 muestran los bloques que se usaron para simular las curvas de cargas y su respectiva conexión al sistema.

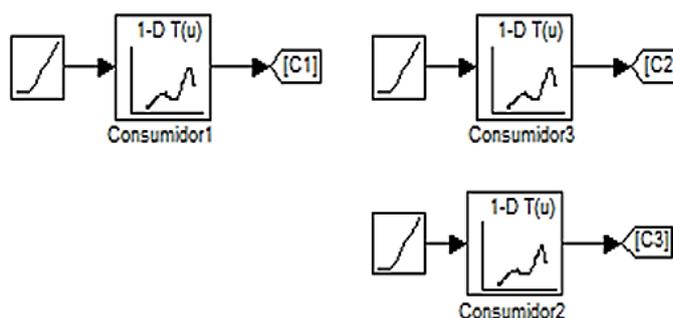


Figura 3.7: Elementos de la librería Simulink para generar curvas de carga.

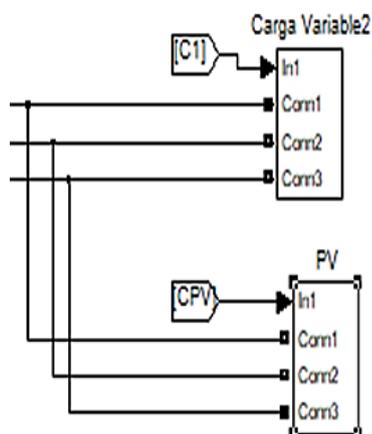


Figura 3.8: Conexión de elementos que simulan la curva de carga dentro de la red.

La curva de generación del panel solar fue seteado inicialmente considerando las cargas mínimas de los consumidores, debido a que estos paneles cargarán a las baterías, las cuales entran a funcionar únicamente en los estados de falla, mientras que los paneles entregan

ese valor de potencia al sistema cuando la red distribución funcione normalmente. Las Figuras 3.9 y 3.10 muestran los bloques que se usaron para simular al sistema fotovoltaico y su respectiva conexión al sistema.

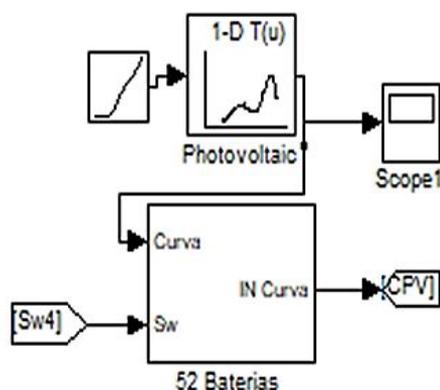


Figura 3.9: Elementos de la librería Simulink para generar curvas del panel fotovoltaico.

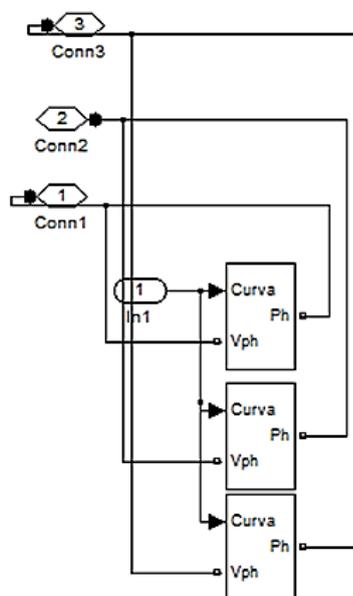


Figura 3.10: Conexión de los elementos que simulan a un panel fotovoltaico.

Cabe indicar que los intervalos de tiempo en que los paneles fotovoltaicos aportan con energía a la red se muestran en la curva de la Figura 3.11, en la que se consideran las horas que simulan la jornada diurna y nocturna

en que podrían operar estos paneles. El diagrama de inyección de corriente de los paneles se muestra en el Anexo D.



Figura 3.11: Curva generada por el panel fotovoltaico obtenido en Matlab.

3.3.2. Dimensionamiento del generador a diésel.

El sistema que representa al generador a diésel fue seleccionado de un modelo pre-diseñado por la librería Simulink, el cual tiene como salidas las respectivas fases para voltajes y como entrada un controlador el cual recepta la señal que simula los estados de operación de la micro-red y ordena a estos elementos a operar de acuerdo a su configuración.

Este elemento del sistema entra a funcionar cuando ocurre una falla en la red externa AC y en conjunto con las baterías que aportan con su energía almacenada, cubren la carga del sistema.

En la Figura 3.12 se muestran los bloques que se usaron para simular el sistema del generador a diésel.

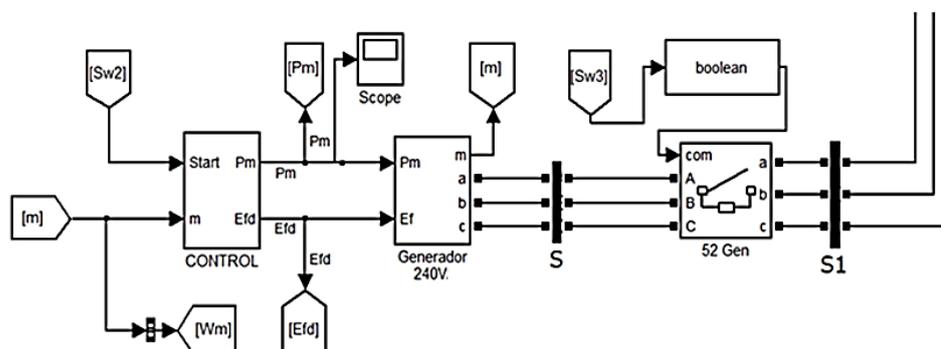


Figura 3.12: Bloque del sistema del generador a diésel en Simulink.

La Figura 3.13 muestra el modelo seleccionado en el software para el generador a diésel, este tiene dos entradas con los parámetros de potencia mecánica y de fuerza electromotriz requeridos. Además, cuenta con un transformador para transformar el voltaje de salida a la red a un valor de 240 V.

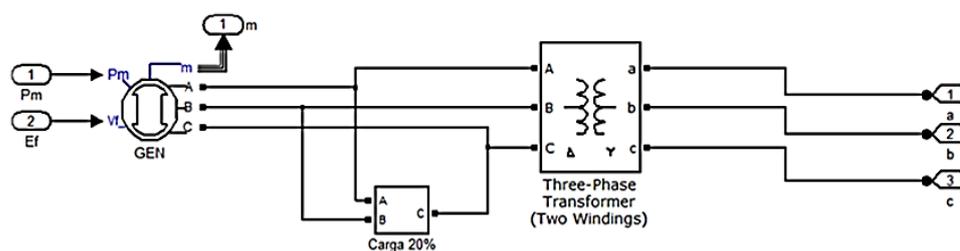


Figura 3.13: Modelo de generador de diésel utilizado.

3.4. Estudio de la GD propuesta en el sistema de distribución.

Para conocer la penetración de la GD aplicado al sistema en estudio, se harán uso dos criterios que permiten evaluar el modelo utilizado, estos son el nivel o grado de dispersión de la GD y el nivel o grado de penetración de la GD. [10]

$$\text{Nivel de dispersión de la GD \%} = \frac{\# \text{ nodos de GD}}{\# \text{ nodos de carga}} \times 100\% \quad (3.1)$$

$$\text{Nivel de penetración de la GD \%} = \frac{P_{GD}}{P_{CARGA}} \times 100\% \quad (3.2)$$

3.4.1. Nivel de dispersión de la GD.

Haciendo uso de la ecuación 3.1 se tiene que:

$$\text{Nivel de dispersión de la GD \%} = \frac{6}{6} \times 100\% = 100\%$$

El nivel de dispersión del sistema propuesto es del 100% debido a que tenemos un sistema de paneles fotovoltaicos conectados en cada una de las viviendas o nodos del sistema de distribución.

3.4.2. Nivel de penetración de la GD.

Haciendo uso de la ecuación 3.2 se tiene que:

$$\text{Nivel de penetración de la GD \%} = \frac{800}{4000} \times 100\% = 20\%$$

El nivel de penetración del sistema propuesto es del 20% lo cual corresponde a un escenario de baja penetración con ello se puede establecer que la penetración de la GD es escasa por lo tanto únicamente se podrá cubrir cierta parte de la carga instalada en cada vivienda.

3.5. Impacto de la Generación Distribuida en la confiabilidad del suministro eléctrico.

A continuación, se muestra un análisis de confiabilidad en el que se observa un sistema de distribución radial con y sin GD, escenario 1 y escenario 2 respectivamente, ambos en un estado de operación normal. La potencia máxima promedio consumida por residencia es de 4000 vatios, la potencia generada por el sistema fotovoltaico es de 800 vatios y la carga consumida en cada residencia es variable en el tiempo.

Donde los valores de disponibilidad p corresponden a la probabilidad de que el sistema se encuentre operando, mientras que la indisponibilidad q corresponde a la probabilidad el sistema se encuentre en falla. Estas probabilidades suman un total de 1, estos valores se encuentran asociados tal como se muestra en la siguiente ecuación. [11]

$$p + q = 1 \quad (3.3)$$

Por lo tanto, el valor de indisponibilidad q se obtiene por medio de la siguiente ecuación.

$$q = 1 - p \quad (3.4)$$

Los valores probabilísticos de indisponibilidad y la disponibilidad de un alimentador típico se muestran en la Tabla 4, y reflejan valores acordes con la ecuación 3.3 y 3.4.

ALIMENTADOR	POTENCIA GENERADA (W)	FOR INDISPONIBILIDAD	DISPONIBILIDAD
RED	4000	$p_1 = 0.02$	$q_1 = 0.98$
GD	800	$p_2 = 0.50$	$q_2 = 0.50$

Tabla 4: Datos del alimentador y de la GD.

