

DISEÑO DE UNA MICRORRED DC EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO



MARIO ALEJANDRO BASTIDAS ORDOÑEZ

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELETRÓNICA
2017
SAN JUAN DE PASTO**

DISEÑO DE UNA MICRORRED DC EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO



MARIO ALEJANDRO BASTIDAS ORDOÑEZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniería Electrónica

ASESOR

PhD. ANDRÉS PANTOJA BUCHELI

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELETRÓNICA**

2017

SAN JUAN DE PASTO

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor.”

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del Jurado

Firma Jurado 1

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a:

A Dios por darme fortaleza y sabiduría para cumplir esta tan anhelada meta. A mis padres quienes estuvieron brindándome su apoyo incondicional y esa fuerza espiritual que los caracteriza. A mi hermano, novia y demás familiares quienes fueron ese sustento para seguir adelante y alcanzar este objetivo.

A mi asesor Ph.D Andrés Pantoja por ser ese pilar de confianza y experiencia dentro de la investigación, concediendo siempre apropiadas recomendaciones, empeño y dedicación para este proyecto.

Al personal docente, investigador y técnico asociado a la Universidad de Nariño, por la ayuda recibida en el desarrollo de la metodología del trabajo.

RESUMEN

Con el crecimiento de los recursos de energía distribuidos, la disponibilidad de dispositivos semiconductores de alta potencia y el interés por resolver problemas inherentes a las microrredes tradicionales, la distribución DC se ha convertido en una alternativa competitiva para la distribución convencional AC.

En este trabajo, se diseña una microrred DC basada en la red eléctrica del edificio de laboratorios de docencia de la Universidad de Nariño, incluyendo dispositivos de conversión con características propias, sistemas de generación con perfiles de inyección de potencia reales y el consumo diario de las cargas del sistema. El modelo de microrred DC conseguido mediante PowerFactory permite la aplicación de diversos casos de estudio y pruebas que dan un indicio de las ventajas de un sistema de distribución DC sobre uno AC juzgando las pérdidas de cada uno.

Como resultado se tiene una factibilidad favorable para la implementación de una microrred DC dentro de un campus universitario, más aun con la creciente integración de las fuentes de energía renovable y los sistemas de almacenamiento en los sistemas de distribución. A pesar de que en un principio el costo es elevado, las ventajas técnicas y de ahorro de energía son bastante atractivas, como lo demuestran los prototipos ya implementados en el mundo y los resultados de investigaciones realizadas. Una característica importante en la transición del sistema AC hasta el DC trata de la disminución de potencia reactiva, presentando ventajas como la reducción de pérdidas y la baja caída de voltaje en las líneas eléctricas.

ABSTRACT

DC distribution systems have become a competitive alternative to conventional AC distribution due to the growing of distributed energy resources, the availability of high power semiconductor devices, and the interest in solving problems inherent in traditional microgrids.

In this work, a DC microgrid is designed based on the electric system of the Building of Laboratories on the University of Nariño. The design includes conversion devices with their own characteristics, generation systems with real energy injection profiles and the daily of the fuel from the system loads. The achieved DC microgrid model through PowerFactory allows the application of various case studies and tests and provides an indication of the advantages of a DC distribution system over an AC by judging the system's losses.

There is a high feasibility to implement a DC microgrid within a university campus, given the increasing integration of renewable energy sources and storage systems into energy distribution systems. Although the initial cost is high, the technical and energy-saving advantages are quite attractive, as it is shown by prototypes and implementations around the world and the results of the research works. An important feature in the transition from the AC to the DC system is the reduction of reactive power, pressing advantages such as loss reduction and low voltage drop in power lines.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. ANÁLISIS RED ELÉCTRICA UNIVERSIDAD DE NARIÑO	4
1.1. VISIÓN GENERAL	4
1.2. RED ELÉCTRICA EDIFICIO DE LABORATORIOS DE DOCENCIA	5
1.2.1. Esquema general de red eléctrica del edificio	5
1.2.2. Medición de variables y procesamiento de la información	6
1.2.3. Curvas de potencia del edificio	7
1.2.4. Curva de energía del edificio	9
1.2.5. Esquema de microrred del edificio	9
1.2.5.1. Concepto de una microrred	9
1.2.5.2. Descripción de una microrred	10
1.2.6. Caracterización de las FERs	11
1.2.6.1. Generación fotovoltaica	12
1.2.6.2. Arreglos fotovoltaicos	12
1.2.6.3. Inversor: ABB 12,5 kW	13
1.2.6.4. Inversor: Infiny SolarSystems 10 kW	13
1.2.6.5. Banco de baterías: MTEK 48 V	13
1.2.6.6. Cable solar: Exzhellent Solar	13
1.2.6.7. Generación eólica	14
1.2.6.8. Cargador eólico y cableado	15
1.2.6.9. Banco de baterías: MTEK 24 V	15
1.2.6.10. Inversor: Victron Phoenix 3 kVA	15
2. CONCEPTOS GENERALES DE MICRORREDES DC	17
2.1. CARGAS	17
2.2. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO	17
2.3. FERs.....	18
2.4. POLARIDAD	18
2.4.1. Sistema Unipolar	18
2.4.2. Sistema Bipolar	19
2.5. NIVEL DE VOLTAJE.....	20
2.6. ESTÁNDARES	21
2.7. ARQUITECTURAS.....	22
2.7.1. Configuración radial	22
2.7.2. Configuración de anillo.....	22
2.7.3. Configuración interconectada.....	22
3. DISEÑO DE UNA MICRORRED DC EN SOFTWARE ESPECIALIZADO	26
3.1. DIGSILENT POWERFACTORY: SOFTWARE DE ANÁLISIS DE SEP...26	26
3.1.1. Análisis de flujo de potencia	26

3.2. COMPONENTES DEL MODELO DE MICRORRED DC.....	27
3.3. MODELO MICRORRED AC Y DC	32
3.3.1. Modelo microrred AC	32
3.3.2. Modelo microrred DC	32
4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	36
4.1. COMPARACION DE RENDIMIENTO DE CABLEADO	36
4.1.1. Test de comparación cable N°4 AWG: Pérdidas en potencia y caída de voltaje	37
4.1.2. Test de comparación cable N°12 AWG: Pérdidas en potencia y caída de voltaje	40
4.2. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	42
4.2.1. Caso de estudio: Generación semanal vs. Demanda semanal	42
4.3. COMPARACIÓN DE ARQUITECTURAS APLICABLES EN EL DISEÑO DE LA MICRORRED DC.....	44
4.3.1. Respuesta frente a condición de falla	45
4.3.2. Funcionamiento en modo isla	48
4.4. ANÁLISIS TÉCNICO-ECÓNOMICO	49
4.4.1. Plan propuesto de microrred DC para el edificio	50
4.4.1.1. Parámetros de diseño de la microrred DC.....	50
4.4.1.2. Componentes de la microrred DC.....	51
4.4.2. Comparación técnico-económica de las microrredes.....	56
5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	59
REFERENCIAS	61
ANEXOS.....	69

