# SIMULACIÓN DE LA MICRORRED DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FJDC

**MARITZA ANDREA GONZÁLEZ RAMÍREZ**

**DIEGO ALEXANDER ORTIZ QUEVEDO**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA ELÉCTRICA BOGOTÁ**

**2016**

# SIMULACIÓN DE LA MICRORRED DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FJDC

**MARITZA ANDREA GONZÁLEZ RAMÍREZ**

**Código: 20071007024**

**DIEGO ALEXANDER ORTIZ QUEVEDO**

**Código: 20071007066**

**Proyecto para optar al título de INGENIERO ELÉCTRICO**

**Director:**

**Johann Alexander Hernández Mora, Ph. D**

**Codirector:**

**Adolfo Andrés Jaramillo Matta, Ph. D**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA ELÉCTRICA BOGOTÁ**

**2016**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

El proyecto de grado titulado "**SIMULACIÓN DE LA MICRORRED DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FJDC**", realizado por los estudiantes MARITZA ANDREA GONZÁLEZ RAMÍREZ Y DIEGO ALEXANDER ORTIZ QUEVEDO recibió la siguiente calificación por cumplir satisfactoriamente los objetivos propuestos.

_____

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

_____

Johann A. Hernández Mora
**Director**

_____

Adolfo A. Jaramillo Matta
**Codirector**

_____

César Leonardo Trujillo
**Jurado**

_____

Edwin Rivas Trujillo
**Jurado**

Bogotá, 2016

## AGRADECIMIENTOS

Desarrollar este proyecto de grado no hubiese sido posible sin la participación de personas e instituciones que han facilitado las cosas para que este trabajo llegue a un feliz término. Por ello, es para nosotros un placer utilizar este espacio para ser justos y consecuentes con ellas, expresándoles nuestros más sinceros agradecimientos.

En primera instancia agradecemos a nuestros padres por ese gran esfuerzo de toda una vida de arduo trabajo y sacrificios para ayudarnos a forjar nuestro camino.

A mi hermano por ser quien con su apoyo y palabras de aliento ha sido fuente de inspiración en mi vida. *Andrea*

A todos los que creyeron y no creyeron en mi esfuerzo y dedicación por este proyecto, esto es para ustedes. *Diego*

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, principalmente al grupo de investigación LIFAE por brindarnos el escenario propicio para nuestro desarrollo personal y profesional.

A nuestro director de proyecto Johann Hernández Mora por ser la persona que con su constante apoyo, conocimiento, tiempo y disposición para enseñar hizo posible la realización de este trabajo de grado.

A nuestro codirector de proyecto Adolfo Jaramillo Matta por su incansable ánimo y exigencia para que este trabajo fuera valioso y digno de admiración.

A nuestros amigos y a todas y cada una de las personas que han vivido con nosotros de una u otra forma la realización de este trabajo de grado.

# ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN ..... 11
1.1 OBJETIVOS ..... 13
1.1.1 Objetivo general ..... 13
1.1.2 Objetivos específicos ..... 13
1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO ..... 13
1.2.1 Diagrama de bloques ..... 14
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES ..... 15
2 GENERALIDADES ..... 16
2.1 MICRORRED ..... 16
2.1.1 ¿Cómo funcionan las microrredes? ..... 17
2.1.2 Ventajas y desventajas de las Microrredes ..... 18
2.2 CONTEXTO HISTÓRICO ..... 18
2.3 FUENTES DE ENERGÍA ..... 19
2.3.1 Energías renovables ..... 19
2.3.2 Energías no renovables ..... 20
2.4 MARCO REGULATORIO ..... 20
2.5 DIgSILENT® POWERFACTORY ..... 21
2.5.1 ¿Cómo funciona DPF? ..... 21
2.5.2 Ventajas de DPF con respecto a otros software de simulación de circuitos eléctricos ..... 22
2.5.3 DPL ..... 23
2.5.4 Funciones de DPL ..... 23
2.6 ANTECEDENTES SIMULACIÓN DE MICRORREDES ..... 24
2.6.1 Proyecto de grado: MICROGRID MODELLING AND SIMULATION . 24
2.6.2 Proyecto de grado: DESARROLLO DE SIMULADOR INTEGRADO DE MICROREDES INTELIGENTES ..... 25
2.6.3 Paper: Modeling and Simulation of DC Microgrids for Electric Vehicle Charging Stations ..... 25
3 ESTRUCTURA DE LA MICRORRED ELÉCTRICA EN DPF ..... 27
3.1 RECONOCIMIENTO GENERAL DE LA MICRORRED ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FJDC ..... 27
3.1.1 Criterios de revisión de la estructura de la microrred ..... 27

3.1.2 Estructura eléctrica del edificio Sabio Caldas ..... 28
3.1.3 SEP de generación y carga ..... 28
3.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA PROPUESTA ..... 29
3.3 COMPOSICIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA MICRORRED ..... 31
3.3.1 Barrajes ..... 31
3.3.2 Líneas de transmisión ..... 31
3.3.3 Transformadores ..... 31
3.3.4 Generadores ..... 32
3.3.5 Cargas ..... 33
3.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA MICRORRED PROPUESTA ..... 33
3.4.1 Implementación de la estructura básica de la microrred ..... 33
3.4.2 Implementación de componentes en la estructura ..... 35
4 ESTRUCTURA DE BLOQUES DE ENTRADA DE DATOS ..... 40
4.1 ADQUISICIÓN DE VARIABLES DE SALIDA DE CADA SEP ..... 40
4.1.1 Generador fotovoltaico ..... 40
4.1.2 Banco de baterías ..... 41
4.1.3 Motores ..... 41
4.1.4 Sistema de gestión de excedentes ..... 43
4.1.5 Carga tipo usuario residencial ..... 44
4.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE LOS BLOQUES ..... 45
4.2.1 Vías de entrada de datos ..... 45
4.2.2 Bloque fotovoltaico ..... 46
4.2.3 Bloque banco de baterías ..... 47
4.2.4 Bloques de cargas ..... 48
4.3 IMPLEMENTACIÓN DE BLOQUES PARA CADA SEP ..... 49
4.3.1 Componentes de los bloques ..... 49
4.4 PROGRAMACIÓN Y DESARROLLO DE LOS MÓDULOS ..... 54
4.4.1 Comando DPL ..... 54
4.4.2 Objetos del comando DPL ..... 55
4.4.3 Programación de los módulos ..... 56
4.4.4 Implementación del código en el bloque ..... 58
4.5 PRUEBAS AL BLOQUE ..... 58

4.5.1 Prueba motor premium ..... 58
5 VALIDACIÓN DEL SISTEMA ..... 61
5.1 PERFIL DE CARGA ..... 61
5.2 PROTOCOLO DE PRUEBAS Y VALIDACIÓN ..... 64
5.2.1 Validación del banco de baterías ..... 64
5.2.2 Validación de los motores eléctricos ..... 66
5.2.3 Validación del sistema de gestión de excedentes ..... 67
5.2.4 Validación de la carga residencial ..... 69
6 SIMULACIÓN DE LA MICRORRED ..... 72
6.1 FUNCIONAMIENTO DE LA SIMULACIÓN ..... 72
6.1.1 Diseño de la simulación ..... 72
6.1.2 Composición de la simulación ..... 72
6.1.3 Implementación de la simulación ..... 74
6.1.4 Comando DPL general ..... 74
6.1.5 Ejecución de la simulación ..... 78
6.2 CASO ESTUDIO PRINCIPAL ..... 79
6.2.1 Determinación de parámetros de cada SEP ..... 79
6.2.2 Descripción caso estudio principal ..... 80
6.2.3 Casos estudios adicionales ..... 85
6.2.4 Simulaciones adicionales ..... 87
6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS ..... 92
6.3.1 Análisis de resultados caso estudio principal ..... 92
6.3.2 Perfil de salida ..... 95
7 CONCLUSIONES ..... 96
8 TRABAJOS FUTUROS ..... 98
9 BIBLIOGRAFÍA ..... 99
ANEXOS ..... 103

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Capacidad instalada por tecnología [3] ..... 11
Figura 1-2 Diagrama de bloques ..... 14
Figura 2-1 Componentes microrred [9] ..... 16
Figura 2-2 Ejemplo microrred [12] ..... 17
Figura 2-3 Fuentes de energía eléctrica [15] ..... 19
Figura 2-4 Opciones de un comando DPL ..... 24
Figura 2-5 Contenido de la carpeta DPL ..... 24
Figura 3-1 Diseño básico inicial de la microrred de la UDFJDC [1] ..... 27
Figura 3-2 Estructura inicial microrred DPF ..... 29
Figura 3-3 Nodo MR en DPF ..... 30
Figura 3-4 Estructura inicial microrred DPF con equivalentes de red ..... 31
Figura 3-5 Placa transformador microrred ..... 32
Figura 3-6 Creación nuevo proyecto en DPF ..... 34
Figura 3-7 Ventana de confirmación del nombre del proyecto ..... 34
Figura 3-8 Workspace DPF ..... 35
Figura 3-9 Creación barraje en DPF ..... 36
Figura 3-10 Parametrización barraje en DPF ..... 36
Figura 3-11 Creación líneas de transmisión en DPF ..... 37
Figura 3-12 Parametrización líneas de transmisión DPF - 1 ..... 37
Figura 3-13 Parametrización líneas de transmisión DPF - 2 ..... 38
Figura 3-14 Parametrización líneas de transmisión DPF - 3 ..... 38
Figura 3-15 Creación transformadores en DPF ..... 39
Figura 3-16 Parametrización transformador DPF ..... 39
Figura 4-1 Generador fotovoltaico [36] ..... 40
Figura 4-2 Banco de baterías [37] ..... 41
Figura 4-3 Motor estándar [32] ..... 42
Figura 4-4 Motor Premium [32] ..... 42
Figura 4-5 Sistema de gestión de excedentes [33] ..... 43
Figura 4-6 Carga tipo usuario residencial [35] ..... 44
Figura 4-7 Estructura de bloques en DPF ..... 45
Figura 4-8 Ejemplo de matriz en DPF ..... 46
Figura 4-9 Placa panel fotovoltaico UDFJDC ..... 47
Figura 4-10 Estructura fotovoltaica en DPF ..... 47
Figura 4-11 Estructura banco de baterías en DPF ..... 48
Figura 4-12 Estructura cargas en DPF ..... 48
Figura 4-13 Creación bloque panel fotovoltaico ..... 49
Figura 4-14 Parametrización bloque panel fotovoltaico ..... 50
Figura 4-15 Creación bloque banco de baterías en DPF ..... 51
Figura 4-16 Parametrización bloque baterías DPF – 1 ..... 51
Figura 4-17 Parametrización bloque baterías DPF – 2 ..... 52
Figura 4-18 Creación bloque de carga ..... 53
Figura 4-19 Parametrización bloque carga DPF ..... 53

Figura 4-20 Administrador de archivos DPF (Data Manager) ..... 54
Figura 4-21 Creación archivo DPL ..... 54
Figura 4-22 Interfaz archivo DPL ..... 55
Figura 4-23 Subrutinas DPL ..... 55
Figura 4-24 Comandos DPL ..... 56
Figura 4-25 Pestañas básicas archivo DPL ..... 57
Figura 4-26 Código DPL (Script) ..... 57
Figura 4-27 Conexión código DPL con la estructura ..... 58
Figura 4-28 Variables de salida motor Premium [32] ..... 59
Figura 4-29 Ventana de entrada de datos ..... 59
Figura 4-30 Parámetro modificado a través de DPL ..... 60
Figura 5-1 Diagrama de flujo programación del banco de baterías ..... 64
Figura 5-2 Variable de salida banco de baterías (Resaltada) [31] ..... 65
Figura 5-3 Resultado bloque banco de baterías en DPF ..... 65
Figura 5-4 Diagrama de flujo programación de motores ..... 66
Figura 5-5 Variable de salida Motor (Resaltada) [32] ..... 67
Figura 5-6 Resultado bloque Motor en DPF ..... 67
Figura 5-7 Diagrama de flujo programación del sistema de gestión ..... 68
Figura 5-8 Variable de salida sistema de gestión (Resaltada) [33] ..... 69
Figura 5-9 Resultado bloque sistema de gestión en DPF ..... 69
Figura 5-10 Diagrama de flujo programación de carga residencial ..... 70
Figura 5-11 Variable de salida carga residencial (Resaltada) [35] ..... 70
Figura 5-12 Resultado bloque carga residencial en DPF ..... 71
Figura 6-1 Estructura de la microrred ..... 73
Figura 6-2 Selección general archivo DPL ..... 74
Figura 6-3 Inicialización básica de cada equivalente de red ..... 75
Figura 6-4 Llamado subrutinas en DPL ..... 75
Figura 6-5 Objeto CalcLdf ..... 76
Figura 6-6 Inicialización código para exportación de resultados ..... 77
Figura 6-7 Código importación de resultados ..... 77
Figura 6-8 Resultados en bloc de notas ..... 78
Figura 6-9 Ejecución comando DPL ..... 81
Figura 6-10 Ingreso datos caso de estudio ..... 81
Figura 6-11 Resultados caso estudio DPF ..... 82
Figura 6-12 Valores de P y Q motor estándar ..... 83
Figura 6-13 Valores de P y Q motor Premium ..... 83
Figura 6-14 Valores de P en carga residencial y sistema de gestión de excedentes ..... 84
Figura 6-15 Valores de P en panel fotovoltaico y banco de baterías ..... 84
Figura 6-16 Valor de P en el transformador ..... 85
Figura 6-17 Valores de P y Q en el transformador (caso estudio adicional 1) ..... 86
Figura 6-18 Valor de P en el transformador (caso estudio adicional 2) ..... 87
Figura 6-19 Potencia generada simulación adicional ..... 89

Figura 6-20 Potencia consumida simulación adicional ..... 90
Figura 6-21 Sección microrred de la simulación en DPF ..... 92
Figura 6-22 Valor de P en transformador, panel fotovoltaico y banco de baterías 92
Figura 6-23 Valor de P en transformador y motores ..... 93
Figura 6-24 Diferencia de valores de P en carga LIFAE y panel fotovoltaico ..... 94
Figura 6-25 Valor de P banco de baterías ..... 94
Figura 6-26 Perfil de salida en bloc de notas ..... 95

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ventajas y desventajas de Microrredes ..... 18
Tabla 2-2 Módulos y funciones disponibles de DIgSILENT PowerFactory [18] ..... 22
Tabla 5-1 Variables de salida del Banco de baterías [31] ..... 61
Tabla 5-2 Variables de salida motor estándar [32] ..... 62
Tabla 5-3 Variables de salida motor premium [32] ..... 62
Tabla 5-4 Variables de salida del Sistema de gestión [33] ..... 63
Tabla 5-5 Variables de salida de carga residencial [35] ..... 63
Tabla 6-1 Parámetros de entrada simulación adicional ..... 88
Tabla 6-2 Variables de salida simulación adicional ..... 88
Tabla 6-3 Balance de potencias simulación adicional ..... 89
Tabla 6-4 Potencias generadas caso 1 ..... 90
Tabla 6-5 Potencias consumidas caso 1 ..... 90
Tabla 6-6 Parámetros de entrada caso 1 ..... 91
Tabla 6-7 Potencias generadas caso 2 ..... 91
Tabla 6-8 Potencias consumidas caso 2 ..... 91
Tabla 6-9 Parámetros de entrada caso 2 ..... 91

# 1 INTRODUCCIÓN

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas como centro de producción de saberes y en concordancia con su visión de generar productos académicos útiles para la sociedad, ha iniciado el análisis, diseño, e implementación de una microrred eléctrica en la Facultad de Ingeniería a través del proyecto de investigación titulado *"Prototipo de una microrred eléctrica en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas PME-UD"* [1], el cual está siendo desarrollado por los grupos de Investigación GCEM (Grupo de Compatibilidad e Interferencia Electromagnética) y LIFAE (Laboratorio de Investigación de Fuentes Alternativas de Energía). Con este se propone aportar a la investigación, al desarrollo del sector eléctrico y a la comunidad académica, además de contribuir al cambio sistemático que propone el concepto de generación distribuida. Desde la aparición de dicho concepto, la idea de generar enormes cantidades de potencia eléctrica en lugares lejanos para posteriormente ser distribuida, se ha cambiado paulatinamente por la concepción de auto generar la energía eléctrica directamente en los sitios de consumo [2], con la intención de optimizar el uso de los valiosos recursos naturales que empiezan a dar muestras de su agotamiento.

Según el informe mensual (diciembre 2015) de variables de generación en Colombia realizado por la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) se puede ver en la Figura 1-1 que las centrales hidroeléctricas tienen el mayor aporte de generación en el país, ya que tienen una participación del 69,97%. En segundo lugar se encuentran las centrales térmicas (gas y carbón), que alcanzan de manera agregada el 18,05%, y las cuales generan emisiones de gases de efecto invernadero como el $CO_2$ en una proporción de 0,66 kg/kWh, en el caso de los gases, y de 1 kg/kWh el carbón, es decir, aproximadamente 2'300.000 kg para un periodo de una hora [3].

**Capacidad por tecnología**

| Tecnología | Potencia (MW) | Participación (%) |
|---|---|---|
| Hidráulica | 11,500.5 | 69.97% |
| Térmica Gas | 1,619.5 | 9.85% |
| Térmica Carbón | 1,348.4 | 8.20% |
| Líquidos | 1,592.0 | 9.69% |
| Gas - Líquidos | 264.0 | 1.61% |
| Viento | 18.4 | 0.11% |
| Biomasa | 93.2 | 0.57% |
| **Total** | **16,436.0** | **100%** |

**Fuente de datos:** Sistema de información de XM
**Fuente de tabla:** UPME

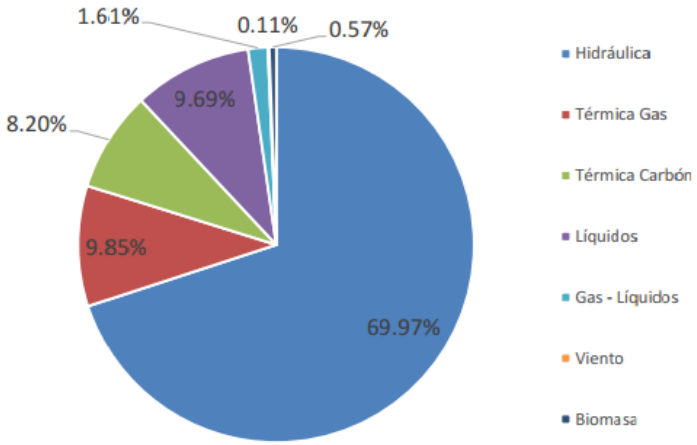



*Figura 1-1 Capacidad instalada por tecnología [3]*

Se debe utilizar la energía eléctrica de manera más eficiente, valiéndose de las energías renovables para crear auto sostenibilidad en el sistema de generación de

la misma, y esto exige transformar los procesos que existen hoy en día para generar y consumir electricidad. Las microrredes eléctricas se presentan como una opción viable porque ellas mitigan la contaminación del medio ambiente utilizando energías renovables para su funcionamiento [4]. Además, pueden suplir sus necesidades energéticas internas y generar excedentes de energía que se pueden proporcionar a la red eléctrica externa a la que se conecte [5].

La microrred eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital FJDC está conformada por diferentes componentes, que se han venido desarrollando de forma independiente en investigaciones y proyectos de grado, para posteriormente ser interconectados en esta. Estos componentes son diversos Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), que han sido y están siendo desarrollados por investigadores de diferentes áreas, tales como energías renovables, electrónica de potencia, calidad de potencia y vehículos eléctricos, entre otros. Cada uno de estos SEP se ha modelado en diferentes programas de simulación, lo cual ha dificultado su asociación de forma directa. Por este motivo, en este proyecto de grado se realiza la integración de estos SEP por medio de sus respectivas variables de salida, a través de una estructura común de simulación.

La simulación de redes eléctricas ha sido una herramienta fundamental en la construcción de los SEP y en la verificación de los mismos, ya que en muchas circunstancias dichas redes no se podrían implementar por diferentes causas como factores técnicos, costos, tiempo, o implementación errónea de las mismas. Particularmente, en el caso de la microrred eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital FJDC, su implementación inmediata no es posible sin antes desarrollar estudios que permitan evaluar el comportamiento de la misma a futuro. Se hizo entonces necesario el desarrollo de simulaciones, que permitieran obtener diferentes parámetros estimativos, para pronosticar comportamientos adecuados de las redes eléctricas o de sus elementos, con la mayor fidelidad posible [6].

Para la integración de estos SEP en una simulación, se escogió el software DIgSILENT® PowerFactory (DPF), debido a su versatilidad en la adaptación de otros software al mismo, y particularmente porque se puede obtener la respectiva representación del comportamiento de las variables de salida a través de bloques de datos diseñados internamente en el software [7].

Adicionalmente, el desarrollo de la simulación no solo servirá como estudio preliminar de lo que será la microrred implementada, sino que podrá ser utilizada como una herramienta básica en la conexión de futuros elementos a desarrollar en la microrred, ya sean de carga o de generación, o inclusive para posibles microrredes implementadas en otras facultades de la Universidad Distrital FJDC, fomentando así el uso de energías renovables en el sistema eléctrico nacional.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo general

Simular la microrred eléctrica perteneciente al proyecto institucional "*Prototipo de una microrred eléctrica en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas PME-UD*" que se implementará en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital FJDC a través del software DIgSILENT® PowerFactory.

### 1.1.2 Objetivos específicos

1) Revisar las características de la microrred eléctrica y sus componentes para definir la estructura básica a simular en DPF.
2) Seleccionar una estructura para cada bloque de datos en DPF adquiriendo variables de salida de cada SEP de la microrred eléctrica.
3) Validar cada bloque de datos comparando las variables de salida de cada SEP contra las variables finales de cada bloque.
4) Simular la microrred con diferentes configuraciones de generación y cargas para conocer las variables de: tensión, corriente y pérdidas de la microrred.

## 1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento consta de nueve capítulos que describen el proceso y el desarrollo de la simulación con sus respectivas etapas de su realización. De tal manera el primer capítulo brinda una descripción de la problemática a resolver y del entorno actual en el cual se enmarca este trabajo.

El capítulo 1.3 acerca al lector al contexto histórico que acompaña esta investigación y una descripción de los aspectos técnicos de cada componente involucrado en este trabajo.

Teniendo en cuenta las consideraciones generales ofrecidas por el capítulo 1.3, en los capítulos 3 y 4 se encuentra una descripción del desarrollo de las diferentes estructuras elaboradas en la simulación para la microrred y sus respectivos componentes, así como su respectiva implementación en el software DPF.

En el capítulo 5 se encuentra expuesta la validación de dichas estructuras y de la integración de los bloques de datos a las mismas.

El capítulo 6 contiene información detallada del funcionamiento de la simulación y el caso estudio elaborado para la misma, además, se incluye el análisis de resultados del caso estudio.

Finalmente, en el capítulo 7 se muestran las principales conclusiones del trabajo y en el capítulo 8 se proponen algunos trabajos futuros a partir de la simulación.

### 1.2.1 Diagrama de bloques

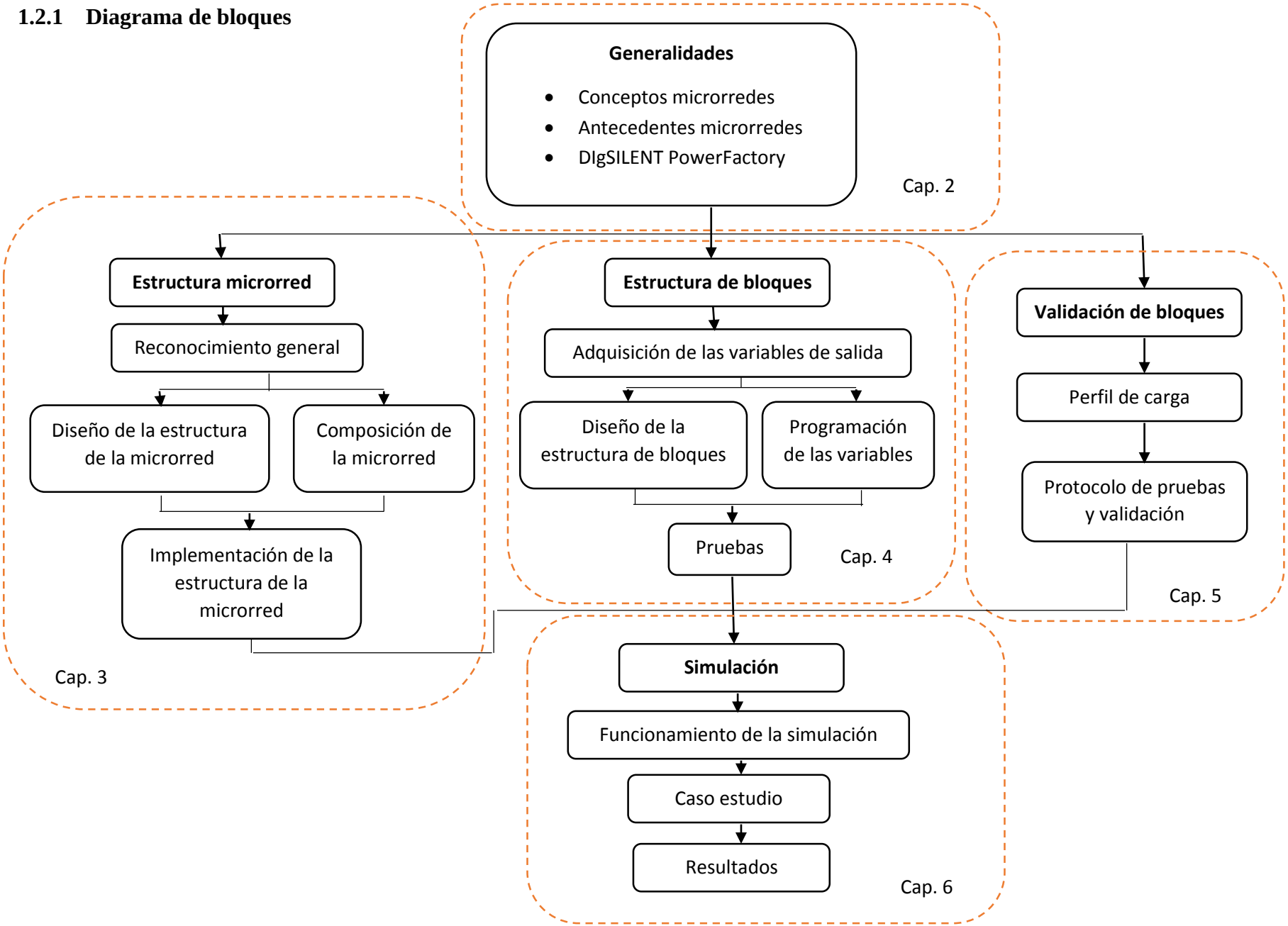



*Figura 1-2 Diagrama de bloques*

## 1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

Si una microrred tiene poca capacidad de generación y requiere alimentar una gran cantidad de cargas y estas consumen una potencia mayor a la generada, la microrred deberá valerse de la red externa para suplir toda la potencia requerida y trabajar de forma interconectada. Después de realizar las aproximaciones previas a los SEP simulados se encuentra que la microrred de la Universidad Distrital requiere potencia de la red externa, es por ello que para esta simulación siempre se desarrolló en modo interconectado.

Lo anterior puede cambiar si se conectan más fuentes de generación en el futuro, como los generadores eólicos, que dependiendo de su generación pueden llegar a suplir las cargas restantes para poder poner la microrred a funcionar de modo autónomo.

Los perfiles que han sido desarrollados en proyectos realizados previamente no serán complementados en el presente proyecto, se tomarán únicamente los datos reales, lo cual es una limitante puesto que los datos son muy limitados para ingresarlos al momento de ejecutar la simulación.

Se tienen unos bloques de convertidores en la versión 14.1 de DIgSILENT PowerFactory que no pueden ser utilizados en esta simulación ya que estos no se pueden conectar directamente a los bloques de generación que se están utilizando para este caso, puesto que estos están diseñados para aplicaciones de alta potencia, es por ello que se procedió a realizar la programación en cada uno de los bloques de generación para que estos posean los convertidores internamente emulando el comportamiento de ellos con modelos de eficiencia, como el observado en el perfil del modelo del panel fotovoltaico [30].

# 2 GENERALIDADES

## 2.1 MICRORRED

Las microrredes comprenden los sistemas de distribución de baja tensión con recursos energéticos distribuidos (DER), junto con dispositivos de almacenamiento y cargas flexibles. De ese modo los sistemas pueden operar de forma no-autónoma conectados a un sistema interconectado, o de forma autónoma cuando no está conectado a la red principal. La operación de micro fuentes en la red puede proveer diferentes beneficios al rendimiento de todo el sistema, si se coordina eficientemente [8].

La principal característica de una microrred es la capacidad de autoabastecerse y funcionar de forma independiente, sabiendo que esta hace parte de una red inteligente, la cual pertenece a la red de distribución. Una microrred se compone de cargas y/o generadores operando como un sistema único siendo capaz de proporcionar energía eléctrica e incluso en algunas ocasiones térmica. La electrónica de potencia es la base del funcionamiento y control de muchas de las fuentes que la integran, permitiendo así que el sistema se comporte como un sistema único, garantizando que se presente al sistema eléctrico con un control que abastece las necesidades locales con fiabilidad y seguridad.




*Figura 2-1 Componentes microrred [9]*

1. Panel fotovoltaico
2. Conversor DC/AC
3. Grupo de medida
4. Banco de baterías
5. Generador
6. Turbina eólica
7. Cargas

### 2.1.1 ¿Cómo funcionan las microrredes?

El funcionamiento de una microrred en teoría es sencillo. Sin embargo, hay que tener en cuenta detalles que son estrictamente necesarios para la buena operación de la misma. Para que funcionen correctamente, un interruptor aguas arriba de ésta debe ser capaz de abrirse en cualquier momento durante una inaceptable condición de calidad de la energía, y el DER -por sus siglas en inglés Distributed Energy Resources- (o, en otras palabras: la red interna de generación de energía eléctrica) debe ser capaz de llevar a la carga la totalidad de la potencia requerida en la sección que se encuentre aislada. Esto incluye mantener la tensión adecuada y los niveles de frecuencia para todas las cargas de la microrred. Independientemente de la tecnología de conmutación, pueden producirse interrupciones momentáneas durante la transferencia de conexión de la red externa a la microrred. En este caso, el DER debe llevar la potencia a las cargas de la isla, además debe ser capaz de reiniciar y recoger la carga de la isla después de que el interruptor se ha abierto [10].

Los análisis de flujo de potencia de los escenarios de la microrred se deben realizar para asegurar que se mantiene una regulación de tensión adecuada y para establecer que el DER puede manejar la desconexión de la microrred. El DER debe ser capaz de suministrar la potencia durante el funcionamiento de la microrred para detectar si una corriente de falla se produce aguas abajo de la ubicación del interruptor. Cuando se restablece la alimentación en el lado de servicio de la red externa, el interruptor no debe cerrarse a menos que la red y la microrred se sincronicen. Esto requiere la medición de tensión y frecuencia en ambos lados del interruptor para permitir la sincronización de la microrred y la red externa [11].

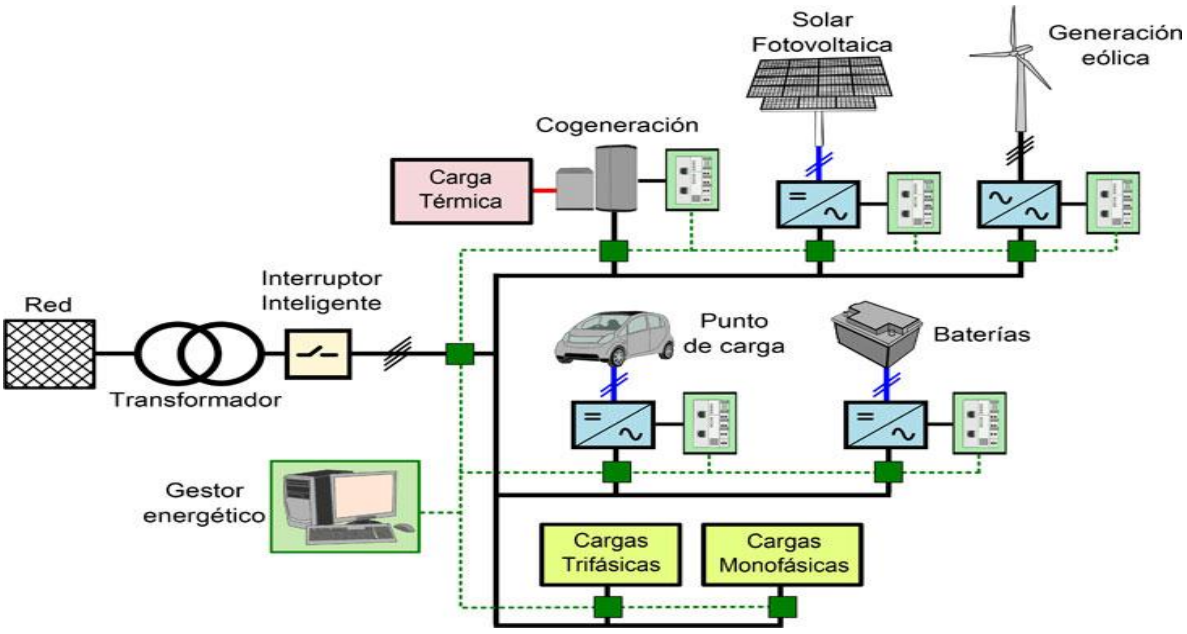



*Figura 2-2 Ejemplo microrred [12]*

### 2.1.2 Ventajas y desventajas de las Microrredes

*Tabla 2-1 Ventajas y desventajas de Microrredes*

| **Ventajas** |
|---|
| • Permiten mayor calidad del suministro de la energía, mayor ahorro y menor dependencia de la red de distribución [13].<br>• Funcionan conectadas a la red pública de distribución o aisladas de la misma.<br>• Como se pueden ubicar cerca de las fuentes de generación y cerca de sus consumidores su eficiencia energética mejora considerablemente en las redes de transmisión y distribución.<br>• Cuando están conectadas al sistema de distribución público lo están beneficiando ya que si ocurre una falla, la microrred sigue funcionando.<br>• El medio ambiente también se ve beneficiado ya que las emisiones de dióxido de carbono (CO2) y de gases de efecto invernadero se reducirían al implementar energías renovables.<br>• En los lugares donde ocurren frecuentes apagones habría mayor fiabilidad en las redes de transmisión y distribución [14].<br>• Menor dependencia de combustibles fósiles. |
| **Desventajas** |
| • Falta de normatividad específica, lo que no permite la masificación.<br>• Son de alto costo inicial ya que es una tecnología que no está implantada en los mercados y requieren protecciones eléctricas de alta calidad.<br>• Las microrredes deben considerar y tener bajo control los parámetros de tensión, frecuencia y calidad de energía a las normas aceptables mientras se mantiene el equilibrio de la potencia y la energía [10].<br>• Se requiere más espacio y mantenimiento ya que generalmente la energía eléctrica tiene que ser almacenada en bancos de baterías, cuando se opera en modo aislado. |

## 2.2 CONTEXTO HISTÓRICO

La creciente demanda de energía eléctrica en las ciudades ha supuesto un paradigma de generación de energía en grandes hidroeléctricas, o termoeléctricas, alejándolas de las ciudades para estar en cercanía a los recursos o sencillamente para no molestar a la sociedad, produciendo contaminación ambiental de todos los tipos y agotando cada vez más los recursos naturales existentes [15].

Dadas estas condiciones, se ha venido generando una reflexión acerca de estas problemáticas, implementando sistemas de autogeneración con la ayuda de las energías renovables, entre las cuales destacan el auto abastecimiento de las cargas propias y la posible entrega de energía al sistema interconectado externo,

accediendo así a posibles descuentos económicos, y además contribuyendo con la alta demanda de energía eléctrica que se pueda presentar a lo largo del día.

Actualmente se está incursionando en los sistemas de potencia utilizando fuentes de energía renovable, las cuales generalmente tienen un comportamiento distinto (y más complejo) al de las fuentes tradicionales, haciendo que los análisis previos requeridos para un montaje eléctrico sean también más complejos. Afortunadamente la tecnología también va evolucionando y a la par se han desarrollado programas de computación muy eficaces, facilitando estos análisis no sólo con fuentes renovables, sino también de sistemas de potencia de gran tamaño [16].