Para determinar la confiabilidad se usa el estimador LOLP (Loss of Load Probability), este es un valor esperado que indica la probabilidad de pérdida de carga, es decir cuál es la cantidad esperada de días al año en los que la carga tiene problemas, en otras palabras, es el caso crítico en que no exista generación.

Para obtener este valor se construye una tabla en la cual se indique la capacidad disponible y la capacidad no disponible en MW, la primera está asociada a la disponibilidad p , mientras que la segunda está asociada a la indisponibilidad q . La probabilidad total cuando únicamente esta la red conectada se determina directamente con las variables p y q , mientras que cuando exista la red y la GD conectadas en conjunto se la determina mediante la multiplicación de estas dos variables, tal como se indica en la siguiente ecuación. [11]

$$\text{Probabilidad Total} = p \times q \quad (3.5)$$

El escenario 1 está conformado por un alimentador de la red de distribución conectada a la carga variable de una residencia, cuyo diagrama unifilar se muestra en la Figura 3.14.

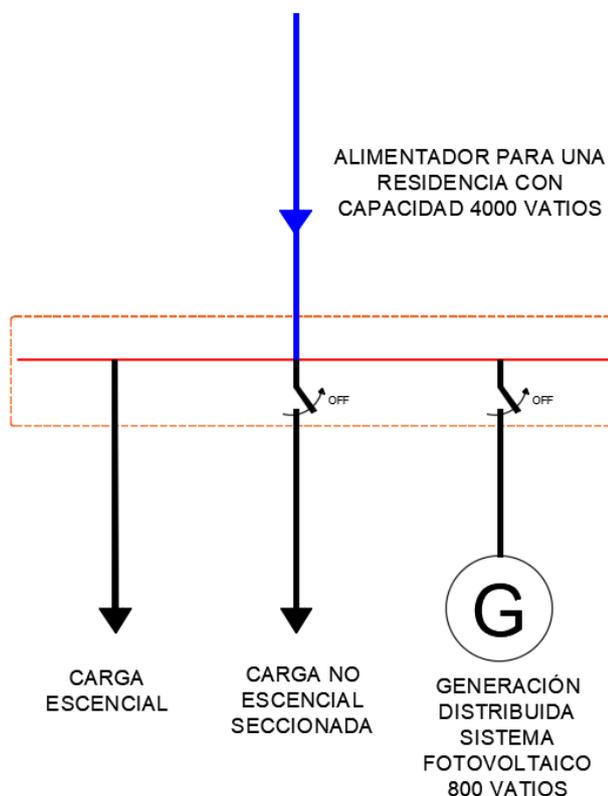


Figura 3.14: Diagrama unifilar sin GD.

CAPACIDAD NO DISPONIBLE (W)	CAPACIDAD DISPONIBLE (W)	PROBABILIDAD TOTAL
0	4000	$p_1 = 0.98$
4000	0	$q_1 = 0.02$

Tabla 5: Estados posibles para el escenario 1: un alimentador, una carga variable, sin GD.

De acuerdo a la Tabla 5, el LOLP para esta carga resulta igual a 0.02 días/año, si se multiplica por 365, obtenemos 7.3 días al año la carga tendrá problemas.

En el escenario 2, el sistema está conformado por un alimentador de la red de distribución, la carga variable de una residencia y la GD, tal como se muestra en la Figura 3.15, la GD consta de un sistema fotovoltaico el cual inyectará potencia a las cargas de la vivienda.

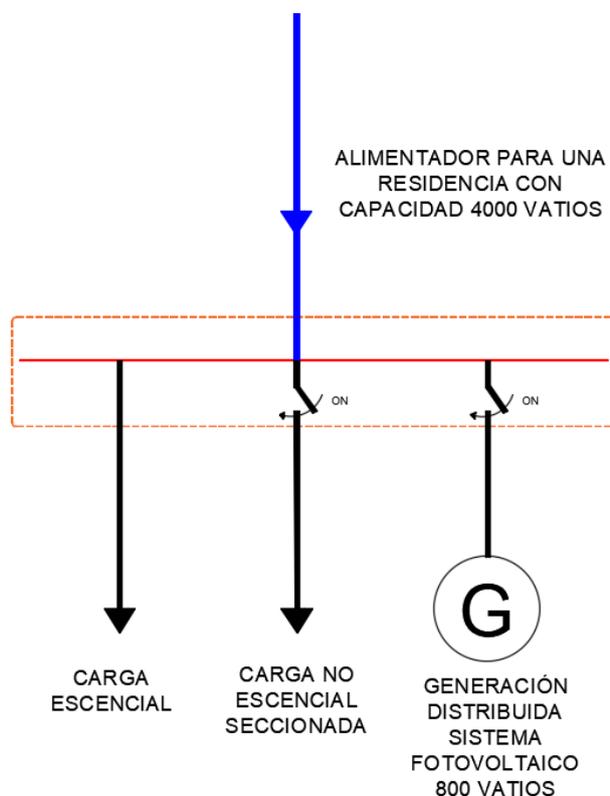


Figura 3.15: Diagrama unifilar con GD.

Los valores obtenidos aplicando la ecuación 3.5 se muestran en la tabla a continuación:

CAPACIDAD NO DISPONIBLE (W)	CAPACIDAD DISPONIBLE (W)	PROBABILIDAD TOTAL
0	4800	$p_1 \times p_2 = 0.98 \times 0.50 = 0.490$
800	4000	$q_1 \times p_2 = 0.50 \times 0.98 = 0.490$
4000	800	$p_1 \times q_2 = 0.98 \times 0.50 = 0.490$
4800	0	$q_1 \times q_2 = 0.02 \times 0.50 = 0.010$

Tabla 6: Estados posibles para el escenario 2: un alimentador, una carga variable, con GD.

De acuerdo a la Tabla 6, el LOLP para esta carga resulta igual a 0.01 días/año, si se multiplica por 365, obtenemos 3.65 días al año tendrá problemas esta carga.

Se observa que el LOLP disminuyó a aproximadamente la mitad del tiempo, por ende, la confiabilidad del sistema en general aumentó con la GD conectada a la vivienda, además de reducirse la potencia suministrada por el alimentador principal. Hay que considerar que la presencia de la GD modifica la confiabilidad en el sistema de distribución en un 50% aproximadamente a su favor.

3.6. Simulación del sistema en estado de operación normal de la red de distribución.

Para la interacción con el diseño realizado, se utiliza el software LabView que muestra un diagrama unifilar completo de la micro-red, consta de indicadores visuales para cada uno de los estados de operación. Los bloques de diseño en LabView del sistema propuesto se muestran en el Anexo G.

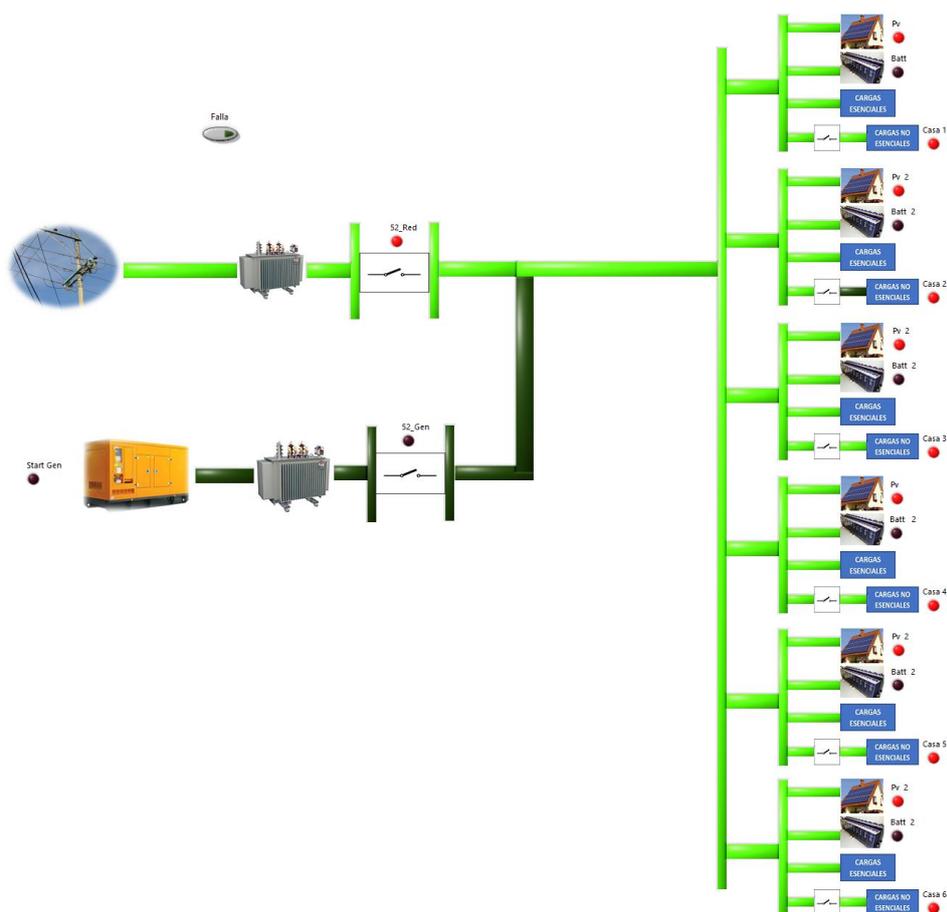


Figura 3.16: Interfaz gráfica de la micro-red cuando la red de distribución opera en estado normal.