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES EN EL CAMPUS UNIVERSITARIO.	4
FIGURA 2. DIAGRAMA UNIFILAR RED ELÉCTRICA ELD.	6
FIGURA 3. POTENCIA ACTIVA TOTAL DEL EDIFICIO DIVIDIDA POR DÍAS.	7
FIGURA 4. POTENCIA REACTIVA TOTAL DEL EDIFICIO DIVIDIDA POR DÍAS.	7
FIGURA 5. POTENCIA ACTIVA DE LOS PISOS DE MAYOR CONSUMO EN EL EDIFICIO.	8
FIGURA 6. POTENCIA REACTIVA DE LOS PISOS DE MAYOR CONSUMO EN EL EDIFICIO.	8
FIGURA 7. ENERGÍA ACTIVA ACUMULADA DURANTE LA SEMANA EN EL EDIFICIO.	9
FIGURA 8. ESQUEMA MICRORRED EDIFICIO DE LABORATORIOS DE DOCENCIA.	11
FIGURA 9. ENERGÍA SUMINISTRADA ARREGLO FOTOVOLTAICO 1.	14
FIGURA 10. ENERGÍA SUMINISTRADA ARREGLO FOTOVOLTAICO 2.	14
FIGURA 11. ENERGÍA SUMINISTRADA POR EL GENERADOR EÓLICO.	16
FIGURA 12. POLARIDAD MICRORRED DC.	19
FIGURA 13. ARQUITECTURA RADIAL. ADAPTADA DE [1], [23] Y [45].	23
FIGURA 14. ARQUITECTURA EN ANILLO. ADAPTADA DE [1], [23] Y [45].	24
FIGURA 15. ARQUITECTURA EN MALLA. ADAPTADA DE [1], [23] Y [45].	24
FIGURA 16. ARQUITECTURA EN ZONA. ADAPTADA DE [1], [23] Y [45].	25
FIGURA 17. ELEMENTOS ELÉCTRICOS DE LA INTERFAZ DE POWERFACTORY.	31
FIGURA 18. MODELO MICRORRED AC EDIFICIO DE LABORATORIOS DE DOCENCIA.	33
FIGURA 19. MODELO MICRORRED DC EDIFICIO DE LABORATORIOS DE DOCENCIA.	34
FIGURA 20. SISTEMAS AC Y DC DE COMPARACIÓN.	37
FIGURA 21. PÉRDIDAS EN POTENCIA CABLEADO N°4 AWG.	38
FIGURA 22. CAÍDA DE VOLTAJE CABLEADO N°4 AWG.	39
FIGURA 23. PÉRDIDAS EN POTENCIA CABLEADO N°12 AWG.	41
FIGURA 24. CAÍDA DE VOLTAJE CABLEADO N°12 AWG.	41
FIGURA 25. PÉRDIDAS DIARIAS EN EL EDIFICIO.	42
FIGURA 26. ENERGÍA AHORRADA EN UNA SEMANA CON UN SISTEMA DC.	43
FIGURA 27. ENERGÍA CONSUMIDA, GENERADA Y RESULTANTE EN EL EDIFICIO.	44
FIGURA 28. ARQUITECTURA RADIAL IMPLEMENTADA EN POWERFACTORY.	46
FIGURA 29. ARQUITECTURA DE ANILLO IMPLEMENTADA EN POWERFACTORY.	46
FIGURA 30. ARQUITECTURA DE MALLA IMPLEMENTADA EN POWERFACTORY.	47
FIGURA 31. ARQUITECTURA ZONAL IMPLEMENTADA EN POWERFACTORY.	47
FIGURA 32. FUNCIONAMIENTO EN ISLA DE LA MICRORRED DC.	49
FIGURA 33. CAÍDA DE VOLTAJE EN MODO ISLA DE LA MICRORRED DC.	49
FIGURA 34. LUMINARIA LED24 VDC 38 W	52
FIGURA 35. CONVERTOR AC/DC NETSURE 4015 Y HRMP.	53
FIGURA 36. PSM Y ESQUEMA MICRORRED DC.	55
FIGURA 37. CONVERTOR DC/DC MPPT 15 KW.	55
FIGURA 38. PLAN PROPUESTO DE MICRORRED DC PARA UN PISO EN EL EDIFICIO.	57

LISTA DE TABLAS

TABLA I	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS PANEL SUNSET SOLAR PX 315/72	12
TABLA II	CARACTERÍSTICAS ARREGLOS FOTOVOLTAICOS	12
TABLA III	PARÁMETROS CABLE EXZHELLENT SOLAR	13
TABLA IV	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS, ELÉCTRICAS Y DE FUNCIONAMIENTO ENAIR 3014	15
TABLA V	CARACTERÍSTICAS CARGADOR EÓLICO ENAIR PRO	15
TABLA VI	CARACTERÍSTICAS INVERSOR VICTRON PHOENIX 3 KVA	15
TABLA VII	APLICACIONES DC Y SU VOLTAJE PREFERIDO	20
TABLA VIII	PARÁMETROS TEST DE CABLEADO N°4 AWG	37
TABLA IX	PARÁMETROS TEST DE CABLEADO N°12 AWG	40
TABLA X	POTENCIA MÁXIMA REGISTRADA POR PISO	51
TABLA XI	CARACTERÍSTICAS DEL CABLEADO THHN-THWN-2 CU	54
TABLA XII	COSTO ESTIMADO DE LOS DISPOSITIVOS DE LA MICRORRED DC	56
TABLA XIII	COSTO ESTIMADO DE LOS DISPOSITIVOS DE LA MICRORRED AC	56

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 CONFIGURACIÓN DE DISPOSITIVOS QUE CONFORMAN LA RED ELÉCTRICA EN POWERFACTORY	69
ANEXO 2 SCRIPT MODELO DESARROLLADO EN DPL POWERFACTORY PARA COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS AC Y DC.	73
ANEXO 3 ANÁLISIS COMPLEMENTARIO DE PÉRDIDAS PARA DIFERENTES POTENCIAS DE CARGA.	74
ANEXO 4 TABLAS COMPARATIVAS DE LOS DISPOSITIVOS QUE CONFORMAN LA MICRORRED AC Y LA MICRORRED DC.	77

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, asuntos energéticos y medioambientales presentados en la red eléctrica convencional han despertado el interés de muchos investigadores y entidades gubernamentales quienes consideran inminente una innovación en el suministro de energía. Asimismo el mercado energético actual exige mayor eficiencia, alta confiabilidad e inteligencia en la distribución de energía [1].

Las microrredes y redes inteligentes son conceptos que se han propuesto con la finalidad de resolver los problemas asociados a la intensiva inclusión de generadores distribuidos en la red, así como para intentar solventar el agotamiento de fuentes de energía convencional, el envejecimiento de la infraestructura actual de transmisión y distribución y la creciente demanda de energía eléctrica [1].

A pesar de las grandes ventajas que han traído las investigaciones preliminares y los prototipos que se han realizado enfocados extensivamente en las microrredes, los sistemas en AC han tenido una serie de limitaciones que podrían ser superadas con la implementación de un nuevo sistema de distribución. Los altos costos de la energía junto con los fondos limitados para construir plantas eléctricas, líneas de transmisión de larga distancia y las exigencias técnicas para mantener la calidad del sistema eléctrico han llevado a plantear alternativas de redes de distribución que permitan mantener estos estándares. En un esfuerzo por mejorar la eficiencia del consumo de energía, recientemente se está estudiando el reemplazo del sistema AC convencional con un enfoque DC [2].

Los sistemas de distribución DC no son un concepto nuevo. De hecho, este tipo de distribución ha sido utilizado desde que se inventaron las redes eléctricas [2], [3]. En el siglo pasado, la “Guerra de las Corrientes” culminó con el dominio de la distribución de AC en la gran mayoría de los sistemas de energía, debido a razones que en ese momento tenían mucho sentido como el transporte a largas distancias y la facilidad de transformación de corriente. Sin embargo, las áreas de aplicación de los sistemas de corriente continua han ido tomando fuerza con el transcurso del tiempo y hasta ahora la penetración de esta tecnología ha sido gradual. Por lo tanto, los sistemas de corriente continua son propensos a ser desarrollados como parte de redes de distribución AC, de forma híbrida o de forma subordinada [1], [4].