## 2.3 FUENTES DE ENERGÍA

El siguiente diagrama muestra las diferentes fuentes de energía eléctrica que están clasificadas en dos grupos diferentes: renovables y no renovables, siendo las primeras aquellas que se pueden regenerar de forma natural después de ser utilizadas y las segundas son todo lo contrario, ya que existen en cantidad limitada y se agotan por su consumo. [17][18]

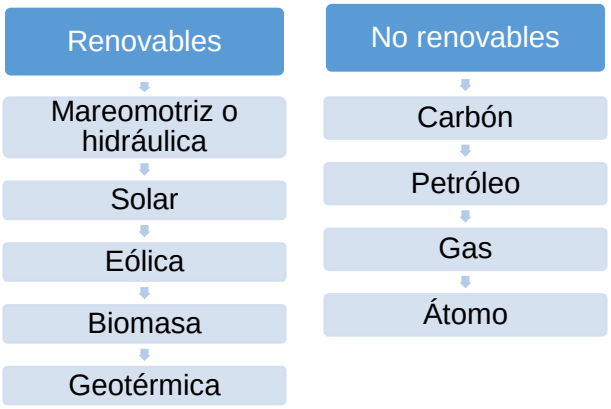



*Figura 2-3 Fuentes de energía eléctrica [15]*

### 2.3.1 Energías renovables

- Energía mareomotriz: subida y bajada del nivel del mar por mareas
- Energía hidráulica: agua almacenada en embalses y su movimiento en los ríos
- Energía solar: luz y calor de la radiación solar, mediante paneles fotovoltaicos
- Energía eólica: movimiento del aire debido al viento, normalmente con molinos
- Energía de la biomasa: vegetación y restos orgánicos de actividades agrícolas e industriales, basura, etc., que generan combustibles mediante diversos procesos
- Energía geotérmica: calor interno de la tierra

### 2.3.2 Energías no renovables

- Carbón: recurso fósil que se usa en centrales térmicas
- Petróleo: se extrae el combustible diésel para centrales térmicas
- Gas: otro combustible, pero menos contaminante que los anteriores
- Átomo: combustible nuclear como el uranio y el plutonio

## 2.4 MARCO REGULATORIO

La implementación de microrredes a nivel comercial ha venido ganando terreno desde hace un tiempo. No solo en el país, sino internacionalmente no es fácil encontrar un marco normativo completo y explícito. Sin embargo, la implementación de estos ha venido aumentando debido al crecimiento demográfico y se han creado algunas leyes que tratan de regular la implementación de las microrredes. En Colombia existen algunas resoluciones de la CREG para generación distribuida y algunas disposiciones de ley, que regulan la actividad de generación y la venta de energía eléctrica al sistema por parte de los consumidores.

***Ley 689 de 2001**

*"Dice que un productor marginal independiente o para uso particular es la persona natural o jurídica que utilizando recursos propios técnicamente aceptados por la normatividad vigente, produce bienes o servicios propios del objeto de las empresas de servicios públicos para sí misma o para una clientela."* [19]

**Resolución CREG 084 de 1996**

*"Reglamenta las actividades del autogenerador conectado al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Donde se define al autogenerador como la persona natural o jurídica que produce energía eléctrica exclusivamente para atender sus propias necesidades, por lo tanto no usa la red pública para fines distintos al de obtener respaldo del SIN. No puede vender parcial o totalmente su energía a terceros, aunque en situaciones de racionamiento declarado de energía podrán vender energía a la Bolsa."* [20]

**Resolución CREG 107 de 1998**

*"Reglamenta la actividad de cogeneración en el SIN. Donde se define al cogenerador como la persona natural o jurídica que produce energía utilizando un proceso de cogeneración, siendo este el proceso de producción combinada de energía eléctrica y térmica, destinadas ambas al consumo propio o de terceros y destinadas a procesos industriales o comerciales. Pueden vender sus excedentes cumpliendo ciertos requisitos especificados en el artículo 8 de la presente resolución."* [21]

**Resolución CREG 086 de 1996**

*"Define la generación con plantas menores como la generación producida con plantas con capacidad efectiva menor a 20MW, operadas por empresas generadoras, productores marginales o independientes de electricidad y que comercializan esta energía con terceros, o en el caso de las empresas integradas verticalmente, para abastecer total o parcialmente su mercado."* [22]

Teniendo en cuenta los factores legales que acompañan la implementación de las microrredes, se abordará el tema del simulador que se ha escogido para ejecutar la implementación en software de la microrred.

## 2.5 DIgSILENT® POWERFACTORY

DPF es una herramienta de diseño asistido por computadora, altamente eficiente en el análisis de sistemas eléctricos de potencia de diversas aplicaciones como generación, transmisión, distribución e industrial. Además, se destaca su principal ventaja de integración funcional global entre funciones de cálculo y bases de datos agilizando los cálculos y combinando la capacidad de modelado flexible con algoritmos de solución. Sabiendo eso, se puede evidenciar que el software se ajusta a las necesidades del presente proyecto, ya que éste tiene dentro de sus objetivos un análisis de variables eléctricas de una microrred que tiene sus componentes en diferentes software, donde DPF permite la integración de todos ellos gracias a la interfaz DPL que se describe detalladamente en la sección 2.5.3 [23].

DIgSILENT (DIgital SImuLation and Electrical NeTwork calculation program), es un software que tiene la habilidad de simular flujos de carga, análisis de fallas, de armónicos y de estabilidad para sistemas de tipo AC, DC y AC-DC.

DPF no le permite al usuario modelar los componentes existentes de los niveles básicos de los mismos, pero tiene la opción de construir configuraciones que ya se han modelado independientemente [24].

El programa tiene una interfaz gráfica que posee la función de dibujar diagramas unifilares, enlazando cada uno de los elementos directamente con la base de datos que almacena toda la información. Adicionalmente esta interfaz tiene acceso directo a todas las funciones de cálculo más relevantes (dinámicas y estáticas).

### 2.5.1 ¿Cómo funciona DPF?

Por cada sistema eléctrico que se quiera modelar, dentro del software se debe crear un proyecto (PROJECT). Así mismo, cada uno de estos debe contener una topología de la red (GRID), unos parámetros técnicos definidos por la librería (LIBRARY) de cada uno de los elementos en unidades físicas y no en por unidad (p.u.) y un caso de estudio (STUDY CASE) donde se especifica que sección de la red se va a analizar. Vale aclarar que dentro de cada "project" puede haber el número de "grid", "library" y "study case" que sean necesarios [25].

DPF tiene sus funciones agrupadas por módulos de la siguiente manera:

*Tabla 2-2 Módulos y funciones disponibles de DIgSILENT PowerFactory [18]*

| **Básicos** |
|---|
| • Elaboración de diagramas unifilares interactivos con la base de datos.<br>• Cálculos de flujo de carga.<br>• Cálculos de cortocircuito.<br>• Calculo de parámetros eléctricos de líneas de transmisión a partir de su configuración geométrica.<br>• Creación de las tareas automatizadas (DPL).<br>• Acceso interactivo o en línea con sistemas SCADA.<br>• Posibilidad de importación o exportación de datos en forma dinámica con otras aplicaciones (Excel, Matlab). |
| **Estabilidad** |
| • Simulaciones de estabilidad transitoria.<br>• Creación de modelos de usuario (DSL).<br>• Simulaciones de estabilidad dinámica.<br>• Análisis nodal.<br>• Reducción de redes. |
| **Otros módulos** |
| • Armónicos.<br>• Confiabilidad.<br>• Protecciones. |

### 2.5.2 Ventajas de DPF con respecto a otros software de simulación de circuitos eléctricos

En el momento de calcular flujos de carga o análisis de cortocircuito se tienen varias formas de almacenar los datos ya sea en tablas, gráficos o archivos, que además son visibles en la pantalla de salida.

Si se implementa un sistema de gran tamaño, el software funciona a altas velocidades detectando rápidamente cuales elementos están fuera del rango de los valores establecidos, siendo estos identificados por distintos colores.

Para el análisis de cortocircuito se tienen varios métodos de cálculo, incluyendo varias normas internacionales, americanas y europeas.

Posee una librería muy amplia, con modelos detallados de máquinas síncronas, asíncronas, diversos tipos de controles, etc.

Además de su librería, el software es muy flexible, ya que permite insertar modelos diseñados por el usuario para que estos sean más cercanos a los requerimientos necesarios.

Durante una simulación se puede interrumpir el proceso de cálculo, en caso tal que se desee cambiar alguna variable o que se quieran obtener los datos en un punto determinado.

### 2.5.3 DPL

DPL (DIgSILENT Programming Language) es una suite de programación dentro del software DPF que permite realizar tareas automáticamente a través de comandos de programación, interactuando con los elementos que maneja DPF dentro de un diagrama unifilar determinado, así como también se puede acceder a funciones y variables creadas por el usuario.

Tanto los comandos de cálculo creados por el usuario como los definidos por la aplicación se pueden usar para el análisis del sistema de potencia como: optimización de la red, análisis de estabilidad, confiabilidad, armónicos, coordinación de protecciones, etc. Todo esto a través de comandos de programación como: if, then, else, do, while [26].

Existe un objeto de comando DPL: ComDpl, que se utiliza como conexión de diferentes parámetros, variables u objetos a funciones o elementos internos para luego obtener resultados o cambios en dichos elementos.

Por lo tanto, un comando DPL ejecuta una serie de acciones estando siempre en comunicación con la base de datos, almacenando los nuevos registros, configuraciones, parámetros o resultados directamente en ella o en un archivo externo como se ha mencionado anteriormente.

### 2.5.4 Funciones de DPL

Para un ejemplo particular, como un cálculo de cortocircuito (ComShc), se puede modificar a través del código fuente indicando la localización de la falla y el tipo de la misma, conociendo todas las variables que vayan a ser implicadas.

Con los filtros (conjunto de objetos) se puede encontrar algún elemento determinado como por ejemplo aquellos que se encuentren sobrecargados o líneas abiertas y generar un reporte de esto.

La Figura 2-4 muestra todas las opciones que se pueden modificar en un comando DPL, tales como definición de variables en la sección *Input parameters*, la sección *Contents* muestra el contenido del archivo DPL, que para el presente ejemplo se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Adicionalmente se puede apreciar, que dentro de un archivo DPL pueden pertenecer otras subrutinas DPL, ejecutándose una tras otra. Todos estos parámetros pueden ser igualmente modificados a través del código fuente, el cual brinda una distinción entre comandos, comentarios y definición de variables por medio de diferentes colores.

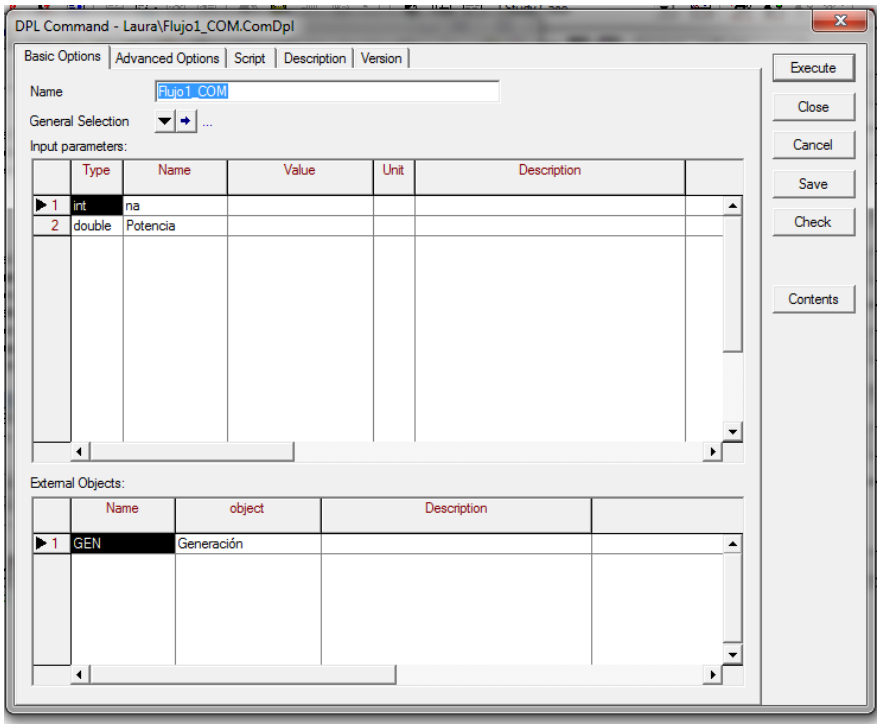



*Figura 2-4 Opciones de un comando DPL*

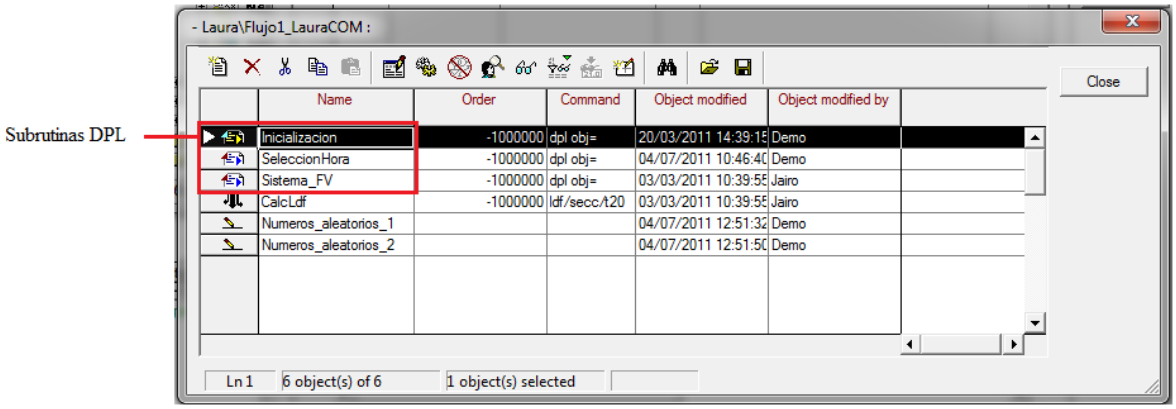



*Figura 2-5 Contenido de la carpeta DPL*

## 2.6 ANTECEDENTES SIMULACIÓN DE MICRORREDES

### 2.6.1 Proyecto de grado: MICROGRID MODELLING AND SIMULATION

Faisal Mohamed realizó una investigación como proyecto de grado para optar por el título de Licenciado en Ciencias en Tecnología titulado “Microgrid Modelling and Simulation” en español “Modelación y simulación de una microrred”, la cual estaba

orientada a modelar una microrred en estado estacionario y estudiar sus respuestas transitorias para diferentes entradas.

Los perfiles que ya están desarrollados y que se incluyeron son: un motor diésel, una pila de combustible, una microturbina, una turbina de viento y una celda fotovoltaica; adicionalmente se implementó la electrónica de potencia. Tenía como objetivo a largo plazo, modelar un sistema altamente sofisticado de una microrred completa, con el fin de permitir su simulación y comprobar el comportamiento de la misma. Dicho modelo fue desarrollado en el software MATLAB/Simulink. [27]

### 2.6.2 Proyecto de grado: DESARROLLO DE SIMULADOR INTEGRADO DE MICROREDES INTELIGENTES

Sebastián Eduardo Fehlandt Muñoz realizó un proyecto como memoria para optar por título de Ingeniero Civil Electricista titulado “Desarrollo de simulador integrado de microrredes inteligentes” destinado principalmente a desarrollar una herramienta que incorporara un algoritmo de flujo de potencia trifásico para permitir la simulación de la operación de una microrred desbalanceada, teniendo en cuenta que se van a incorporar módulos de carga, almacenamiento y generación, que mayormente serán de fuentes renovables.

Se implementó un algoritmo de flujo de potencia como una extensión del proyecto MATPOWER que permite calcular flujos de potencia y flujos de potencia óptimos en MATLAB®. Para la validación de este se hizo una comparación con un caso de estudio internacional, obteniéndose un error de 0.0005 p.u. para las tensiones de fase y 0.811% para las potencias inyectadas, con un tiempo de ejecución de 0.1s.

Para la validación de la herramienta se hizo con la microrred real de Huatacondo, desarrollada por el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, donde se obtuvieron resultados que reflejaban su óptimo funcionamiento. [28]

### 2.6.3 Paper: Modeling and Simulation of DC Microgrids for Electric Vehicle Charging Stations

Fabrice Locment y Manuela Sechilariu escribieron un paper titulado "Modeling and Simulation of DC Microgrids for Electric Vehicle Charging Station" en español "Modelo y simulación de microrredes DC para una estación de carga de vehículos eléctricos" el cual se centra en la evaluación de aspectos teóricos y numéricos relacionados con la arquitectura de potencia de una microrred DC original para carga eficiente de vehículos eléctricos con enchufe.

La microrred DC propuesta se basa en generación fotovoltaica y en el almacenamiento electroquímico, estando interconectada a la red externa. Se supone que los vehículos eléctricos tienen una conexión directa a su entrada DC del cargador. A diferencia de los diseños de arquitectura de potencia

convencionales, la generación fotovoltaica se acopla directamente con el enlace DC sin un convertidor estático, aumentando la eficiencia energética y reduciendo la complejidad de control.

La administración de energía propuesta permite el autoconsumo de acuerdo con la producción de potencia fotovoltaica y con las restricciones en la capacidad de almacenamiento. De ese modo, la red pública es vista sólo como respaldo.

La primera fase de modelado tuvo como objetivo evaluar los principales flujos de energía dentro de la arquitectura de la microrred DC propuesta, identificar la estructura de control y las estrategias de gestión de energía.

La segunda fase de la simulación se basa en la caracterización numérica de los componentes de la microrred DC y las estrategias de gestión de la energía, que consideran los requerimientos de la fuente de alimentación, los tiempos de carga de diferentes vehículos eléctricos, el envejecimiento de almacenamiento electroquímico y limitaciones de la potencia de carga de la red para el modo de inyección.

Los resultados de la simulación muestran la validez del modelo y la viabilidad de la arquitectura de potencia de la microrred DC propuesta que presenta un buen rendimiento en términos de eficiencia total y el control simplificado. [29]

# 3 ESTRUCTURA DE LA MICRORRED ELÉCTRICA EN DPF

Una microrred eléctrica consiste básicamente en un "*sistema de generación eléctrica bidireccional que permite la distribución de electricidad desde los proveedores hasta los consumidores, utilizando tecnología digital y favoreciendo la integración de las fuentes de generación de origen renovable, con el objetivo de ahorrar energía, reducir costos e incrementar la fiabilidad*" [13].

Las microrredes poseen estructuras complejas pero pueden ser modeladas de forma sencilla con el fin de facilitar la comprensión de su estructura, tal como se puede apreciar en el diseño básico inicial de la microrred eléctrica de la Universidad Distrital FJDC presentado por el proyecto institucional [1] (ver Figura 3-1).

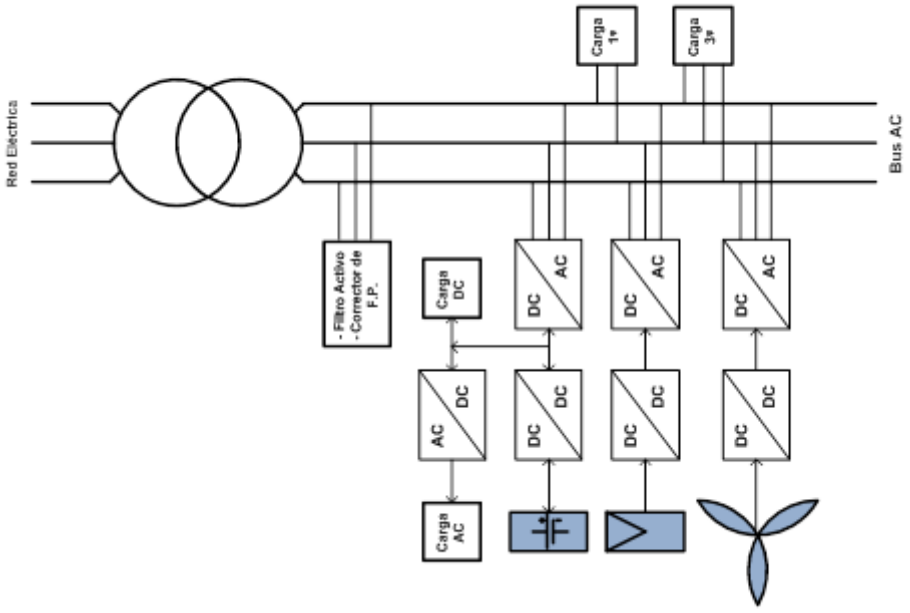



*Figura 3-1 Diseño básico inicial de la microrred de la UDFJDC [1]*

## 3.1 RECONOCIMIENTO GENERAL DE LA MICRORRED ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FJDC

A continuación se presenta la revisión realizada a la estructura actual de la microrred y se menciona cada uno de los SEP que estaban listos para su incorporación en el momento de la revisión.

### 3.1.1 Criterios de revisión de la estructura de la microrred

Con el fin de delimitar el alcance y las limitaciones de la simulación, y de la estructura de la microrred dentro de la misma, se realizó un reconocimiento del estado actual de esta y sus componentes. Esta revisión consistió en recoger

información acerca del desarrollo de cada componente, listar los SEP que estaban terminados para su implementación, y la adquisición de sus respectivas variables de salida.

Para desarrollar el diseño de la estructura de la microrred en DPF, se tuvo en cuenta la red eléctrica del edificio Sabio Caldas de la Universidad Distrital FJDC, desde su punto de conexión con la red externa de suministro de energía, hasta el punto de conexión común (PCC) en el séptimo piso del edificio, donde está ubicado el LIFAE.

El diseño de la estructura de la microrred interconectó los SEP que han sido previamente desarrollados por investigadores de los grupos de investigación. Esto se realizó accediendo a las variables de salida de cada SEP y modelando sus bloques dentro de la estructura de la microrred en la simulación.

### 3.1.2 Estructura eléctrica del edificio Sabio Caldas

Inicialmente se procedió a revisar la infraestructura eléctrica actual del edificio Sabio Caldas. En el sótano del mismo se encuentra alojada la subestación interna de la Universidad Distrital FJDC, la cual posee un transformador de potencia nominal 630 kVA. Este transformador es el punto de conexión del edificio con la red eléctrica externa. Posteriormente, se efectuó una revisión de los tableros eléctricos del edificio Sabio Caldas dentro de cada piso, para los cuales se determinó una carga estimada, teniendo en cuenta un factor de utilización de estas, en un instante dado. (ANEXO 1)

Finalmente, en el séptimo piso del edificio (PCC) se encuentra el laboratorio del grupo LIFAE y alojado en él, un transformador de potencia nominal de 5KVA dispuesto para la implementación de la microrred, permitiendo así interconectar los SEP de la misma.

#### 3.1.2.1 LIFAE

El área de trabajo a utilizar para la implementación de la microrred es el laboratorio del grupo LIFAE. Este espacio cuenta con los SEP de generación de energía que alimentarán la microrred. Adicionalmente, en el LIFAE también se encuentran las cargas que integran la microrred y el transformador del cual dispone la misma.

### 3.1.3 SEP de generación y carga

Las variables de salida adquiridas de los componentes de la microrred corresponden a:

- 1 Generador fotovoltaico de generación de energía eléctrica
- 1 Banco de baterías
- 2 Motores eléctricos
- 1 Sistema de gestión de excedentes

- 1 Emulador de carga residencial

## 3.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA PROPUESTA

Teniendo en cuenta los elementos encontrados en la revisión del estado actual de la microrred, se empezó a diseñar una estructura básica de la misma dentro de DPF. Esta cuenta con diferentes bloques que asemejan el comportamiento de cada uno de los SEP dispuestos a interconectarse, para posteriormente introducir los perfiles de salida respectivos a cada uno de estos bloques. En la Figura 3-2 se puede apreciar el equivalente de la instalación eléctrica del edificio Sabio Caldas en DPF, la cual está compuesta por diferentes elementos como son barras (Rojo), líneas de transmisión (Verde) y transformadores (Azul).

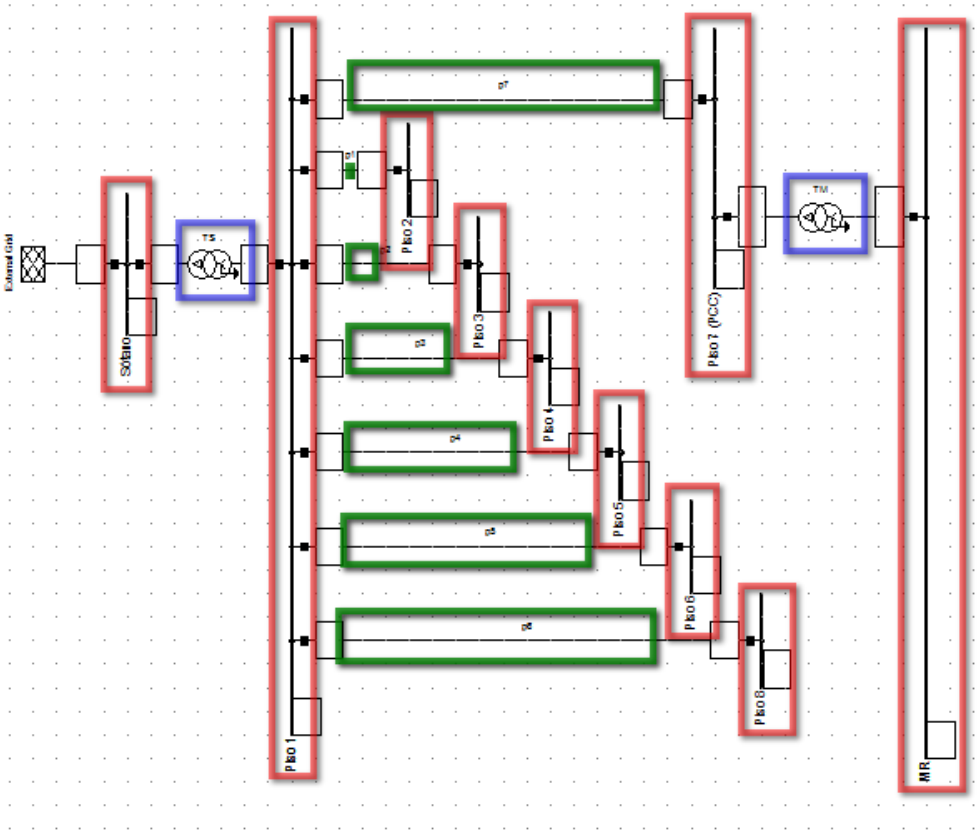



*Figura 3-2 Estructura inicial microrred DPF*

Las barras corresponden a los puntos de interconexión entre los diferentes componentes. El diseño contiene 12 de ellos, de los cuales el más importante es el nodo MR ya que contiene los SEP. Así pues, en esta estructura se implementó el nodo MR para representar al LIFAE e interconectar todos los SEP en este barraje dentro de DPF. Se observa el nodo Microrred (MR) en la Figura 3-3.

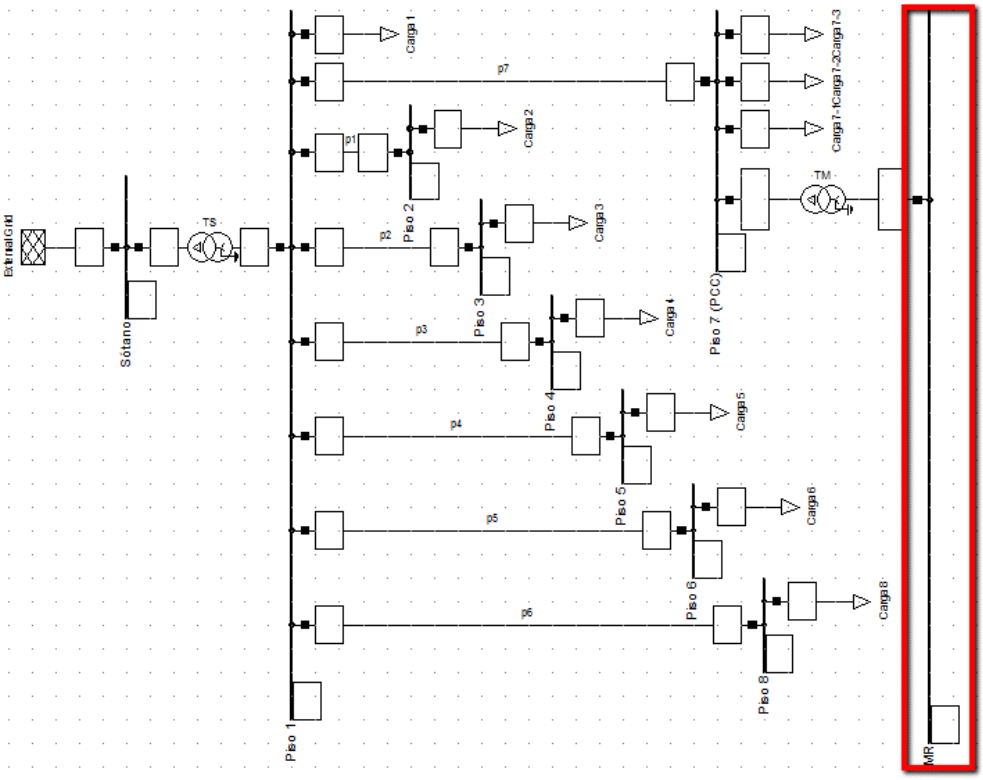



*Figura 3-3 Nodo MR en DPF*

En el nodo MR se implementaron dos bloques de generación de energía y tres bloques de carga, según la revisión generada en la primera actividad. No obstante este nodo está abierto a recibir más bloques según avance la ejecución en el futuro. Adicionalmente se presenta un equivalente de red (Amarillo) para cada piso del edificio, el cual representa las cargas dispuestas en cada piso del mismo y que son alimentadas por el transformador principal que entrega la energía para toda la estructura (ver Figura 3-4).

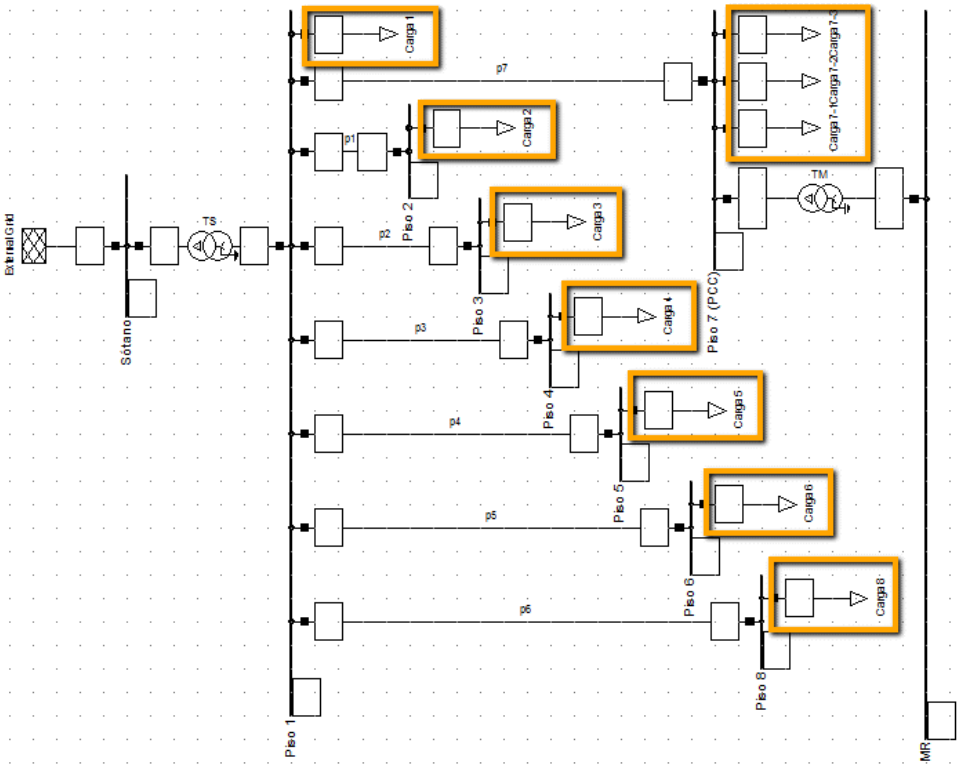



*Figura 3-4 Estructura inicial microrred DPF con equivalentes de red*

## 3.3 COMPOSICIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA MICRORRED

### 3.3.1 Barrajes

Como se mencionó anteriormente los barrajes corresponden a los puntos de interconexión entre los diferentes componentes. De lo 12 en total, el más importante es el nodo MR. En cuanto a los demás, se clasificaron en dos subgrupos que son los barrajes del nodo MR hacia la red externa, los cuales representan cada piso del edificio y contienen un equivalente de red y los barrajes del nodo MR hacia los elementos internos de la misma, los cuales interconectan los SEP.

### 3.3.2 Líneas de transmisión

Estas líneas unieron los barrajes de la estructura de la microrred. Tienen parámetros que asemejan el comportamiento del cableado del edificio Sabio Caldas y además unieron el barraje principal MR con los demás barrajes de cada SEP.

### 3.3.3 Transformadores

Se cuenta con dos transformadores, uno que conectó el edificio con la red externa

y otro que estuvo dispuesto única y exclusivamente para alimentar la microrred, de este último se tienen los datos de placa (ver Figura 3-5).




*Figura 3-5 Placa transformador microrred*

### 3.3.4 Generadores

La microrred cuenta con varias clases de generadores, de acuerdo con la revisión generada en la primera fase del proyecto, los SEP de generación que estaban listos para su integración dentro de la simulación corresponden a los siguientes:

Un generador fotovoltaico implementado por el grupo de investigación LIFAE dentro de las instalaciones de la Universidad Distrital FJDC, el cual fue modelado previamente dentro de DPF con el fin de obtener todos sus parámetros de funcionamiento [30].

Luego se encontró un banco de baterías conformado por 4 baterías de 12 V en serie de valor de capacidad de 200 Ah a 48 V. Se realizaron unas pruebas en dichas baterías las cuales arrojaron un perfil de salida que permitió modelar el banco de baterías en DPF [31].

### 3.3.5 Cargas

Aunque dentro de la microrred se tienen contempladas diferentes cargas, las que estaban disponibles al momento de la revisión son:

Un par de motores eléctricos, uno de eficiencia estándar y el otro de eficiencia premium, los cuales fueron modelados previamente en una investigación de distorsiones armónica realizada en la Universidad Distrital FJDC. Estos motores poseen perfiles de salida con valores de velocidad y de carga detallados, que permitieron hacer su modelamiento dentro de la estructura de bloques de la simulación de manera rápida para luego ser incorporados a la estructura de la microrred en DPF [32].

Luego se encuentra un sistema de gestión de excedentes implementado por el grupo de investigación LIFAE dentro de las instalaciones de la Universidad Distrital FJDC [33], el cual fue mejorado por parte de este proyecto como adición a sus objetivos para obtener un mejor perfil de salida más completo y detallado al implementar un inversor y un multigate. Este último elemento es una unidad de comunicación y es la conexión entre el panel fotovoltaico y el inversor. Además, está equipado con un interruptor para la monitorización de la red, que hace más eficiente y fiable el sistema [34].

Finalmente se tiene un sistema de emulación de carga residencial diseñado para obtener perfiles de salida de consumo de potencia, de acuerdo a parámetros programables como hora del día y carga requerida en un instante de tiempo, este sistema aporta a la simulación cargas que pueden ser programables de acuerdo al escenario que se quiera plantear dentro de los futuros casos estudio [35].

## 3.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA MICRORRED PROPUESTA

Cada elemento que compone la estructura de la microrred dentro de DPF se modeló con los módulos que ofrece el programa. En el caso de los SEP, estos están representados con bloques que a su vez se conformaron con módulos incluidos en DPF.

### 3.4.1 Implementación de la estructura básica de la microrred

En este punto aún no se tienen en cuenta las cargas y generadores puesto que estos son objeto de estudio e implementación del capítulo 4 y poseen sus propias estructuras de bloques.

Para iniciar la implementación de la estructura en la simulación en DPF se creó un nuevo proyecto dentro de este, el cual se nombró Microrred1 y tiene extensión .PFD,

accediendo a este por medio del menú principal de DPF en la casilla Archivo (File) (ver Figura 3-6).

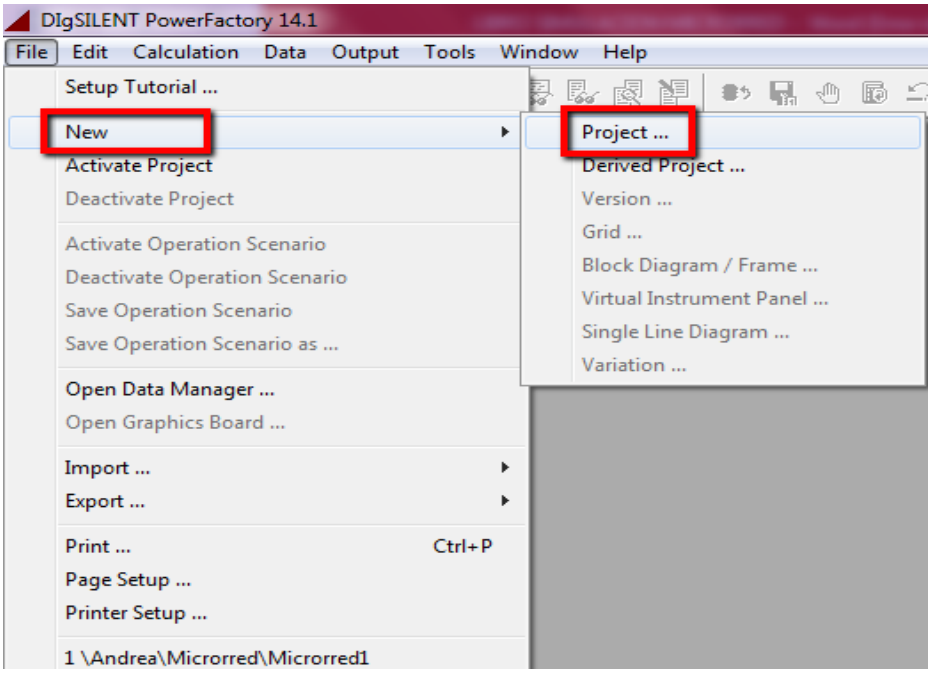



*Figura 3-6 Creación nuevo proyecto en DPF*

En seguida apareció una ventana de confirmación en la cual se nombró el proyecto y se pudo elegir su ubicación dentro de las librerias del DPF (ver Figura 3-7).