La Figura 3.16 muestra la interfaz para el monitoreo y control de la micro-red, cabe recalcar que las líneas de conexión rellenas de color verde con tonalidad fosforescente representan las líneas en las cuales se transporta la energía eléctrica, mientras que las líneas de color verde con tonalidad oscura indican que las líneas están desenergizadas, es decir están fuera de servicio.

Para el presente estado, los consumidores son abastecidos con el suministro eléctrico mediante la red de distribución y paneles fotovoltaicos. En estos últimos se pre-establecieron valores de generación para intervalos de una hora durante un día.

El diseño cuenta con interruptores en el punto de interconexión con la red de distribución, en la generación a diésel, en los transformadores y en todos los puntos que conectan la carga al sistema. Estos interruptores tienen indicadores de luz que muestran el estado actual del mismo, es decir si se encuentra cerrado o abierto con luces de color rojo y negro respectivamente.

3.7. Control de carga para el estado de falla.

En la Figura 3.17 se observan los bloques que contienen las señales que permiten operar los elementos requeridos de acuerdo al estado en que se encuentre el sistema de distribución, esto es en operación normal o en estado de falla.

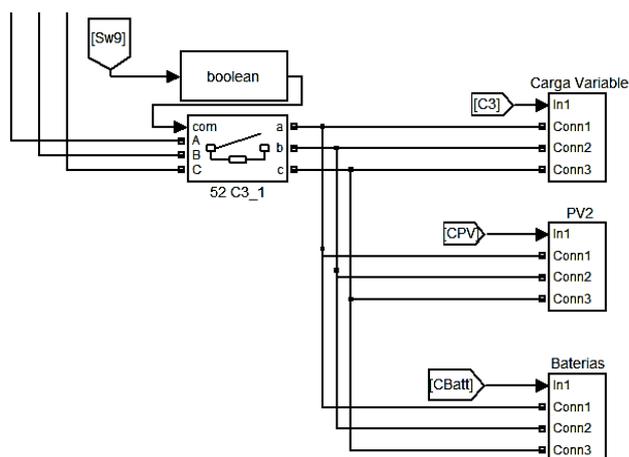


Figura 3.17: Bloques de carga e interruptor de la librería Simulink.

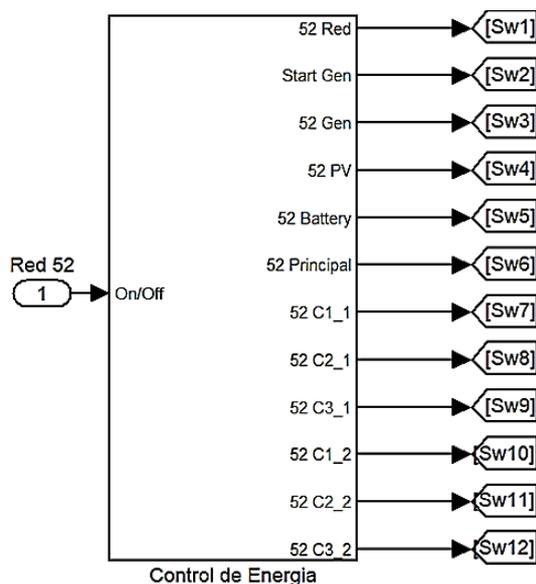


Figura 3.18: Bloque que contiene las señales para operar los elementos del sistema.

Para el estado de falla de la red distribución, se ha asignado una señal 1, esto se muestra en la Figura 3.18, la cual será enviada por este bloque hacia el generador que simula la red de distribución, el generador a diésel, sistema de baterías, interruptor principal e interruptores de las cargas, para indicar que es momento de operar y realicen sus tareas asignadas respectivamente.

En el caso de simular una falla, se secciona carga para que queden conectadas únicamente las cargas prioritarias de cada consumidor. Cuando cada interruptor, detecte una señal de estado de falla (señal 1), estos seleccionarán a la carga pre-establecida como carga prioritaria. El diagrama de control completo se muestra en el Anexo A.

3.8. Simulación del sistema en estado de falla.

Cuando se realiza el cambio de estado, el seccionamiento de carga hace que el interruptor del sistema de la red de distribución se abra, entrando el sistema de baterías las que inyectan la energía acumulada por un lapso de tiempo hasta que se descarguen, mientras que el sistema de generación a diésel inicia su arranque hasta estabilizarse y para en conjunto cubrir la carga prioritaria de la micro-red. Con ello se cumple el principal objetivo que es mantener el voltaje en la barra de

distribución al mismo valor de voltaje antes de que ocurra la falla y la red fuese desconectada.

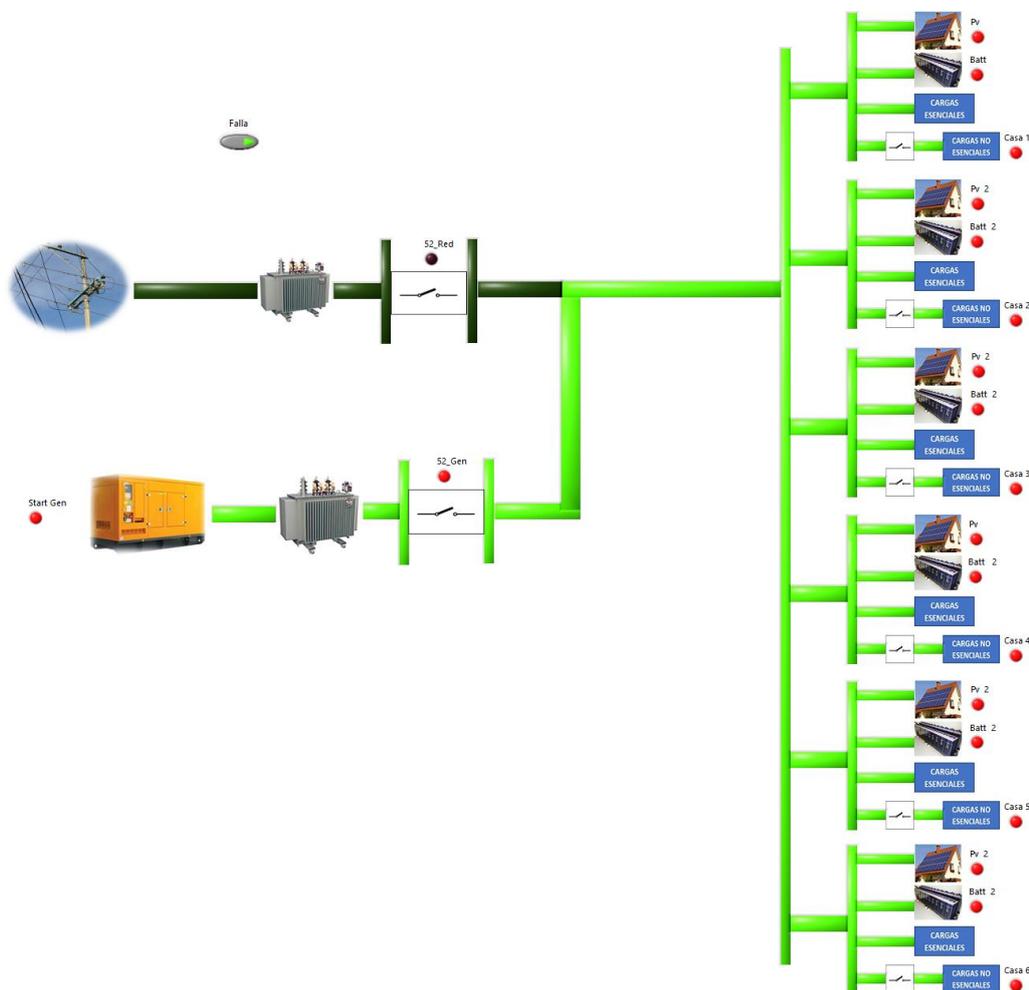


Figura 3.19: Interfaz gráfica de la micro-red cuando la red de distribución opera en estado de falla.

La Figura 3.19 muestra la interfaz de la micro-red cuando esta se encuentra operando en estado de falla, la red de distribución fue desconectada junto con el transformador de distribución, mientras que el generador a diésel fue conectado.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación del sistema en Simulink y el interfaz gráfico Labview, en el que se plantea dos casos particulares, el primero muestra un estado normal en el que la carga está conectada al suministro de la red eléctrica pública y el segundo muestra un estado de falla en el que parte de la carga está conectada a un generador a diésel.

4.1. Análisis de los parámetros principales del sistema sin GD.

Cuando el sistema de distribución permanezca en su condición normal de operación, esto es sin los paneles fotovoltaicos, se obtendrá una curva de carga superior a la curva en la que se incluye a los paneles fotovoltaicos, debido a que estos cubrirían cierta parte de esta carga.

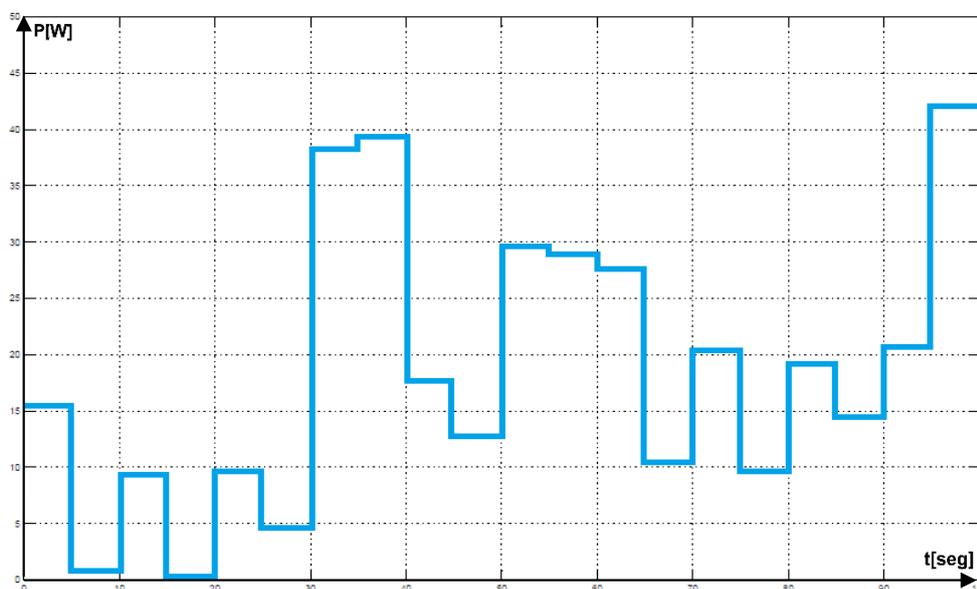


Figura 4.1: Curva de la demanda total del sistema sin Generación Distribuida.