Recientemente, tratar con los sistemas de corriente continua se ha hecho mucho más fácil debido al sorprendente crecimiento de la tecnología de semiconductores y el desarrollo continuo de convertidores electrónicos de energía. Uno de los conceptos que ha tomado más fuerza dentro del desarrollo de la distribución de corriente continua son las microrredes DC o *DC Microgrids*. Las microrredes DC son sistemas que interconectan un grupo de cargas y fuentes distribuidas que generan y distribuyen principalmente energía eléctrica en su forma DC nativa a bajos voltajes (hasta 1.500 VDC) y operan ya sea conectados a la red centralizada tradicional o funcionan de forma autónoma [3], [6]. Por ende,

las microrredes DC han comenzado a llamar la atención actualmente debido a varias ventajas sobre las microrredes tradicionales [5]. En los últimos años, se han publicado múltiples resultados destacando sistemas de control significativamente menos complejos debido a que los sistemas de DC están libres de regulación de frecuencia, sincronización, corrientes armónicas, control de potencia reactiva o problemas de calidad de potencia [6], [7]. Además se exaltan beneficios en cuanto a reducción de pérdidas y baja caída de voltaje que otorgan una eficiencia y confiabilidad más alta a una microrred DC [8] – [10].

Por otra parte, existen varias razones válidas para repensar el despliegue de los sistemas DC tales como el incremento de los dispositivos nativos DC (equipos electrónicos e iluminación LED) que han alcanzado una fracción mayor de la carga eléctrica en los edificios. Además los avances recientes en la tecnología de las energías renovables y el aumento de la penetración de las fuentes de energía distribuidas están provocando un renovado interés en los sistemas de distribución de corriente continua [11]. Aunque las microrredes DC pueden ser implementadas hoy en día y se usan efectivamente en instalaciones como centros de datos, edificios comerciales, residenciales e instituciones educativas [12] – [17], aún se carece de diseños estándar que sirvan de fundamento para el desarrollo.

Dentro de los trabajos ejecutados se destaca el prototipo de microrred DC realizado en un edificio del Instituto Fraunhofer en Erlangen, Alemania. El diseño consiste en un sistema de iluminación de corriente continua, un convertidor DC/DC para baja infraestructura informática, cargador de vehículo eléctrico DC, unidades fotovoltaicas MPPT DC, un rectificador y unidad de control y monitorización de red [13]. Proyectos demostrativos también se han realizado en Tokio, Japón, donde se han usado rangos de voltaje que van desde los 48 VDC hasta los 400 VDC en las instalaciones [16]. Uno de los trabajos más importantes se llevó a cabo en la base militar Fort Bragg en Carolina del Norte, Estados Unidos. La microrred DC mencionada, implementada por la compañía Bosch, está constituida por un bus DC nominal de 380 VDC que interconecta la generación distribuida y las cargas como luminarias [17]. De la misma forma se han ejecutados proyectos en Holanda y Korea, que han servido de banco de pruebas para alcanzar resultados satisfactorios en el desarrollo de la distribución DC [12].

Para poder aprovechar las ventajas que ofrecen las redes de corriente continua, deben ser resueltos varios retos técnicos que incentivan la investigación en el campo de la distribución en DC [3], [5], [18]. Así, el diseño de una microrred DC simulada permite obtener una aproximación de su comportamiento, y predecir la reacción ante diferentes condiciones, corregir posibles errores y tener una base concreta para su posterior implementación.

Particularmente en la Universidad de Nariño, el consumo de energía para satisfacer las necesidades dentro del campus es significativo, teniendo en cuenta el crecimiento de la comunidad estudiantil y la necesidad de ampliar su infraestructura física y la dotación. Por ende, es de gran importancia emprender

iniciativas que propendan por el uso racional de la energía y la apropiación tecnología que evada limitaciones presentadas en la inclusión de fuentes de energía renovable en el sistema.

El enfoque principal de este trabajo es discutir la planificación de una microrred DC en el edificio de laboratorios de docencia de la Universidad de Nariño, valiéndose de herramientas especializadas para el análisis. La caracterización eléctrica del edificio realizada con mediciones en tiempo real de potencia en la carga, representa un insumo fundamental en el desarrollo de la investigación dado que proporciona las bases de ejecución del proyecto. Sin duda, cada fase posee una relevancia distinta, partiendo desde los conceptos básicos obtenidos con la revisión bibliográfica, y la realización de pruebas de rendimiento, hasta finalmente alcanzar un diseño adecuado de microrred DC.

El diseño de la microrred DC en las instalaciones del edificio posee un soporte importante en las microrredes ya implementadas alrededor del mundo. Un aspecto fundamental es la elección de la escala junto con el nivel de voltaje, el cual fue definido como 380 VDC para cargas grandes y 24 VDC para cargas pequeñas. Una ventaja significativa del plan propuesto es la definición de la arquitectura mallada en el diseño que proporciona ventajas significativas en el funcionamiento.

Algunas de las principales contribuciones del presente trabajo están relacionadas con la propuesta, configuración y obtención de un modelo de microrred DC establecido en PowerFactory que incluye dispositivos de conversión, generación distribuida con fuentes de energía renovable y posibles cargas del sistema. También se considera relevante el estudio correspondiente a la comparación entre los sistemas AC y DC mediante la realización de varios casos de estudio, que muestra en una visión general, una mayor eficiencia energética de un sistema de distribución DC sobre un sistema AC.

El trabajo se encuentra organizado de la siguiente forma: En el Capítulo 1 se realiza una caracterización del edificio donde se instalará la microrred teniendo en cuenta consumos diarios, índices de generación de las fuentes de energía renovable y aspectos importantes que contribuyen al desarrollo de un prototipo apropiado. El caso propuesto se presenta en el Capítulo 2, en donde se presentan los conceptos generales de diseño como la elección de niveles de voltaje, polaridades y la arquitectura adecuada. Además, con el objetivo de enfocar el estudio dentro de la normativa, se realiza una revisión de estándares publicados por instituciones internacionales que ejercen su labor en beneficio del avance de las microrredes DC. Consecutivamente, en el Capítulo 3 se establece el modelo de microrred DC usando el software DIgSILENT PowerFactory, incluyendo fuentes de energía renovable ya implementadas sobre el edificio, conectadas a un bus de corriente continua a través de convertidores DC/DC o AC/DC. Luego, en el Capítulo 4 se realiza la comparación de características entre los sistemas AC y DC para mostrar resultados concernientes a pérdidas en potencia y la realización de un

análisis técnico-económico del sistema DC. Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo del proyecto.

1. ANÁLISIS RED ELÉCTRICA UNIVERSIDAD DE NARIÑO

1.1. VISIÓN GENERAL

La red eléctrica actual de la Universidad de Nariño sede Torobajo, está constituida fundamentalmente por 10 transformadores distribuidos a lo largo del campus, los cuales establecen en conjunto una capacidad nominal instalada de 1042 kVA. El sistema eléctrico del campus presenta un voltaje de 13,2 kV en media tensión y un rango entre 208 – 233 V en baja tensión después de cada transformador. Los conductores usados para distribución de corriente son N2, N4 y 4/0 ACSR; N2, N4, N6, N8, 2/0 y 1/0 AWG THW de Cu y de Al y XLPE N2, 1/0 CU. [48]. La Figura 1 muestra la distribución y la ubicación aproximada de los transformadores dentro de la ciudadela universitaria disponiendo por color según su capacidad de potencia.



Figura 1. Distribución de los transformadores en el campus universitario.