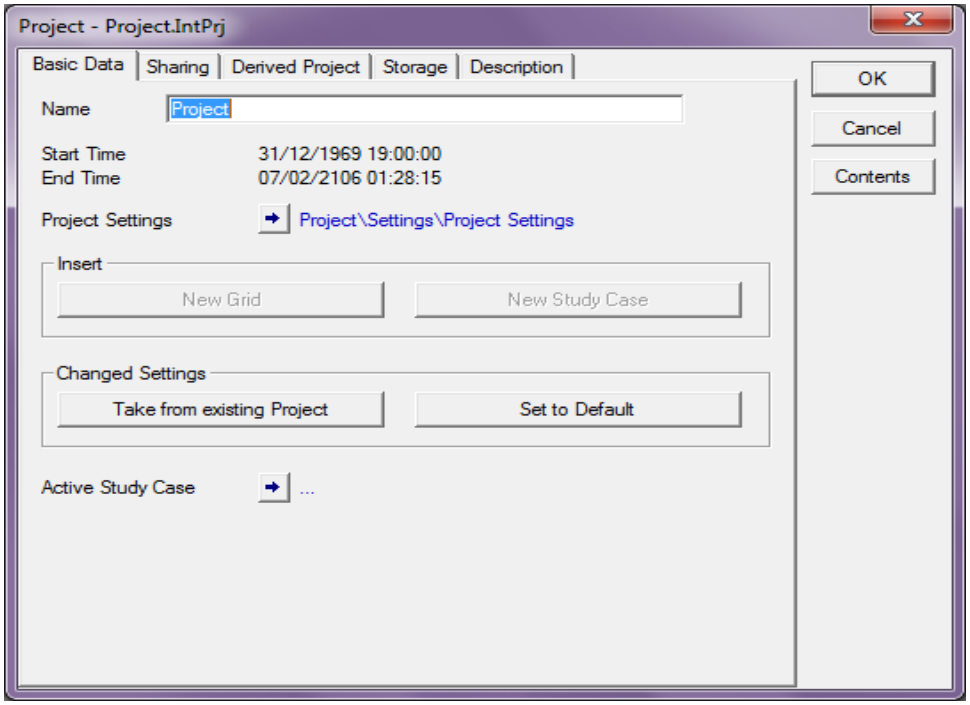



*Figura 3-7 Ventana de confirmación del nombre del proyecto*

Luego de crear el proyecto, este ofreció un espacio de trabajo (Workspace) en cual se pudieron implementar todos los elementos necesarios en la estructura a simular (Network Model) (ver Figura 3-8).

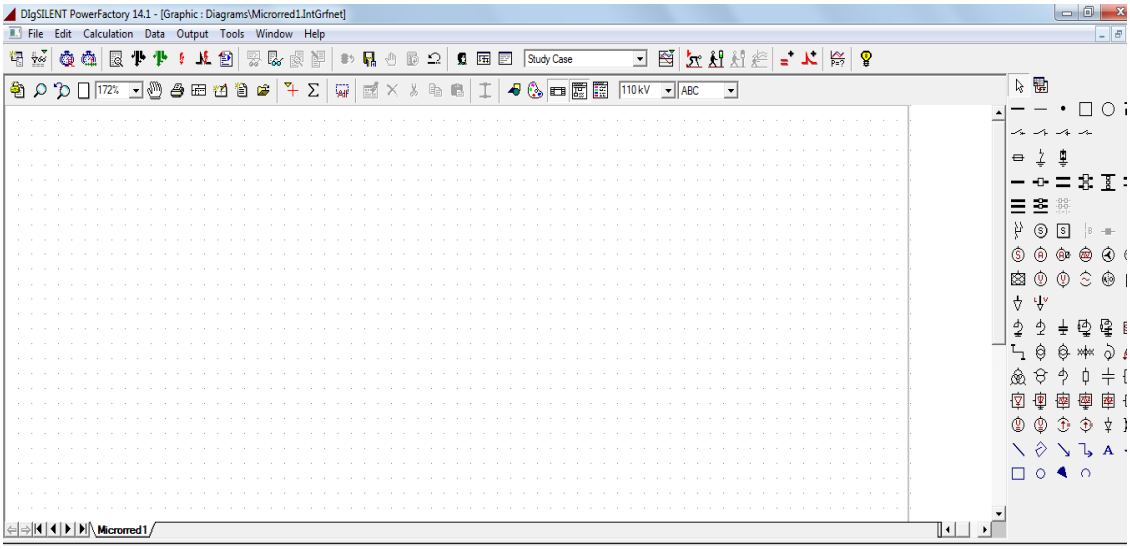



*Figura 3-8 Workspace DPF*

Finalmente, se obtuvo el proyecto y su respectiva barra de herramientas para empezar a interconectar los elementos intrínsecos que componen la microrred dentro del espacio de trabajo (Workspace) en DPF.

### 3.4.2 Implementación de componentes en la estructura

Cada componente de esta estructura fue parametrizado de acuerdo a los valores iniciales que requiere el bloque y que necesitó intrínsecamente para su funcionamiento. De acuerdo a esto, hay parámetros del bloque que se tomaron por defecto en el simulador, teniendo en cuenta que no afectaran la fiabilidad de la información suministrada en los perfiles de salida.

Sin embargo, los bloques que representan los SEP de generación y cargas están sujetos a las variables de salida que se implementaron en DPL. Lo anterior quiere decir que solo los componentes como barras, líneas y transformadores se inicializaron con algunos parámetros por defecto del simulador y desde los módulos dispuestos para ellos, y no en DPL como los bloques de carga y generación.

#### 3.4.2.1 Barrajes

Para implementar el barraje, se utilizó el elemento Terminal (ElmTerm) de las herramientas de DPF, seleccionándolo y posicionándolo en el Área de trabajo (Workspace). Una vez posicionado el elemento, apareció su gráfica con el cuadro de salida correspondiente (ver Figura 3-9).

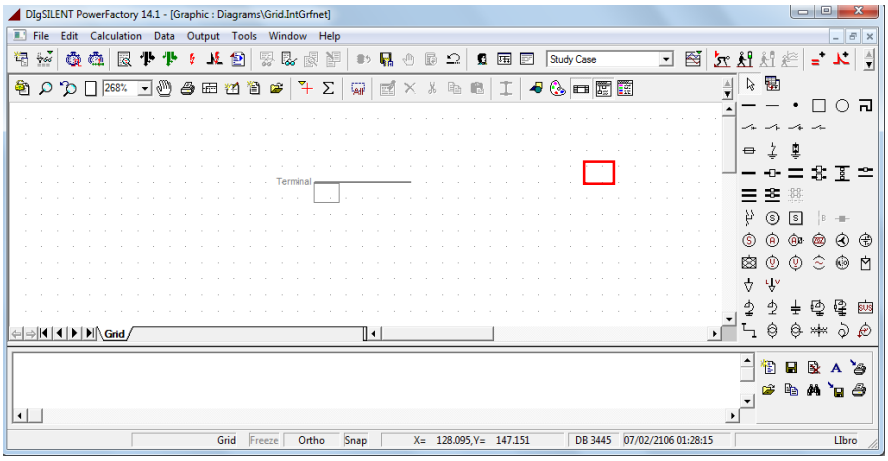



*Figura 3-9 Creación barraje en DPF*

Los barrajes se debieron parametrizar con el valor de tensión que correspondía y el tipo de corriente al que estuviesen sometidos (AC/DC). Para esto simplemente se ingresó al cuadro de opciones del elemento (ver Figura 3-10).

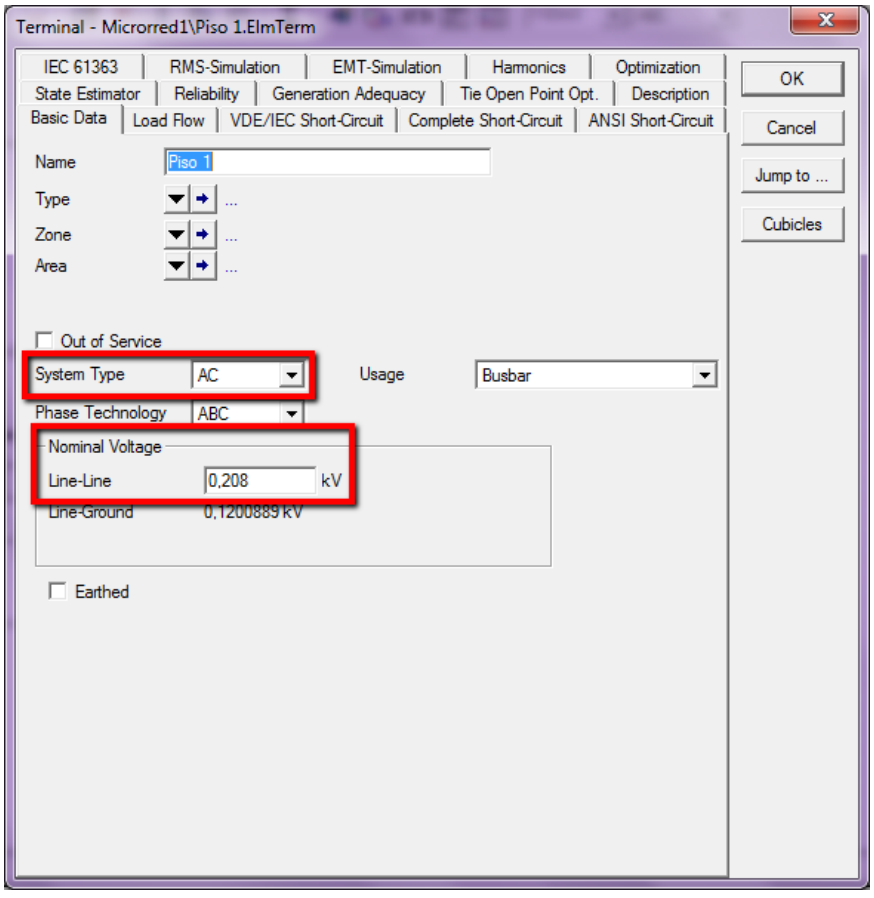



*Figura 3-10 Parametrización barraje en DPF*

### 3.4.2.2 Líneas de transmisión

Para implementar una línea o un cable en la simulación, fue necesario tener dos barras que conectar. De lo contrario no se hubiese permitido la ubicación del cable en la simulación (ver Figura 3-11).

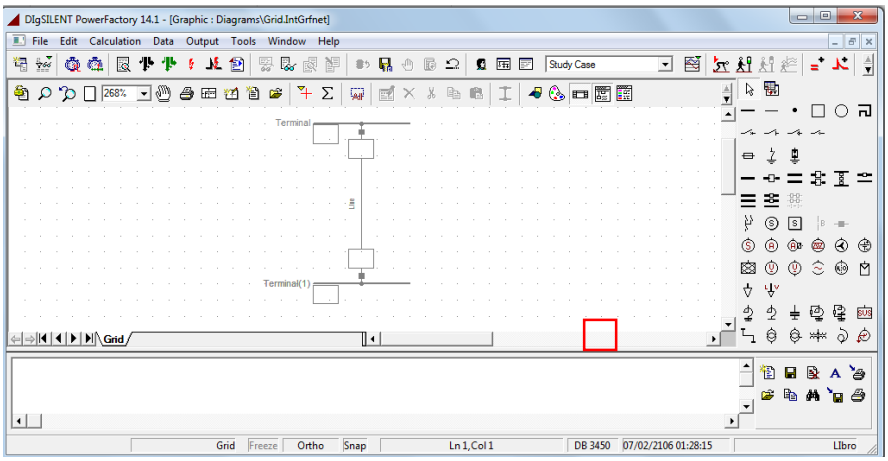



*Figura 3-11 Creación líneas de transmisión en DPF*

Los parámetros necesarios para el funcionamiento de las líneas de transmisión son más detallados que los anteriores módulos. Inicialmente se requirió la longitud del cable o de la línea y su modelo (distribuido, PI) (ver Figura 3-12).

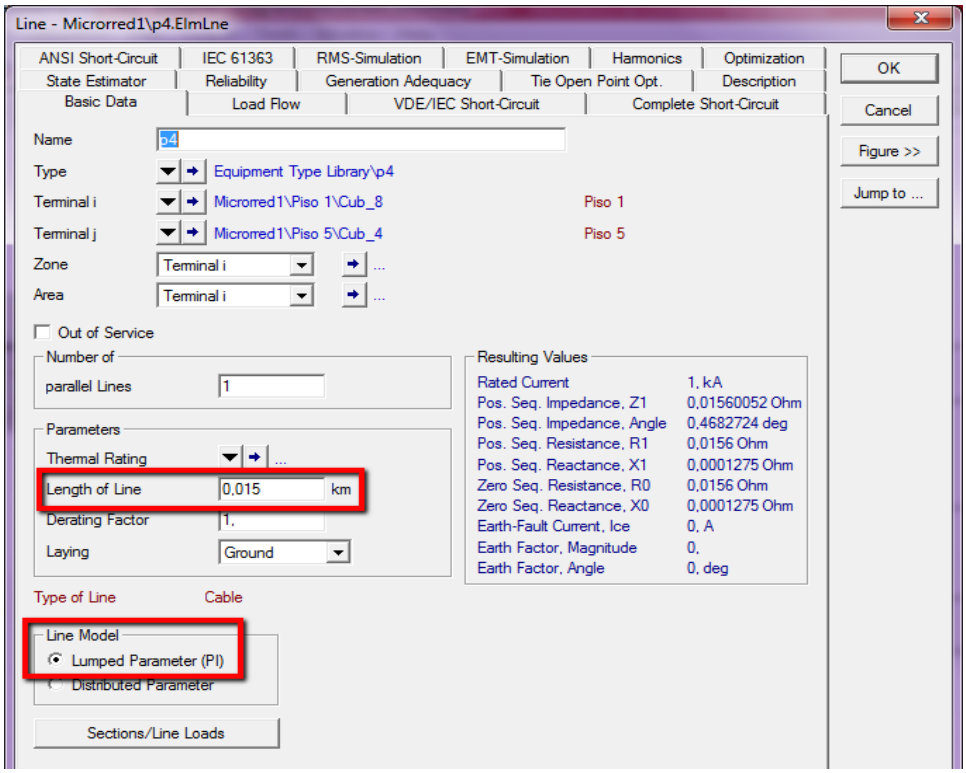



*Figura 3-12 Parametrización líneas de transmisión DPF - 1*

Adicionalmente, se requirieron datos internos del módulo como son los valores de tensión, frecuencia a los que estaba sometida el cable (DPF también diferencia si es cable o línea en estos parámetros), y por último sus valores de resistencia y reactancia (ver Figura 3-13).

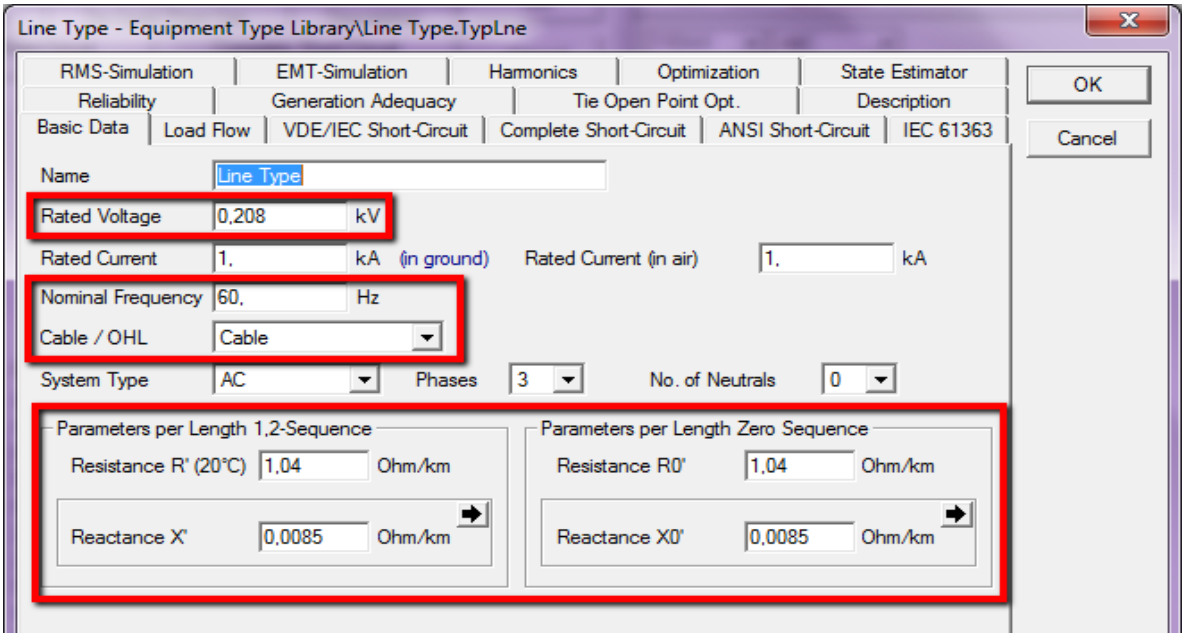



*Figura 3-13 Parametrización líneas de transmisión DPF - 2*

Finalmente, el bloque requirió para efectos de flujo de carga los valores de temperatura, tipo de material del cable y sus valores de susceptancia.

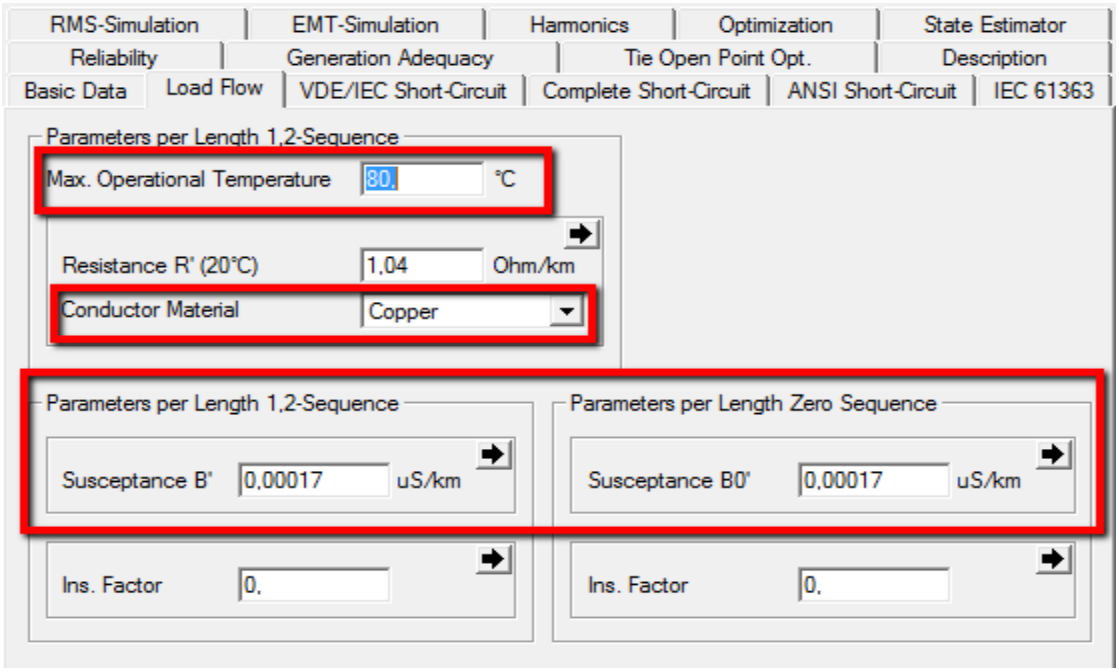



*Figura 3-14 Parametrización líneas de transmisión DPF - 3*

### 3.4.2.3 Transformadores

Los transformadores también requirieron ser interconectados entre dos barras. Además, fue importante escoger el tipo de transformador correcto, ya que DPF ofrece varios tipos. Esto garantizó mayor fiabilidad en los resultados de la simulación.

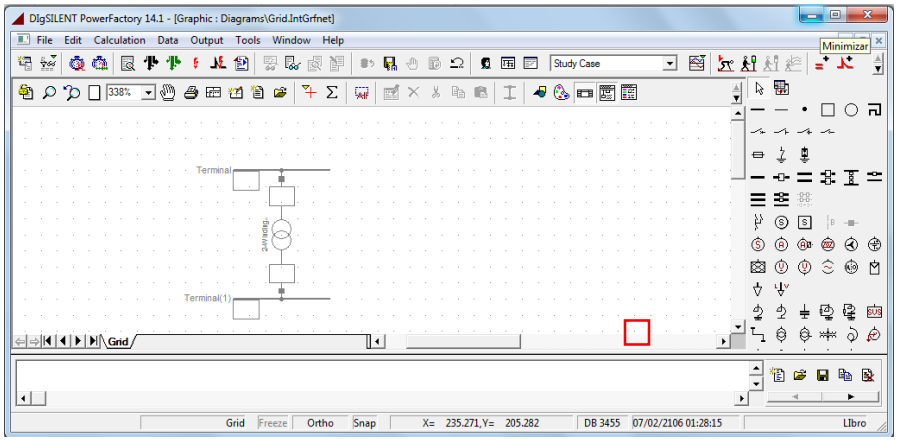



*Figura 3-15 Creación transformadores en DPF*

Cada transformador requirió los valores de alta y de baja tensión a los que estaba conectado, su potencia y frecuencia nominal como parámetros internos del mismo. También se requirió especificar el grupo de conexión (Vector Group), que para este caso es DYN5 (ver Figura 3-16).

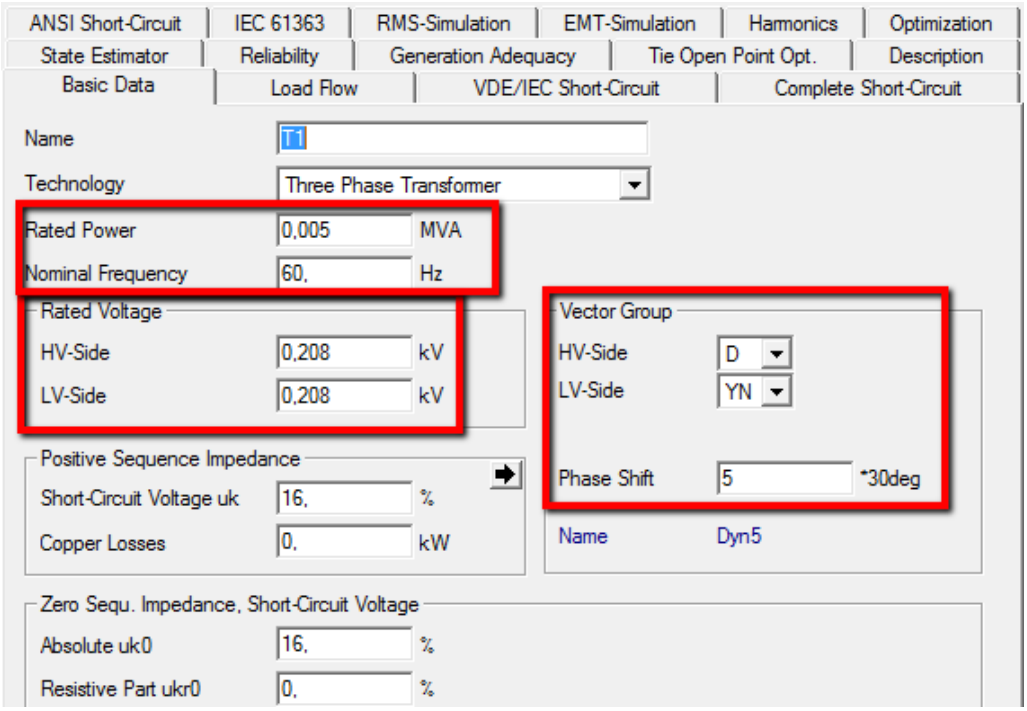



*Figura 3-16 Parametrización transformador DPF*

# 4 ESTRUCTURA DE BLOQUES DE ENTRADA DE DATOS

## 4.1 ADQUISICIÓN DE VARIABLES DE SALIDA DE CADA SEP

Luego de tener la estructura básica de la microrred, se procede a conseguir las variables de salida de cada SEP. Para la consecución de estas hubo que recurrir a cada investigador y a cada estudiante involucrado en el desarrollo de cada uno de éstos, puesto que ellos eran los únicos que disponían de esta información de forma detallada y precisa.

Para obtener algunas variables de salida se requirió de trabajos adicionales a los inicialmente presupuestados, puesto que algunos de los SEP que estaban listos para integrarse a la microrred aún no disponían de estas variables de salida o estas no estaban en formatos de manejo cómodo y accesible.

En el caso de la carga del sistema de gestión de excedentes y la carga de usuario residencial, se tuvieron que realizar pruebas por parte de este proyecto adicionales a las desarrolladas por los realizadores de los proyectos originales, para obtener registros y perfiles de salida más detallados y precisos. A continuación se relacionan la descripción y las fuentes de los perfiles de salida encontrados:

### 4.1.1 Generador fotovoltaico

Las variables de salida del generador fotovoltaico se obtuvieron directamente implementadas en DPF, lo que facilitó bastante el proceso, y además permitió realizar las primeras pruebas a este bloque en la estructura previamente diseñada. Este perfil de salida fue suministrado por la tesis doctoral "*Metodología para el análisis técnico de la masificación de sistemas fotovoltaicos como opción de generación distribuida en redes de baja tensión*" [30]



*Figura 4-1 Generador fotovoltaico [36]*

### 4.1.2 Banco de baterías

Está compuesto por 4 baterías (ver Figura 4-2) que se implementarán en un banco de 200 Ah a 48V. Las variables de salida de este banco de baterías fueron suministradas por el proyecto de grado "*Metodología para incrementar los ciclos de uso de un banco de baterías de Plomo-ácido con diferentes tipos de arreglos en paralelo*" y se modelaron en el respectivo bloque de la simulación. [31]

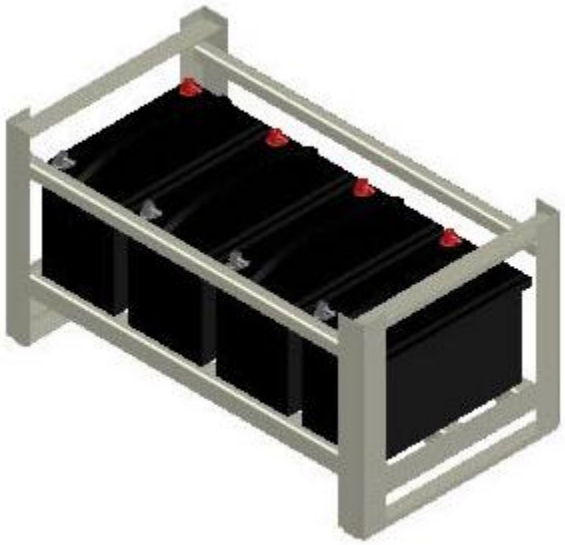


*Figura 4-2 Banco de baterías [37]*

### 4.1.3 Motores

Para la adquisición de los perfiles de salida de los motores, uno estándar (ver Figura 4-3) y otro premium (ver Figura 4-4), se contactó a los investigadores desarrolladores del proyecto "*Distorsión armónica generada por accionamientos eléctricos de control de velocidad basados en motores de inducción de propósito general y eficiencia Premium*" [32], los cuales hicieron entrega de los mismos en archivos de Excel. Las variables de salida del bloque de carga motores se adquirieron de manera eficiente, con lo cual se pudo modelar rápidamente este bloque dentro de la simulación y analizar así mismo su integración a la misma.



*Figura 4-3 Motor estándar [32]*



*Figura 4-4 Motor Premium [32]*

### 4.1.4 Sistema de gestión de excedentes

El sistema de gestión de excedentes del LIFAE (ver Figura 4-5) es una carga de la microrred que consiste en un sistema compuesto por varios componentes eléctricos que permiten obtener energía eléctrica a partir del panel fotovoltaico y alimentar ciertas cargas dispuestas en dicho sistema y adicionalmente si la energía es suficiente, entregar excedentes a la red por medio de una interconexión a la misma que permite a este sistema funcionar de manera autónoma o interconectada.

Esta carga se había desmantelado parcialmente ya que uno de sus inversores debía ser reemplazado. Debido a esto, primero se llevó a cabo este reemplazo para luego obtener las nuevas variables de salida del sistema, y así obtener el perfil de salida. Este sistema fue desarrollado en el proyecto *"Diseño e implementación de un sistema de gestión de excedentes de la energía generada por un sistema de generación distribuida, caso de estudio laboratorio de sistemas fotovoltaicos interconectados de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas"* [33]




*Figura 4-5 Sistema de gestión de excedentes [33]*

### 4.1.5 Carga tipo usuario residencial

En el LIFAE se encuentra un prototipo de emulación de cargas (ver Figura 4-6) que permite observar de manera práctica la gestión de demanda de un usuario que participa de forma activa en la red. Principalmente, el prototipo funciona como una carga pasiva dentro de la simulación de la microrred y sus variables de salida fueron recopiladas para tal fin, siendo los desarrolladores del proyecto "*Emulador a pequeña escala de un sistema fotovoltaico conectado a la red, bajo la aplicación de generación distribuida para un usuario tipo residencial"* los que suministraron esa información [35]

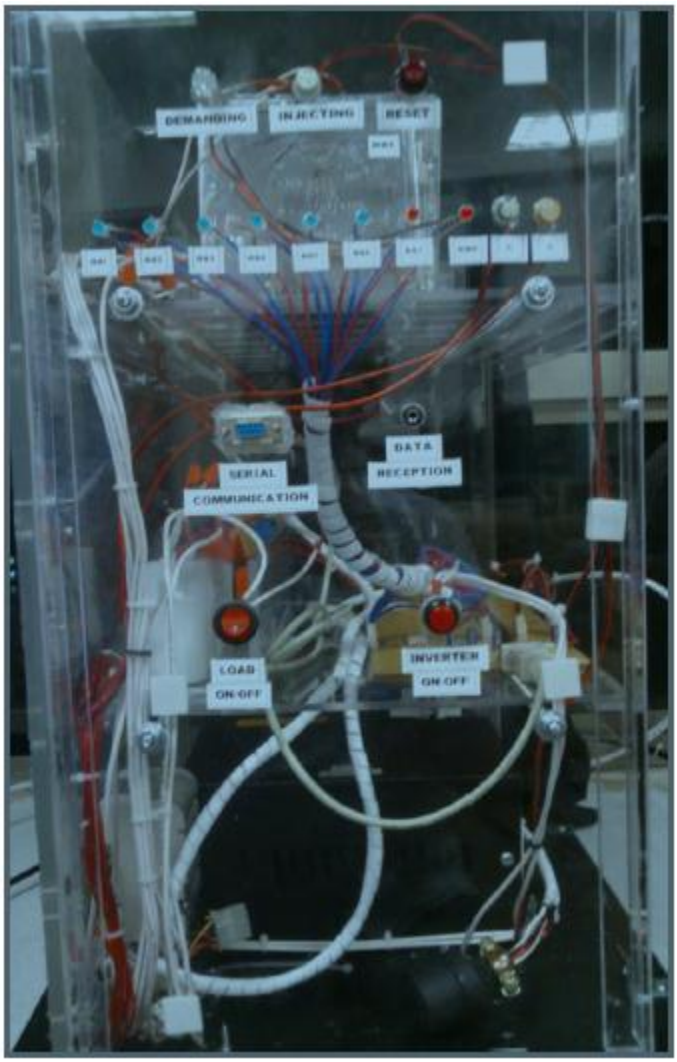



*Figura 4-6 Carga tipo usuario residencial [35]*

## 4.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE LOS BLOQUES

A excepción del generador fotovoltaico, todos los SEP restantes obtuvieron sus bloques en la simulación a través de la implementación de sus respectivas variables de salida en DPL. Los SEP de generación de energía (Morado) se modelaron con bloques conformados por módulos de DPF. Ver Figura 4-7.

De la misma manera, las cargas son modeladas con un módulo de carga incluido en DPF en el cual tienen que empezar a programarse las variables y para lo cual se estudian los formatos en que vienen contenidas (ver numeral 4.2.1).

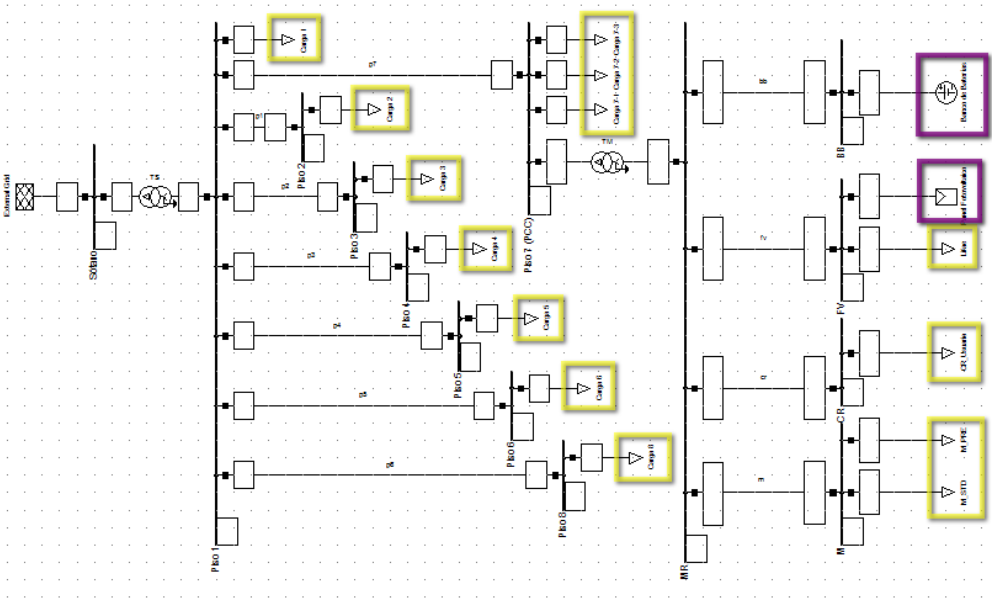


*Figura 4-7 Estructura de bloques en DPF*

### 4.2.1 Vías de entrada de datos

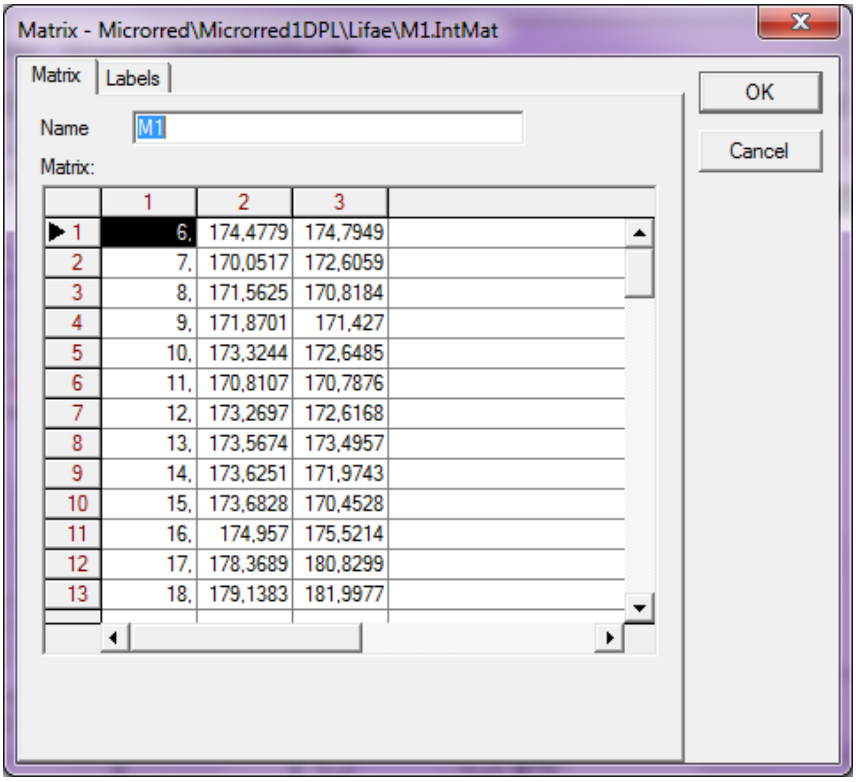
De acuerdo con los perfiles de salida obtenidos, se observaron datos de acuerdo a diferentes pruebas ejecutadas por los realizadores de cada proyecto. Se tomó en cuenta esta clasificación de los datos para programar la integración de estos a los bloques concebidos para tal fin.

Dada la estructuración de los datos, se implementó la integración en DPL. Esta suite permite al usuario utilizar matrices para integrar las variables de salida a las rutinas de programación, las cuales a través de código de programación en C permiten enlazar estas variables a los módulos implementados en la estructura de la microrred, conformando los bloques que asemejan el comportamiento de cada SEP.