La Figura 4.1 muestra el consumo total del sistema sin el uso de los paneles fotovoltaicos, estos contribuirían a la disminución del consumo eléctrico en ciertas

horas del día y conllevaría a que las cargas reduzcan su dependencia de la red de distribución en esas horas, permitiendo reducir la compra de este servicio y un ahorro de dinero.

La Tabla 7 muestra los valores de voltaje en las fases del sistema en el lado de baja tensión, llegando a un valor de 110 Vrms.

V_{AB} [V]	V_{BC} [V]	V_{CA} [V]
110	110	110

Tabla 7: Valores de Voltaje rms de las fases del sistema sin GD.

Los voltajes se mantienen fijos en cada una de las fases, sin variaciones que vayan a perjudicar en el desempeño de los elementos que estén conectados a la red eléctrica.

4.2. Análisis de los parámetros principales para el estado normal del sistema.

Durante la operación normal, el sistema debe de operar de forma correcta garantizando el suministro de energía constante proveniente de la red eléctrica pública y de los paneles fotovoltaicos.

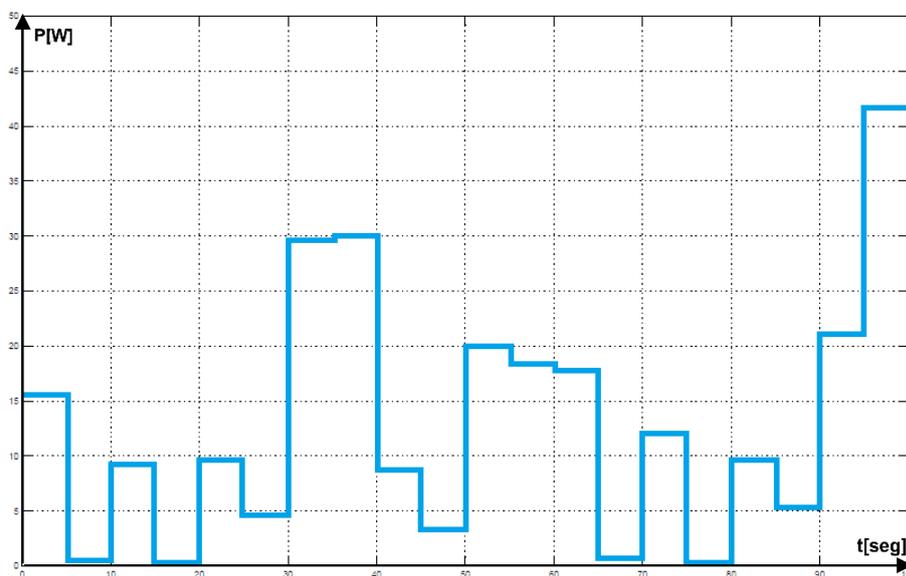


Figura 4.2: Curva de la demanda total del sistema con Generación Distribuida.

En la Figura 4.2 se puede notar que el consumo se ha disminuido gracias a que la energía suministrada por los paneles fotovoltaicos cubre parte de la carga en cada una de las viviendas, reduciendo su consumo de la red eléctrica pública.

El voltaje se sigue manteniendo en el valor esperado, esto es en 110 Vrms en cada una de las fases lo que garantiza el adecuado nivel de voltaje, como se muestra en la Tabla 8. Con ello, se evita el bajo desempeño de los equipos conectados y que son alimentados de la energía eléctrica del sistema en general.

V_{AB} [V]	V_{BC} [V]	V_{CA} [V]
110	110	110

Tabla 8: Valores de Voltaje rms de las fases del sistema con GD en estado normal.

4.3. Análisis de los parámetros principales para el estado de falla del sistema.

En el estado de falla la alimentación de la energía eléctrica al sistema será suministrado por el generador a diésel y con ayuda del control de carga se irá seccionando parte de la carga hasta dejar sólo las cargas prioritarias, las cuales permanecerán en todo momento, inclusive con el normal abastecimiento de energía eléctrica.

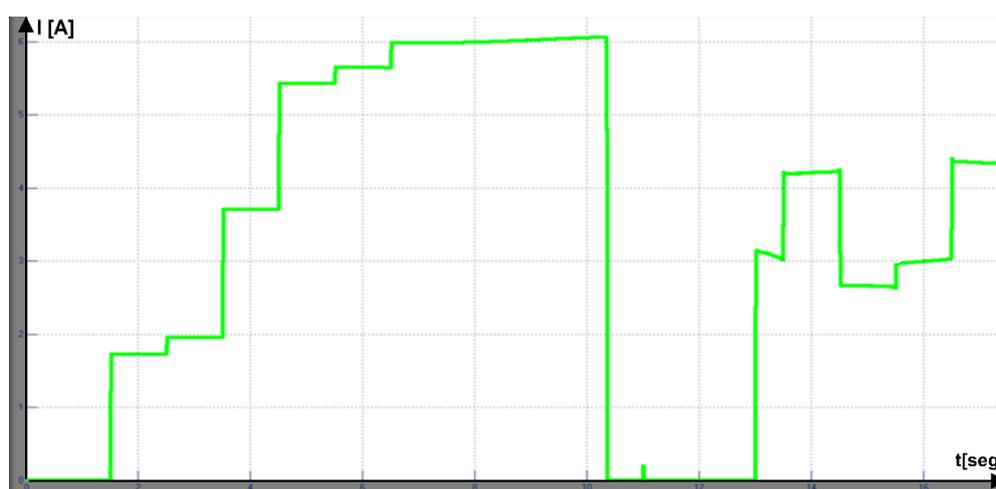


Figura 4.3: Curva de corriente del sistema en operación normal cuando ocurre una falla.

La Figura 4.3 muestra tres estados, la operación normal del sistema de distribución, una repentina falla que deja sin energía eléctrica la carga por un lapso de tiempo y finalmente como se puede observar la disminución de la carga, esto es por el seccionamiento de carga, puesto que se ha dejado sólo las cargas prioritarias en cada vivienda.

Los voltajes se mantienen a un valor de 110 Vrms, como se muestra en la Tabla 9, lo que garantiza un adecuado ingreso de la carga al voltaje deseado, sin afectar su desempeño.

V_{AB} [V]	V_{BC} [V]	V_{CA} [V]
110	110	110

Tabla 9: Valores de Voltaje rms de las fases del sistema con GD cuando falla el sistema de distribución.

En todos los casos se muestra que el voltaje se mantiene, no presenta variación alguna por lo que la calidad de energía es buena puesto que no existe presencia de caída de tensión.

4.4. Análisis del sistema de monitoreo y control para la micro-red.

El sistema SCADA permite monitorear un sistema a cualquier hora para poder tomar un control frente a cualquier contingencia que ocurra.

Un operador que este frente a la pantalla del SCADA será capaz de observar el comportamiento del sistema en operación normal y en operación de falla, en el caso de ocurrir una falla el operador podrá tomar la decisión de parar el sistema o reestablecerlo.

En la Figura 4.4 se muestra el sistema de distribución en estado de operación normal, es decir la carga en su totalidad se encuentra conectada a la red y al sistema fotovoltaico de cada vivienda, los dos sistemas están entregando energía en conjunto, con ello se reduce la energía suministrada desde la red, mientras que el generador a diésel se encuentra desconectado.