Según el informe de diagnóstico e inspección realizado en [48] sobre la red eléctrica, la Universidad de Nariño presenta anomalías en cuanto al estado del cableado en distintos sectores, fallas en tableros, espacio inadecuado para elementos eléctricos, y problemas en el alumbrado perimetral, entre otros. Este diagnóstico recomienda también la solución de estos problemas antes de implementar alguna actualización de la red eléctrica. Por otra parte, respecto a la definición de cargas prioritarias, la universidad dispone de una planta eléctrica de 465 kVA de capacidad y tres sistemas ininterrumpidos de potencia de 3 kVA, 10 kVA y 15 kVA que brindan confiabilidad en el suministro de energía los centros de datos del campus. El análisis posterior se enfoca en las nuevas instalaciones de la ciudadela universitaria donde están ubicadas las fuentes de energía renovable.

1.2. RED ELÉCTRICA EDIFICIO DE LABORATORIOS DE DOCENCIA

El desarrollo de esta sección se centra en la caracterización del edificio de Laboratorios de Docencia de la Universidad de Nariño (ELD).

1.2.1. Esquema general de red eléctrica del edificio

El modelo de red eléctrica implementado en el bloque está compuesto por un transformador de 112 kVA de potencia nominal, que distribuye su capacidad en 7 tableros principales, de los cuales 6 corresponden a cada piso del primero al sexto, y 1 referente al piso cero dividido entre la morgue y el sótano en general. Respecto al cableado, el edificio recibe alimentación desde el poste P112, nomenclatura tomada de [48], por medio de tres conductores XLPE N1/0 CU de 57 metros de longitud hasta el transformador T10 antes mencionado. Con inicio en el lado de baja tensión del transformador hasta el gabinete de protecciones, se extienden cuatro conductores 500 MCM, estableciendo las tres fases y el neutro del sistema.

Desde del gabinete de protecciones, se disponen 4 conductores N°4 AWG THHN-THWN-2 Cu hacia cada uno de los tableros de distribución en los pisos. La Figura 2 muestra el esquema de red donde se tiene en cuenta la acometida principal de la red eléctrica de la Universidad de Nariño, su despliegue hasta alcanzar el bloque y el cableado de distribución por piso.

En cuanto a las cargas, para el diseño propuesto de microrred se ha establecido el suministro de la iluminación. En su mayoría, el edificio está compuesto por luminarias fluorescentes 4x17 T8 de 68 W. Cada planta tiene aproximadamente 96 luminarias de este tipo distribuidas en toda el área. Las luminarias son energizadas desde el tablero de distribución de cada piso usando cable N°12 AWG. De igual forma, los tomacorrientes para los laboratorios y oficinas del edificio, se disponen usando el mismo calibre de cable.

1.2.2. Medición de variables y procesamiento de la información

Para iniciar el proceso de análisis y caracterización de la red eléctrica del edificio, se ha hecho uso de 8 medidores inteligentes SATEC EM133 conectados

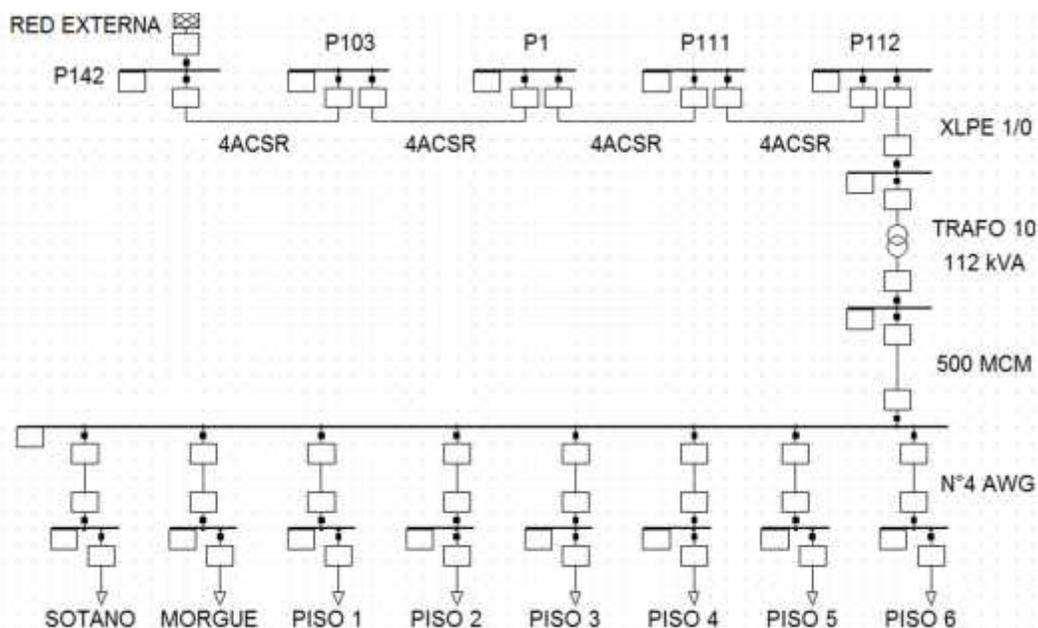


Figura 2. Diagrama unifilar red eléctrica ELD.

en las protecciones de cada piso en el lado de baja tensión del transformador.

Este procedimiento se realiza con el fin de registrar y medir variables como voltaje, corriente y factor de potencia por cada una de las fases. Aunque las protecciones están establecidas una por cada piso, como caso particular, el piso cero está dividido en dos protecciones, una para la morgue y otra para el resto de la planta. Las mediciones se realizaron durante un periodo de siete días en intervalos de cinco minutos. La configuración de los medidores se realiza mediante el software P.A.S-SATEC, estableciendo 3 variables de medición por cada fase, respetando la memoria del dispositivo según el manual de usuario [49]. En esta disposición de datos se obtienen 2574 registros compuestos por 9 parámetros cada uno, suficientes para el procesamiento y obtención de resultados.

Debido a la gran cantidad de datos, se ve la necesidad de procesar esta información creando un script en MATLAB con el propósito de obtener la potencia activa y reactiva del bloque a partir de los datos medidos. Además, el script tiene la finalidad de realizar las gráficas de las variables eléctricas más sobresalientes.

1.2.3. Curvas de potencia del edificio

Con la finalidad de obtener parámetros para el diseño de la microrred DC, se analizan las curvas de potencia resultantes del procesamiento de datos.

La Figura 3 presenta el consumo de potencia activa total del bloque, segmentada por colores para cada día. Durante los días sábado, domingo y lunes, el consumo de potencia se comporta de manera casi constante estableciéndose en un valor alrededor de los 4 kW como se puede observar. Entre los días martes y viernes los valores de potencia varían entre 4 kW y alcanzan un pico de 30 kW dependiendo de la hora de consumo. Tal como se muestra en el gráfico, los valores pico diarios están siempre cerca de las 10 am y de las 4 pm.

La Figura 4 muestra la potencia reactiva demandada por las cargas en el edificio. Los niveles de potencia indicados están totalmente relacionados con el funcionamiento de dispositivos tales como extractores de gas, motores y aparatos eléctricos que operan en el herbario y la morgue.

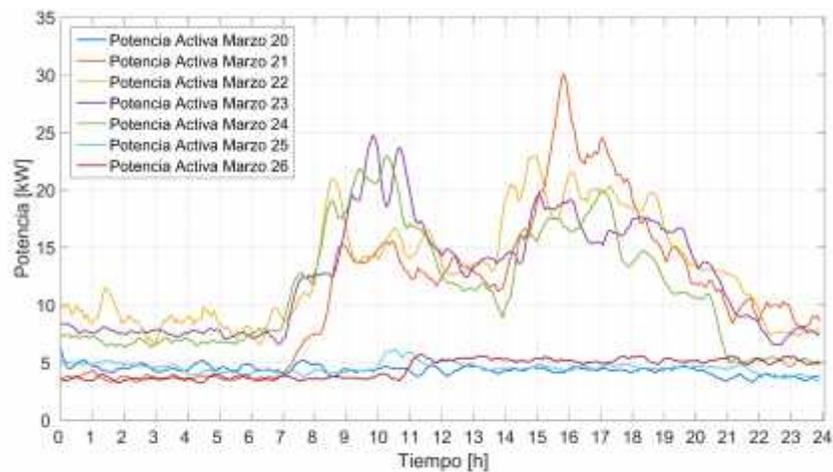


Figura 3. Potencia activa total del edificio dividida por días.