#### 4.2.1.1 Matrices

Los datos se organizaron de acuerdo a los parámetros propios de cada SEP. Estos tienden a estar organizados en tablas que se pueden adaptar a matrices. DPF

dispone mejor de los datos de esta manera, ya que los busca dentro de su propia base de datos para traerlos a la simulación una vez hayan sido importados a esta (ver Figura 4-8).




| | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| ▶ 1 | 6, | 174,4779 | 174,7949 |
| 2 | 7, | 170,0517 | 172,6059 |
| 3 | 8, | 171,5625 | 170,8184 |
| 4 | 9, | 171,8701 | 171,427 |
| 5 | 10, | 173,3244 | 172,6485 |
| 6 | 11, | 170,8107 | 170,7876 |
| 7 | 12, | 173,2697 | 172,6168 |
| 8 | 13, | 173,5674 | 173,4957 |
| 9 | 14, | 173,6251 | 171,9743 |
| 10 | 15, | 173,6828 | 170,4528 |
| 11 | 16, | 174,957 | 175,5214 |
| 12 | 17, | 178,3689 | 180,8299 |
| 13 | 18, | 179,1383 | 181,9977 |

*Figura 4-8 Ejemplo de matriz en DPF*

### 4.2.2 Bloque fotovoltaico

Teniendo en cuenta que el bloque fotovoltaico ya estaba implementado en DPF, lo único que hubo que ejecutarse fue una importación del archivo .DZ en que estaba contenido este bloque con su respectiva programación y emulación del generador fotovoltaico real [30]. Adicionalmente, se validaron los datos correspondientes a los paneles fotovoltaicos de la microrred, (ver Figura 4-9) ya que el proyecto había sido desarrollado con otros paneles fotovoltaicos.

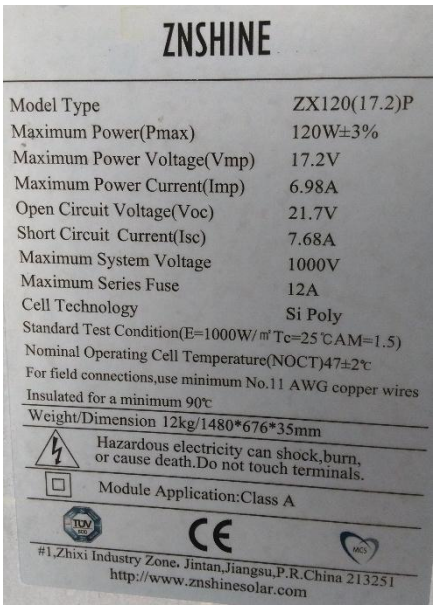



*Figura 4-9 Placa panel fotovoltaico UDFJDC*

El bloque del generador fotovoltaico está conformado por una línea de transmisión (Ver numeral 3.4.2.2.), un barraje (Ver numeral 3.4.2.1.), una carga que es el sistema de gestión de excedentes y el generador fotovoltaico (Photovoltaic), (estas dos últimas son proporcionadas por módulos de DPF de los cuales se dará una descripción más detallada en el numera 4.3) como se puede ver en la Figura 4-10.

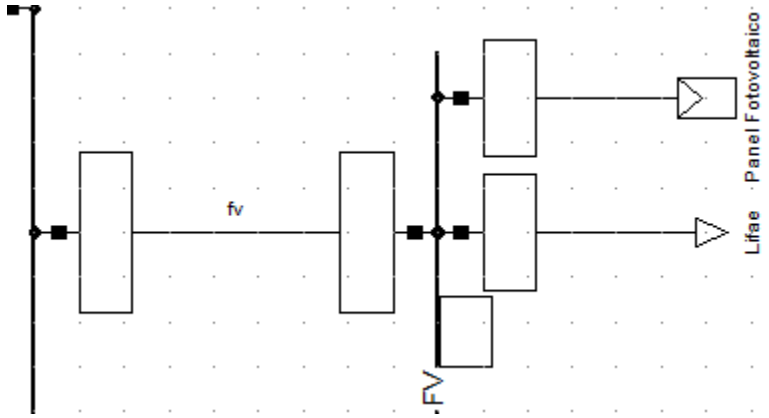



*Figura 4-10 Estructura fotovoltaica en DPF*

### 4.2.3 Bloque banco de baterías

Para este bloque se intentó usar un conversor AC/DC que contiene DPF. Aunque está diseñado para otras aplicaciones diferentes a una microrred, resultaba más fiable utilizar este convertidor junto a una fuente de tensión DC para emular el banco de baterías. No obstante, estos convertidores presentaron problemas para su integración a la simulación por corresponder a aplicaciones de alta potencia. Adicionalmente, se pudo encontrar que gracias a la programación intrínseca del

archivo DPL del generador fotovoltaico, los inversores implementados en este se comportarían de la misma manera para el banco de baterías. Esto se debe a que el modelo del generador estático (ElmGenStat) está diseñado para comportarse como cualquier tipo de generador no rotativo como es el caso del panel fotovoltaico y del banco de baterías. [38] Este bloque también contiene una línea y una barra aparte del módulo de banco de baterías (Storage) proporcionado por DPF (ver Figura 4-11).

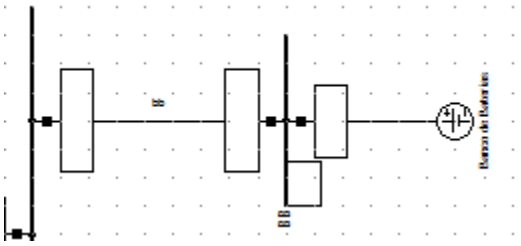


*Figura 4-11 Estructura banco de baterías en DPF*

### 4.2.4 Bloques de cargas

Las cargas fueron modeladas con un módulo proporcionado por DPF. Se incorporó una barra y una línea para ser interconectados al nodo MR (ver Figura 4-12).

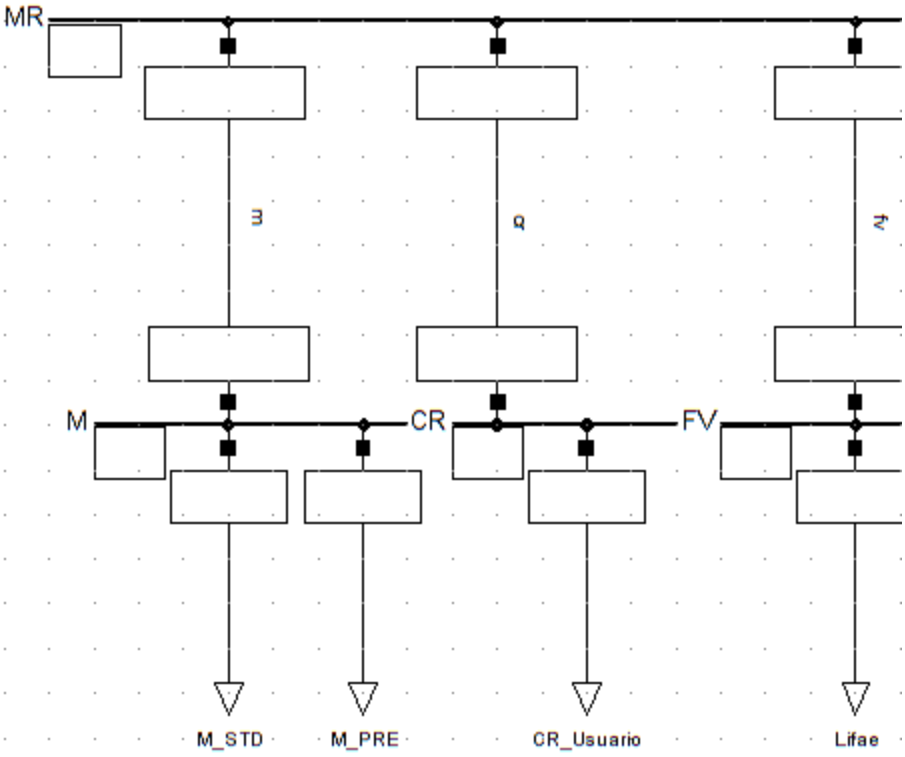



*Figura 4-12 Estructura cargas en DPF*

## 4.3 IMPLEMENTACIÓN DE BLOQUES PARA CADA SEP

La implementación de los bloques de la simulación se desarrolló en el directorio de herramientas y módulos que ofrece la suite de simulación de DPF. Para el caso de la generación de energía se tomaron los módulos de generadores estáticos (ElmGenStat) que ofrece DPF. Las cargas se modelaron a partir de los mismos módulos de cargas (ElmLodLv) que ofrece DPF y se modificaron sus parámetros de acuerdo a sus respectivas variables de salida.

### 4.3.1 Componentes de los bloques

Un bloque está conformado por dos o más elementos. De esta manera se obtuvo una barra, una línea, y el módulo que representa el elemento a modelar específicamente. Así se tienen los siguientes componentes.

#### 4.3.1.1 Generadores

Para la simulación de la microrred se utilizaron dos componentes de generación incluidos dentro de DPF como Generadores Estáticos, los cuales se pueden comportar como generador fotovoltaico y como banco de baterías, ya que estos contienen los parámetros internos que se ajustan a las especificaciones de cada SEP de generación.

##### 4.3.1.1.1 Panel fotovoltaico

El panel fotovoltaico se debió conectar a un barraje de forma AC ya que contiene internamente los convertidores respectivos.

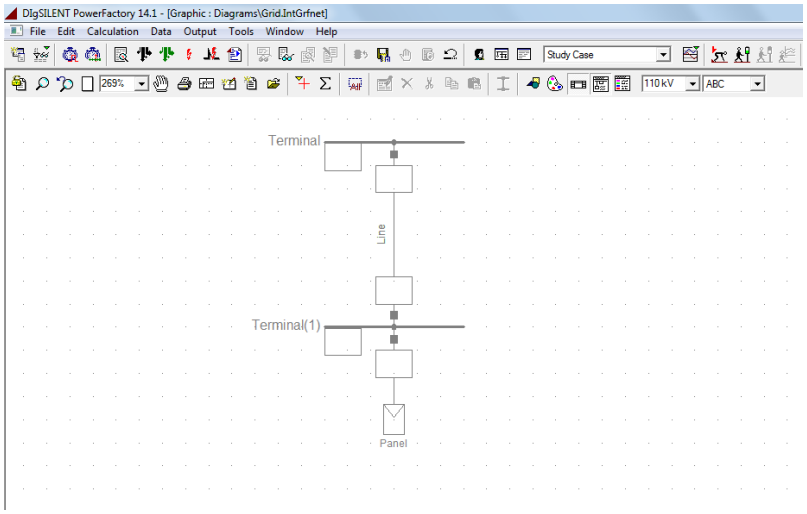



*Figura 4-13 Creación bloque panel fotovoltaico*

El panel fotovoltaico solo requirió el número de paneles que se interconectarán y la potencia que generan con su respectivo factor de potencia (si lo hay) (ver Figura 4-14).

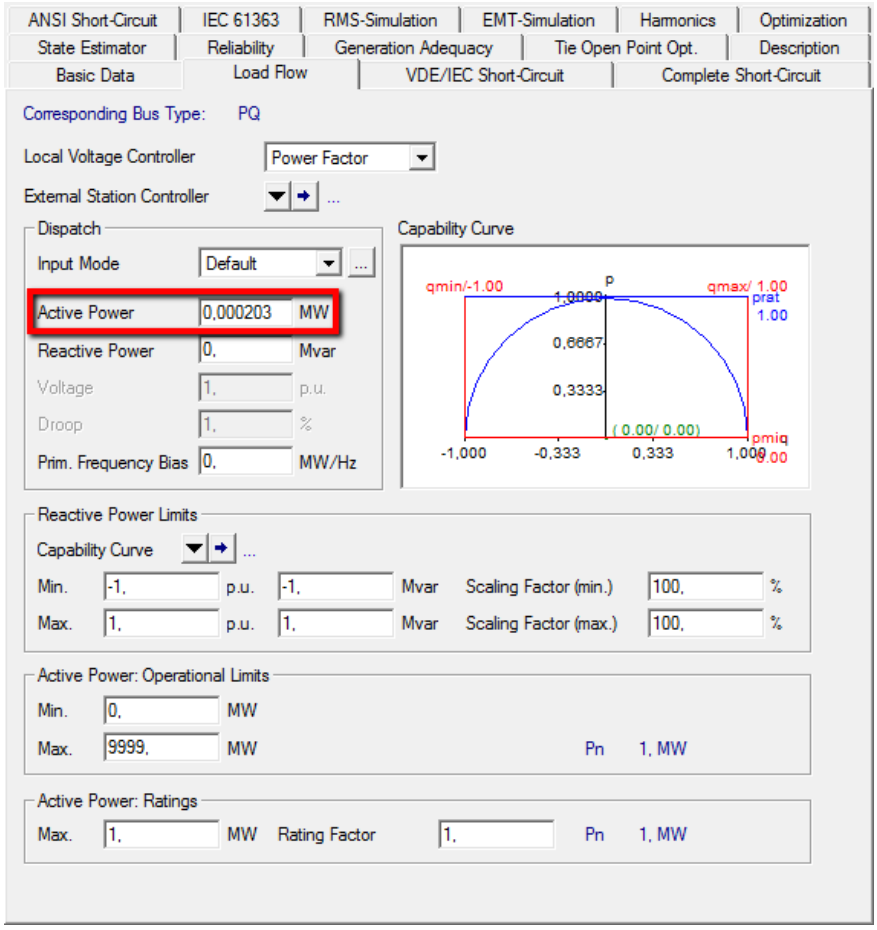



*Figura 4-14 Parametrización bloque panel fotovoltaico*

#### 4.3.1.1.2 Banco de baterías

De la misma manera que el panel fotovoltaico se debió conectar a un barraje, el banco de baterías debía también cumplir esta condición y pudo conectarse de forma AC ya que contiene internamente los convertidores (ver Figura 4-15) [31].

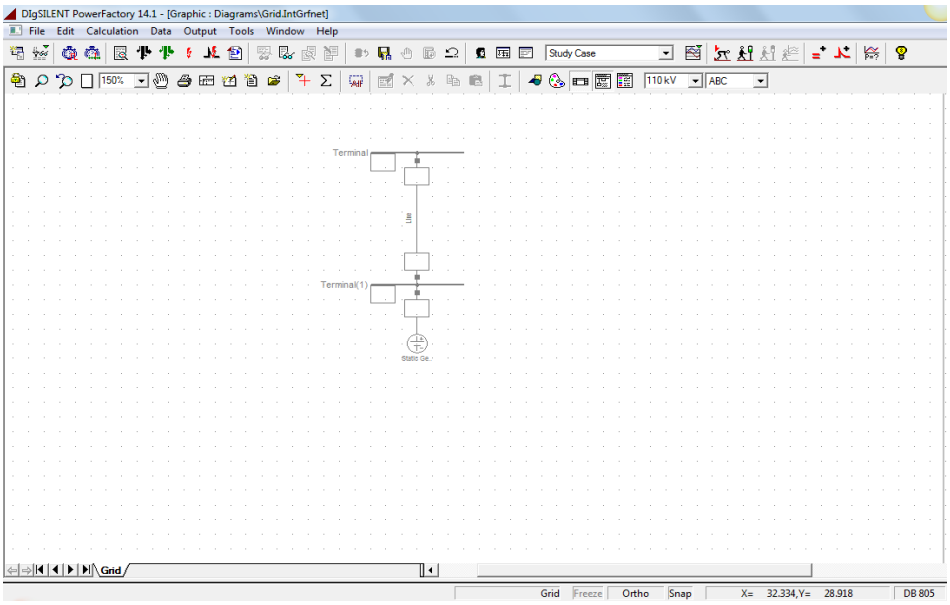



*Figura 4-15 Creación bloque banco de baterías en DPF*

Como se puede apreciar en la Figura 4-15 se obtuvo el bloque del banco de baterías. De acuerdo con el perfil de salida obtenido para el banco de baterías, se introdujo el número de baterías del banco en el campo visto en la Figura 4-16.

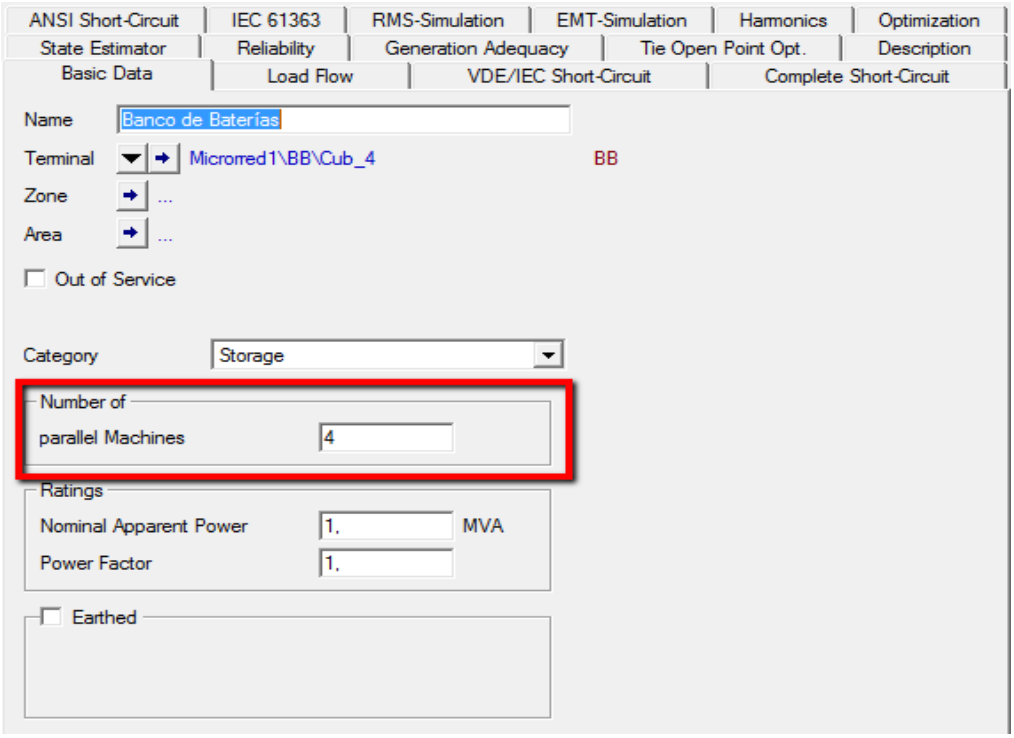



*Figura 4-16 Parametrización bloque baterías DPF – 1*

El módulo además requirió la potencia generada por cada batería, la cual es la variable de salida obtenida en las tablas de datos, como se observa en la Figura 4-17.

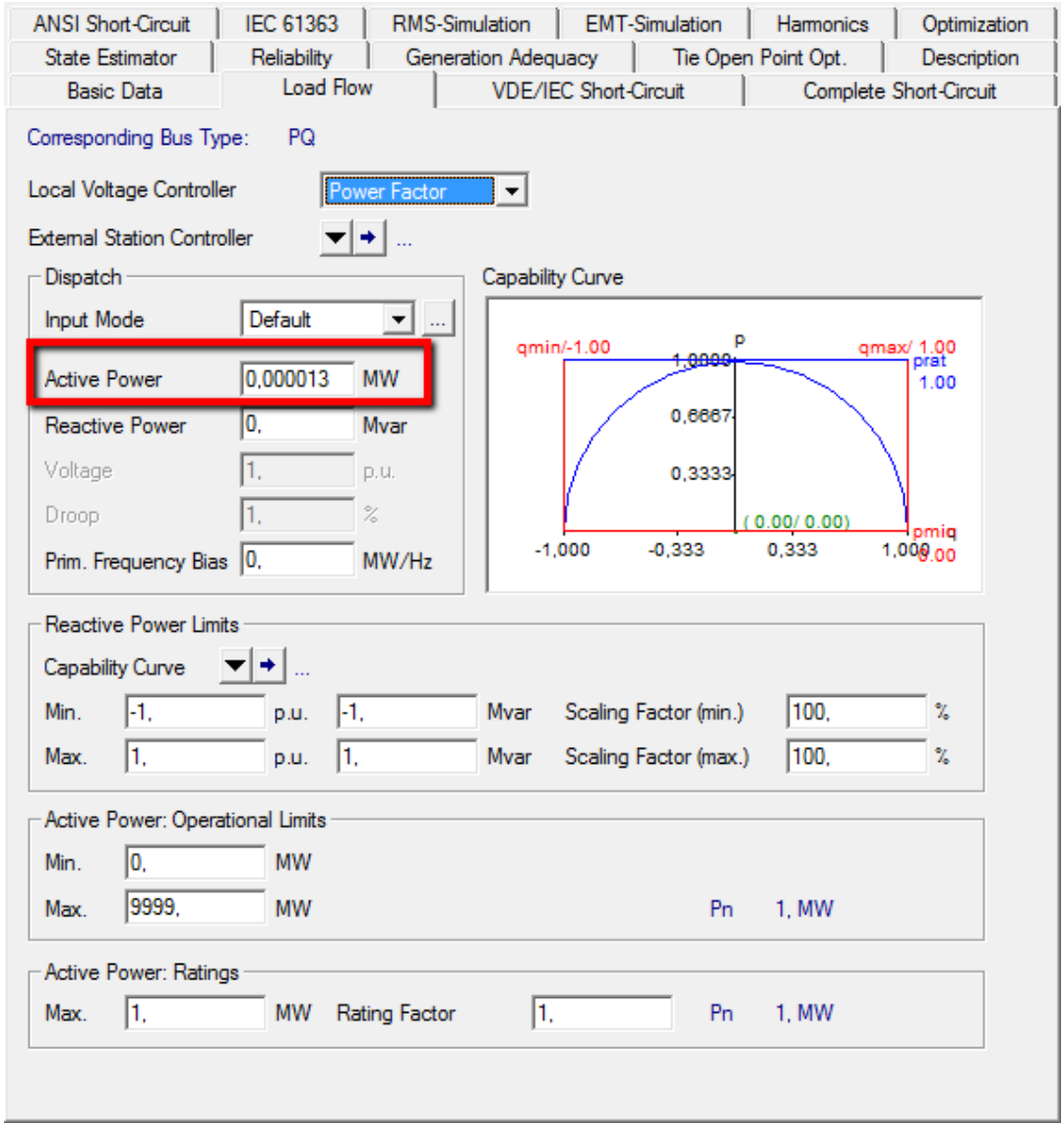



*Figura 4-17 Parametrización bloque baterías DPF – 2*

### 4.3.1.2 Cargas

Hay dos tipos de cargas dentro de DPF, las cargas generales y las cargas de baja tensión. Se escogió la carga de baja tensión para ser utilizada en la simulación, puesto que sus parámetros internos se acomodan mejor a los requerimientos de cada SEP de la microrred. Esta carga requirió estar conectada a un barraje para su implementación (ver Figura 4-18).

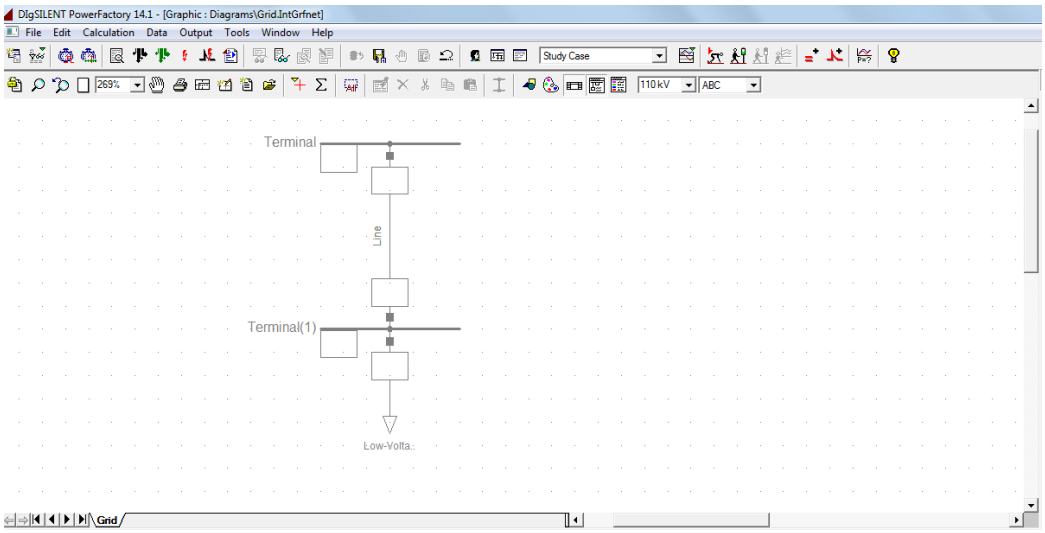



*Figura 4-18 Creación bloque de carga*

Las cargas requirieron solamente un valor de tensión, un valor de potencia activa y su respectivo factor de potencia (ver Figura 4-19).

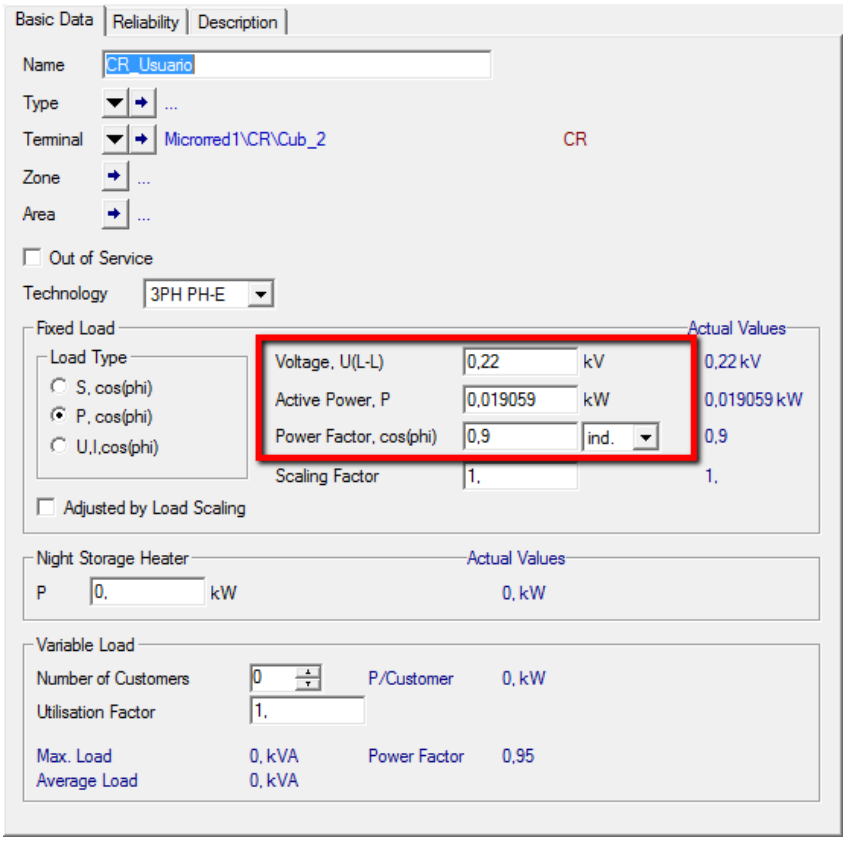



*Figura 4-19 Parametrización bloque carga DPF*

## 4.4 PROGRAMACIÓN Y DESARROLLO DE LOS MÓDULOS

En esta parte del capítulo se describe la programación en DPL realizada para implementar los módulos de generación y carga.

### 4.4.1 Comando DPL

La interfaz básica de programación de los módulos de generación y carga en DPF fue la suite DPL (DIgSILENT Programming Language). Se accedió a DPL por medio del Data Manager, el cual crea un nuevo objeto dentro de la simulación (ver Figura 4-20).

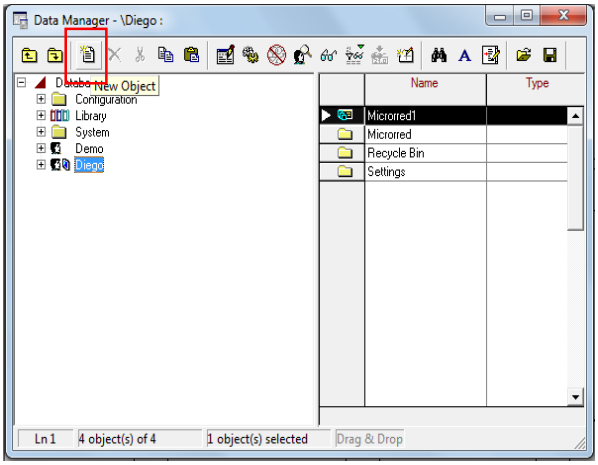



*Figura 4-20 Administrador de archivos DPF (Data Manager)*

En la Figura 4-21 se observa la creación del objeto Comando DPL para el desarrollo del código pertinente y demás.

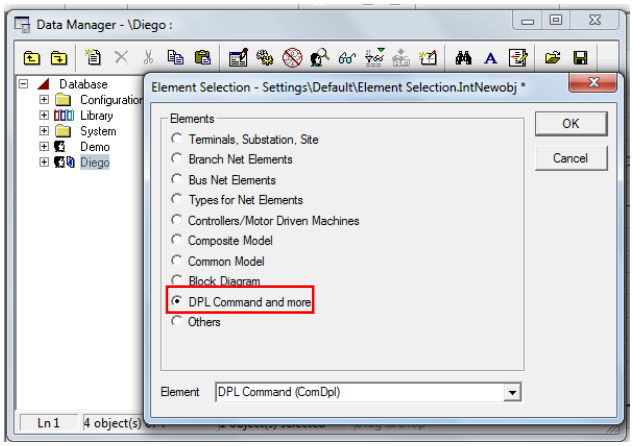



*Figura 4-21 Creación archivo DPL*

En seguida se encuentra la ventana de opciones del comando DPL, en la cual se desarrolló el código, la creación de variables internas del código, la ejecución de rutinas y el enlace con los elementos de la simulación (ver Figura 4-22).

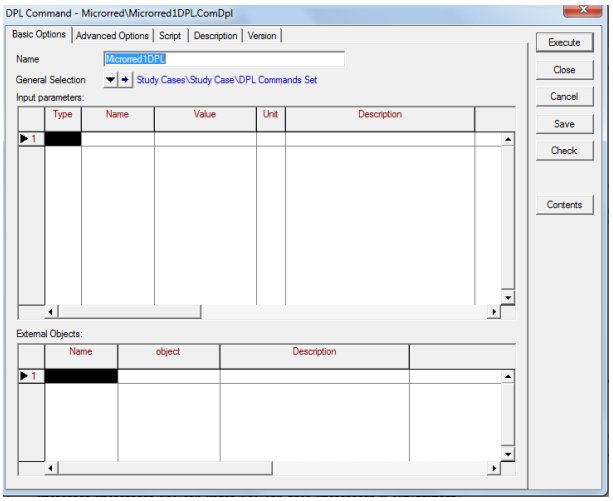



*Figura 4-22 Interfaz archivo DPL*

Luego de tener este archivo dispuesto para el manejo de las variables de salida, se inició con la respectiva programación de cada bloque en otras subrutinas que están dentro de este archivo principal. Este archivo principal es el único ejecutable de la simulación y controla los demás sin modificar sus parámetros internos (ver Figura 4-23).

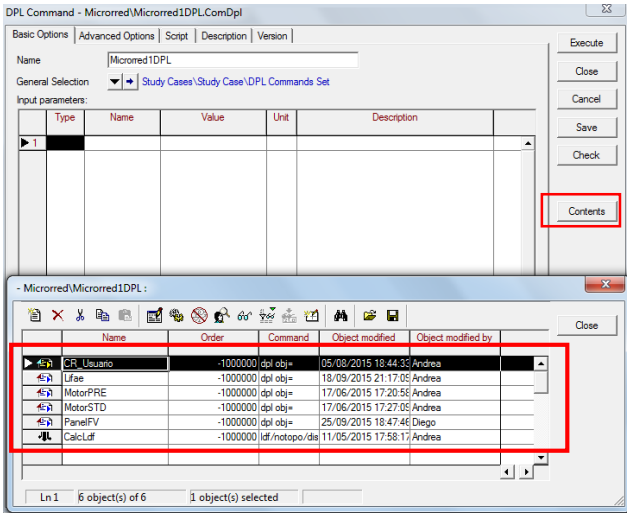



*Figura 4-23 Subrutinas DPL*

Cada subrutina es otro archivo de Comando DPL, en el cual se escribió todo el código de programación necesario para importar e integrar las variables de salida de los formatos en donde se encontraban alojadas a DPF.

### 4.4.2 Objetos del comando DPL

El comando DPL contiene dentro sus propias librerías objetos que permitieron integrar de manera más detallada cualquier variable externa al programa y en diferentes maneras. Es así como se encuentran vectores (IntVec), matrices (IntMat),

formularios (IntForm), filtros (SetFilt) y además varios comandos adicionales que permitieron ejecutar diferentes cálculos intrínsecamente en el mismo código de programación del bloque, como flujos de carga (ComLdf), cálculo de corto circuito (ComShc) y de armónicos (ComHmc), entre otros (ver Figura 4-24).

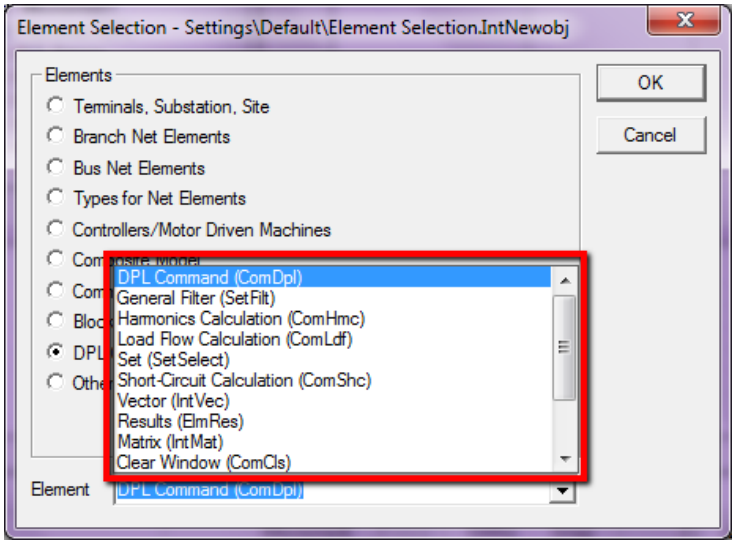



*Figura 4-24 Comandos DPL*

### 4.4.3 Programación de los módulos

El comando DPL ofrece cinco pestañas básicas para su manipulación: opciones básicas, opciones avanzadas, código, descripción y versión (Derechos de Autor). Dentro de las opciones básicas se crearon los parámetros de entrada al código, y adicionalmente se generó la conexión a los objetos externos que el código controla. Para este caso son los SEP previamente modelados en la estructura de la microrred (ver Figura 4-25).

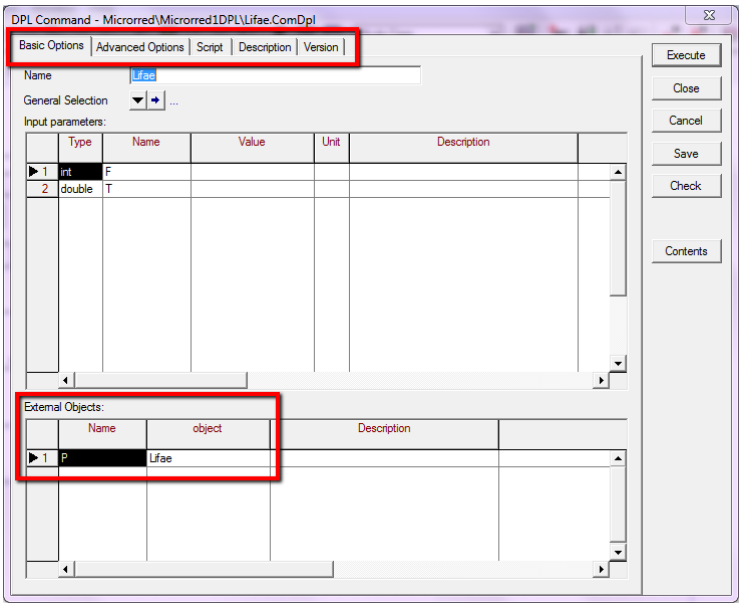



*Figura 4-25 Pestañas básicas archivo DPL*

En seguida se generó el código para cada bloque, el cual fue diseñado y programado con las consideraciones tenidas en la sección 4.2.1 Vías de entrada de datos) y es específico para cada SEP. Así se integraron los datos de cada bloque, y la simulación entró en interacción con ellos para que cada bloque de generación y carga de la estructura sea capaz de representar el comportamiento del SEP previamente modelado.

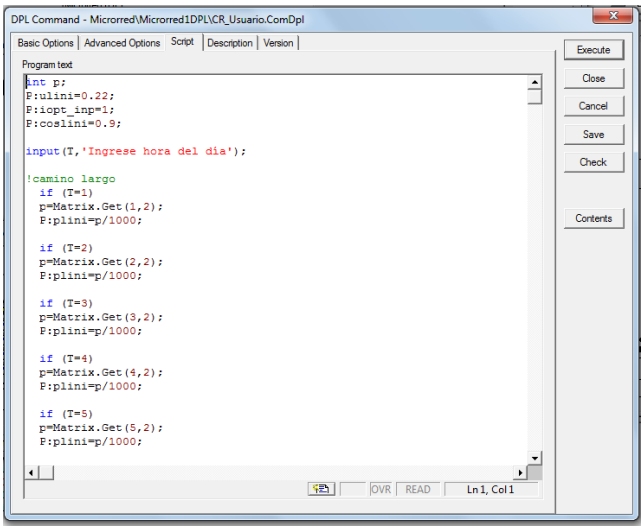



*Figura 4-26 Código DPL (Script)*

Luego de crear los parámetros de entrada y salida, estos se involucraron en el código junto con los objetos necesarios para realizar la importación de los datos y los cálculos adicionales que se requieran.