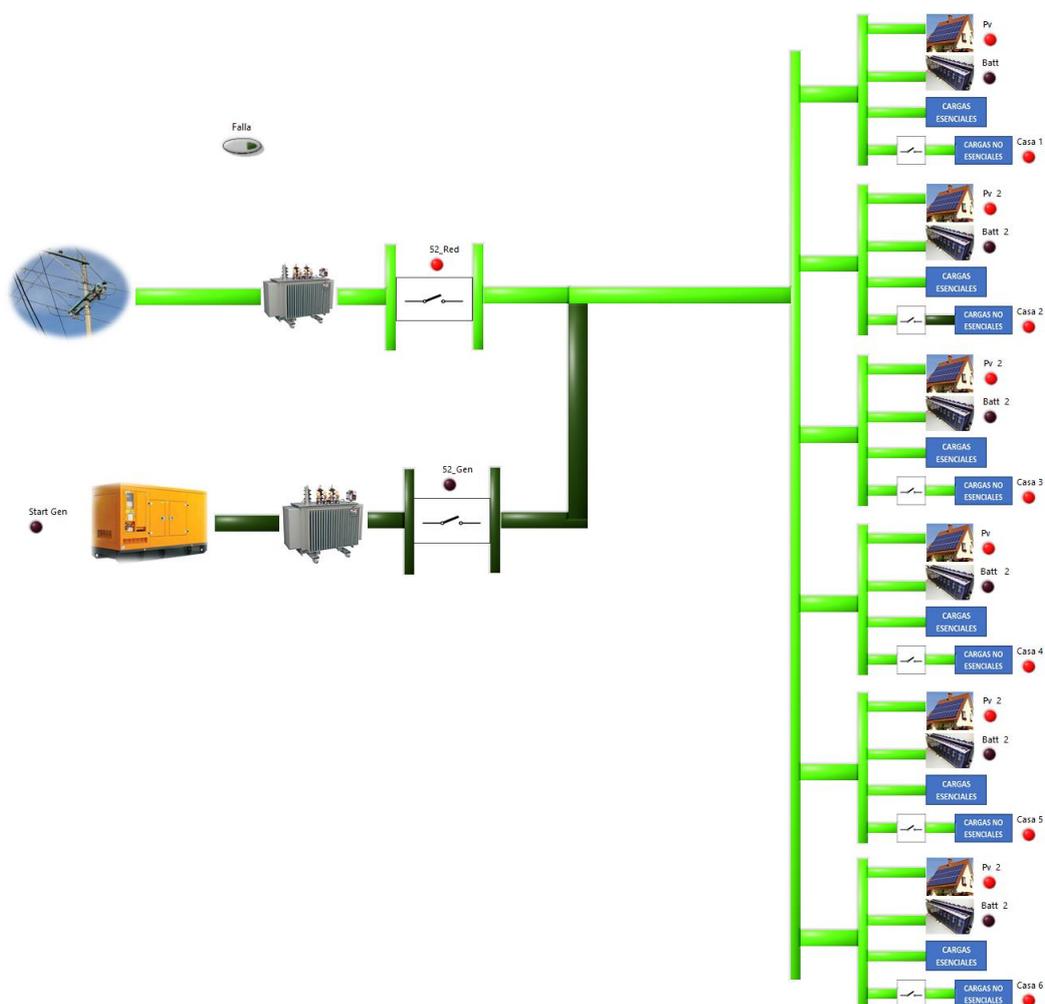


Figura 4.4: Interfaz gráfica del SCADA, Sistema en operación normal.

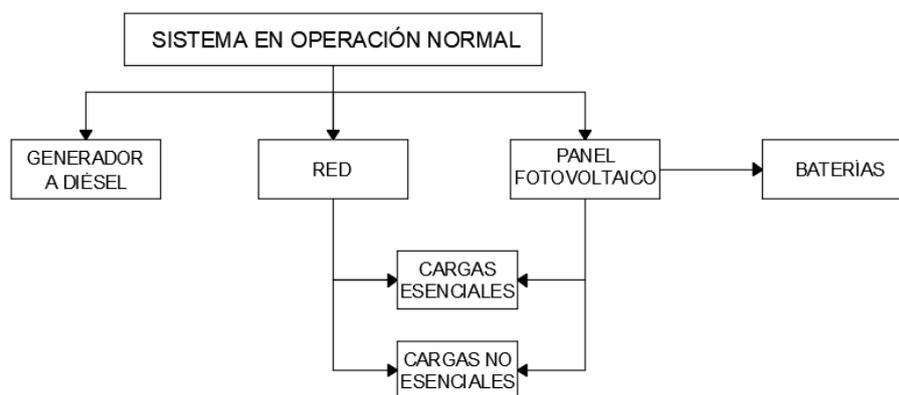


Figura 4.5: Diagrama esquemático del sistema en operación normal.

Un diagrama esquemático que representa el caso de operación normal del sistema se muestra en la Figura 4.5, se observa que las cargas esenciales y no esenciales son alimentadas desde la red y los paneles fotovoltaicos.

En el caso de darse una falla en el día, el primer paso es desconectar el sistema de alimentación de la red de distribución para mantener aislada a la micro-red, luego las cargas esenciales serán energizadas por las baterías y los paneles fotovoltaicos, mientras que las cargas no esenciales estarán desconectadas hasta que el generador a diésel entre a operar por completo de manera estable, cuando esto ocurra se procederá a energizar las cargas “no esenciales” automáticamente, tal como se muestra en la Figura 4.6.

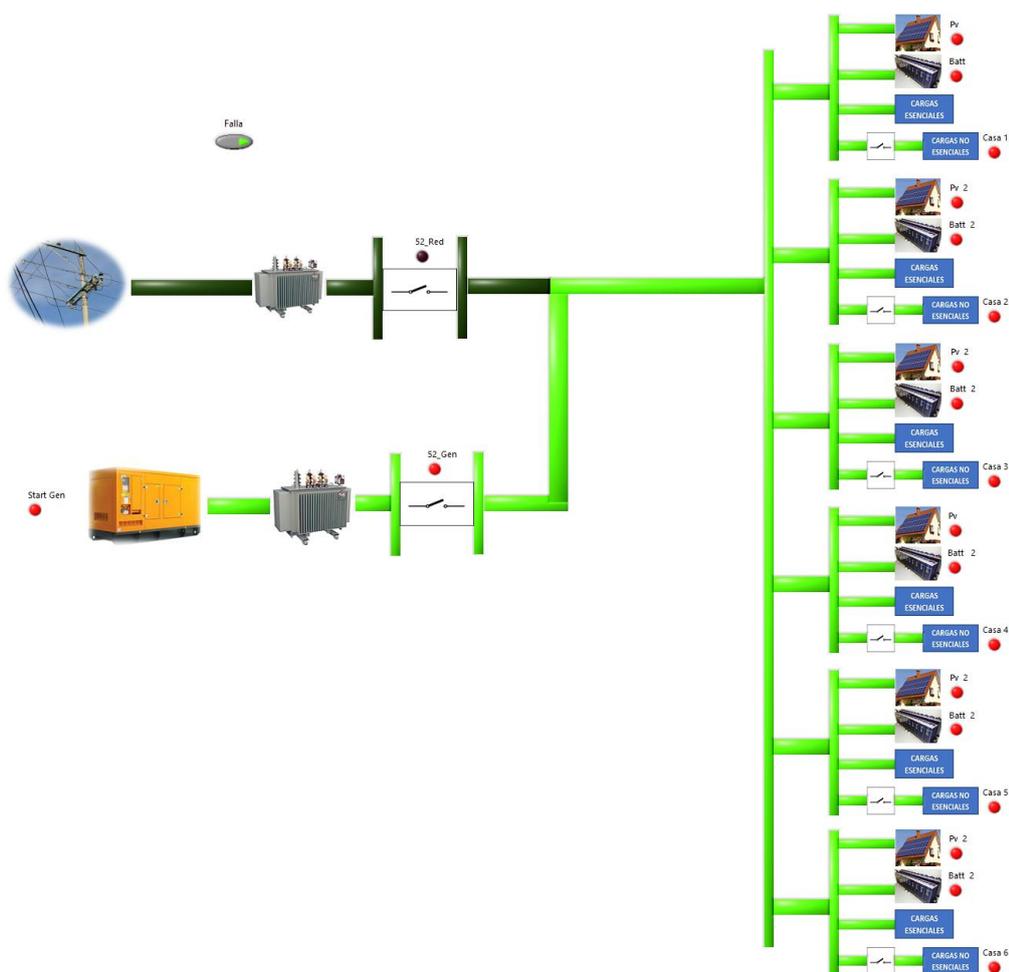


Figura 4.6: Interfaz gráfica del SCADA, sistema en estado de falla en el día.

En el caso de que ocurra una falla en la noche y no se cuente con el apoyo de los paneles fotovoltaicos, las carga “esenciales” serán energizadas únicamente por las baterías y las “cargas no esenciales” estarán desconectadas hasta que el generador a diésel este completamente operando y de forma estable, pero cuando esto ocurra no se procederá a energizar las cargas “no esenciales” automáticamente, el estado final se muestra en la Figura 4.7.

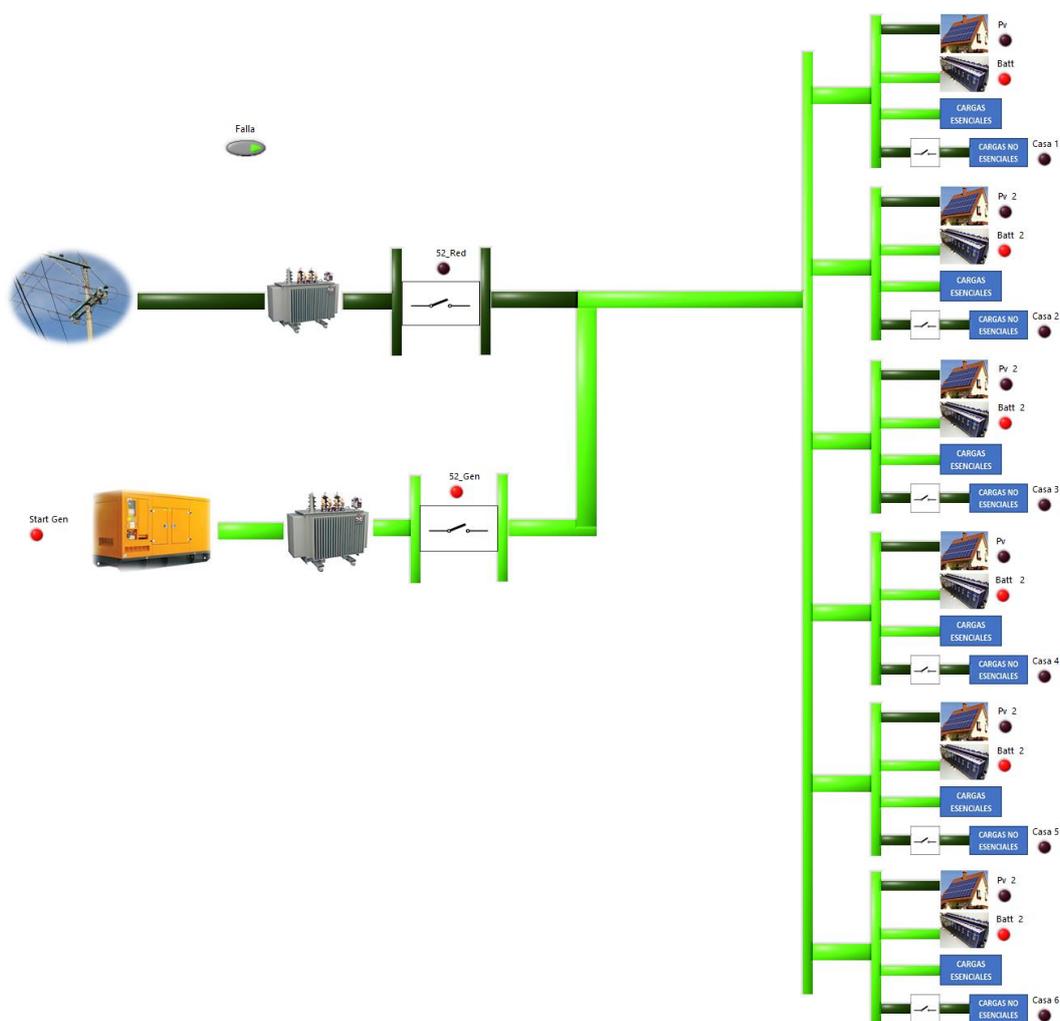


Figura 4.7: Interfaz gráfica del SCADA, sistema en estado de falla en la noche.