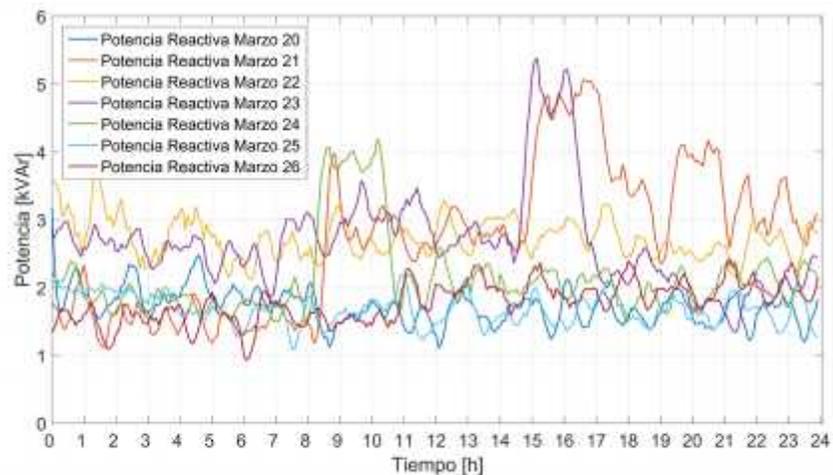


Figura 4. Potencia reactiva total del edificio dividida por días.

La Figura 5 muestra los pisos del edificio que tienen los valores más altos de consumo de potencia activa. Según los resultados presentados, el sótano muestra un comportamiento regular mientras pasan los días, presentando valores que sobrepasan los 6 kW de potencia en horas pico de consumo. El piso 3 mantiene un nivel casi constante en 1,5 kW evidenciando picos de potencia durante periodos cortos del día. Caso similar señalan los resultados del piso 6 elevando su valor de potencia en el transcurso de la semana.

La potencia reactiva de los pisos de mayor consumo se muestra en la Figura 6. Un caso particular se muestra en el gráfico donde el consumo de potencia reactiva en el piso 3 permanece constante durante todo el periodo de medición. El piso 6 muestra los niveles más altos de potencia reactiva sobrepasando los 2 kVAr y llegando a los 3 kVAr en lapsos cortos. Por su parte el sótano tiene una variación entre 0,1

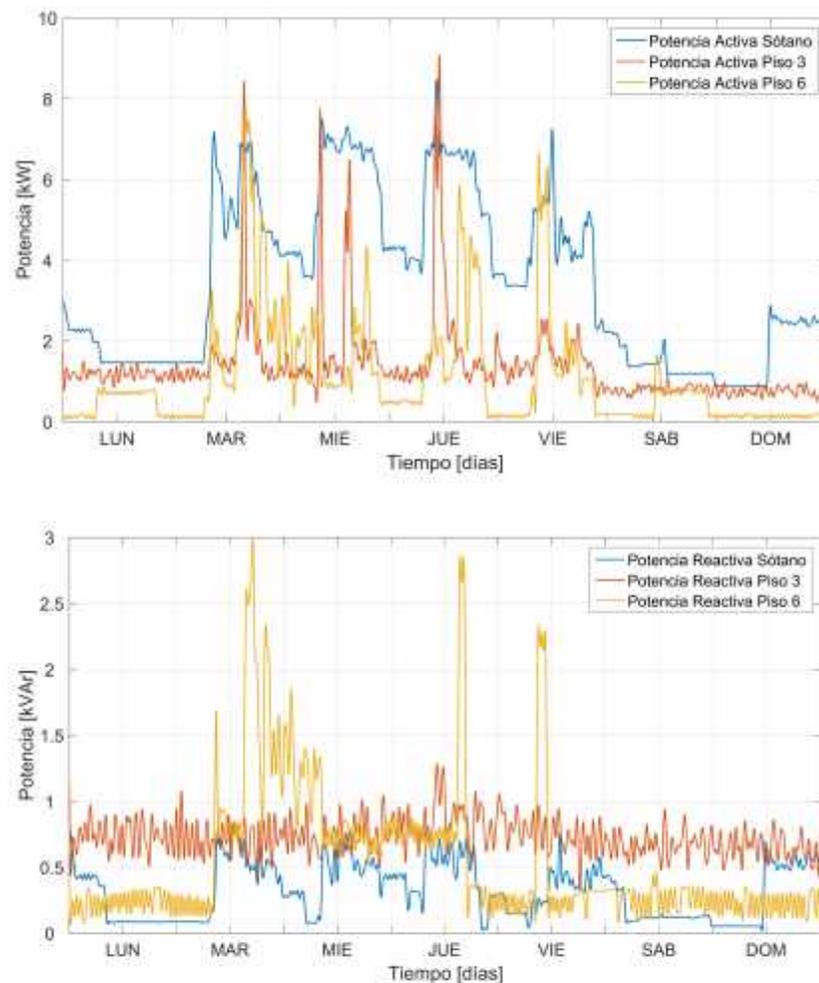


Figura 6. Potencia reactiva de los pisos de mayor consumo en el edificio.

1.2.4. Curva de energía del edificio

La Figura 7 presenta el consumo de energía acumulado durante la semana. El edificio gasta aproximadamente 1500 kWh al finalizar un periodo de 7 días. Este valor es tomado sin ninguna inyección de potencia hacia la red por parte de las fuentes de energía renovable.

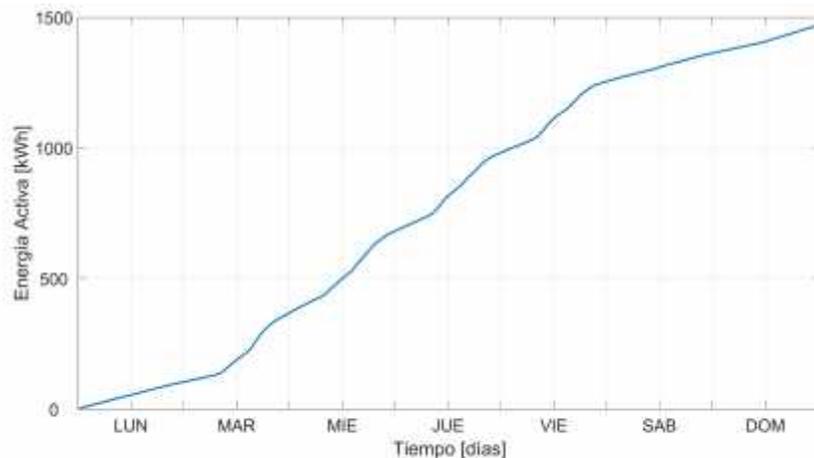


Figura 7. Energía activa acumulada durante la semana en el edificio.

1.2.5. Esquema de microrred del edificio

En esta sección se introducen definiciones de elementos y fundamentos relevantes que integran una microrred.

1.2.5.1. Concepto de una microrred

El concepto de microrred se encajó por primera vez en la literatura técnica en [50] y [51] como una alternativa bastante atractiva para superar los desafíos de integrar fuentes energéticas distribuidas como también sistemas de almacenamiento y cargas controlables en sistemas de energía [52], [53].