El código posee restricciones de diferente índole determinadas por el comportamiento de cada SEP. Estas restricciones se manejaron con parámetros de entrada que el usuario podrá definir de acuerdo al caso estudio que quiera efectuar, como por ejemplo la hora del día a la que se quiera simular la potencia generada por el generador fotovoltaico.

### 4.4.4 Implementación del código en el bloque

Dentro de las opciones básicas que brinda el Comando DPL, está el manejo de objetos externos al archivo, los cuales pueden estar en la estructura a simular o en cualquier ubicación del simulador. Luego de haber programado las variables de salida de cada SEP y haber importado sus respectivos datos, el módulo estuvo listo para integrarse a su respectivo bloque.

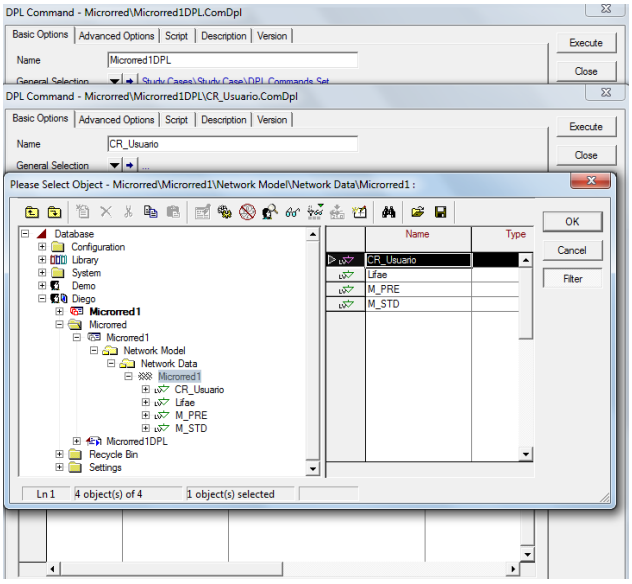



*Figura 4-27 Conexión código DPL con la estructura*

El módulo quedó enlazado a la programación del bloque y ahora de acuerdo a las palabras clave que correspondieron a cada variable eléctrica a manipular, se pudo controlar desde el archivo principal de DPL, generado para tal fin.

## 4.5 PRUEBAS AL BLOQUE

Con el fin de validar la importación de las variables al bloque después de haber sido programado, se ejecutaron una serie de pruebas para verificar la fidelidad de los datos dispuestos en su respectivo módulo en la estructura de la microrred.

### 4.5.1 Prueba motor premium

Uno de los SEP que conforma la microrred, es un motor eléctrico de eficiencia

premium el cual fue modelado por el proyecto de grado [32] y presenta sus variables de salida en diferentes pruebas que se realizaron al motor. Cada valor de potencia de salida presentado se relacionó con un porcentaje de carga y de velocidad a las que el motor fue sometido. Así pues, se esperaba obtener un valor de potencia dado en el bloque una vez el usuario hubiese digitado el valor del porcentaje de la carga y velocidad a la cual quería simular el comportamiento del motor. Para esta prueba se observa la potencia del motor siendo sometido al 50% de su carga y velocidad.

TABLA PRUEBAS ENTRE VARIADOR Y MOTOR PREMIUM

| Velocidad Mdl 1.5 H.P. | Porcentaje de Carga Mdl 1.5 H.P. | Porcentaje de Par aplicado | Equivalencia de Par aplicado en Nm | V1 (V) | V2 (V) | V3 (V) | I1 (A) | I2 (A) | I3 (A) | P1 (W) | P2 (W) | P3 (W) | P in (W) | Med. (N | ed. (r.p | P out (W) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | %* | Nm** | | | | | | | | | | | | | |
| 50% | 0% | 0% | 0 | 173,12 | 173,35 | 173,14 | 3,84 | 3,84 | 3,82 | 286,49 | 286,80 | 284,96 | 1047,5 | 0,5 | 1750 | 91,63 |
| | 30% | 30,09% | 0,92 | 174,92 | 175,32 | 175,13 | 4,47 | 4,46 | 4,43 | 337,15 | 337,39 | 334,46 | 1234,9 | 1,3 | 1748 | 237,97 |
| | 50% | 50,14% | 1,53 | 177,01 | 177,37 | 176,96 | 4,98 | 5,00 | 4,95 | 380,11 | 382,19 | 377,49 | 759,7 | 1,9 | 1747 | 347,60 |
| | 80% | 80,23% | 2,46 | 180,18 | 180,31 | 180,01 | 5,89 | 5,90 | 5,85 | 457,87 | 459,13 | 454,18 | 913,3 | 3,0 | 1742 | 547,27 |

*Figura 4-28 Variables de salida motor Premium [32]*

En el cuadro de dialogo de la Figura 4-29 se ingresó el valor del porcentaje de la velocidad y el Comando DPL se encarga de buscar en su objeto Matriz (IntMat) el valor de potencia correspondiente, para luego exportarlo al bloque que represente este SEP.

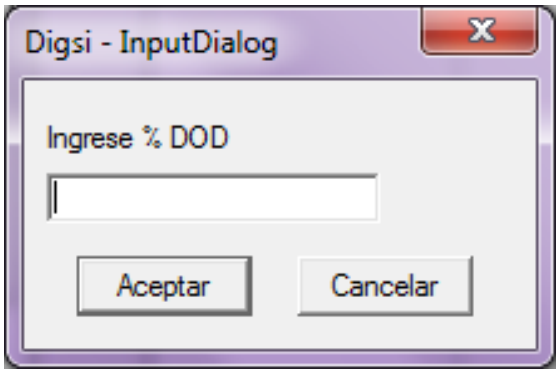



*Figura 4-29 Ventana de entrada de datos*

Luego de haber realizado la exportación se pudo observar dentro de los parámetros internos del bloque, que la potencia se había inicializado con el valor que el modelo proporcionaba, como se observa en la Figura 4-30.

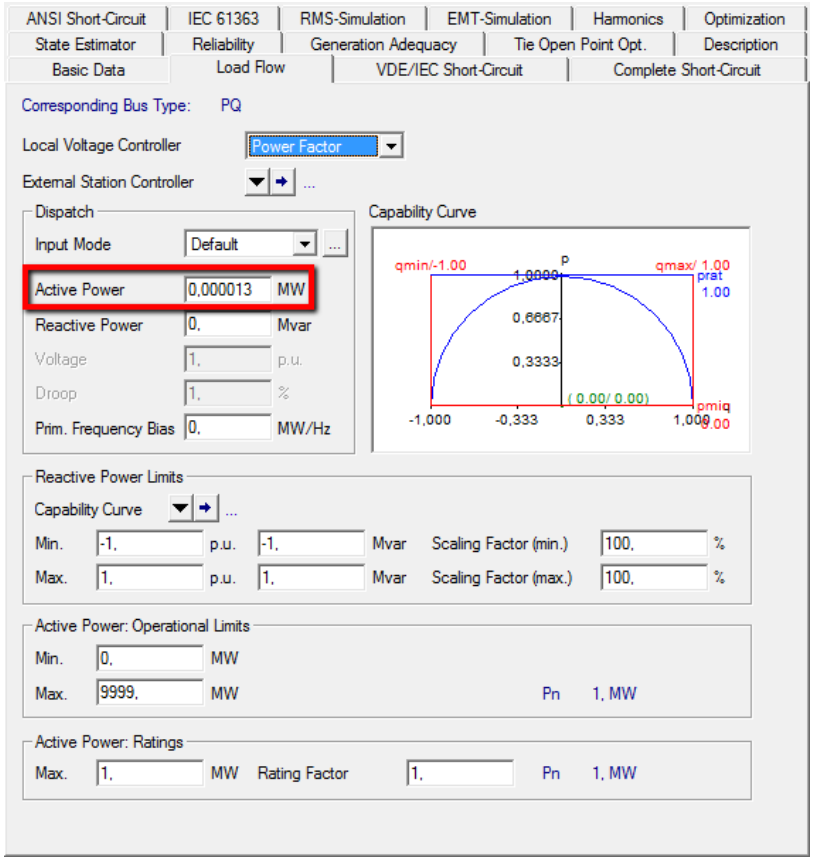



*Figura 4-30 Parámetro modificado a través de DPL*

# 5 VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Como se ha mencionado, la simulación de la microrred en conjunto, no es objeto de validación, puesto que ésta no ha sido implementada y no se tienen valores de referencia para comparar con los posibles resultados del caso estudio. No obstante, es posible validar los bloques que componen el sistema ya que éstos sí poseen valores de referencia, previamente obtenidos por sus desarrolladores. Para desarrollar esta validación se requieren unos perfiles de carga que emulan el comportamiento de cada SEP a través de sus variables de salida.

## 5.1 PERFIL DE CARGA

Con el fin validar los bloques implementados en la estructura de la simulación de la microrred, fue necesario cotejar las salidas de estos bloques, con los datos que sirvieron de entrada para los mismos, que para este caso son las variables de salida recolectadas de cada SEP. De esta manera se tiene la variable P (potencia) que es el valor que se utiliza para caracterizar el banco de baterías, los motores eléctricos, el sistema de gestión de excedentes y la carga residencial dentro de DPF, de los cuales se da una descripción más detallada a continuación.

#### 5.1.1.1 Banco de baterías

Del proyecto descrito en [31] se tomaron los valores de tensión y corriente de una sola batería de los dos tipos que analizaba el proyecto: una es Mtek de 2.3Ah y 12V, y la otra es Magna de 18Ah y 12V. Sólo fue tomada en cuenta la batería Mtek por ser la de mayor similitud con las baterías que conforman el banco. Con estos valores, se calculó la potencia en vatios [W] para cada DOD (Depth Of Discharge), permitiendo modelar el banco de baterías dentro de la simulación, estos cálculos se pueden apreciar en los datos suministrados por el investigador. (ver Tabla 5-1).

*Tabla 5-1 Variables de salida del Banco de baterías [31]*

| %DOD | P[W] | %DOD | P[W] | %DOD | P[W] | %DOD | P[W] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 15,22732 | 11 | 13,43293 | 21 | 14,23209 | 31 | 12,16791 |
| 1 | 14,48854 | 12 | 12,50234 | 22 | 13,25396 | 32 | 13,10353 |
| 2 | 14,42502 | 13 | 14,36031 | 23 | 14,20032 | 33 | 13,04314 |
| 3 | 14,42502 | 14 | 14,32855 | 24 | 14,16739 | 34 | 13,0135 |
| 4 | 13,43293 | 15 | 14,32855 | 25 | 13,19357 | 35 | 12,14038 |
| 5 | 13,46368 | 16 | 12,47379 | 26 | 13,19357 | 36 | 12,98385 |
| 6 | 14,39208 | 17 | 13,3429 | 27 | 12,22398 | 37 | 12,9542 |
| 7 | 13,46368 | 18 | 13,31325 | 28 | 13,22321 | 38 | 12,02924 |
| 8 | 14,39208 | 19 | 12,33512 | 29 | 13,13318 | 39 | 11,02924 |
| 9 | 12,47379 | 20 | 13,3429 | 30 | 13,10353 | 40 | 11,00924 |

#### 5.1.1.2 Motores

Utilizando los datos dados en [32] se obtuvo una tabla de cada motor de los dos tipos de motores que se tenían: el Estándar y el Premium. En cada motor se pudieron medir sus parámetros eléctricos más importantes a diferentes porcentajes de velocidad y carga, brindando así las variables de salida que permiten modelar el SEP dentro de la simulación. Sin embargo, en la programación de cada uno se tomaron los mismos tipos de datos, puesto que el único cambio entre motores son sus valores de potencia y esto no afecta las variables del bloque en DPF (ver Tabla 5-2 y Tabla 5-3).

*Tabla 5-2 Variables de salida motor estándar [32]*

| **% Carga** | % Vel | P[W] | % Vel | P[W] | % Vel | P[W] | % Vel | P[W] | % Vel | P[W] | % Vel | P[W] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | 30 | 33,11 | 50 | 91,63 | 70 | 102,5 | 80 | 117,08 | 90 | 131,74 | 100 | 146,23 |
| **30** | | 154,52 | | 237,97 | | 332,58 | | 379,68 | | 394,58 | | 437,94 |
| **50** | | 242,36 | | 347,6 | | 485,68 | | 555,12 | | 591,88 | | 692,8 |
| **80** | | 340,21 | | 547,27 | | 740,09 | | 816,6 | | 886,4 | | 1017,75 |

*Tabla 5-3 Variables de salida motor premium [32]*

| **% Carga** | % Vel | P[W] | % Vel | P[W] | % Vel | P[W] | % Vel | P[W] | % Vel | P[W] | % Vel | P[W] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | 30 | 66,29 | 50 | 128,72 | 70 | 206 | 80 | 255,41 | 90 | 261,13 | 100 | 257,08 |
| **30** | | 189,6 | | 313,32 | | 438,12 | | 352,86 | | 561,66 | | 661,05 |
| **50** | | 268,67 | | 443,59 | | 567,66 | | 708,49 | | 758,94 | | 883,16 |
| **80** | | 371,84 | | 612,36 | | 879,44 | | 945,33 | | 1062,3 | | 1179,56 |

#### 5.1.1.3 Sistema de gestión de excedentes

Al sistema descrito en [33] (complementado durante este proyecto), se le realizaron pruebas durante un día para así obtener las variables de salida a implementar en el respectivo SEP dentro de la simulación de la microrred. La carga del sistema de gestión es variable, pero para obtener un perfil uniforme se mantuvo constante durante toda la toma de datos. Al igual que con el perfil del banco de baterías, se hizo un promedio del valor de las potencias para un rango de tiempo determinado, y así tener valores de tiempo sólo de una hora. Para este SEP se obtuvo un perfil interconectado a la red externa (ver Tabla 5-4).

*Tabla 5-4 Variables de salida del Sistema de gestión [33]*

| t(H) | P(W) |
|---|---|
| 6 | 174,4779 |
| 7 | 170,0517 |
| 8 | 171,5625 |
| 9 | 171,8701 |
| 10 | 173,3244 |
| 11 | 170,8107 |
| 12 | 173,2697 |
| 13 | 173,5674 |
| 14 | 173,6251 |
| 15 | 173,6828 |
| 16 | 174,957 |
| 17 | 178,3689 |
| 18 | 179,1383 |

#### 5.1.1.4 Carga residencial

Del proyecto descrito en [35] se obtuvo una tabla de datos con los resultados adquiridos de una carga residencial promedio. Adicionalmente, éste ha sido implementado como un prototipo de emulación de cargas que permite observar la gestión de demanda de un usuario tipo residencial, el cual se va a conectar a la microrred. Las mediciones fueron obtenidas con un analizador de calidad de energía durante un día, para así tener un total de 24 datos (uno cada hora). De ahí resultó el perfil con las respectivas potencias dadas en vatios [W], que se implementaron en el respectivo SEP dentro de la simulación, ya que estas fueron requeridas por el respectivo bloque dentro del software (ver Tabla 5-5).

*Tabla 5-5 Variables de salida de carga residencial [35]*

| t(H) | P(W) |
|---|---|
| 1 | 16,61576 |
| 2 | 12,99928 |
| 3 | 12,1198667 |
| 4 | 12,6630827 |
| 5 | 29,5311467 |
| 6 | 25,99264 |
| 7 | 42,7419467 |
| 8 | 27,0952267 |
| 9 | 19,54736 |
| 10 | 20,0998667 |
| 11 | 29,2331733 |
| 12 | 19,05912 |

| | |
|---|---|
| 13 | 20,9175467 |
| 14 | 25,2176 |
| 15 | 25,76304 |
| 16 | 25,0023467 |
| 17 | 28,74744 |
| 18 | 31,7202667 |
| 19 | 29,2330667 |
| 20 | 46,7189333 |
| 21 | 51,8490667 |
| 22 | 55,208 |
| 23 | 39,012 |
| 24 | 22,9779733 |

## 5.2 PROTOCOLO DE PRUEBAS Y VALIDACIÓN

Todos los datos recopilados para emular el comportamiento de cada SEP fueron implementados en DPF de modo tal que para la integración de estos al software se hizo necesario el diseño de archivos DPL. Se crearon dentro de los mismos, los vectores necesarios que contienen la información de los perfiles de salida de cada uno de los SEP. Posteriormente, estos archivos se interconectaron con los bloques correspondientes dentro de la estructura general de la microrred.

### 5.2.1 Validación del banco de baterías

La programación del archivo DPL de este bloque se hizo procediendo como indica el siguiente diagrama de flujo.

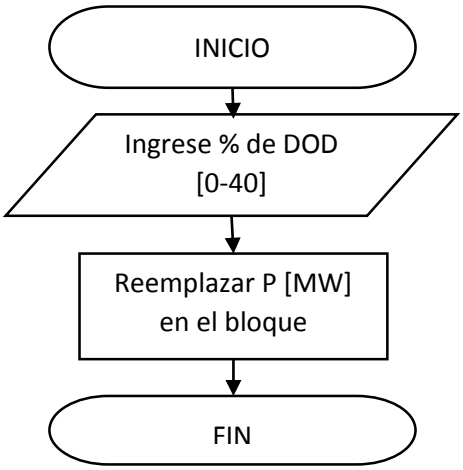



*Figura 5-1 Diagrama de flujo programación del banco de baterías*

Según los datos obtenidos de los desarrolladores del proyecto [31], en las pruebas realizadas a la batería Mtek por el tiempo en que duró conectada la batería, esta llegó a una profundidad de descarga (DOD) máxima del 40%. Estas pruebas

consistían en realizar mediciones sobre baterías de plomo-ácido que permitieran estimar el estado de carga y el estado de vida útil de la batería, teniendo en cuenta la degradación por el tiempo de operación bajo condiciones previamente establecidas. Por lo tanto, se tomaron los valores de 0 a 40% del DOD y se les dio un respectivo valor de potencia en el archivo DPL. Para la demostración del funcionamiento de este bloque se hizo el ejemplo con un DOD del 20% (ver Figura 5-2).

| DOD | POT |
|---|---|
| 19,75% | 13,31325 |
| 19,85% | 12,33512 |
| 19,88% | 13,2836 |
| 20,06% | 13,3429 |
| 20,10% | 12,36265 |
| 20,24% | 12,33512 |
| 20,27% | 13,2836 |
| 20,45% | 14,23209 |
| 20,64% | 13,2836 |

*Figura 5-2 Variable de salida banco de baterías (Resaltada) [31]*

Se puede observar en la Figura 5-3 que el valor para la potencia en DPF es el que corresponde según la Figura 5-2.

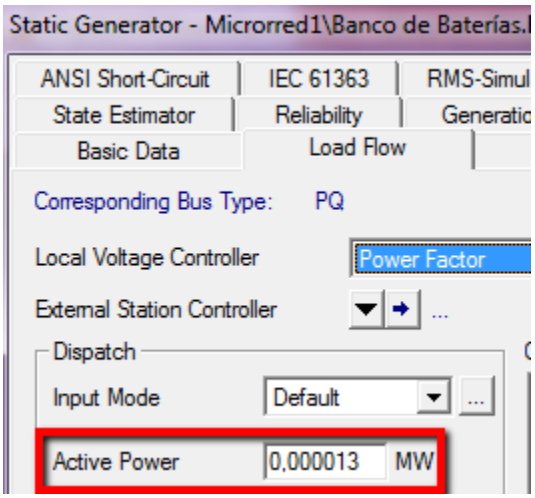



*Figura 5-3 Resultado bloque banco de baterías en DPF*

$$\%\ error = \frac{|Valor\ esperado - Valor\ obtenido|}{Valor\ esperado} * 100\%$$

$$= \frac{|0.00001334 - 0.000013|}{0.00001334} * 100\% = 2.54872564\%$$

Se presenta un pequeño porcentaje de error ya que el software no nos muestra todos los decimales que se han ingresado, ya que por defecto la potencia se muestra en MW, de otro modo el error sería 0%.

### 5.2.2 Validación de los motores eléctricos

Puesto que los dos motores tienen el mismo tipo de datos, se desarrolla su programación en DPL como indica el siguiente diagrama de flujo:

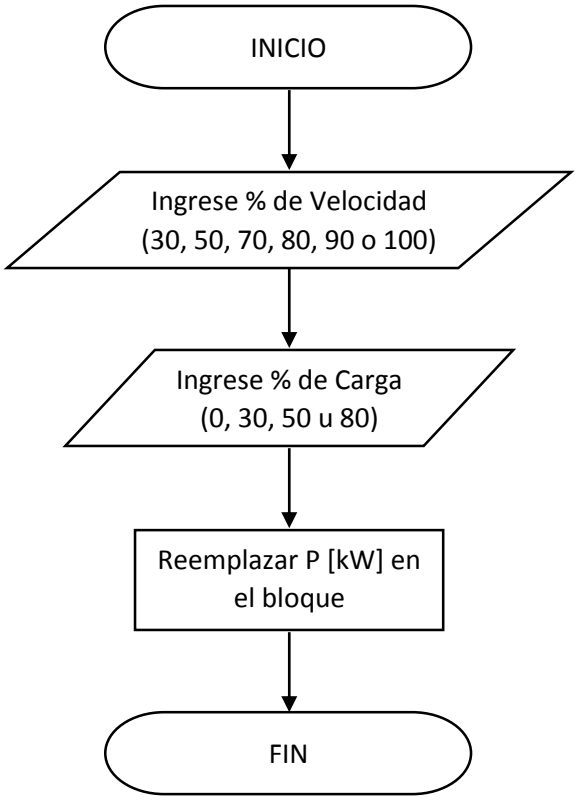



*Figura 5-4 Diagrama de flujo programación de motores*

En el momento de verificar el buen funcionamiento del bloque dentro de la simulación, se obtuvieron los mismos datos que obtuvieron los desarrolladores del proyecto [32]. En la Figura 5-5 se muestra la primera tabla de resultados final de ellos: para el caso de este ejemplo, la simulación se ejecutó con unos datos de velocidad del 50%. Igualmente, el porcentaje de carga también fue del 50%, para el cual la potencia de salida del motor estándar es de 347.6W. En la Figura 5-6 se puede evidenciar que el DPF muestra como potencia de salida P=0.0003476MW (Igualmente ocurrió con el motor Premium).

TABLA PRUEBAS ENTRE VARIADOR Y MOTOR PREMIUM

| Velocidad Mdl 1.5 H.P. | Porcentaje de Carga Mdl 1.5 H.P. | Porcentaje de Par aplicado | Equivalencia de Par aplicado en Nm | V1 (V) | V2 (V) | V3 (V) | I1 (A) | I2 (A) | I3 (A) | P1 (W) | P2 (W) | P3 (W) | P in (W) | Med. (N | ed. (r.p | P out (W) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | %* | Nm** | | | | | | | | | | | | | |
| 50% | 0% | 0% | 0 | 173,12 | 173,35 | 173,14 | 3,84 | 3,84 | 3,82 | 286,49 | 286,80 | 284,96 | 1047,5 | 0,5 | 1750 | 91,63 |
| | 30% | 30,09% | 0,92 | 174,92 | 175,32 | 175,13 | 4,47 | 4,46 | 4,43 | 337,15 | 337,39 | 334,46 | 1234,9 | 1,3 | 1748 | 237,97 |
| | 50% | 50,14% | 1,53 | 177,01 | 177,37 | 176,96 | 4,98 | 5,00 | 4,95 | 380,11 | 382,19 | 377,49 | 759,7 | 1,9 | 1747 | 347,60 |
| | 80% | 80,23% | 2,46 | 180,18 | 180,31 | 180,01 | 5,89 | 5,90 | 5,85 | 457,87 | 459,13 | 454,18 | 913,3 | 3,0 | 1742 | 547,27 |

*Figura 5-5 Variable de salida Motor (Resaltada) [32]*

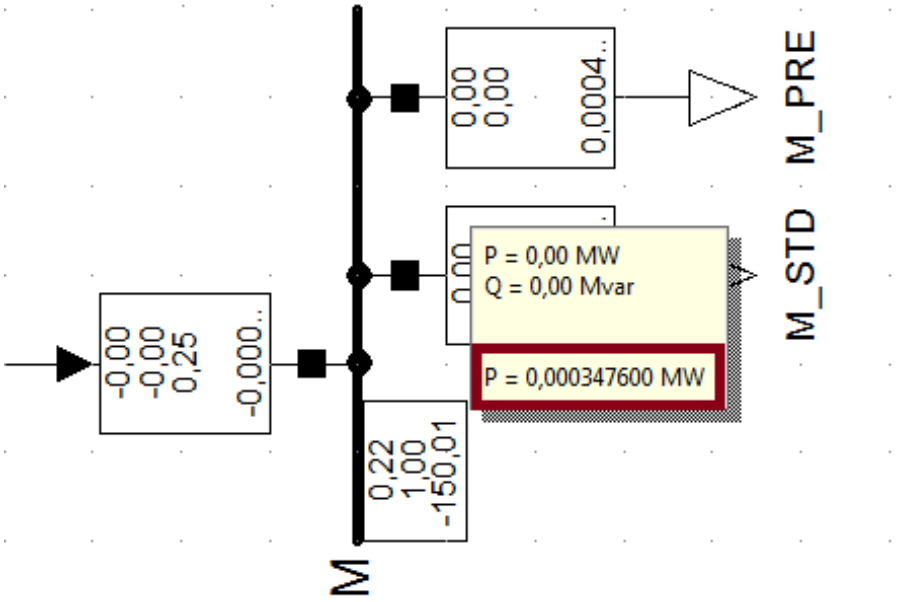



*Figura 5-6 Resultado bloque Motor en DPF*

$$\%\ error = \frac{|Valor\ esperado - Valor\ obtenido|}{Valor\ esperado} * 100\%$$
$$= \frac{|0.0003476 - 0.0003476|}{0.0003476} * 100\% = 0\%$$

Se comprueba que el bloque es muy confiable ya que el porcentaje de error es del 0% para cada uno de los datos en ambos motores, todos los datos arrojados por el software coincidían con los del perfil de salida obtenido.

### 5.2.3 Validación del sistema de gestión de excedentes

La programación del DPL para esta carga se hizo procediendo como indica el siguiente diagrama de flujo.

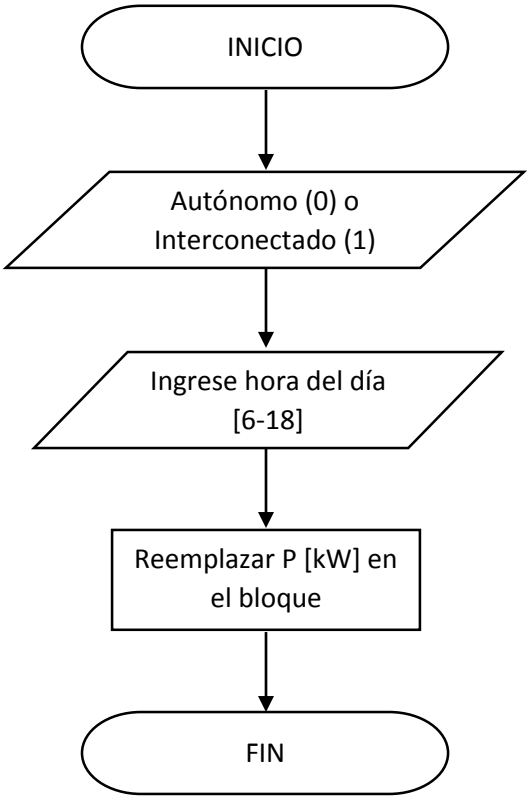



*Figura 5-7 Diagrama de flujo programación del sistema de gestión*

Al igual que con los bloques anteriores, se logró probar que los datos adquiridos en el muestreo que se hizo en el LIFAE coinciden con los simulados. Para la demostración de ello se ejecutó la simulación para un sistema autónomo, es decir, alimentado únicamente por los paneles fotovoltaicos (escogiendo aleatoriamente las 10AM como hora de simulación). En la Figura 5-8 se muestra la tabla del perfil adquirido, y en la Figura 5-9 el cuadro de resultados de la simulación en DPF, evidenciando el correcto funcionamiento del bloque ya que P=172.6485W = 0.000172649MW.

| | Interconectado | Autónomo |
|---|---|---|
| t(H) | P(W) | |
| 6 | 174,4779 | 174,7949 |
| 7 | 170,0517 | 172,6059 |
| 8 | 171,5625 | 170,8184 |
| 9 | 171,8701 | 171,427 |
| 10 | 173,3244 | 172,6485 |
| 11 | 170,8107 | 170,7876 |
| 12 | 173,2697 | 172,6168 |
| 13 | 173,5674 | 173,4957 |
| 14 | 173,6251 | 171,9743 |

*Figura 5-8 Variable de salida sistema de gestión (Resaltada) [33]*

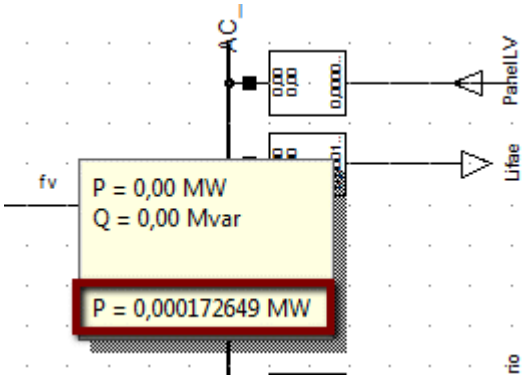



*Figura 5-9 Resultado bloque sistema de gestión en DPF*

$$\%\ error = \frac{|Valor\ esperado - Valor\ obtenido|}{Valor\ esperado} * 100\%$$

$$= \frac{|0.0001726485 - 0.000172649|}{0.0001726485} * 100\% = 0{,}00028961\%$$

Al igual que ocurre con las baterías hay una diferencia en el resultado arrojado por DIgSILENT por la cantidad de decimales, pero en este caso es mucho menor el porcentaje de error ya que sólo hace falta un decimal para completar la cifra, sin embargo el porcentaje de error tiende a 0%, probando así que es confiable.

### 5.2.4 Validación de la carga residencial

La respectiva programación de su DPL se describe en el siguiente diagrama.

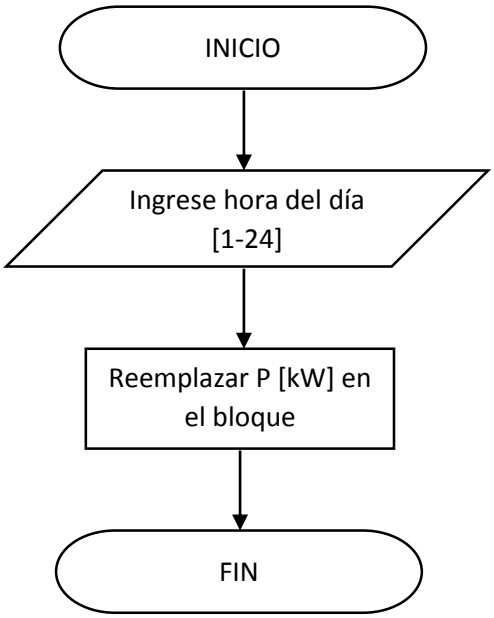



*Figura 5-10 Diagrama de flujo programación de carga residencial*

Para comprobar la correcta implementación del bloque, se ejecutó el DPL respectivo, lo cual permite comprobar que los resultados de DPF coinciden con los obtenidos en el proyecto [35]. En la Figura 5-11 se muestra la tabla con los datos suministrados por los desarrolladores, el cuadro muestra la hora de las 12M, ya que es la que se utilizó para el ejemplo de validación y la Figura 5-12 es la prueba de que los datos coinciden. DPF hace una aproximación, ya que el equivalente de 19.05912W en MW es P=0.00001905912. Se hizo la prueba con cada una de las horas y todas coincidían.

| t(H) | P(W) |
|---|---|
| 1 | 16,61576 |
| 2 | 12,99928 |
| 3 | 12,1198667 |
| 4 | 12,6630827 |
| 5 | 29,5311467 |
| 6 | 25,99264 |
| 7 | 42,7419467 |
| 8 | 27,0952267 |
| 9 | 19,54736 |
| 10 | 20,0998667 |
| 11 | 29,2331733 |
| 12 | 19,05912 |

*Figura 5-11 Variable de salida carga residencial (Resaltada) [35]*

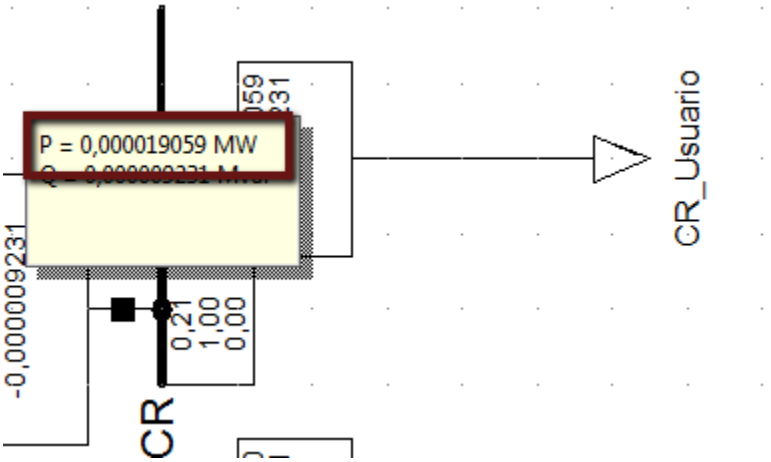



*Figura 5-12 Resultado bloque carga residencial en DPF*

$$\%\ error = \frac{|Valor\ esperado - Valor\ obtenido|}{Valor\ esperado} * 100\%$$

$$= \frac{|0.00001905912 - 0.000019059|}{0.00001905912} * 100\% = 0{,}0006296\%$$

Como se pudo evidenciar con todos los bloques, si se presenta un error es por la cantidad de decimales, ya que todas las potencias son muy pequeñas y el software por defecto muestra la potencia en MW, pero al tener un porcentaje de error tan bajo, se puede probar que todos los bloques funcionan al igual que los elementos reales a conectar en la microrred.

# 6 SIMULACIÓN DE LA MICRORRED

Dando paso al objetivo general de este proyecto, se ejecutó la simulación de la microrred integrando todos los SEP que la componen, luego de haber sido interconectados a través de una estructura diseñada en forma de bloques modelados por medio de sus variables de salida.

Para tal fin, se ejecutó un caso estudio con valores predeterminados de acuerdo a la parametrización interna de cada SEP, conjugando diferentes estados eléctricos en los que se encuentre cada bloque en la simulación.

## 6.1 FUNCIONAMIENTO DE LA SIMULACIÓN

En este apartado se describen los elementos más importantes que se vieron involucrados en el funcionamiento de la simulación y se da una explicación de manera estructurada de como vienen apareciendo dentro de la simulación de acuerdo al momento de su desarrollo y utilización, desde el diseño inicial de la simulación hasta los protocolos de utilización de la misma para dar paso a los casos de estudio.

### 6.1.1 Diseño de la simulación

La simulación de la microrred está basada en la integración de los SEP que componen la misma. Una vez desarrollado el modelo de esta, en DPF se desarrolló una programación que controla la simulación en general en un archivo DPL. Este archivo contiene las ordenes básicas para de la simulación, tales como el flujo de carga, y la integración de las variables con las que el usuario controla diferentes parámetros, como los porcentajes de carga y velocidad para los motores, o la cantidad de radiación que recibirá el panel fotovoltaico.

### 6.1.2 Composición de la simulación

La simulación de la microrred puede representarse en cuatro aspectos básicos: la estructura de la microrred, sus bloques de generación y carga, el comando DPL y la exportación de sus resultados.

#### 6.1.2.1 Estructura básica de la microrred

Comprende todos los elementos que se interconectaron para dar forma al modelo de la misma dentro de la simulación. Esta contiene los elementos que se encuentran desde el punto de conexión externa de energía eléctrica, el cual suple de energía el edificio Sabio Caldas por medio de un transformador, hasta llegar al punto de conexión común con la microrred, que se encuentra ubicado en el séptimo piso del edificio.

La estructura de la microrred está compuesta por barrajes, líneas, un transformador, generadores y cargas como se puede ver en la Figura 6-1.

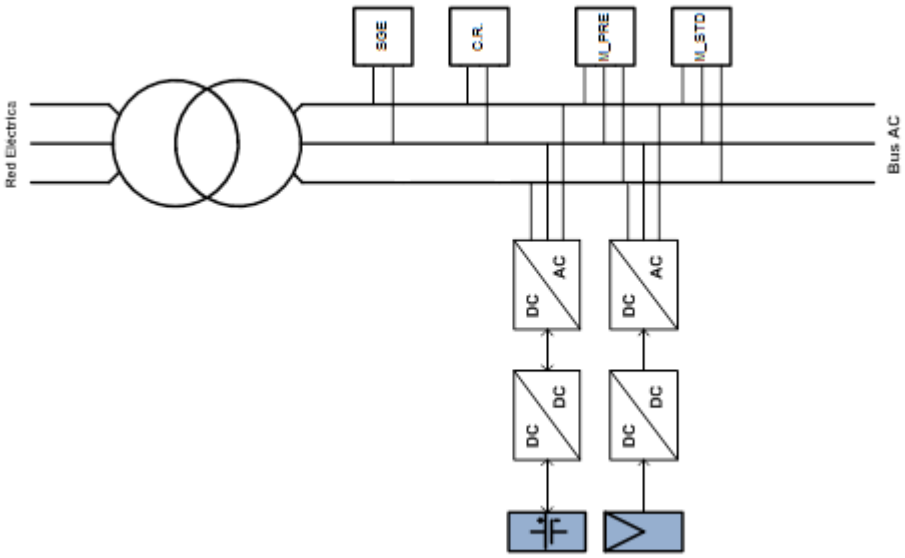



*Figura 6-1 Estructura de la microrred*

### 6.1.2.2 Bloques de generación y cargas

Estos bloques representan cada SEP dispuesto a interconectarse en la microrred. Cada uno de ellos está compuesto por módulos que brinda DPF y están programados para emular el comportamiento de cada elemento de la microrred.