El sistema opera de forma automática, en el estado de operación normal (Figura 4.4) y en el estado de falla dependiendo si se da en el día (Figura 4.6) o en la noche (Figura 4.7), esto garantiza un suministro continuo de energía eléctrica en cada caso.

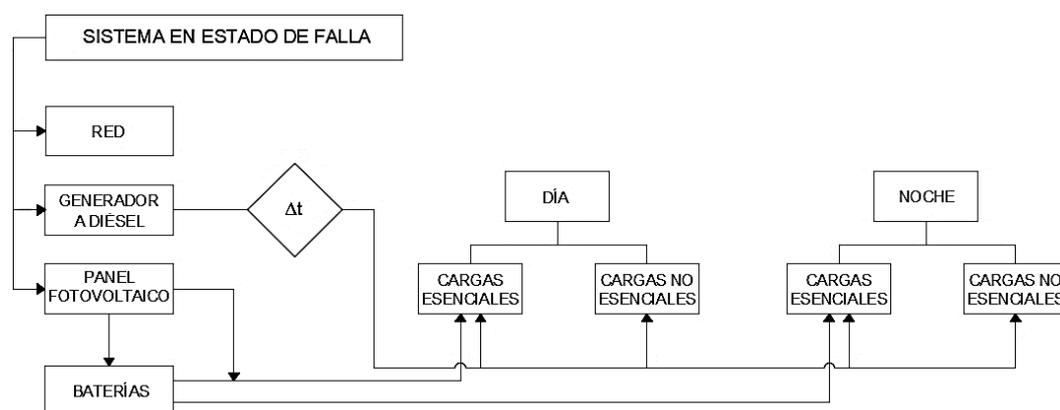


Figura 4.8: Diagrama esquemático del sistema en estado de falla.

Un diagrama esquemático que representa el caso de estado de falla del sistema se muestra en la Figura 4.8, se observa que las cargas esenciales y no esenciales son alimentadas desde los paneles fotovoltaicos y las baterías según sea el caso, mientras que el generador a diésel entra a esta micro-red una vez transcurrido el tiempo necesario para que el sistema sea estable.

4.5. Señales de control en tiempo real para estado normal de la micro-red.

Las señales que recibimos del controlador del sistema permiten conocer lo que está sucediendo un instante determinado en el sistema. El SCADA es de gran ayuda para el monitoreo y control, todas las señales de entrada y de salida están correctamente indicadas en la interfaz gráfica como se lo puede apreciar en las Figuras 4.4, 4.6 y 4.7.

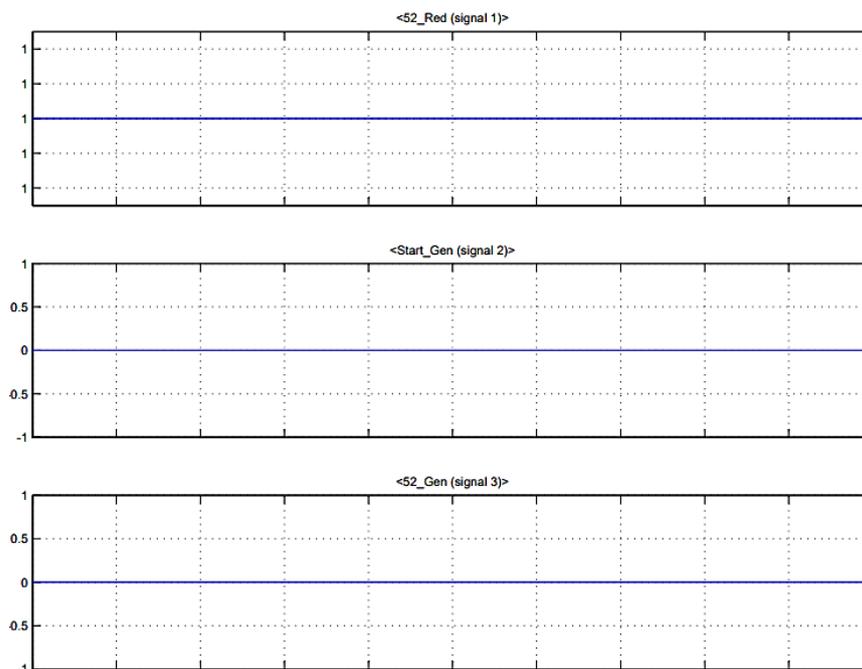


Figura 4.9: Señal de estado de la red eléctrica pública y generador a diésel.

La Figura 4.9 muestra con un 1 (operación) y un 0 (no operación) el estado de operación de la red eléctrica pública y del generador a diésel que cuenta el sistema respectivamente.

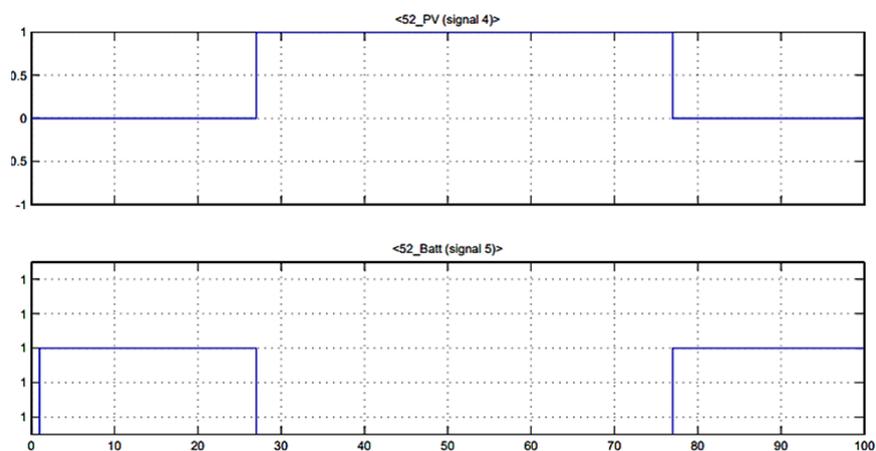


Figura 4.10: Señales de estado de los paneles fotovoltaicos y baterías.

La Figura 4.10 muestra el estado de operación con un 1 (operación) o 0 (no operación) de los paneles fotovoltaicos y de las baterías en cada vivienda respectivamente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los valores esperados de voltaje en la entrada principal de la micro-red, para los estados en los que la alimentación de la red externa funciona de manera normal y cuando esta falla, se mantuvieron constantes en el régimen permanente.

El seccionamiento de las cargas prioritarias no provocó distorsión de los niveles y formas de las variables de voltaje y corriente para cuando el sistema queda únicamente abastecido por el generador a diésel y el sistema de almacenamiento de baterías en el estado de falla.

La GD presenta varios beneficios, tales como eliminar la dependencia de fuentes convencionales, cambia la configuración de la red que inicialmente era radial, puesto que entrega energía en varios puntos de esta, aumentando la confiabilidad del sistema, con ello se redujo de 7 (sin GD) a 4 (con GD) días al año en que la red no abastecerá la carga en su totalidad.

La interfaz de control eficiente mediante LabView es de gran ayuda para el monitoreo y control de las cargas del sistema y en caso de ocurrir una falla el operador podrá tomar la decisión de parar el sistema o reestablecerlo inmediatamente.

Se puede concluir que el prototipo desarrollado de una micro-red mediante un software que realiza pruebas en tiempo real, es útil para simular proyectos que requieren grandes cantidades de tiempo e inversión, llevándose a cabo de una manera sencilla y en reiteradas ocasiones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Sarango, “Estructura del Sistema de Generación, Transmisión, y Distribución de Energía en el Ecuador”, Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Técnica Particular de Loja, UTPL, Loja, Ecuador, 2013.
- [2] J. Juárez, “El Sistema de Distribución”, en Sistemas de distribución de energía eléctrica, Primera Edición, México: Sans Serif Editores, 1995, pp. 11-23.
- [3] Janitza - Cydesa, “Gestión de picos de demanda y corrección del factor de potencia”, 2017, Online, Disponible en: <http://www.janitza-cydesa.es>
- [4] J. Valera y G. Landa, “Sistema de Monitorización y Control Web centralizado IEC61850 – OPC para el desarrollo e Integración de micro-redes eléctricas en la red de distribución”, Ingeteam, Zamudio, España, 2008.
- [5] L. Chusin y B. Escobar, “Análisis de confiabilidad de sistemas de distribución eléctrica con penetración de generación distribuida”, Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2015.
- [6] G. Jiménez, R. Palma y L. Reyes, “Desafíos en el desarrollo de micro-redes inteligentes en zonas aisladas”, Centro de energía, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2012.
- [7] J. Ducoy, “Implementación de Energías Renovables en una Planta de Producción de Amoniaco”, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, Sevilla, España, 2011.
- [8] E. Sánchez, “Balance de Generación vs. Consumo de energía y retos de la generación distribuida”, Tecnalia, Corporación Tecnológica, Vizcaya, España, 2010.
- [9] Guía Básica de la Generación Distribuida, “Análisis de Sistemas para la Generación Distribuida”, Fundación de la Energía de Comunidad de Madrid, Madrid, España, 2012.
- [10] E. Durán, La Generación Distribuida y sus retos frente al nuevo marco legal del mercado eléctrico ecuatoriano”, Trabajo de fin de carrera, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2013.