Desde entonces, las microrredes se consideran pequeños sistemas de distribución de energía local que implican fuentes de energía renovable (FERs), sistemas de almacenamiento y múltiples clientes [54], que tienen como objetivo aumentar la eficiencia energética, la fiabilidad de todo el sistema y proporcionar la

posibilidad de mejorar la calidad de la energía [40], [55]. Como una característica relevante, las microrredes tienen la capacidad de ser controladas localmente, y por lo tanto, pueden desconectarse de la red cuando hay un apagón o un fallo en la red principal y continuar suministrando energía a una porción de sus cargas locales en un denominado modo isla [11], [55].

1.2.5.2. Descripción de una microrred

Las microrredes son sistemas integrados en los cuales las fuentes energéticas distribuidas crean una red que alimenta un número variable de cargas. Ambos elementos constituyen el cuerpo principal de una microrred [42]. Las fuentes energéticas distribuidas, pueden ser clasificadas en dos grupos:

- *Generadores distribuidos*: Las microrredes eléctricas incluyen diferentes tipos de GD que pueden ser basados ya sea en fuentes renovables o no renovables. Esta característica permite aprovechar adecuadamente los recursos en cada ubicación.
- *Sistemas de almacenamiento*: El uso de sistemas de almacenamiento mejora la estabilidad, la calidad de la potencia, confiabilidad de suministro de energía y el comportamiento general de la microrred.

Por otra parte hay un amplio rango de cargas que pueden ser conectadas a una microrred. De esta forma, se consideran dos grupos principales clasificados como cargas críticas y no críticas.

Además de los elementos antes mencionados, en las microrredes se definen otros conceptos fundamentales como:

- *Punto de acople común*: Constituye una puerta de enlace entre la red principal y la microrred.
- *Distribución*: Las cargas y las FERs se conectan mediante líneas de distribución.
- *Protecciones*: Mecanismos electromecánicos que garantizan la seguridad de operación.
- *Monitoreo*: Sistemas electrónicos de seguimiento para monitorear diversos parámetros eléctricos de la red.
- *Convertidores*: Se encargan de adaptar determinados parámetros de la microrred a la magnitud correspondiente.
- *Control*: Coordinación de tareas dentro de la microrred para inducir un correcto funcionamiento.

Los elementos anteriormente mencionados dependen principalmente de la tecnología, AC o DC, de distribución de la microrred [42]. En el Capítulo 2 se presentan las principales características de las microrredes DC.

Tal como se aprecia en la Figura 8, en el esquema de microrred desarrollado para el bloque de laboratorios de docencia se han integrado FERs como solar y

eólica con sus respectivos sistemas de almacenamiento. Estos nuevos sistemas están implementados en la planta superior del edificio y tienen su punto de acople en el cuarto nivel del mismo.

1.2.6. Caracterización de las FERs

Pensando en la importancia que poseen las fuentes de energía renovable en el desarrollo de una microrred, esta sección presenta la caracterización de los generadores distribuidos ubicados en el edificio. Este proceso implica una obtención de datos reales de generación de las FERs mediante el uso del software de monitoreo proporcionado por *ABB corporation*, *Infiny SolarSystems* e *ENAIR*, que son las

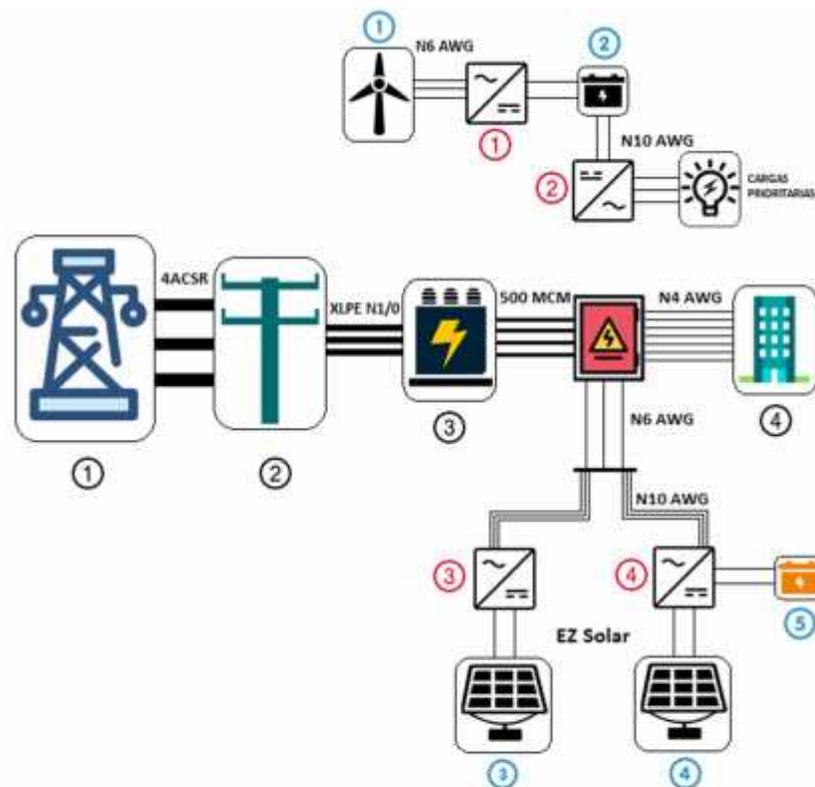


Figura 8. Esquema microrred edificio de laboratorios de docencia.

marcas de los equipos instalados.

Además, se tiene en cuenta parámetros importantes para la generación de energía relacionados con las características particulares de cada sistema de generación, como el número de paneles en cada arreglo, potencia nominal de cada módulo fotovoltaico, potencia nominal del aerogenerador, y cableado usado en las instalaciones, entre otros, que son indispensables en el diseño. Los datos tomados conciernen al mes de julio de 2017.

1.2.6.1. **Generación fotovoltaica**

Este sistema está conformado en su totalidad por 70 módulos fotovoltaicos SUNSET Solar de referencia PX 315/72. La Tabla I presenta las características eléctricas referentes a los módulos mencionados.

Tensión punto de máxima potencia	Tensión circuito abierto	Corriente punto de máxima potencia	Corriente de Corto Circuito	Potencia Máxima
37,4 V	46,8 V	8,42 A	8,90 A	315 Wp (±5%)

1.2.6.2. **Arreglos fotovoltaicos**

El sistema de generación fotovoltaica está dividido en dos conjuntos. El primer arreglo contiene 34 paneles solares organizados en dos *strings*, cada uno conformado por 17 paneles solares en serie. El segundo grupo contiene 36 paneles solares dispuestos igualmente en dos *strings*. En este caso, cada arreglo contiene un paralelo compuesto por 2 series de 9 paneles. Cabe mencionar que la inclinación de los paneles en cada arreglo es de 15° con una orientación hacia el sur. La Tabla II presenta el voltaje de salida y la potencia pico de cada arreglo fotovoltaico.

Arreglo PV 1		Arreglo PV 2	
Voltaje de salida	Potencia pico	Voltaje de salida	Potencia pico
635, 8 V	10,71 kW	336,6 V	11, 34 kW

1.2.6.3. Inversor: ABB 12,5 kW

El primer arreglo fotovoltaico está directamente conectado a un inversor trifásico de inyección a red de uso comercial. Este dispositivo está diseñado para controlar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos incluso durante periodos de condiciones climáticas variables. Este inversor cuenta con dos módulos MPPT autónomos con una eficiencia que alcanza hasta un 97,8%. Cada dispositivo admite un voltaje de entrada entre 360 y 750 VDC.

1.2.6.4. Inversor: Infiny SolarSystems 10 kW

El segundo arreglo fotovoltaico establece una conexión directa con un inversor híbrido capaz de entregar energía solar directamente a la red externa y a un sistema de almacenamiento de energía. Está compuesto por dos dispositivos independientes MPPT de alta eficiencia con un rango de voltaje de entrada entre 400 y 800 VDC. Entre otras características, el sistema multifuncional permite tres tipos de operación programable como inyección a red, modo aislado para energizar cargas prioritarias e inyección a red con respaldo de baterías.