### 6.1.2.3 Comando DPL

La programación de cada SEP se desarrolló en la plataforma DPL. Esta permite controlar por medio de variables externas y con modelos basados en parámetros y archivos de datos, todos los elementos de la estructura básica de la microrred con sus respectivos SEP, después de haber sido interconectados. Además, el comando DPL general ejecuta la simulación con los casos de estudio que se requieran y permite al usuario un manejo más cómodo de la simulación, brindando una interfaz gráfica que permite introducir las variables de control de cada SEP.

### 6.1.2.4 Módulo de exportación de resultados

Finalmente, se dispuso un módulo de exportación de datos, también desarrollado a través de DPL, que permite obtener memorias de salida de los datos y resultados que se hayan obtenido de la simulación, para poder analizarlas más cómodamente.

### 6.1.3 Implementación de la simulación

Habiendo interconectado los bloques a la estructura de la microrred dentro de la simulación, para ejecutar la misma, fue necesario implementar un archivo DPL general que integre los archivos DPL individuales de cada bloque, para controlarlos ahora desde un archivo DPL general, en el cual se ejecutó el flujo de carga para la microrred y la exportación de sus resultados.

### 6.1.4 Comando DPL general

Es necesario manejar la simulación desde un archivo DPL general, puesto que para enlazar el archivo con la estructura DPF, se requirió una selección general (General Selection) de la estructura a simular y el caso estudio determinado dentro de la simulación (ver Figura 6-2).

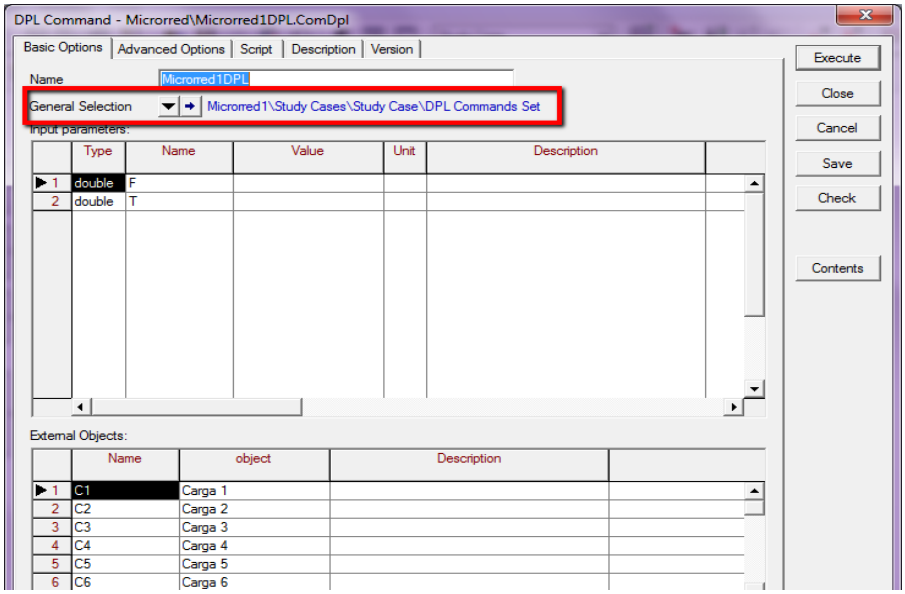



*Figura 6-2 Selección general archivo DPL*

Este archivo no solo englobó los demás comandos DPL para cada bloque, sino que contiene la inicialización de los parámetros básicos de cada componente de la estructura, tales como tensiones, corrientes, potencias, factores de potencia, etc.

Estos componentes se enlazaron al archivo DPL general como un objeto externo. Para el caso de esta simulación, se inicializaron los parámetros de las cargas de cada piso del edificio Sabio Caldas, ya que la inicialización de los demás bloques está dentro de su propio comando DPL (ver Figura 6-3).

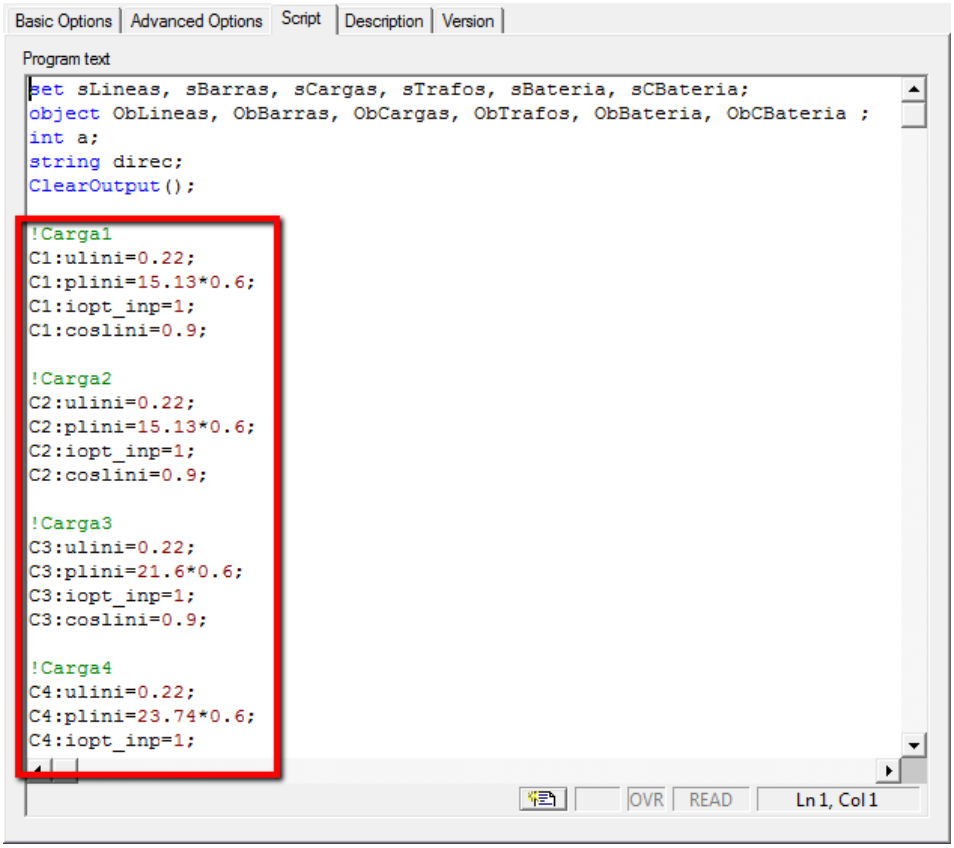



*Figura 6-3 Inicialización básica de cada equivalente de red*

Para integrar las demás subrutinas o archivos DPL de cada bloque, bastó con "llamarlas" dentro de la programación del archivo DPL general con la programación necesaria. Para este caso, la palabra clave Execute seguida del nombre de la subrutina, ejecuta la programación de cada bloque. Adicionalmente, en el comando general DPL se puede programar el orden en que se quiere ejecutar cada subrutina (ver Figura 6-4).

```
PanelFV.Execute();
Bateria.Execute();

input (F, 'Autonomo o Interconectado');  !0=Autonomo 1=Interconectado
input(T,'Ingrese Hora del Dia');

MotorPRE.Execute();
MotorSTD.Execute();
CR_Usuario.Execute(T);
Lifae.Execute(F,T);

CalcLdf.Execute();
```

*Figura 6-4 Llamado subrutinas en DPL*

### 6.1.4.1 Objeto CalcLdf

Como se mencionó en el Capítulo 4, DPL es una suite de programación que llama diferentes objetos dentro de la misma programación para ejecutar las simulaciones a que haya a lugar. Uno de ellos es el objeto CalcLdf que sirve para ejecutar flujos de carga en las estructuras desarrolladas en DPF. Simplemente es necesario "llamarlo" en la programación del archivo general DPL para que se ejecute, después de haberlo creado dentro del contenido del archivo (ver Figura 6-5).

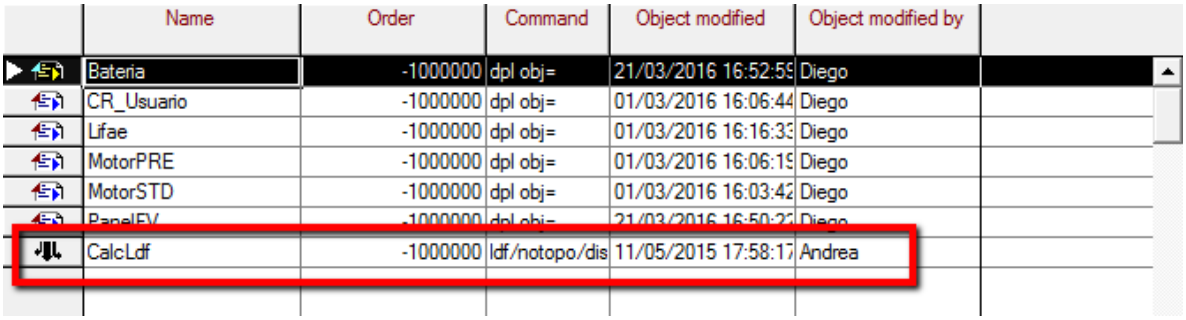



*Figura 6-5 Objeto CalcLdf*

### 6.1.4.2 Exportación de resultados

Para llevar un registro de los resultados, se implementó un módulo de exportación de datos, en cual se desarrolla un archivo que contiene los parámetros eléctricos de tensión, corriente, potencia y pérdidas en todos los elementos de la microrred como barras, cargas y líneas etc., exportando estos datos desde la simulación a un archivo de extensión .TXT (bloc de notas).

En DPL se encuentran los comandos *Set*, *Object*, y *String*. Los dos primeros permitieron controlar los elementos de la simulación e inicializar variables dentro de la programación. Con los valores de las variables que producen estos elementos, posteriormente se implementó con *String* la ruta y dirección del archivo .TXT que se utilizó para guardar los datos correspondientes (ver Figura 6-6).

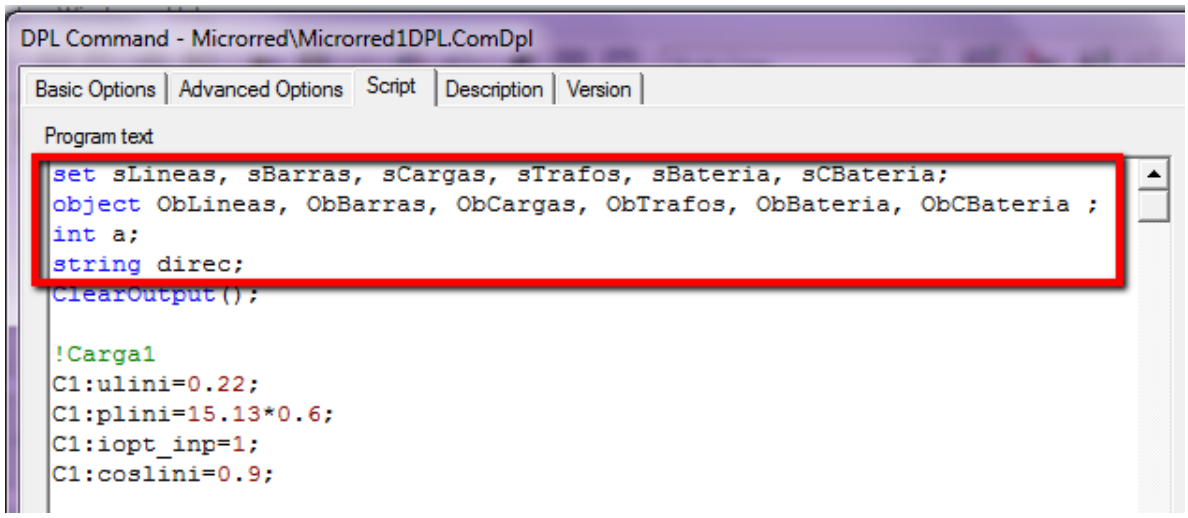



*Figura 6-6 Inicialización código para exportación de resultados*

Después de desarrollar las variables internas de programación que se usan para controlar los elementos de la simulación y sus respectivos valores, se procedió a escribir el código que permite exportar los resultados al archivo. Con esto se pudieron obtener perfiles de salida de la simulación para ser analizados con más detalle o ser a su vez importados desde otro módulo de simulación que integre este modelo de la microrred (ver Figura 6-7).

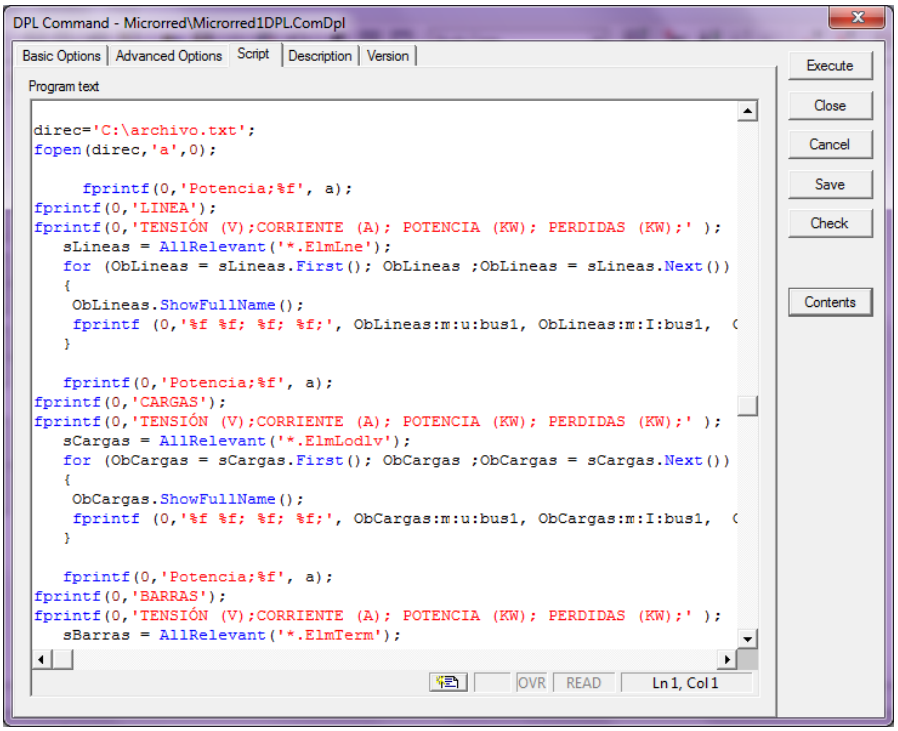



*Figura 6-7 Código importación de resultados*

Adicionalmente, se usaron otros comandos de DPL que permitieron extraer de forma iterativa los datos de cada elemento, sin necesidad de desarrollar un código para cada uno de ellos, como *ElmTerm* que agrupa todas las barras, *ElmLne* que agrupa todas las líneas y *ElmLodlv* que agrupa todas las cargas.

Finalmente, se obtuvo un perfil de salida para el caso estudio, de acuerdo con los valores de entrada suministrados a la simulación, de la siguiente manera (ver Figura 6-8).

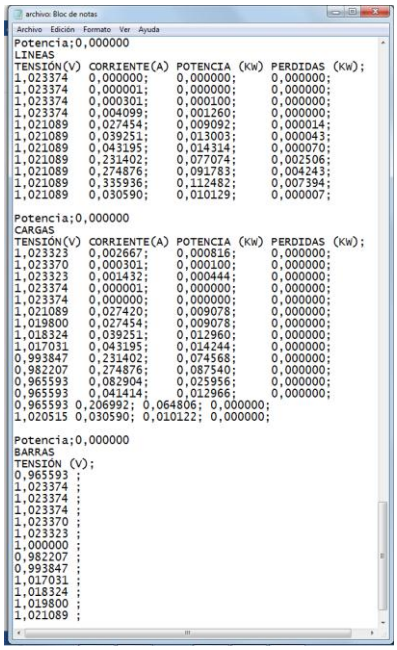



*Figura 6-8 Resultados en bloc de notas*

### 6.1.5 Ejecución de la simulación

Es importante ejecutar el archivo DPL para correr la simulación, puesto que el archivo DPL inicializa los valores básicos de los bloques y recoge los parámetros dados por el usuario para ejecutar el caso estudio.

#### 6.1.5.1 Protocolo de utilización

Para la debida ejecución de la simulación se debe llevar a cabo el siguiente protocolo:

1. Iniciar el software DIgSILENT® PowerFactory y activar el proyecto Microrred1.
2. Verificar la interconexión de todos los elementos de la estructura, observando que estén en negro y no en blanco los puntos de conexión.
3. Abrir el “Data Manager” de DPF y buscar el archivo Microrred1DPL.
4. Dar clic contrario en el archivo y seleccionar “Execute”.

5. En la ventana emergente “Panel Fotovoltaico” ingresar el valor de la temperatura ambiente en grados Celsius.
6. En la ventana emergente “Panel Fotovoltaico” ingresar el valor de la irradiancia en W/$m^2$ (de 0 a 1000).
7. En la ventana emergente “banco de baterías” ingresar el valor del DOD (de 0 a 40).
8. En la ventana emergente “SGE y CR” ingresar el valor de la hora en hora militar y en enteros (de 6 a 18).
9. En la ventana emergente “Motor STD” ingresar su porcentaje de velocidad (30,50, 80).
10. En la ventana emergente “Motor STD” ingresar su porcentaje de carga (30, 50, 80).
11. En la ventana emergente “Motor PRE” ingresar su porcentaje de velocidad (30,50, 80).
12. En la ventana emergente “Motor PRE” ingresar su porcentaje de carga (30,50, 80).

## 6.2 CASO ESTUDIO PRINCIPAL

El caso estudio principal se ha diseñado para ejecutar la simulación de la microrred para integrar todos los elementos contenidos en la misma, de acuerdo a unos parámetros que se asignaron por defecto para cada uno de ellos, por ser posiblemente los más ocurrentes, de acuerdo a estimaciones previas dadas por cada SEP dentro de la microrred. Es de resaltar que adicional al caso de estudio principal, la simulación permite analizar cualquier caso distinto que el usuario desee. (Ver ANEXOS 2 y 3)

### 6.2.1 Determinación de parámetros de cada SEP

Cada SEP contiene unos valores determinados de potencia de acuerdo con las condiciones de funcionamiento para cada hora del día.

#### 6.2.1.1 Generador fotovoltaico

En el caso del panel fotovoltaico, este entregará potencia de acuerdo a la cantidad de irradiancia que reciba. De esta forma, se escogió una cantidad de irradiancia de 850 W/$m^2$, la cual según estudios estadísticos para Bogotá, es un valor frecuente a las 12m [39]. Adicionalmente, los paneles funcionan teniendo en cuenta el valor de la temperatura ambiente a la que estén sometidos, para esta variable se escoge 30°C.

#### 6.2.1.2 Banco de baterías

De acuerdo con las variables de salida obtenidas de este SEP, se programó el

bloque para que funcione con el DOD (Depth of Discharge) al 20%, por ser un valor intermedio de su estado de carga completo.

#### 6.2.1.3 Sistema de gestión y carga residencial

Estas cargas tienen la particularidad de estar modeladas de la mano con el generador fotovoltaico. Por tal razón, dentro de su programación se requirió el valor de una hora del día, que fue previamente enlazada a un valor de irradiancia con funciones probabilísticas desarrolladas para tal fin. Se escogió las 12m de acuerdo con lo anteriormente descrito.

#### 6.2.1.4 Motores eléctricos

Para los motores que se interconectarán a la microrred se realizó un estudio de calidad de potencia. Los resultados de éste permitieron modelar su comportamiento en detalle, puesto que las pruebas fueron realizadas para seis variaciones de carga con seis velocidades diferentes, con base a los puntos de medición propuestos por la IEC60034-2-3 (Variaciones de velocidad del 25%, 50%, 75% y 100%). Con base en lo anterior y dada la carga promedio a la cual funcionan los motores, se escoge el 50% como parámetro de entrada a la simulación para cada uno de estos. [32]

### 6.2.2 Descripción caso estudio principal

El caso estudio principal, programado de acuerdo a los parámetros determinados se ejecutó con éxito, simulando el comportamiento de los SEP por separado, de acuerdo con lo descrito anteriormente, y arrojando como resultado diferentes variables eléctricas en todos los elementos de la microrred.

Posteriormente se ejecutó un flujo de carga en la simulación y se obtuvieron los valores de tensión, corriente y potencias con todos los elementos ya integrados en la misma estructura, emulando el posible comportamiento real de ésta cuando sea implementada en el futuro.

#### 6.2.2.1 Ejecución caso estudio principal

Para desarrollar el caso estudio principal se debió ejecutar el comando DPL general e introducir las variables determinadas previamente.

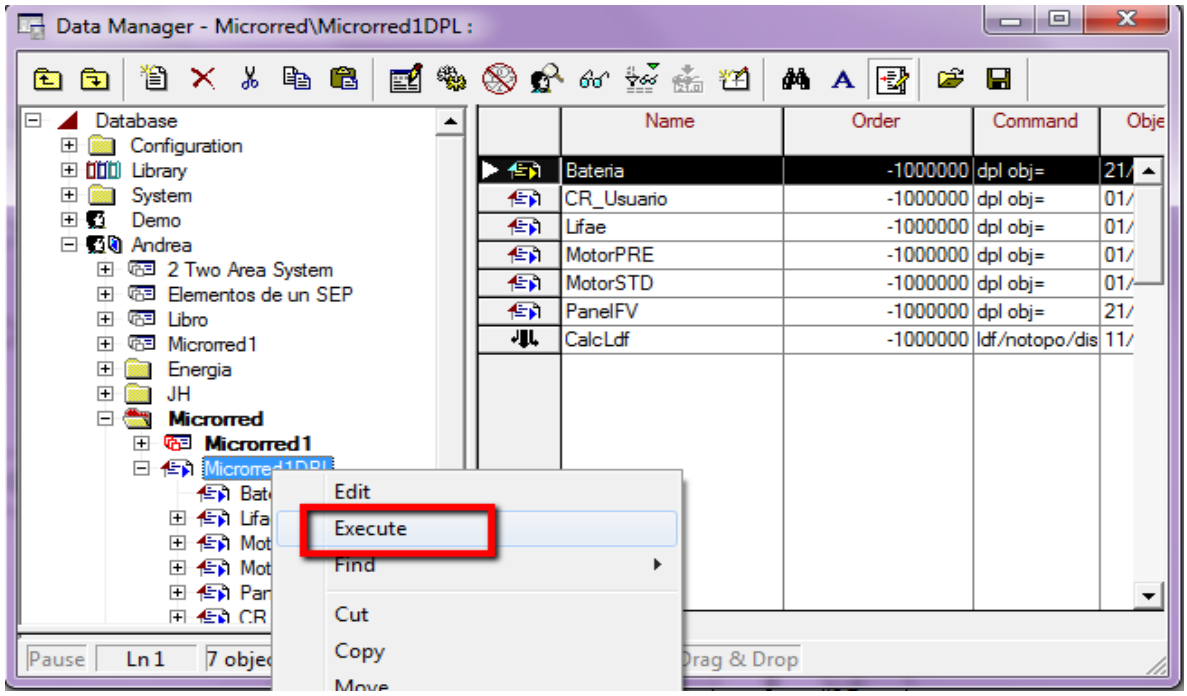



*Figura 6-9 Ejecución comando DPL*

En seguida aparecieron las ventanas que captaban las variables de entrada a la simulación (ver Figura 6-10Figura 6-10).

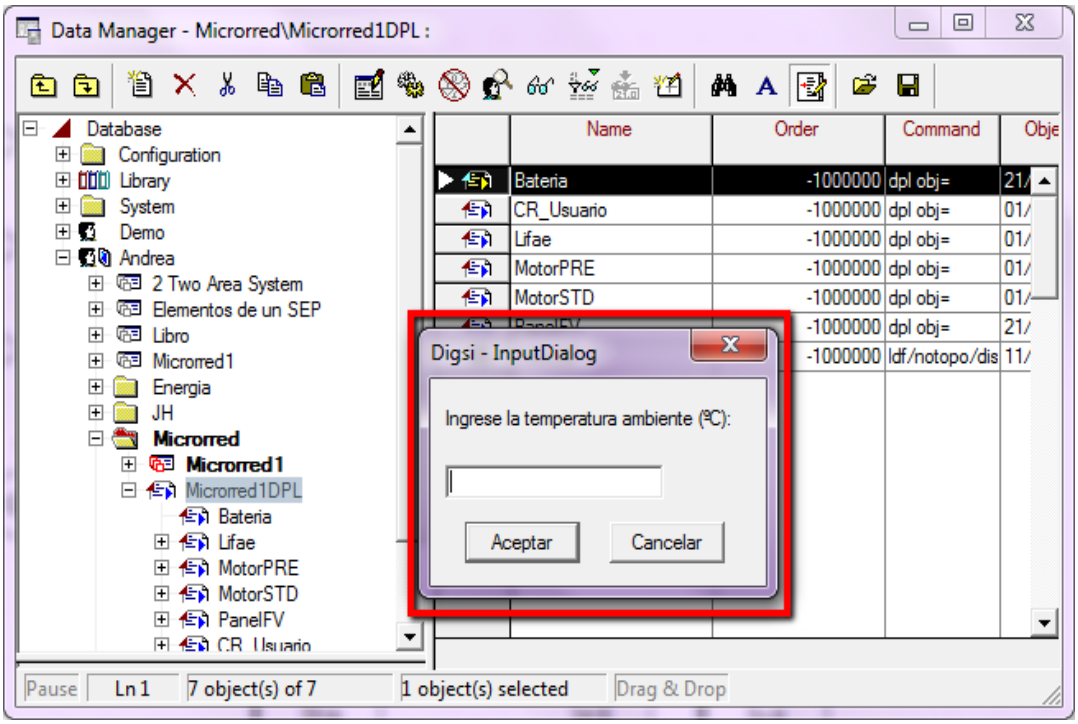



*Figura 6-10 Ingreso datos caso de estudio*

Finalmente se ejecutó el flujo de carga como se observa en la Figura 6-11.

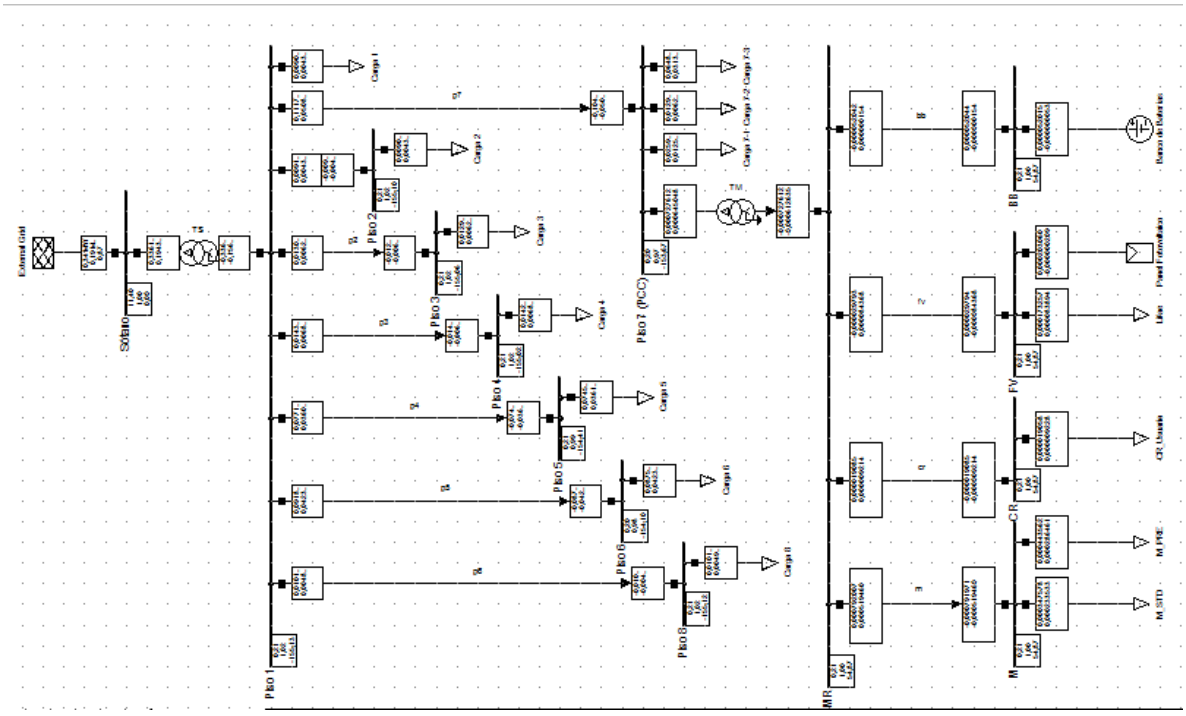


*Figura 6-11 Resultados caso estudio DPF*

### 6.2.2.2 Resultados caso estudio principal

En este apartado se evidencian los datos que arroja el software en sus ventanas de resultados los cuales son P (potencia activa) [MW] y Q (potencia reactiva) [MVAR] que para la simulación son las variables que se utilizan para evaluar el flujo de carga.

Una vez ejecutado el flujo de carga, los resultados se observan en los respectivos cuadros (BoxResults) de DPF, donde se visualizan los valores de potencia activa y potencia reactiva para todas las cargas, mientras que para las barras, se visualiza la tensión de línea a línea, la tensión en por unidad (p.u.) y su respectivo desfase. Por ejemplo, para la carga motor estándar se observó una potencia activa entregada de 347,6 W y una potencia reactiva de 233,5 VAR, tal como se observa en la Figura 6-12.

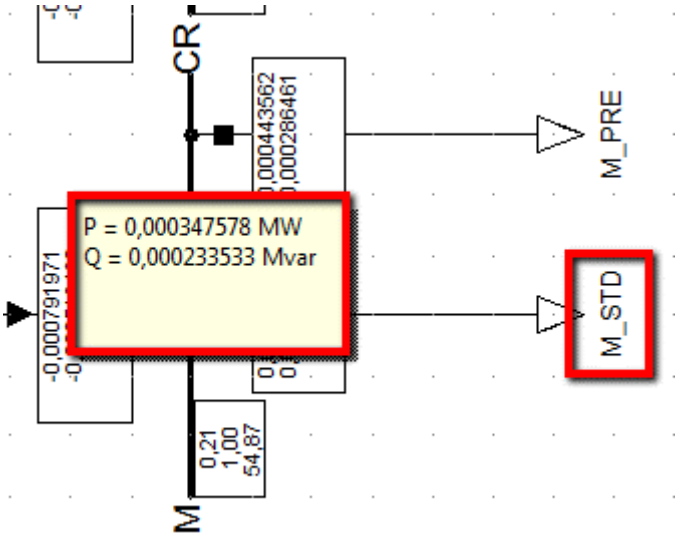



*Figura 6-12 Valores de P y Q motor estándar*

Para la carga motor Premium, la potencia activa es 443,5W y la potencia reactiva es de 286,4W, estos valores de potencia activa y reactiva son altos e influyen de manera importante en el comportamiento de la microrred en su totalidad (ver Figura 6-13).

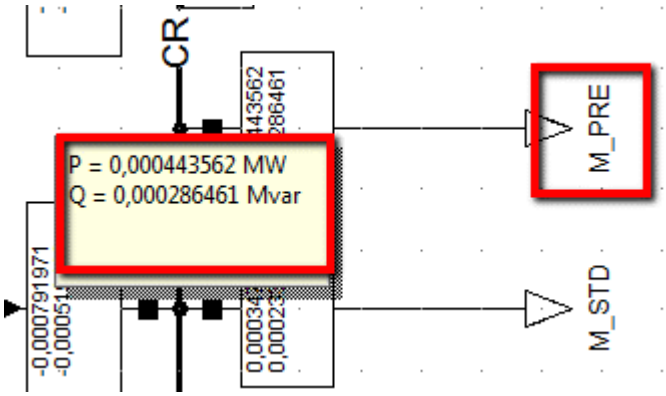



*Figura 6-13 Valores de P y Q motor Premium*

En el caso de la carga residencial (CR_Usuario en la Figura 6-14) y la carga del sistema de gestión de excedentes (Lifae en la simulación) para la hora del día 12pm, se obtuvieron los valores de potencia activa de 19,1 W y 173,2W respectivamente, los cuales son valores de potencia inferiores a los obtenidos en los motores. Los datos de la figura están en MW.

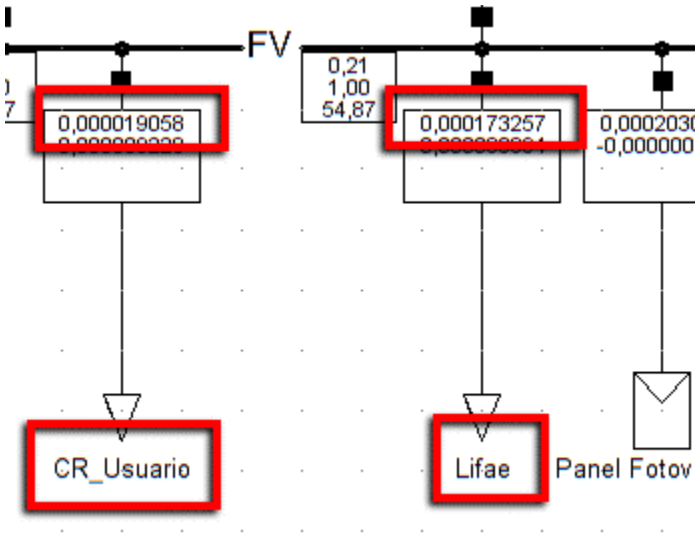



*Figura 6-14 Valores de P en carga residencial y sistema de gestión de excedentes*

Para el generador fotovoltaico con los parámetros de radiación y temperatura determinados para el caso estudio, se obtuvo una potencia activa de 203,1W y el banco de baterías entregó 52,1W (Ver Figura 6-15). Los resultados están en MW.

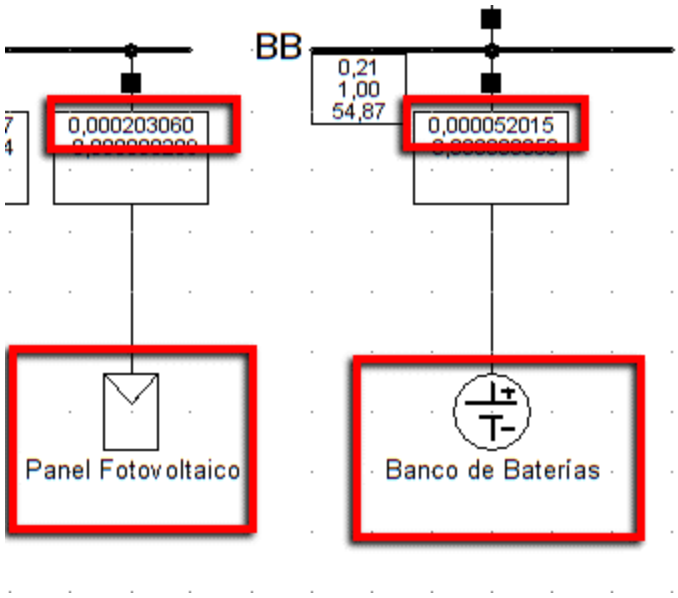



*Figura 6-15 Valores de P en panel fotovoltaico y banco de baterías*

A continuación se muestra la potencia activa total entregada por el transformador de la microrred según el caso estudio planteado, que corresponde a 727,6W (ver Figura 6-16).

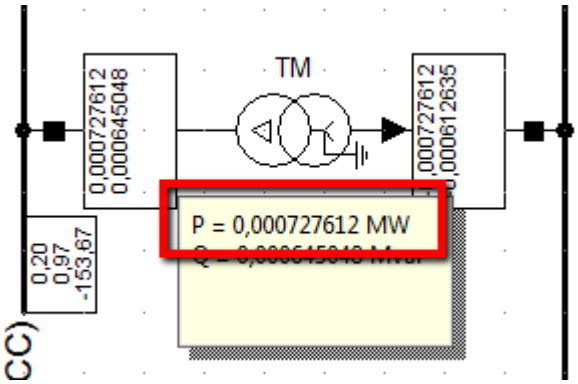



*Figura 6-16 Valor de P en el transformador*

Los resultados que se muestran en los BoxResults de DPF se pueden programar dependiendo de lo que el usuario quiera analizar o evaluar, como se mencionó previamente, en este caso se eligieron P y Q.

### 6.2.3 Casos estudios adicionales

Se ejecutaron dos casos adicionales variando los parámetros de entrada de los SEP, con el fin de observar los distintos flujos de carga en condiciones diferentes al caso estudio principal, que fue con los parámetros más recurrentes.