- [11] G. Salazar, L. Chusin y B. Escobar, "Análisis de Confiabilidad de Sistemas de Distribución Eléctrica con Penetración de Generación Distribuida", Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2015.
- [12] K. Bustamante, "Estudios de los sistemas de Generación Distribuida", Trabajo de graduación, Facultad de Ciencia y Tecnología, Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador, 2013.
- [13] Seminario de Redes Inteligentes, "Generación Distribuida: Impacto en las Redes de Distribución", Colombia Inteligente, Colombia, 2012.
- [14] V. Cholota, "Impacto de la generación distribuida en redes de distribución, aplicación central hidroeléctrica Mira", Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014.
- [15] C. Gischler y N. Janson, "Perspectiva para la generación distribuida mediante energías renovables en América Latina y el Caribe", Santo Domingo, Ecuador, 2011.
- [16] G. Casaravilla y M. Vignolo, "Generación distribuida en el Uruguay: Evaluación de fortalezas, oportunidades y tratamiento regulatorio", Informe Final, Universidad de la República Uruguay, UDELAR, Montevideo, Uruguay, junio, 2016.
- [17] Manual Eléctrico, "Sistemas y redes de distribución", Segunda Edición, Viakon, México, 2011.
- [18] Agencia de Regulación y Control de Electricidad Arconel, "Ecuador posee un 51,78% de energía renovable", marzo, 2016. [Online]. Disponible en: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/ecuador-posee-un-5155-de-energia-renovable/>

ANEXO A

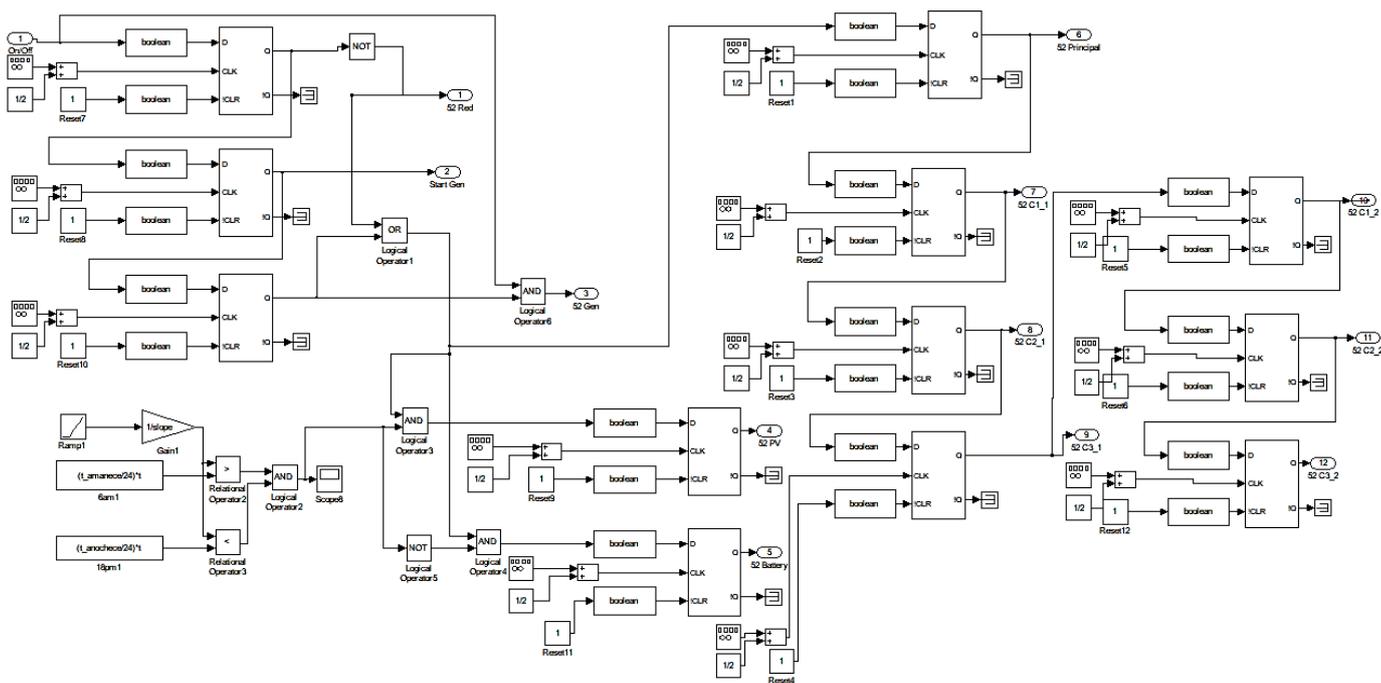


Figura A.1: Diagrama de control para operar elementos para los diferentes estados de la micro-red.

ANEXO B

HORA	CARGA 1 [W]	CARGA 2 [W]	CARGA 3 [W]
0:00	1595	1360	1200
1:00	1035	100	200
2:00	1035	760	850
3:00	760	100	150
4:00	1595	660	500
5:00	1695	100	150
6:00	4050	2360	2000
7:00	1885	3650	3000
8:00	2145	1175	1100
9:00	1250	1052	1150
10:00	1652	2960	2050
11:00	3515	1400	1500
12:00	1190	2275	2500
13:00	1695	600	750
14:00	1275	2095	1800
15:00	800	952	1052
16:00	760	2095	1800
17:00	2250	760	810
18:00	3837	600	750
19:00	3447	2660	3000
20:00	2795	1535	1570
21:00	3130	2095	2000
22:00	3030	1550	1700
23:00	2370	2195	2500

Tabla 10: Datos para realizar las curvas de potencia de los consumidores de la micro-red planteada.

ANEXO C

HORA	GENERACIÓN [W]
0:00	0
1:00	0
2:00	0
3:00	0
4:00	0
5:00	0
6:00	800
7:00	800
8:00	800
9:00	800
10:00	800
11:00	800
12:00	800
13:00	800
14:00	800
15:00	800
16:00	800
17:00	800
18:00	0
19:00	0
20:00	0
21:00	0
22:00	0
23:00	0

Tabla 11: Datos para realizar las curvas de generación de los paneles fotovoltaicos utilizados en la micro-red planteada.

ANEXO D

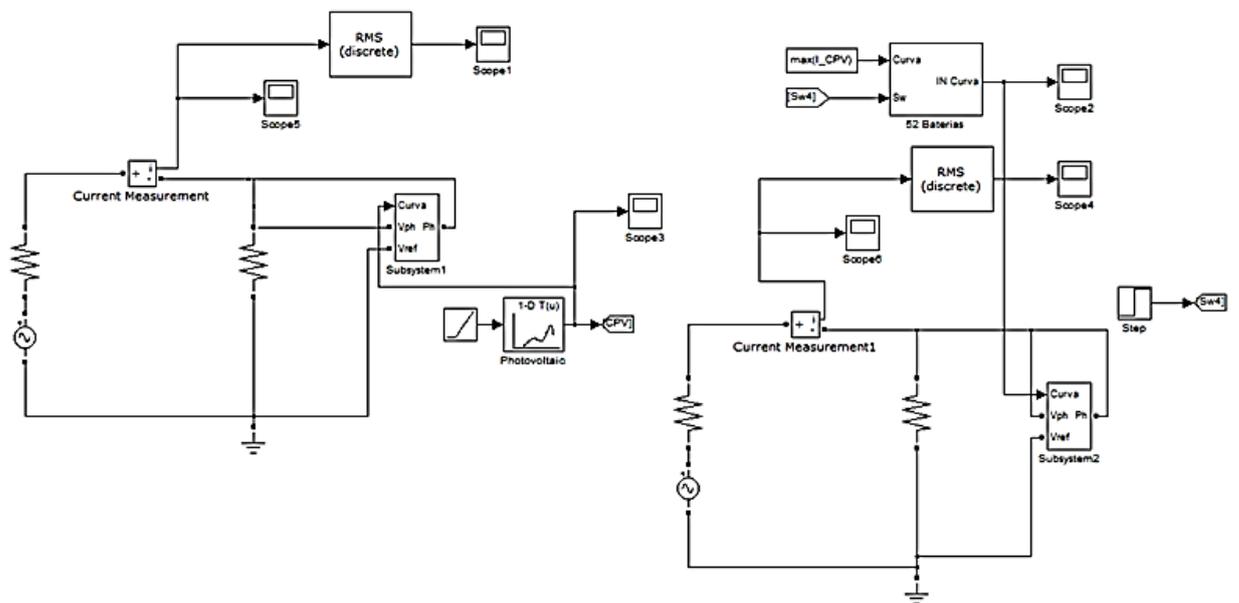


Figura D.1: Sistema de inyección de corriente de los paneles fotovoltaicos.