1.2.6.5. Banco de baterías: MTEK 48 V

El sistema de almacenamiento de energía está conformado por 8 baterías MTEK de 12 V con una capacidad de 255 Ah, dispuestas en un paralelo de 4 baterías por fila. El sistema entrega 48 V en la salida y está configurado al 30% de profundidad de descarga (DOD).

1.2.6.6. Cable solar: Exzhellent Solar

El cable seleccionado es dedicado especialmente para instalaciones solares y sus parámetros principales se exponen en la Tabla III. La longitud del cableado para distribución de corriente continua (desde los paneles ubicados en la azotea del edificio y cada inversor situado en el 4to piso) es aproximadamente 70 metros por cada polo (positivo y negativo).

Referencia	Voltaje DC Nominal	Voltaje AC Nominal	Resistencia Máxima del Conductor	Corriente Nominal
Exzhellent Solar ZZ-F (AS)	1,8 kV	0,6/1 kV	3,39 Ohm/km	70 A

Según la información tomada del software de monitoreo de las FERs, se exponen en la Figura 9 y 10 la energía suministrada en un día regular por parte de los sistemas fotovoltaicos 1 y 2, respectivamente. La energía inyectada hacia la red alcanza índices diarios que sobrepasan los 6 kWh en las horas pico de un día, dando un indicio para conocer los niveles de generación mensual.

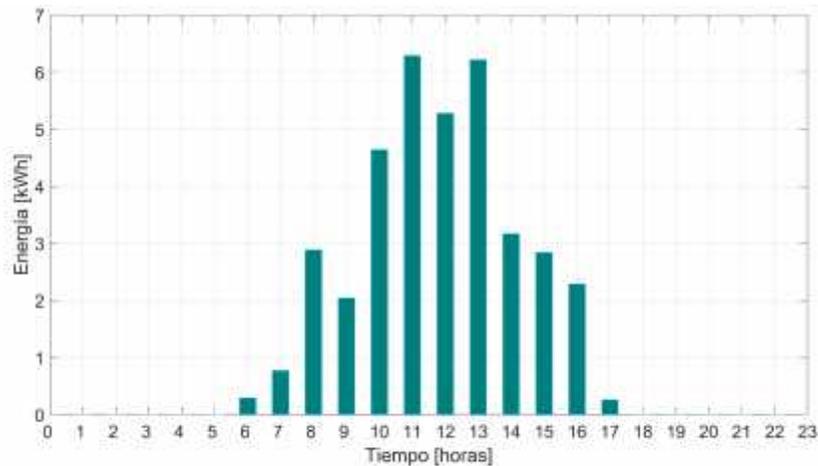


Figura 9. Energía suministrada arreglo fotovoltaico 1.

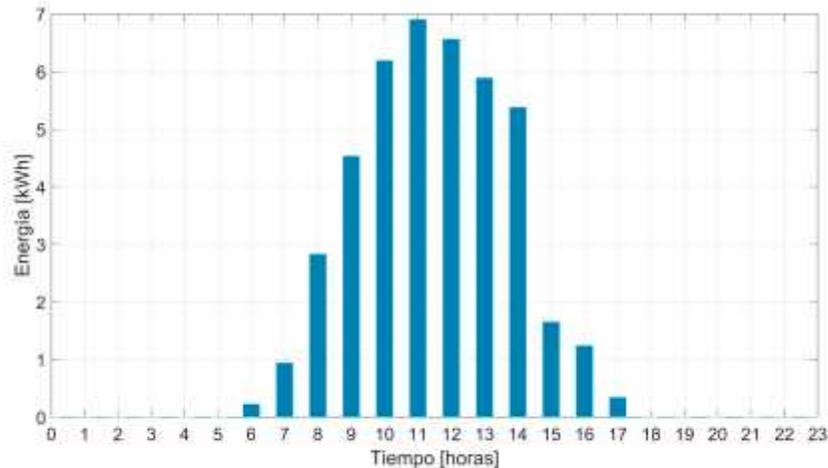


Figura 10. Energía suministrada arreglo fotovoltaico 2.

Es evidente que la energía producida por parte de los dos arreglos mostrados anteriormente, en general presenta buenos índices de generación a lo largo del mes, a pesar de mostrar altibajos debidos a cambios climáticos y cambios físicos en su conexión. Esto señala un alto grado de afinidad en cuanto al aprovechamiento de recursos naturales para generación de energía como también a la inclusión de fuentes de energía renovable dentro de la microrred.

1.2.6.7. **Generación eólica**

El sistema eólico ubicado sobre la última planta del edificio está constituido por un Aerogenerador modelo Enair 30. Sus características técnicas, eléctricas y de funcionamiento más importantes se presentan en la Tabla IV.

TABLA IV

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS, ELÉCTRICAS Y DE FUNCIONAMIENTO ENAIR 30				
Generador	Potencia	Voltaje	Velocidad de Arranque	Velocidad Nominal
250 rpm 24 polos imanes de neodimio	3 kW	24 48 220 V	2 m/s	12 m/s

1.2.6.8. Cargador eólico y cableado

Las instalaciones eléctricas para transportar la corriente generada por la microturbina desde la planta superior hasta el piso 4 del bloque, se efectuaron usando tres líneas de cable calibre N° 6 AWG con una longitud aproximada de 60 metros. La conexión en el cuarto piso se realiza directamente a un cargador eólico Enair PRO encargado de controlar la carga del banco de baterías dispuesto en el sistema, cuyas características se indican en la Tabla V. Además, se cuenta con un arreglo fotovoltaico de respaldo para cargar las baterías, conformado por dos paneles solares de 310 W cada uno conectados en paralelo directamente a un dispositivo conversor MPPT Outback.

TABLA V
CARACTERÍSTICAS CARGADOR EÓLICO ENAIR PRO

Voltaje nominal	Corriente	Rango tensión de operación	Máximo 3 fases
24/48 V	120 A	9 - 68 VDC	100 VAC

1.2.6.9. Banco de baterías: MTEK 24 V

El sistema de almacenamiento está formado por 4 baterías MTEK de 12 V con una capacidad de 300 Ah, configuradas en dos series de dos baterías en paralelo. Este arreglo entrega 24 V a la salida y se encuentra configurado al 30% DOD.

1.2.6.10. Inversor: Victron Phoenix 3 kVA

Las baterías se conectan a un inversor Victron Phoenix 3 kVA (120 V – 60 Hz) con los datos de interés mostrados en la Tabla VI. El sistema tiene como carga el laboratorio de microrredes y automatización ubicado en el cuarto piso del edificio de laboratorios de docencia. Para energizar la carga, el inversor se conecta mediante cable calibre N° 10 AWG de 7 hilos con una distancia aproximada de 8 metros hasta llegar al tablero de distribución del laboratorio.

TABLA VI
CARACTERÍSTICAS INVERSOR VICTRON PHOENIX 3 KVA

Rango de tensión de entrada (VDC)	Salida	Potencia de Salida	Pico de Potencia	Eficiencia máxima
19 – 33 V	120 V – 60 Hz	3000 W	6000 W	94%

La Figura 11 muestra los niveles por hora de energía producida por el generador eólico en un día. A diferencia de los arreglos fotovoltaicos, este sistema genera energía aprovechable en la mayoría de horas del día. Sin embargo el comportamiento depende exclusivamente de las condiciones climáticas y por ende, la generación puede variar de un día a otro. El día presentado muestra índices muy cercanos a un 1 kWh en horas determinadas.