#### 6.2.3.1 Caso estudio adicional 1

Se ejecuta el caso estudio adicional 1, tomando valores de entrada relacionados con la hora del día, es decir, a las 6AM hay buena irradiancia pero no como lo es al medio día, la temperatura promedio de Bogotá a las 6AM es de 15°C y como recién está comenzando la prueba, el porcentaje de descarga de las baterías es muy poco, al igual que la velocidad y la carga de los motores.

- T=15°C
- I= 500 W/M2
- DOD= 1%
- Hora: 6AM
- Porcentaje de Velocidad y Carga motores: 30%

Como se puede observar en la Figura 6-17 el consumo de potencia por parte de la microrred es menor con respecto al caso estudio principal y corresponde a 366,5 W. (ANEXO 2)

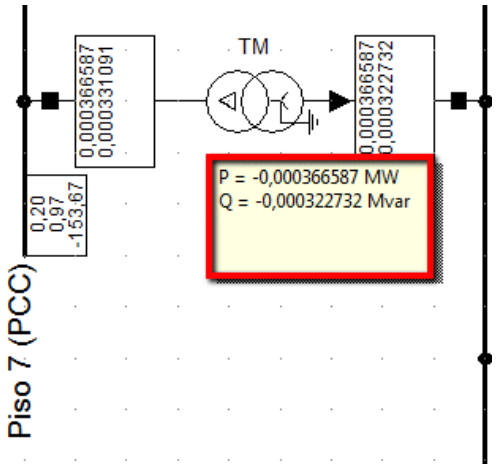



*Figura 6-17 Valores de P y Q en el transformador (caso estudio adicional 1)*

#### 6.2.3.2 Caso estudio adicional 2

Se ejecuta el caso estudio adicional 2, tomando valores de entrada relacionados con la hora del día, es decir, a las 6PM hay poca irradiancia, la temperatura promedio de Bogotá es de 15°C y como ya estaría terminando la prueba, el porcentaje de descarga de las baterías es alto, al igual que la velocidad y la carga de los motores.

- T=15°C
- I= 250 W/M2
- DOD= 40%
- Hora: 6PM
- Porcentaje de Velocidad y Carga motores: 80%

Como se puede observar en la Figura 6-18 el consumo de potencia por parte de la microrred es mayor con respecto al caso estudio principal y corresponde a 1,86 KW. (ANEXO 3)

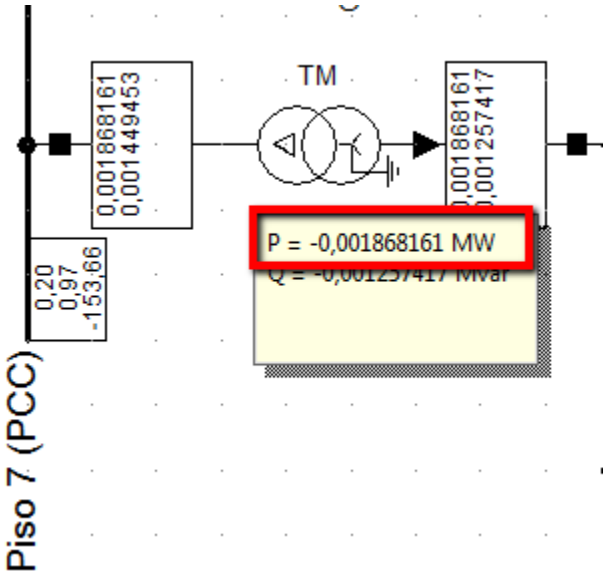



*Figura 6-18 Valor de P en el transformador (caso estudio adicional 2)*

### 6.2.4 Simulaciones adicionales

Aparte del caso estudio principal y los casos adicionales, se realizaron algunas simulaciones con diferentes configuraciones de generación y carga en otros escenarios operativos menos frecuentes, pero igualmente ocurrentes a través del día, desde las 6:00 am hasta las 6:00 pm hora a hora.

Estas 13 simulaciones se realizaron de forma iterativa y se consignaron sus resultados en una tabla de datos, en la que se relacionaron los parámetros de entrada y las variables de salida de la simulación con su respectivo balance de potencia (ANEXO 4).

Como se presenta en la Tabla 6-1, se tienen diferentes parámetros de entrada acordes con la hora del día para todos los SEP de la microrred, así pues, para cada escenario, la microrred se comporta de una manera diferente, arrojando valores de potencia activa y reactiva diferentes, que describen su comportamiento.

*Tabla 6-1 Parámetros de entrada simulación adicional*

| PARAMETROS DE ENTRADA | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***PANEL FOTOVOLTAICO*** | | | ***BANCO BATERIAS*** | ***MOTOR STANDARD*** | | ***MOTOR PREMIUM*** | | ***SISTEMA GESTION*** | ***CARGA RESIDENCIAL*** |
| HORA | IRRADIANCIA [W/M²] | TEMPERATURA °C | DOD [%] | VELOCIDAD [%] | CARGA [%] | VELOCIDAD [%] | CARGA [%] | HORA | HORA |
| 06:00 | 550 | 12 | 0 | 30 | 0 | 30 | 0 | 06:00 | 06:00 |
| 07:00 | 600 | 15 | 1 | 50 | 30 | 50 | 30 | 07:00 | 07:00 |
| 08:00 | 650 | 18 | 2 | 70 | 50 | 70 | 50 | 08:00 | 08:00 |
| 09:00 | 700 | 21 | 4 | 80 | 80 | 80 | 80 | 09:00 | 09:00 |
| 10:00 | 750 | 24 | 8 | 90 | 0 | 90 | 0 | 10:00 | 10:00 |
| 11:00 | 800 | 27 | 12 | 100 | 30 | 100 | 30 | 11:00 | 11:00 |
| 12:00 | 850 | 30 | 16 | 30 | 50 | 30 | 50 | 12:00 | 12:00 |
| 13:00 | 900 | 30 | 20 | 50 | 80 | 50 | 80 | 13:00 | 13:00 |
| 14:00 | 950 | 30 | 24 | 70 | 0 | 70 | 0 | 14:00 | 14:00 |
| 15:00 | 800 | 27 | 28 | 80 | 30 | 80 | 30 | 15:00 | 15:00 |
| 16:00 | 700 | 24 | 32 | 90 | 50 | 90 | 50 | 16:00 | 16:00 |
| 17:00 | 600 | 21 | 36 | 100 | 80 | 100 | 80 | 17:00 | 17:00 |
| 18:00 | 500 | 18 | 40 | 50 | 50 | 50 | 50 | 18:00 | 18:00 |

En seguida se muestra la Tabla 6-2 con los valores de potencia (Variables de salida) que arroja cada SEP después del flujo de carga ejecutado en la microrred.

*Tabla 6-2 Variables de salida simulación adicional*

| | VARIABLES DE SALIDA | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***PANEL FOTOVOLTAICO*** | ***BANCO BATERIAS*** | ***MOTOR STANDARD*** | ***MOTOR PREMIUM*** | ***SISTEMA GESTION*** | ***CARGA RESIDENCIAL*** |
| HORA | POTENCIA [W] | POTENCIA [W] | POTENCIA [W] | POTENCIA [W] | POTENCIA [W] | POTENCIA [W] |
| 06:00 | 133,058 | 60,026 | 33,108 | 66,287 | 174,467 | 25,991 |
| 07:00 | 145,032 | 56,02 | 237,957 | 313,302 | 170,04 | 42,739 |
| 08:00 | 156,02 | 56,013 | 485,639 | 567,611 | 171,551 | 27,093 |
| 09:00 | 167,99 | 51,997 | 816,459 | 945,163 | 171,836 | 19,546 |
| 10:00 | 180,068 | 56,021 | 131,734 | 261,117 | 173,303 | 20,099 |
| 11:00 | 192,042 | 52,011 | 437,903 | 660,993 | 170,994 | 29,032 |
| 12:00 | 203,072 | 48,017 | 242,348 | 268,656 | 173,259 | 19,058 |
| 13:00 | 215,042 | 52,01 | 547,223 | 612,306 | 173,549 | 20,916 |
| 14:00 | 227,086 | 56,021 | 102,496 | 205,991 | 173,615 | 25,217 |
| 15:00 | 192,06 | 52,016 | 379,657 | 352,838 | 173,67 | 25,761 |
| 16:00 | 168,023 | 52,007 | 591,814 | 758,853 | 174,934 | 24,999 |
| 17:00 | 144,943 | 51,98 | 1017,457 | 1119,215 | 178,312 | 28,738 |
| 18:00 | 121,038 | 44,014 | 347,575 | 443,557 | 179,122 | 31,717 |

Finalmente se muestra la diferencia de potencias generadas y consumidas en la Tabla 6-3, en la cual la diferencia de las potencias es el valor el cual la red externa le aporta a la microrred, ya que como se ha dicho esta no es autosuficiente y por esta razón se simula únicamente de forma interconectada.

*Tabla 6-3 Balance de potencias simulación adicional*

| BALANCE DE POTENCIAS | | | |
|---|---|---|---|
| HORA | TOTAL GENERADO | TOTAL CONSUMIDO | DIFERENCIA POTENCIAS |
| | POTENCIA [W] | POTENCIA [W] | POTENCIA [W] |
| 06:00 | 193,084 | 299,853 | -106,769 |
| 07:00 | 201,052 | 764,038 | -562,986 |
| 08:00 | 212,033 | 1251,894 | -1039,861 |
| 09:00 | 219,987 | 1953,004 | -1733,017 |
| 10:00 | 236,089 | 586,253 | -350,164 |
| 11:00 | 244,053 | 1298,922 | -1054,869 |
| 12:00 | 251,089 | 703,321 | -452,232 |
| 13:00 | 267,052 | 1353,994 | -1086,942 |
| 14:00 | 283,107 | 507,319 | -224,212 |
| 15:00 | 244,076 | 931,926 | -687,85 |
| 16:00 | 220,03 | 1550,6 | -1330,57 |
| 17:00 | 196,923 | 2343,722 | -2146,799 |
| 18:00 | 165,052 | 1001,971 | -836,919 |

Para finalizar se muestran las gráficas de potencias generada (ver Figura 6-19) y consumida (ver Figura 6-20) para una mayor evidencia del comportamiento de la microrred.

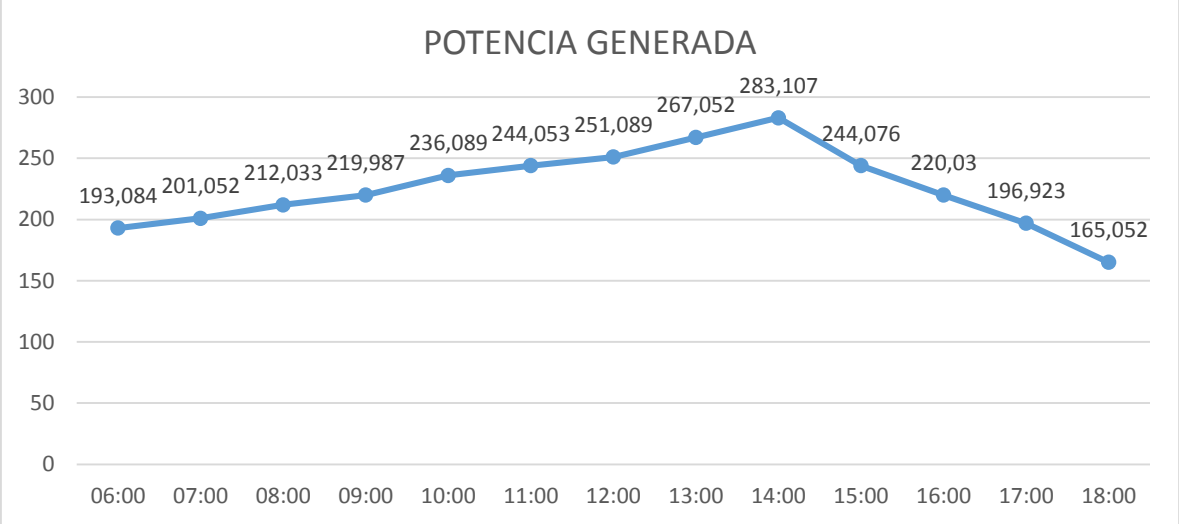



*Figura 6-19 Potencia generada simulación adicional*

Como se puede observar la microrred tiene su mayor aporte de generación por parte del panel fotovoltaico cuando este se acerca al cenit del medio día (12:00m). Ya que el banco de baterías mantiene su potencia entregada casi constante a lo largo del día, se puede concluir que el ascenso de la gráfica es mayormente influenciado por el panel fotovoltaico.

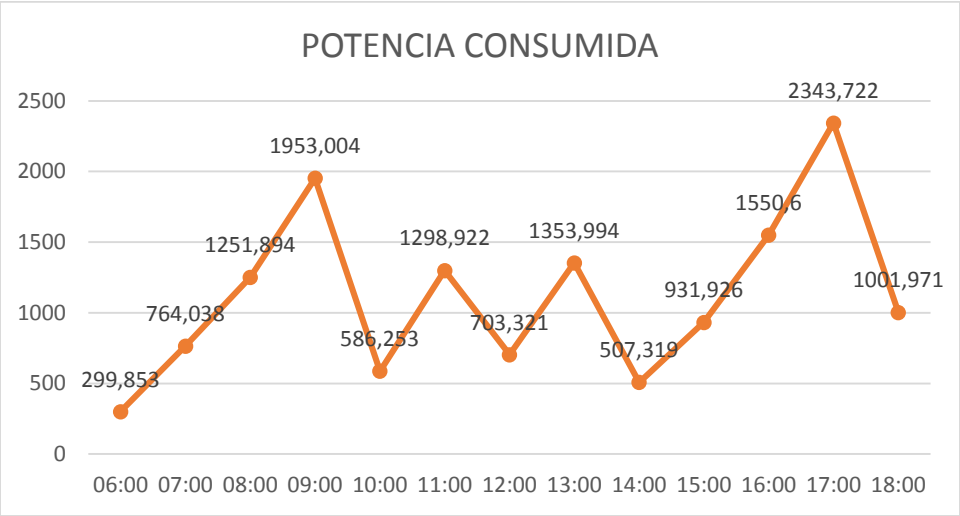



*Figura 6-20 Potencia consumida simulación adicional*

Por otra parte, se ve como la potencia consumida tiene sus mayores picos de consumo cuando los motores se activan cerca de su rango de máxima carga, lo cual ocurre a diferentes horas del día e indiscriminadamente. Adicionalmente, después de observar los resultados de estas simulaciones, llama la atención el caso de dos escenarios en donde la microrred requiere una baja potencia por parte de la red externa, a continuación se relaciona en las tablas el primer caso de ellos:

*Tabla 6-4 Potencias generadas caso 1*

| SEP (Generación) | P (Generada) [W] |
|---|---|
| Panel FV | 133,058 |
| Banco de baterías | 60,026 |
| **Total** | **193,084** |

*Tabla 6-5 Potencias consumidas caso 1*

| SEP (Carga) | P (Consumida) [W] |
|---|---|
| SGE | 174,467 |
| Carga Res | 25,991 |
| Motor Premium | 66,287 |
| Motor Standard | 33,108 |
| **Total** | **299,853** |

Para este caso donde se observa una diferencia de 106 W, la más baja de estas simulaciones, se tuvieron los siguientes parámetros de entrada:

*Tabla 6-6 Parámetros de entrada caso 1*

| HORA | IRRADIANCIA [W/M²] | TEMP. °C | DOD [%] | VELOCIDAD [%] | CARGA [%] | VELOCIDAD [%] | CARGA [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 06:00 | 550 | 12 | 0 | 30 | 0 | 30 | 0 |

De aquí se puede deducir que la carga del motor al estar en 0% afecta considerablemente el bajo consumo de potencia de la microrred, lo cual es verificado en el segundo caso: Aquí la microrred requiere poca potencia por parte de la red externa, a comparación de otros casos previos, ver Tabla 6-7, Tabla 6-8 y Tabla 6-9.

*Tabla 6-7 Potencias generadas caso 2*

| SEP (Generación) | P (Generada) [W] |
|---|---|
| Panel FV | 227,086 |
| Banco de baterías | 56,021 |
| **Total** | **283,107** |

*Tabla 6-8 Potencias consumidas caso 2*

| SEP (Carga) | P (Consumida) [W] |
|---|---|
| SGE | 173,615 |
| Carga Res | 25,761 |
| Motor Premium | 205,991 |
| Motor Standard | 102,496 |
| **Total** | **507,319** |

Para este caso en el cual la diferencia de potencias es de 224 W se tienen los siguientes parámetros de entrada:

*Tabla 6-9 Parámetros de entrada caso 2*

| HORA | IRRADIANCIA [W/M²] | TEMPERATURA °C | DOD [%] | VELOCIDAD [%] | CARGA [%] | VELOCIDAD [%] | CARGA [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14:00 | 950 | 30 | 24 | 70 | 0 | 70 | 0 |

Nuevamente se puede ver que la potencia consumida disminuye notablemente con la ausencia de carga de los motores, por lo tanto se puede deducir que en ausencia de ellos la microrred podría funcionar de modo autónomo en el futuro.

## 6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de ejecutar el flujo de carga se pudo analizar el comportamiento de la microrred observando sus diferentes variables eléctricas, de las cuales se observan tensión, corriente, potencia y pérdidas eléctricas en cada uno de los elementos de la misma. Principalmente se hace un análisis de potencias para encontrar la que aportan los SEP generadores a la microrred y la que consumen las cargas de la misma, como se puede ver la Figura 6-21.

### 6.3.1 Análisis de resultados caso estudio principal

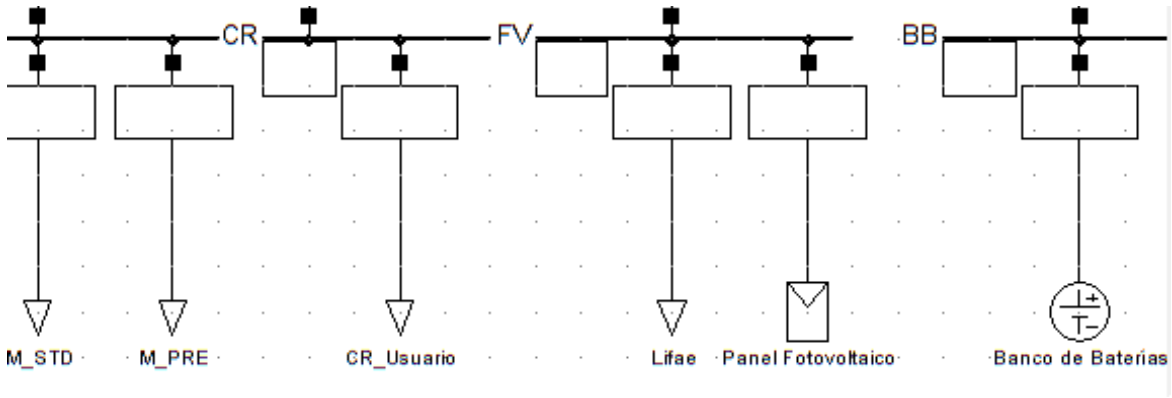



*Figura 6-21 Sección microrred de la simulación en DPF*

Se sumaron las potencias que consumen las cargas, este valor corresponde a 984.3W. Sin embargo, como se observó en los resultados del caso estudio principal, el transformador de la microrred solo estaba suministrando a la misma 727.6W, lo que quiere decir que los SEP generadores están entregando a la microrred la diferencia, tal como se puede verificar en la Figura 6-22Figura 6-22.

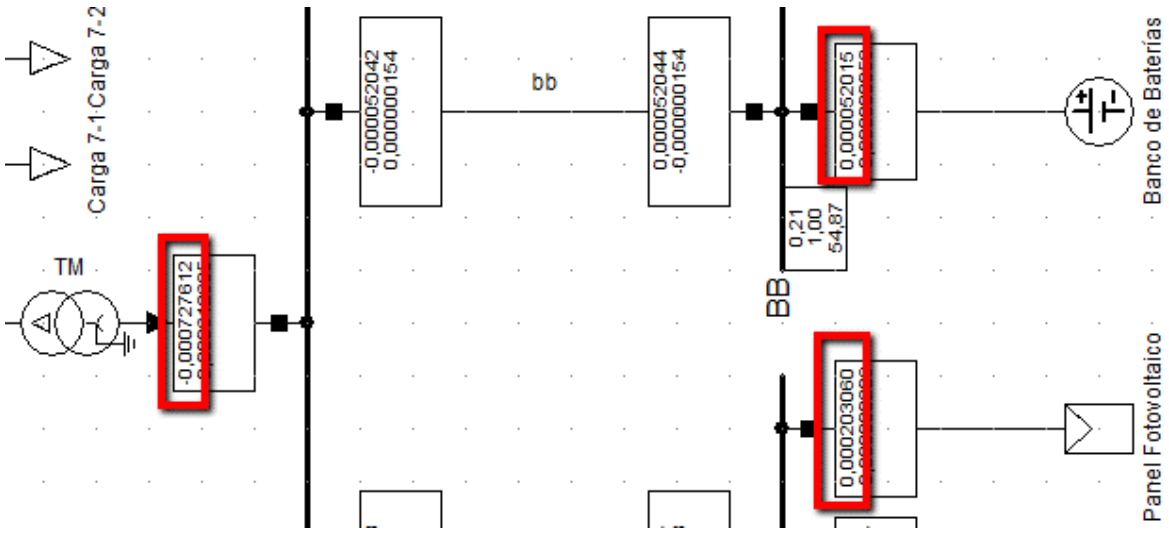



*Figura 6-22 Valor de P en transformador, panel fotovoltaico y banco de baterías*

La diferencia corresponde a 256.7W, de los cuales el panel fotovoltaico está entregando a la microrred 203.1W y el banco de baterías para un DOD de 20% entrega 53.6W completando así el consumo total de la sumatoria de las cargas conectadas a la microrred.

$$P_T = P_{Tr} + P_P + P_B$$

$$984.3W = 727.6W + 203.1W + 53.6W$$

También se pueden observar los valores de potencia consumida por los motores (791.97W), los cuales exceden al valor suministrado de potencia por el transformador. De aquí se puede deducir que en este caso estudio, los motores son los que mayor potencia consumen, a un punto tal que no se pueden conectar a la microrred si ninguno de los SEP generadores está conectado suministrando energía (ver Figura 6-23).

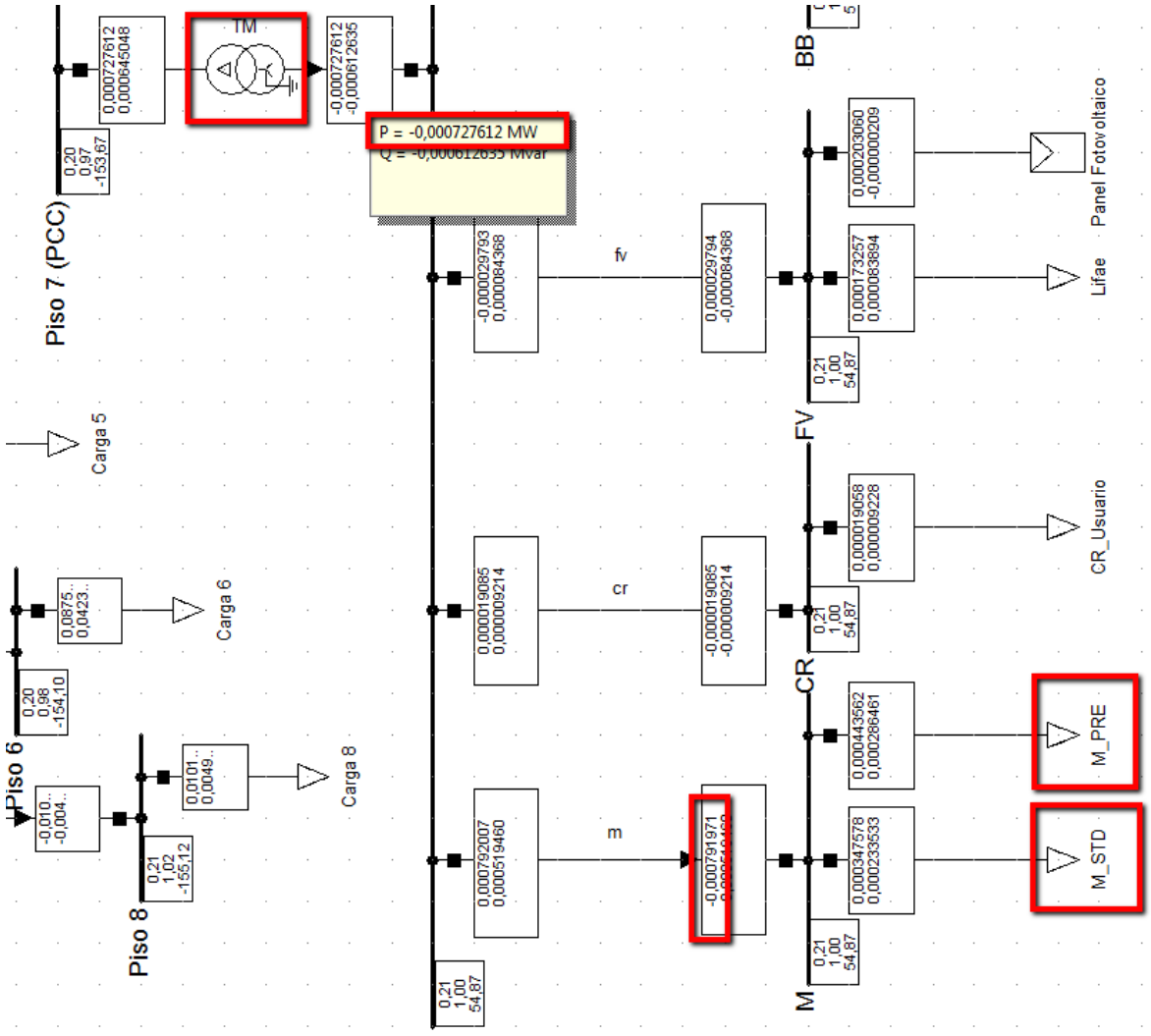



*Figura 6-23 Valor de P en transformador y motores*

El valor de potencia que consume la carga LIFAE (173.2W) es suplida por la potencia entregada por el generador fotovoltaico (203.06W) y aún le sobra para entregar 29,7W a la microrred. (Ver Figura 6-24).

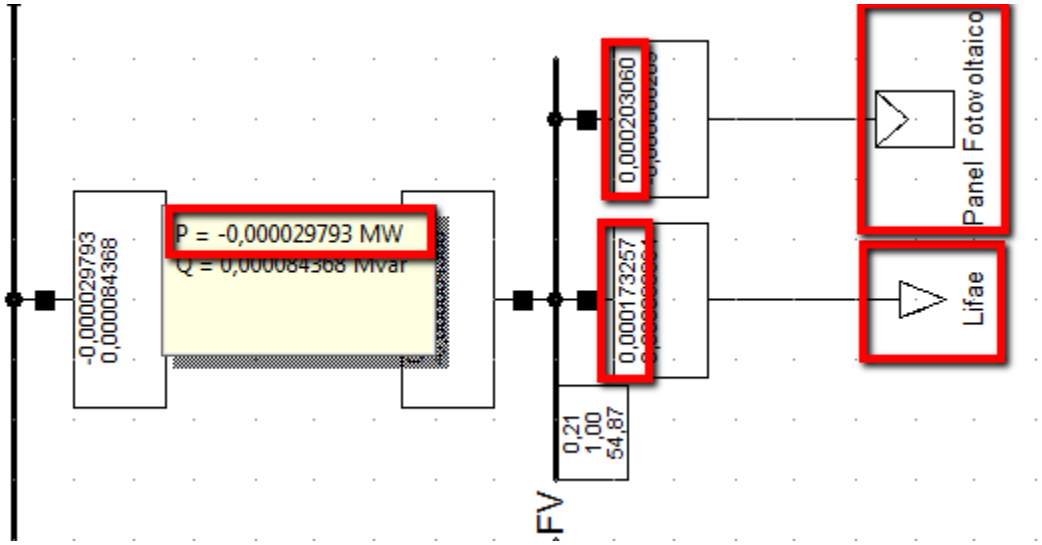



*Figura 6-24 Diferencia de valores de P en carga LIFAE y panel fotovoltaico*

Finalmente, se observó el banco de baterías entregando una potencia de 52W. Puesto que cada batería para un DOD del 20% entrega aproximadamente 13W y esto por 4 baterías (el banco se compone de 4 baterías), se obtienen exactamente 52W el cual era un valor esperado para este caso estudio de acuerdo al perfil de salida ingresado en la simulación (ver Figura 6-25).

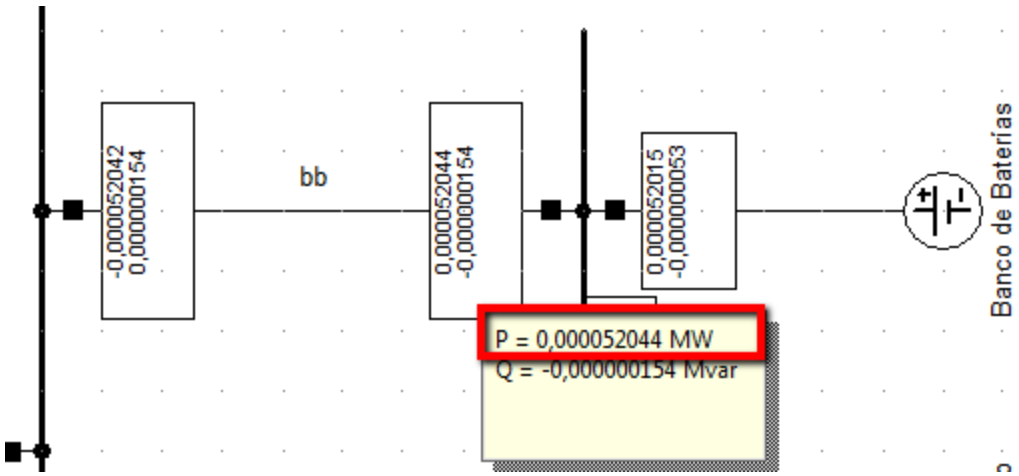



*Figura 6-25 Valor de P banco de baterías*

Finalmente se puede analizar de forma general las siguientes observaciones de las simulaciones adicionales realizadas al final de los casos estudio.

- La potencia del panel fotovoltaico se mantiene desde un valor mínimo de potencia de 120 W hasta 230 W a medida que se va a acercando a su máximo valor de irradiancia con la llegada del cenit.
- La potencia que el banco de baterías entrega es casi constante entre 50 W y 60 W y solo se ve disminuida después del 25% de descarga (DOD).
- El sistema de gestión de excedentes mantiene su consumo constante de potencia en un valor cercano a los 175 W.
- Los motores son los SEP de más influencia en el consumo de la microrred, no se recomienda conectarlos a ella, mientras no se agreguen más SEP de generación.
- La carga residencial mantiene su consumo de potencia entre 20 W y 30 W y es el SEP menos influyente en el comportamiento de la microrred dada la naturaleza resistiva de sus cargas.

### 6.3.2 Perfil de salida

El perfil de salida es un registro de datos que se puede tomar de la simulación, este incluye las variables de tensión, corriente, potencia y pérdidas de cada uno de los elementos que la conforma. La simulación cuenta con un módulo de exportación de resultados para un análisis más cómodo, y para su posible utilización como perfil de salida en otros proyectos que requieran datos de la microrred. Este caso estudio se guarda en un archivo de Bloc de notas dispuesto para tal fin y del cual se pueden extraer los datos para corroborar los valores que brindan los cuadros de resultados de DPF, para que el usuario tenga un manejo más cómodo de estos, tal como se puede ver en la Figura 6-26.

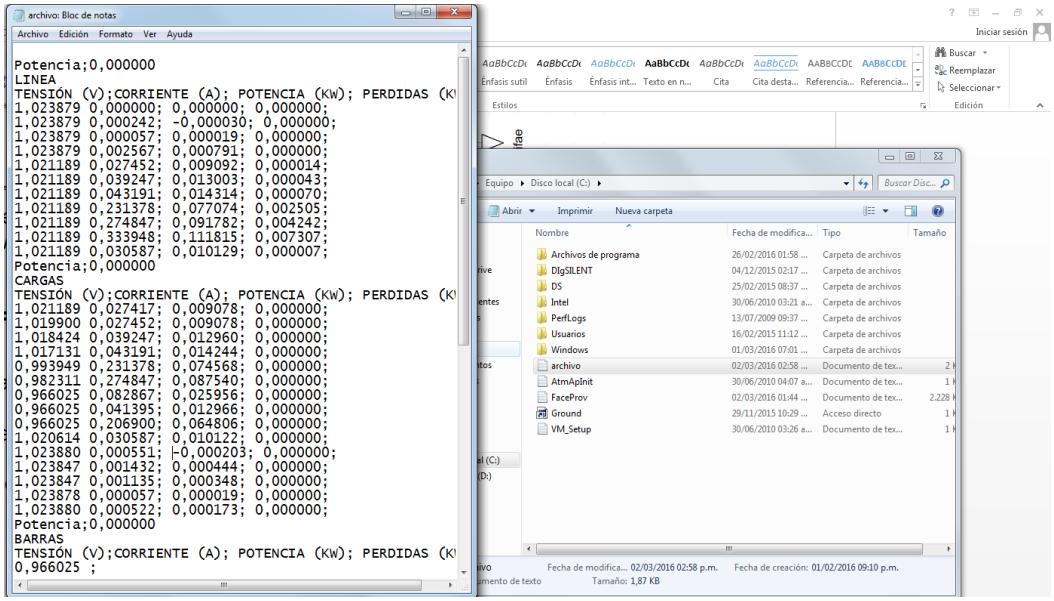



*Figura 6-26 Perfil de salida en bloc de notas*

# 7 CONCLUSIONES

- El objetivo general de este proyecto de grado fue simular la microrred eléctrica que se implementará en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital FJDC. Este objetivo fue alcanzado con éxito, ya que se consiguió integrar los diferentes SEP que componen la microrred y simularlos conjuntamente, obteniendo parámetros estimativos como tensión, corriente, potencia activa y pérdidas eléctricas; los cuales ayudan a predecir el comportamiento de la misma cuando se implemente en la realidad.

- Se diseñó e implementó una estructura de la microrred en DIgSILENT® basada en la revisión generada de la estructura eléctrica del edificio Sabio Caldas de la Universidad Distrital FJDC, conteniendo los equivalentes de red y las cargas que componen la microrred dentro de la misma. Esto permitió desarrollar el modelo de la simulación, sobre el cual se integraron los SEP de cargas y generación para posteriormente trabajar sobre estos y sus variables de salida.

- Se programó y se implementó cada bloque de la estructura de la microrred que emula el comportamiento de cada SEP en DIgSILENT®. Para esto se utilizan los perfiles de salida de estos para que sean importados desde la simulación, logrando así desarrollar casos estudio en los cuales se realizan cálculos de flujo de carga en estado estable y se obtienen las variables de salida de potencia activa, tensión, corriente y pérdidas eléctricas del todo el conjunto de la microrred.

- Después de revisar y obtener los respectivos perfiles de salida de los SEP que pertenecerán a la microrred, se obtuvo con la mayoría de ellos resultados que demuestran la efectividad de la simulación, puesto que en su respectiva validación, se demostró que la importación de las variables de salida de cada SEP mostró un margen de error de 0% en todos los casos, contribuyendo así a una gran confiabilidad en los resultados finales de la simulación.

- Se consigue la implementación de todos los SEP recolectados en DIgSILENT®, comprobando así que el software escogido era el indicado para el presente proyecto. El simulador demuestra que su versatilidad es la indicada para este tipo de proyectos, su suite de programación DPL permitió desarrollar la integración de los SEP y además lo hace de forma efectiva utilizando matrices y códigos de programación, estandarizando los datos para ser manejados de forma eficaz.

- Se elaboró un documento en el cual se muestran los detalles de la revisión realizada a la estructura de la microrred y sus respectivos componentes. Además, el documento contiene información detallada de la programación realizada en DIgSILENT® PowerFactory para lograr modelar la estructura de la microrred en la simulación con sus respectivos componentes, SEP de generación y carga y demás, así como las pruebas, procedimientos, casos estudio y resultados obtenidos por la simulación, permitiendo tener un registro completo de los datos entregados y un análisis de la misma, para generar las respectivas conclusiones del caso.

- DIgSILENT® PowerFactory 14.1 no ofrece conversores AC/DC – DC/DC ni bancos de baterías que sirvan para asemejar el comportamiento de los que se van a implementar en la microrred. Los módulos con los que inicialmente se intentó implementar los bloques de la microrred, no eran los indicados puesto que estos estaban diseñados para aplicaciones de alta potencia y resultaba mucho más complejo que modelarlos de la manera que se hicieron, esto debido a que la programación realizada en el proyecto que modeló el panel fotovoltaico contenía el código para realizar la conversión AC/DC intrínseca que debía tener el banco de baterías, por lo que se concluye que para manejo de datos en matrices resulta mejor programar en DPL los modelos de elementos como los conversores AC/DC – DC/DC.

- Una vez implementada la simulación se recomienda tener especial atención con los motores eléctricos ya que de acuerdo a los resultados obtenidos no se aconsejaría conectar los motores a la misma, ya que estos tienen un nivel de consumo de potencia muy alto en comparación con la potencia que se genera en la microrred.