ANEXO E

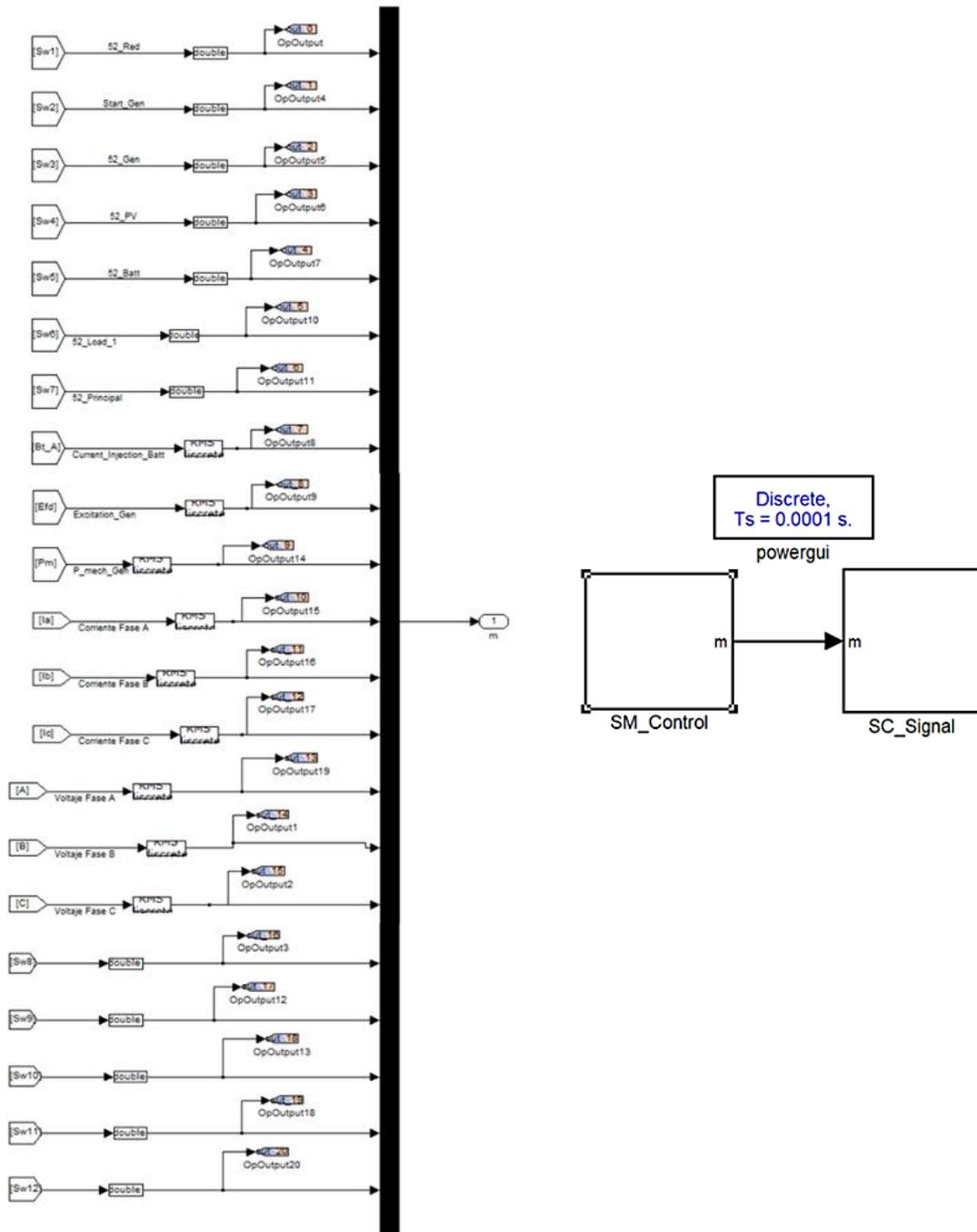


Figura E.1: Sistema de señales de salida para comunicación del diseño con el equipo de simulación.

ANEXO G

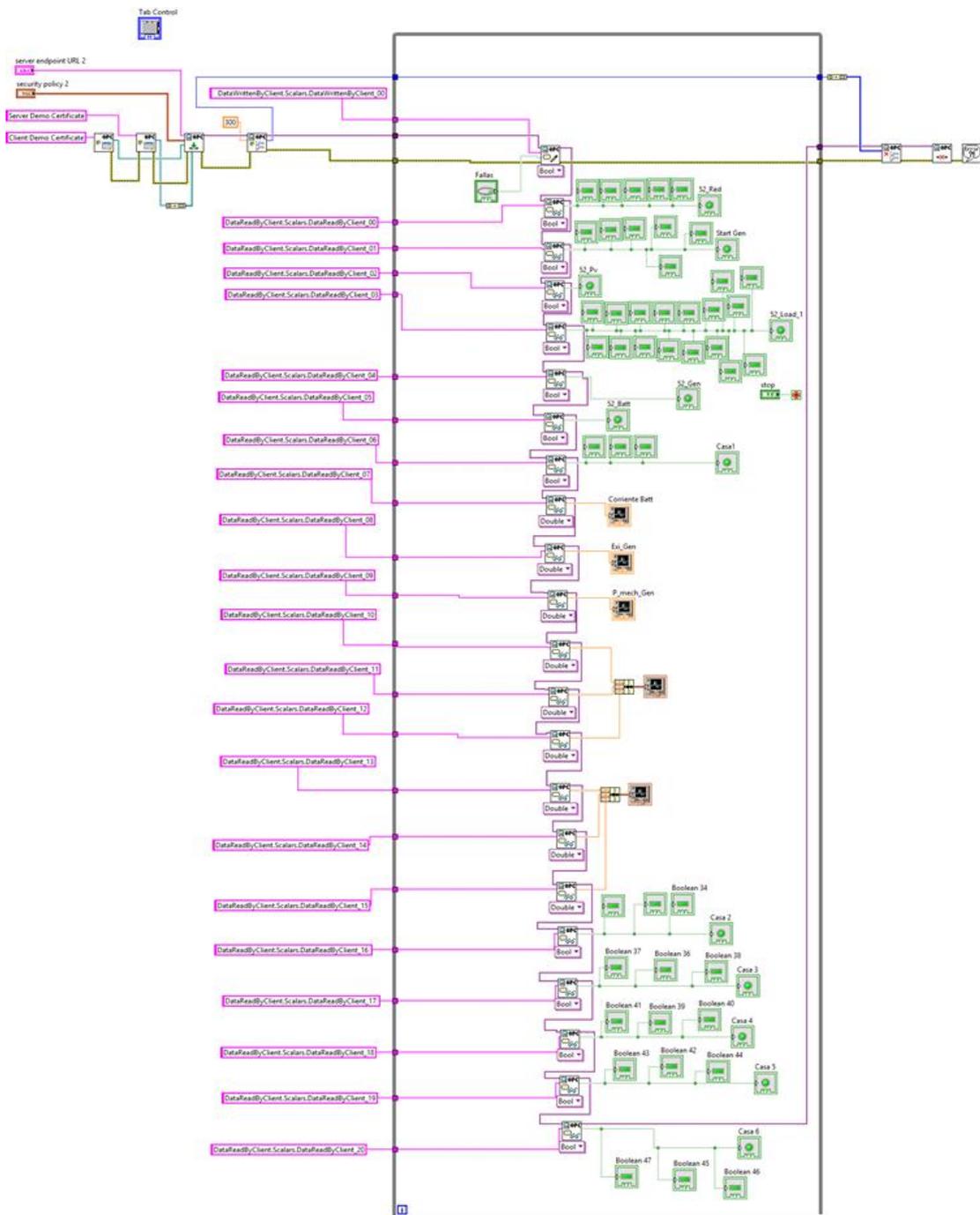


Figura G.1: Bloques para desarrollar la interfaz gráfica de la micro-red en el software LabView.

ANEXO H

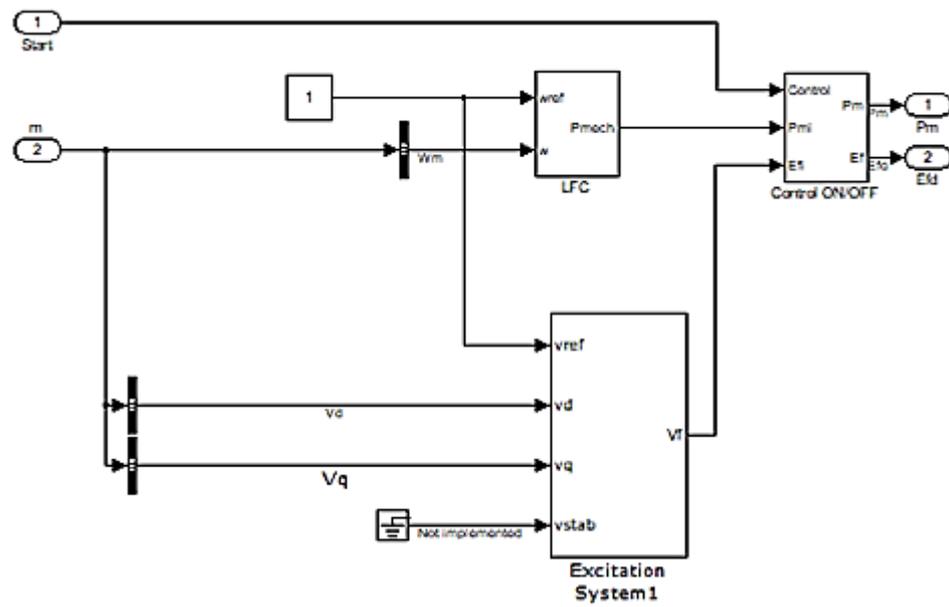


Figura H.1: Bloques del control del generador.