- Se puede concluir que los SEP de mayor relevancia son el panel fotovoltaico y los motores eléctricos, puesto que sus parámetros de entrada afectan de forma significativa el comportamiento de la microrred, mientras que el sistema de gestión de excedentes, el banco de baterías y la carga residencial, tienen comportamientos poco dinámicos, por el contrario sus variables de salida se muestran casi constantes a través de las diferentes configuraciones de generación y carga.

- Finalmente se puede concluir que la simulación es una herramienta útil y dinámica ya que puede verse mejorada a través de la adición de módulos en el futuro y la programación abierta y flexible que posee, gracias al comando DPL.

# 8 TRABAJOS FUTUROS

La simulación de la microrred de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, puede ser implementada con todos los elementos restantes que la conforman como generadores, cargas, sistema de control etc. Esto permitirá tener un estudio detallado de la microrred para su implementación final, brindando datos precisos acerca de los parámetros eléctricos necesarios para su desarrollo completo.

Implementar los perfiles de salida de la simulación con registros más detallados que incluyan datos de horas, minutos y porcentajes más precisos de uso de las cargas. Esto permitirá obtener un análisis completo de la simulación en cualquiera de sus escenarios sin estar limitado por valores estándar.

Aprovechar los perfiles de salida que se obtuvieron de toda la simulación para implementar la microrred teniendo en cuenta los parámetros eléctricos que arrojo la misma. Se puede implementar una simulación diferente importando los perfiles de salida de esta simulación de la microrred de la misma manera que se hizo acá, adicionándola como un bloque para minimizar la cantidad de elementos y hacer más efectiva la nueva simulación.

Si se obtiene una nueva versión del DIgSILENT se podría implementar la simulación con los bloques de convertidores adecuados, ya que estos fueron programados para este caso, lo cual permitiría tener mayor precisión a la hora de calcular ciertas perdidas que estos convertidores desarrollan. Para esto se puede aprovechar nuevamente los perfiles de salida de la simulación teniendo en cuenta las consideraciones de los nuevos elementos, ya que la simulación es flexible y permite adiciones y cambios en su código base.

# 9 BIBLIOGRAFÍA


[1] C. Trujillo, “Prototipo de una microrred eléctrica en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas PME-UD.” Bogotá, Colombia, 2012.

[2] R. Acuña, M. Acosta, and S. Zurita, “GENERACIÓN DISTRIBUIDA: CONCEPTOS Y APLICACIONES,” 2009.

[3] Unidad de Planeación Minero Energética, “Informe Mensual De Variables De Generación Y Del Mercado Eléctrico Colombiano – Diciembre De 2015,” Bogotá, Colombia, 2015.

[4] IEA, *Technology Roadmap Smart Grids*. France: International Energy Agency, 2011.

[5] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, “An Overview of Ongoing Research, Development, and Demonstration Projects,” no. august, pp. 78–94, 2007.

[6] L. R. Izquierdo, J. M. Galán, J. I. Santos, and R. del Olmo, “Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas,” *Rev. Metodol. Ciencias Soc.*, vol. 16, pp. 85–112, 2008.

[7] J. Castaño and G. J. López, “Herramientas Computacionales para el Análisis y Monitoreo de Sistemas de Potencia Basadas en Modelos Angulares,” 2012.

[8] C. Schw and L. Tao, “Microgrid: Architectures and Control,” pp. 1–24, 2003.

[9] Ecología verde, “Microrredes rurales de renovables para un autoabastecimiento completo,” 2016. [Online]. Available: http://www.ecologiaverde.com/microrredes-rurales-de-renovables-para-un-autoabastecimiento-completo/.

[10] H. Bs, Y. Budiyanto, and R. Setiabudy, “Review of Microgrid Technology,” pp. 127–132, 2013.

[11] B. Kroposki and R. Lasseter, “Making microgrids work,” *Power and Energy*, no. June, 2008.

[12] Smart Grids Info, “II Congreso SG: Desarrollo de una Microrred de laboratorio,” 2015. [Online]. Available: https://www.smartgridsinfo.es/comunicaciones/ii-congreso-sg-desarrollo-de-una-microrred-de-laboratorio.

[13] F. Ramón Ducoy, “Implantación de Energías Renovables en una Planta de Producción de Amoniaco,” Universidad de Sevilla, 2012.

[14] R. Quintanilla and J. M. Yarza, “Nuevas exigencias y aplicaciones de comunicaciones para la protección de microrredes,” in *VI Seminario Internacional: SMART GRID en Sistemas de Distribución y Transmisión de Energía Eléctrica*, 2010, pp. 43–50.

[15] S. Arefifar and Y. Mohamed, “DG Mix , Reactive Sources and Energy

Storage Units for Optimizing Microgrid Reliability and Supply Security," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1835–1844, 2014.

[16] F. M. González-Longatt, "Análisis de Sistemas de Potencia empleando DIgSILENT PowerFactory: Análisis en Estado Estacionario," 2013.

[17] A. de Ulloa, "4. Fuentes de energía," in *Proyecto Antonio de Ulloa*, Sevilla, España, 2003, pp. 8–13.

[18] F. de Pablo, "Energía y fuentes de energía. La produducción eléctrica.," 2010.

[19] El Congreso de Colombia, *Ley 689 de 2001, Por la cual se modifica parcialmente la Ley 142 de 1994*. Colombia, 2001, p. Definiciones Especiales.

[20] Comisión de Regulación de Energía y Gas, *Resolución CREG 084 de 1996, Por la cual se reglamentan las actividades del Autogenerador conectado al Sistema Interconectado Nacional (SIN)*. Colombia, 1996, p. Definiciones.

[21] Comisión de Regulación de Energía y Gas, *Resolución CREG 107 de 1998, Por la cual se aclara el alcance de las disposiciones establecidas en la Resolución CREG-085 de 1996 que reglamenta la actividad de Cogeneración en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y se expide una Resolución autoconten*. Colombia, 1998, p. Definiciones.

[22] Comisión de Regulación de Energía y Gas, *Resolución CREG 086 de 1996, Por la cual se reglamenta la actividad de generación con plantas menores de 20 MW que se encuentra conectado al Sistema Interconectado Nacional (SIN)*. Colombia, 1996, p. Definiciones.

[23] DIgSILENT PowerFactory, "DIgSILENT," 2014. [Online]. Available: www.digsilent.de.

[24] A. V Ubisse, K. A. Folly, K. O. Awodele, and D. T. Oyedokun, "Comparison of Matlab PST, PSAT and DigSILENT for Transient Stability Studies on Parallel HVAC- HVDC Transmission Lines," p. 6, 2010.

[25] Etesa, "Plan de expansión del sistema interconectado nacional 2007–2021," Panamá, 2007.

[26] J. Santana and V. Hinojosa, "Análisis de la operación del sistema nacional interconectado del Ecuador utilizando programación en DIgSILENT-DPL," p. 10, 2009.

[27] F. Mohamed, "Microgrid Modelling and Simulation," Helsinki University of Technology, Finland, Helsinki, Finlandia, 2006.

[28] A. V. Uscategui, J. Patricio, I. Rivera, A. S. Oses, and R. A. E. González, "Desarrollo de simulador integrado de microrredes inteligentes," Universidad de Chile, 2014.

[29] F. Locment and M. Sechilariu, "Modeling and simulation of DC microgrids for electric vehicle charging stations," *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 4335–4356, 2015.

[30] J. A. Hernández Mora, “Metodología para el análisis técnico de la masificación de sistemas fotovoltaicos como opción de generación distribuida en redes de baja tensión,” Universidad Nacional de Colomnbia, 2012.

[31] A. F. Campos Fajardo and R. A. Gómez Porras, “Metodología para incrementar los ciclos de uso de un banco de baterías de Plomo-ácido con diferentes tipos de arreglos en paralelo,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015.

[32] F. J. Cadena Villalba and M. I. Ballesteros Camacho, “Distorsión armónica generada por accionamientos eléctricos de control de velocidad basados en motores de inducción de propósito general y eficiencia premium,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015.

[33] D. A. Avila Charry, L. C. Korez Franco, and J. A. Murillo Zuñiga, “Diseño e implementación de un sistema de gestión de excedentes de la energía generada por un sistema de generación distribuida, caso de estudio laboratorio de sistemas fotovoltaicos intercontectados de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2013.

[34] SMA Solar Technology, “Installation Manual: SUNNY BOY 240, SUNNY MULTIGATE.” 2013.

[35] M. A. Urueña Saavedra, D. A. Balaguera Cañola, and A. F. Cortés Borray, “Emulador a pequeña escala de un sistema fotovoltaico conectado a la red, bajo la aplicación de generación distribuida para un usuario tipo residencial,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2013.

[36] Materialescarlos, “Geografia de España,” 2014. [Online]. Available: http://materialescarlos.blogspot.com.co/2014/03/geografia-de-espana-tema-9-los-espacios.html.

[37] BiblioCAD, “Banco de baterías 3D,” 2016. [Online]. Available: http://www.bibliocad.com/biblioteca/banco-de-baterias-3d_45104.

[38] Digsilent GmbH and S. Weigel, “Static Generator Technical Documentation,” in *DIgSILENT Technical Documentation*, 14.0.516., Germany, 2009, p. 28.

[39] IDEAM and UPME, “Mapas de radiacón solar global sobre una superficie plana,” Colombia, 2015.

# ANEXOS

## Anexo 1. Caracterización de cargas edificio Sabio Caldas

Este anexo tiene como finalidad describir la caracterización realizada a las cargas conectadas en cada uno de los pisos del edificio Sabio Caldas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas ya que se plantea conectar la microrred en el LIFAE que se encuentra ubicado en el séptimo piso de la Universidad y el transformador principal al cual se interconectará la microrred se encuentra en el sótano.

La caracterización desarrollada fue necesaria para estimar la potencia que se consume actualmente del transformador principal de la Universidad y así mismo saber la potencia disponible, en caso tal de que la microrred esté interconectada.

**Metodología**

Para poder hacer la caracterización se hizo necesario acudir al ingeniero eléctrico de la Universidad, para así poder hacer una inspección general de todos los tableros del edificio y conocer las corrientes soportadas por los interruptores termo magnéticos de cada piso. Con los datos recopilados, se hicieron los cálculos necesarios para calcular la potencia aproximada y así incluirla dentro de las cargas de la simulación.

Cálculo de potencia aproximada para el **piso 1** el cual incluye la iluminación de los sótanos:

Se tiene un interruptor termo-magnético totalizador de 70 A, para lo cual se calcula la potencia de la siguiente manera:

$$P = V * I * Fp = 220V * 70A * 0.9 = 13860W = 13.86kW \quad \text{Ec. (1)}$$

Cálculo de potencia aproximada para el **piso 2**:

El totalizador para este piso también es de 70 A, por ende, la potencia también es de 13.86kW. Ver Ec. (1)

Cálculo de potencia aproximada para el **piso 3**:

El totalizador para este piso es de 100 A, para lo cual se calcula la potencia de la siguiente manera:

$$P = V * I * Fp = 220V * 100A * 0.9 = 19800W = 19.8kW \quad \text{Ec. (2)}$$

Cálculo de potencia aproximada para el **piso 4**:

Se tienen 2 interruptores totalizadores para el piso 4, uno de 70 A y otro de 40 A para un total de 110 A, para lo cual se calcula la potencia de la siguiente manera:

$$P = V * I * Fp = 220V * 110A * 0.9 = 21780W = 21.78kW \quad \text{Ec. (3)}$$

Cálculo de potencia aproximada para el **piso 5**:

Se tienen 5 interruptores totalizadores para el piso 5, dos de 100 A, otro de 50 A, otro de 200 A y otro de 125 A para un total de 575 A, para lo cual se calcula la potencia de la siguiente manera:

$$P = V * I * Fp = 220V * 575A * 0.9 = 113850W = 113.85kW \quad \text{Ec. (4)}$$

Cálculo de potencia aproximada para el **piso 6**:

Se tienen 3 interruptores totalizadores para el piso 6, uno de 500 A, otro de 125 A y otro de 50 A para un total de 675 A, para lo cual se calcula la potencia de la siguiente manera:

$$P = V * I * Fp = 220V * 675A * 0.9 = 133650W = 133.65kW \quad \text{Ec. (5)}$$

Cálculo de potencia aproximada para el **piso 7** el cual fue dividido en los 3 diferentes tableros para así tener uno independiente para el LIFAE:

El interruptor termo-magnético del LIFAE es de 500 A, para lo cual se calcula la potencia de la siguiente manera:

$$P = V * I * Fp = 220V * 500A * 0.9 = 99000W = 99kW \quad \text{Ec. (6)}$$

Otro de los interruptores del piso 7 es de 200 A, para lo cual se calcula la potencia de la siguiente manera:

$$P = V * I * Fp = 220V * 200A * 0.9 = 39600W = 39.6kW \quad \text{Ec. (7)}$$

El último de los interruptores del piso 7 es de 100 A, por ende, la potencia es 19.8kW al igual que la del piso 3. Ver Ec. (2)

Cálculo de potencia aproximada para el **piso 8**:

El totalizador para este piso es de 80 A, para lo cual se calcula la potencia de la siguiente manera:

$$P = V * I * Fp = 220V * 80A * 0.9 = 15840W = 15.84kW \quad \text{Ec. (8)}$$

Según datos de placa el transformador que alimenta todo el edificio Sabio Caldas es de 630KVA.

Para la simulación todas las cargas se multiplicaron por un factor de utilización de 0.6 ya que no se usa el 100% de la carga disponible.

## ANEXO 2. Resultados caso estudio 1

Después de ejecutarse el caso estudio 1, se pudo observar en los cuadros de resultados (BoxResults) de DPF, los valores de potencia activa y potencia reactiva para todas las cargas y en las barras, la tensión de línea a línea, la tensión en por unidad (p.u.) y su respectivo desfase.

**Caso estudio adicional 1**

Se tomaron valores de entrada relacionados con la hora del día en que se ejecuta el caso estudio adicional 1.

- T=15°C
- I= 500 W/M2
- DOD= 1%
- Hora: 6AM
- Porcentaje de Velocidad y Carga motores: 30%

Para la carga motor estándar se observó una potencia activa entregada de 154,5 W y una potencia reactiva de 103,8 VAR. Como se observa en la Ilustración 1

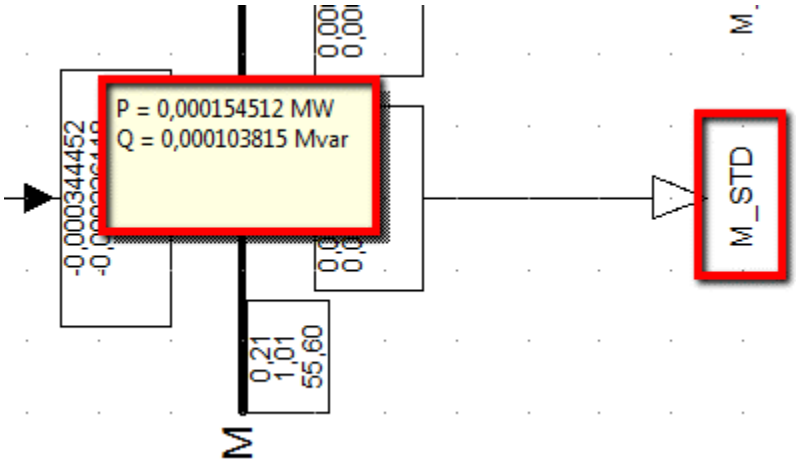



*Ilustración 1 Valores de P y Q motor estándar*

Para la carga motor Premium, la potencia activa es 189,6W y la potencia reactiva es de 122,4W (ver Ilustración 2).

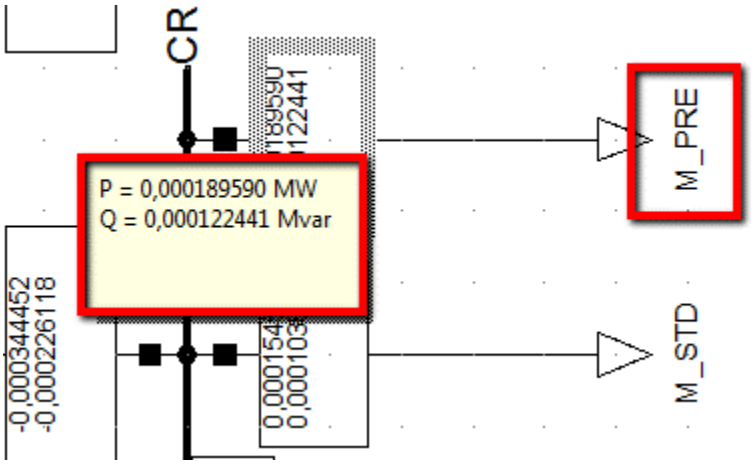



*Ilustración 2 Valores de P y Q motor Premium*

En el caso de la carga residencial (CR_Usuario en la Ilustración 3) y la carga del sistema de gestión de excedentes (Lifae en la Ilustración 3) para la hora del día 6am, se obtuvieron los valores de potencia activa de 25,9 W y 174,5W respectivamente. Los datos de la figura están en MW.

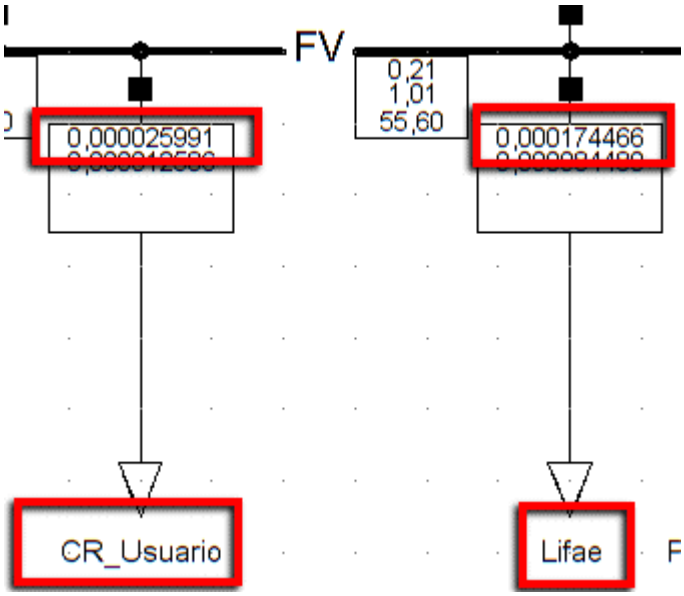



*Ilustración 3 Valores de P en carga residencial y sistema de gestión de excedentes*

Para el generador fotovoltaico con los parámetros de radiación y temperatura determinados para el caso estudio, se obtuvo una potencia activa de 121,1W y el banco de baterías entregó 56,02W (Ver Ilustración 4). Los resultados están en MW.

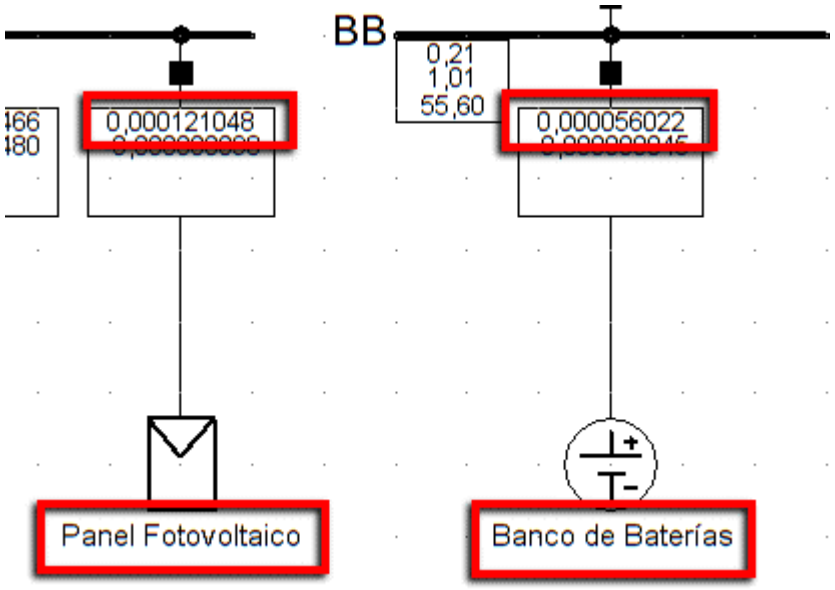



*Ilustración 4 Valores de P en panel fotovoltaico y banco de baterías*

A continuación, se muestra la potencia activa total entregada por el transformador de la microrred según el caso estudio planteado, que corresponde a 366,6W (ver Ilustración 5).

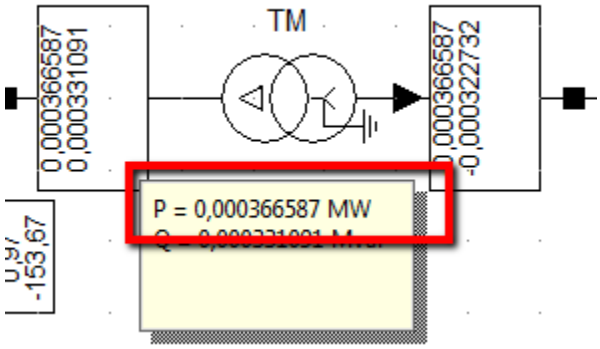



*Ilustración 5 Valor de P en el transformador*

## ANEXO 3. Resultados caso estudio 2

Después de ejecutarse el caso estudio 2, se pudo observar en los cuadros de resultados (BoxResults) de DPF, los valores de potencia activa y potencia reactiva para todas las cargas y en las barras, la tensión de línea a línea, la tensión en por unidad (p.u.) y su respectivo desfase.

**Caso estudio adicional 2**

Se tomaron valores de entrada relacionados con la hora del día en que se ejecuta el caso estudio adicional 2.

- T=15°C
- I= 250 W/M2
- DOD= 40%
- Hora: 6PM
- Porcentaje de Velocidad y Carga motores: 80%

Para la carga motor estándar se observó una potencia activa entregada de 816,4 W y una potencia reactiva de 548,4 VAR. Como se observa en la Ilustración 6

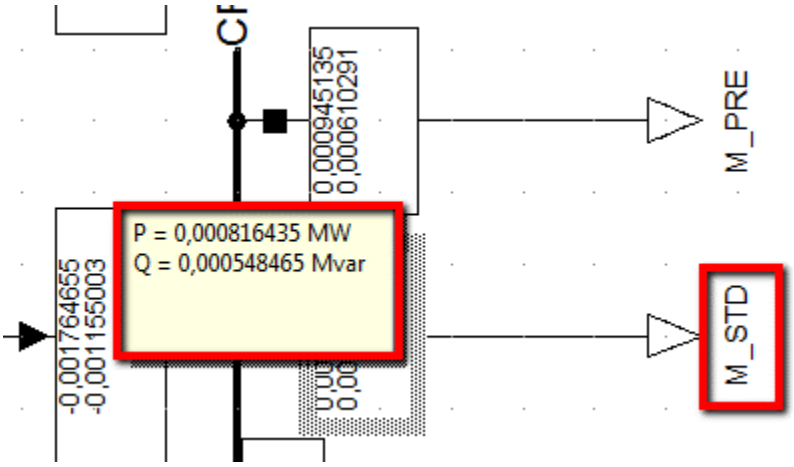



*Ilustración 6 Valores de P y Q motor estándar*

Para la carga motor Premium, la potencia activa es 945,1W y la potencia reactiva es de 610,3W (ver Ilustración 7).

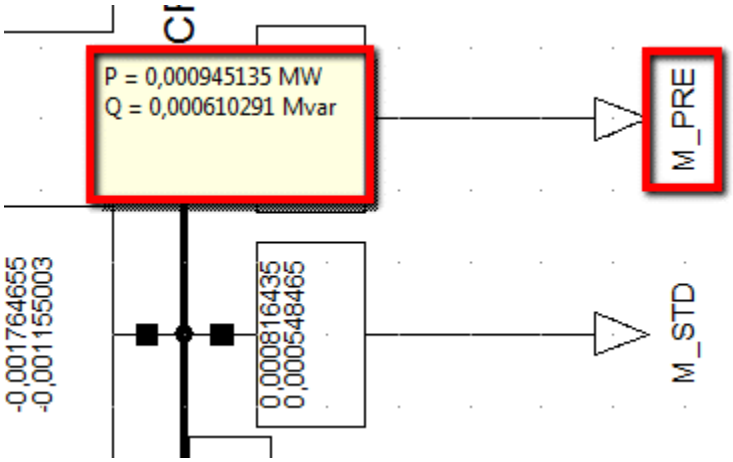



*Ilustración 7 Valores de P y Q motor Premium*

En el caso de la carga residencial (CR_Usuario en la Ilustración 8) y la carga del sistema de gestión de excedentes (Lifae en la Ilustración 8) para la hora del día 6pm, se obtuvieron los valores de potencia activa de 31,7 W y 179,1W respectivamente. Los datos de la figura están en MW.

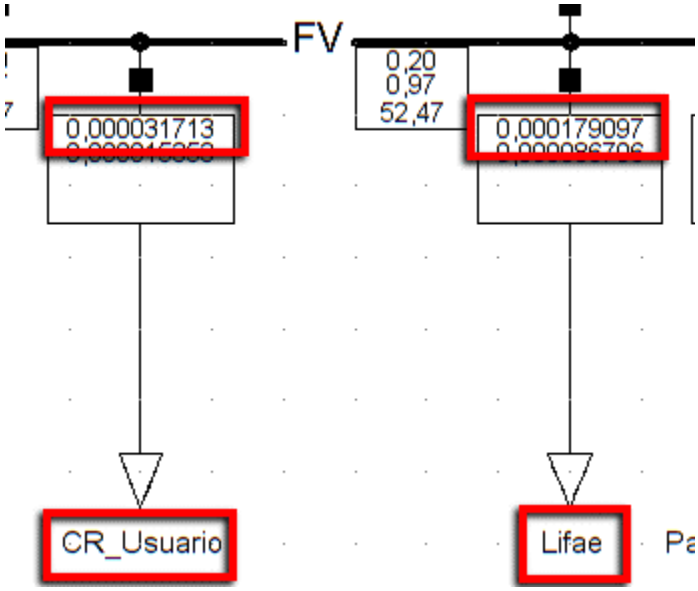



*Ilustración 8 Valores de P en carga residencial y sistema de gestión de excedentes*

Para el generador fotovoltaico con los parámetros de radiación y temperatura determinados para el caso estudio, se obtuvo una potencia activa de 59,99W y el banco de baterías entregó 43,99W (Ver Ilustración 9). Los resultados están en MW.

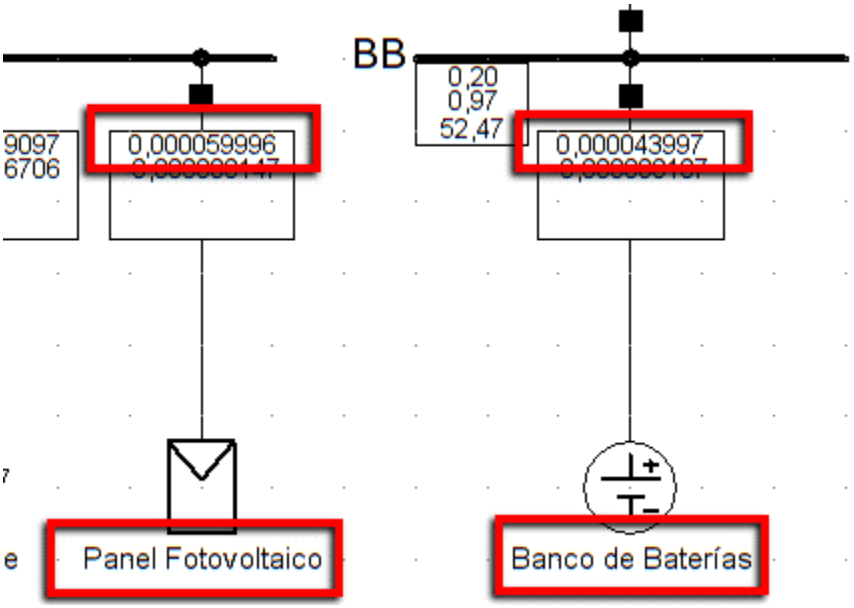



*Ilustración 9 Valores de P en panel fotovoltaico y banco de baterías*

A continuación se muestra la potencia activa total entregada por el transformador de la microrred según el caso estudio planteado, que corresponde a 186,8W (ver Ilustración 10).

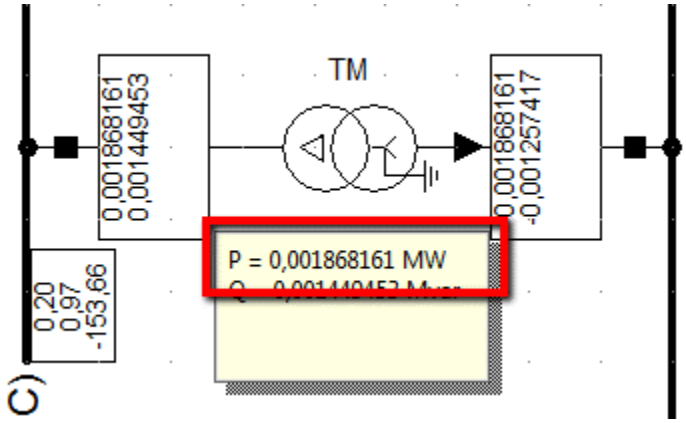



*Ilustración 10 Valor de P en el transformador*

## Anexo 4. Simulaciones adicionales

| PARÁMETROS DE ENTRADA | | | | | | | | | | OUT | | | | | | TOTAL | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *PANEL* | | | *BATTS* | *MOTOR 1* | | *MOTOR 2* | | *SGE* | *CR* | PANEL | BATTS | MOTOR 1 | MOTOR 2 | SGE | CR | TOTAL GEN | TOTAL CON | DIFERENCIA |
| HORA | IRRAD. | TEMP. | DOD | VEL | CARGA | VEL | CARGA | HORA | HORA | POTENCIA | POTENCIA | POTENCIA | POTENCIA | POTENCIA | POTENCIA | POTENCIA | POTENCIA | POTENCIA |
| 06:00 | 550 | 12 | 0 | 30 | 0 | 30 | 0 | 06:00 | 06:00 | 133,058 | 60,026 | 33,108 | 66,287 | 174,467 | 25,991 | 193,084 | 299,853 | -106,769 |
| 07:00 | 600 | 15 | 1 | 50 | 30 | 50 | 30 | 07:00 | 07:00 | 145,032 | 56,02 | 237,957 | 313,302 | 170,04 | 42,739 | 201,052 | 764,038 | -562,986 |
| 08:00 | 650 | 18 | 2 | 70 | 50 | 70 | 50 | 08:00 | 08:00 | 156,02 | 56,013 | 485,639 | 567,611 | 171,551 | 27,093 | 212,033 | 1251,894 | -1039,861 |
| 09:00 | 700 | 21 | 4 | 80 | 80 | 80 | 80 | 09:00 | 09:00 | 167,99 | 51,997 | 816,459 | 945,163 | 171,836 | 19,546 | 219,987 | 1953,004 | -1733,017 |
| 10:00 | 750 | 24 | 8 | 90 | 0 | 90 | 0 | 10:00 | 10:00 | 180,068 | 56,021 | 131,734 | 261,117 | 173,303 | 20,099 | 236,089 | 586,253 | -350,164 |
| 11:00 | 800 | 27 | 12 | 100 | 30 | 100 | 30 | 11:00 | 11:00 | 192,042 | 52,011 | 437,903 | 660,993 | 170,994 | 29,032 | 244,053 | 1298,922 | -1054,869 |
| 12:00 | 850 | 30 | 16 | 30 | 50 | 30 | 50 | 12:00 | 12:00 | 203,072 | 48,017 | 242,348 | 268,656 | 173,259 | 19,058 | 251,089 | 703,321 | -452,232 |
| 13:00 | 900 | 30 | 20 | 50 | 80 | 50 | 80 | 13:00 | 13:00 | 215,042 | 52,01 | 547,223 | 612,306 | 173,549 | 20,916 | 267,052 | 1353,994 | -1086,942 |
| 14:00 | 950 | 30 | 24 | 70 | 0 | 70 | 0 | 14:00 | 14:00 | 227,086 | 56,021 | 102,496 | 205,991 | 173,615 | 25,217 | 283,107 | 507,319 | -224,212 |
| 15:00 | 800 | 27 | 28 | 80 | 30 | 80 | 30 | 15:00 | 15:00 | 192,06 | 52,016 | 379,657 | 352,838 | 173,67 | 25,761 | 244,076 | 931,926 | -687,85 |
| 16:00 | 700 | 24 | 32 | 90 | 50 | 90 | 50 | 16:00 | 16:00 | 168,023 | 52,007 | 591,814 | 758,853 | 174,934 | 24,999 | 220,03 | 1550,6 | -1330,57 |
| 17:00 | 600 | 21 | 36 | 100 | 80 | 100 | 80 | 17:00 | 17:00 | 144,943 | 51,98 | 1017,457 | 1119,215 | 178,312 | 28,738 | 196,923 | 2343,722 | -2146,799 |
| 18:00 | 500 | 18 | 40 | 50 | 50 | 50 | 50 | 18:00 | 18:00 | 121,038 | 44,014 | 347,575 | 443,557 | 179,122 | 31,717 | 165,052 | 1001,971 | -836,919 |

La anterior tabla es una recopilación de toda la información recolectada para la simulación adicional que se realizó, conteniendo parámetros de entrada, variables de salida y valores totales para ver la potencia que tiene que ser entregada por la red externa.

La Ilustración 11 es la gráfica de los datos registrados en la tabla anterior, en naranja se ve la potencia consumida por las cargas y en azul la potencia generada, evidenciando que siempre se requiere potencia de la red externa.

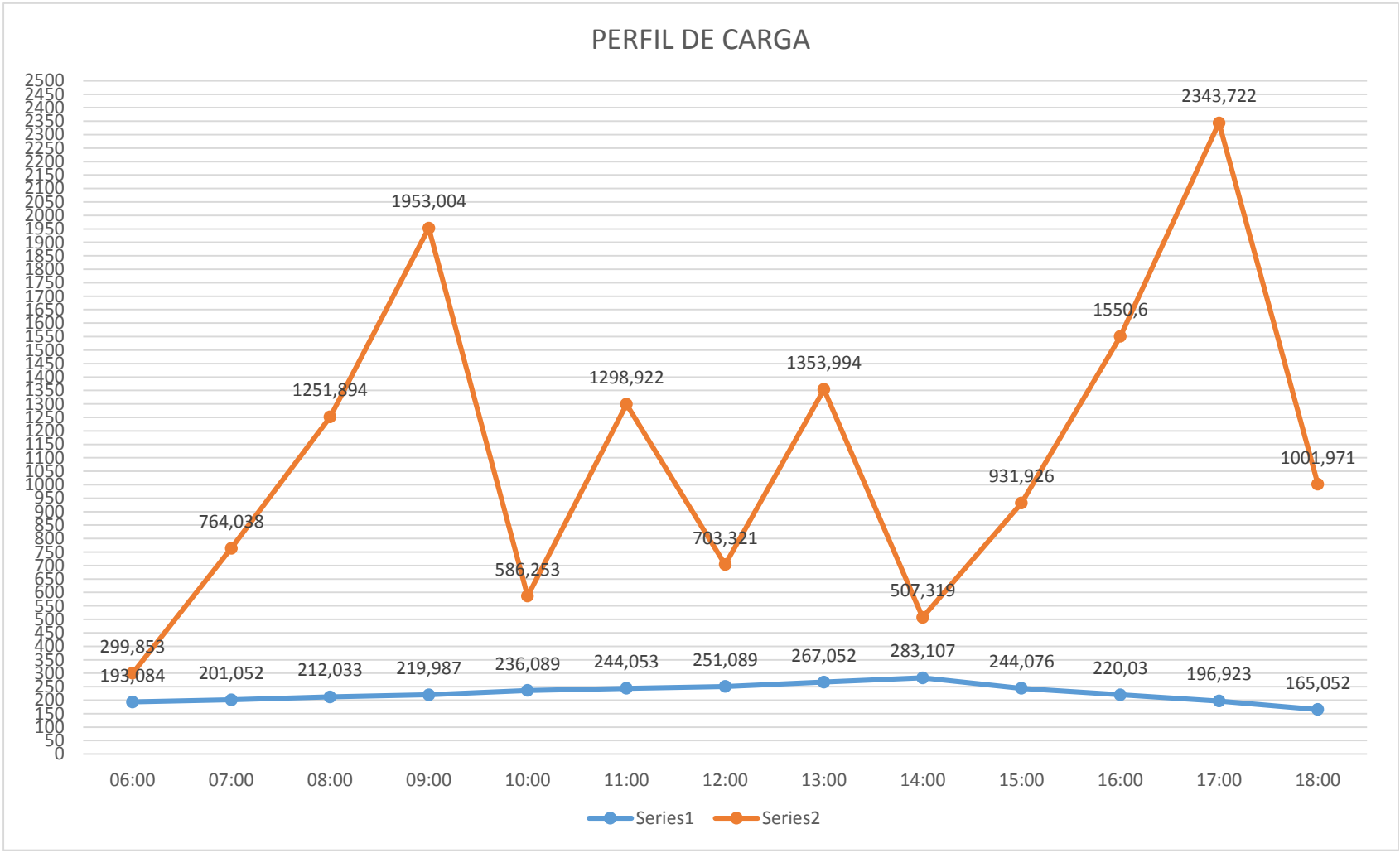



*Ilustración 11 Perfil de carga simulación adicional*