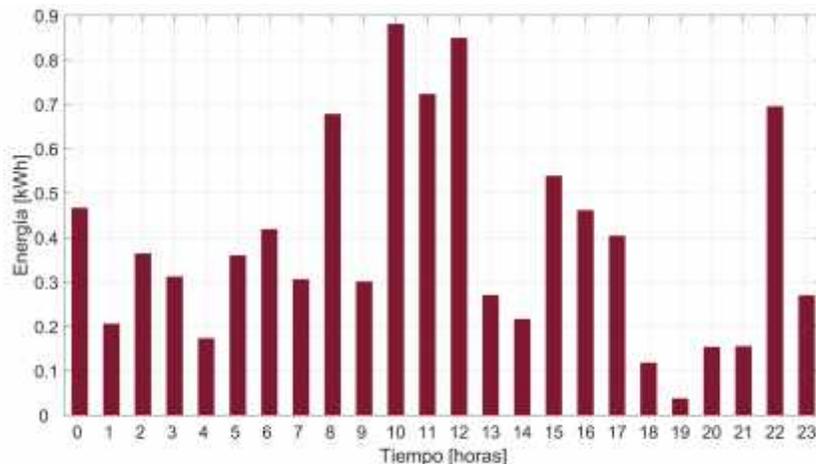


Figura 11. Energía suministrada por el generador eólico.

2. CONCEPTOS GENERALES DE MICRORREDES DC

El debate sobre la distribución AC contra DC es histórico, teniendo siempre como principal actor al sistema eléctrico tradicional AC. Evidentemente, el sistema convencional ha evolucionado con la creciente penetración de las FERs, llegando a establecer sistemas más compactos conocidos como microrredes.

Sin embargo, se ha concebido un renacer de los sistemas DC en la operación de la red. Hoy en día, las redes de corriente continua están integradas en varios sistemas autónomos y han ido ganando terreno en la distribución de energía en forma de pequeñas microrredes DC [57]. Debido a los avances logrados en la electrónica de potencia, la creciente penetración de cargas nativas DC y la facilidad de integración de FERs, ha hecho que la distribución DC se convierta en una alternativa competitiva frente a la distribución convencional de AC [58], [11].

De esta forma, partiendo del concepto de microrred tradicional se ha logrado establecer una nueva idea con la inclusión de modernas tecnologías en su entorno, conocida como microrred DC. Así como las microrredes convencionales, las microrredes DC enlazan un grupo de cargas comúnmente nativas DC y un conjunto de fuentes distribuidas que generan y distribuyen principalmente energía eléctrica en su forma DC por debajo de los 1500 VDC. Estas igualmente pueden operar ya sea conectados a la red centralizada tradicional o funcionan de forma aislada [3], [6]. Este tipo de microrred ofrece ventajas significativas reduciendo etapas de conversión AC/DC requerida para los ordenadores portátiles, los equipos electrónicos y las cargas de iluminación que representan un porcentaje alto de las cargas en la mayor parte de los edificios hoy. Sin embargo, las normas para microrredes DC no están documentadas hasta la fecha [59].

En este sentido, se presentan a continuación distintos componentes, conceptos y características que se conjugan para conformar la estructura de una microrred DC.

2.1. CARGAS

Muchas de las cargas de consumo actuales son energizadas mediante corriente continua con el uso de rectificadores. Los electrodomésticos y dispositivos electrónicos de oficina, como ordenadores, portátiles, tabletas, teléfonos, impresoras, televisores e iluminación, consumen energía en forma DC [12], [40]. Esto ha dado cabida a muchas investigaciones relacionadas con el desarrollo de una microrred DC como un método más eficiente para conectar fuentes y cargas directamente, con el uso de algunos convertidores DC/DC para regular el voltaje. Este tipo de microrred evita transformaciones de potencia AC/DC o DC/AC innecesarias para las cargas referidas anteriormente [60] – [62].

2.2. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

Uno de los grandes beneficios de microrredes DC es su capacidad inherente de facilitar la integración de sistemas de almacenamiento. La mayoría de los

elementos de almacenamiento son puramente DC como baterías y ultra capacitores [11]. Estos pueden ser integrados dentro de la microrred para garantizar estabilidad y confiabilidad en el sistema, almacenando energía cuando está presente en exceso u operando como fuente de energía cuando la generación local por parte de los generadores distribuidos sea insuficiente [63]. Conjuntamente, la integración de baterías dentro del sistema trae consigo una disminución de pérdidas, considerando solo una conversión por parte de un dispositivo DC/DC para elevar su voltaje hasta el nivel apropiado del bus DC principal [64].

2.3. FERs

La penetración de la generación distribuida en la red eléctrica ha aumentado considerablemente en los últimos años debido a sus múltiples ventajas. Principalmente, las FERs reducen el impacto ambiental y permiten explotar las fuentes de energía locales [42]. En el escenario actual, considerando el voltaje de salida DC de muchas de las fuentes de energía renovable, mediante una implementación de una microrred DC dentro de un edificio se evita la conversión de las fuentes hasta un bus AC tradicional [65].

Respecto a la facilidad de integración de las FERs, es importante destacar que tanto los generadores como los sistemas de almacenamiento, en su gran mayoría operan originalmente en DC. Por ejemplo, los arreglos fotovoltaicos, celdas de combustible, baterías, súper-capacitores, entre otros, necesitarían solo una etapa DC/DC. Por otra parte, fuentes como generadores eólicos, micro turbinas de gas y micro turbinas hidráulicas necesitarían solo de una etapa AC/DC simple para su conexión [11]. A raíz de esto, utilizar una microrred DC facilita la interconexión de las FERs, simplificando los dispositivos de acondicionamiento de potencia y ayudando a mitigar problemas derivados de la regulación de frecuencia, flujos de potencia reactiva y de la sincronización presentes en redes de corriente alterna [18]. Además, esto permite un funcionamiento aislado y menos complejo en una microrred DC, de tal manera que sea más robusta frente a fallas en la red principal.

2.4. POLARIDAD

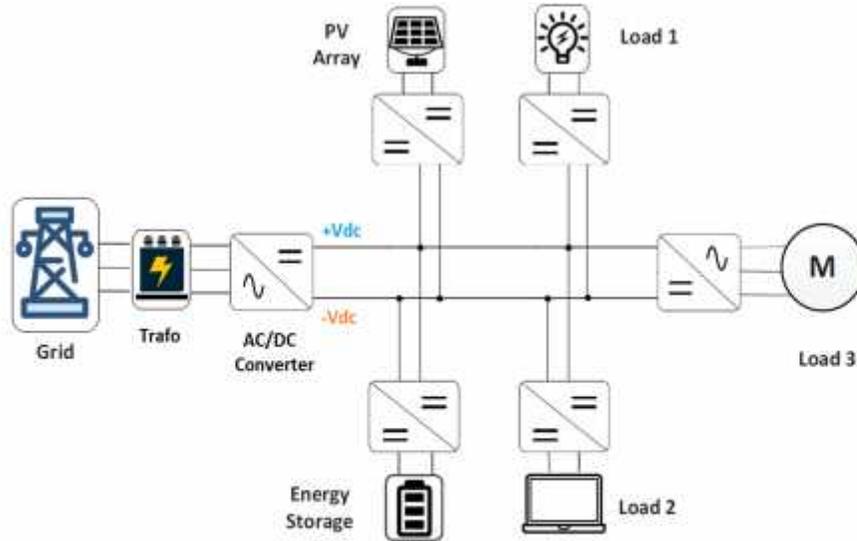
La potencia en las redes de corriente continua puede transmitirse utilizando diferentes tipos de configuraciones como en la Figura 12. Los más comunes son: sistema de dos hilos (unipolares) y de tres hilos (bipolares) [19] – [22]. La diferencia más evidente entre estas dos configuraciones de red DC es el número de niveles de tensión disponible.

2.4.1. Sistema Unipolar

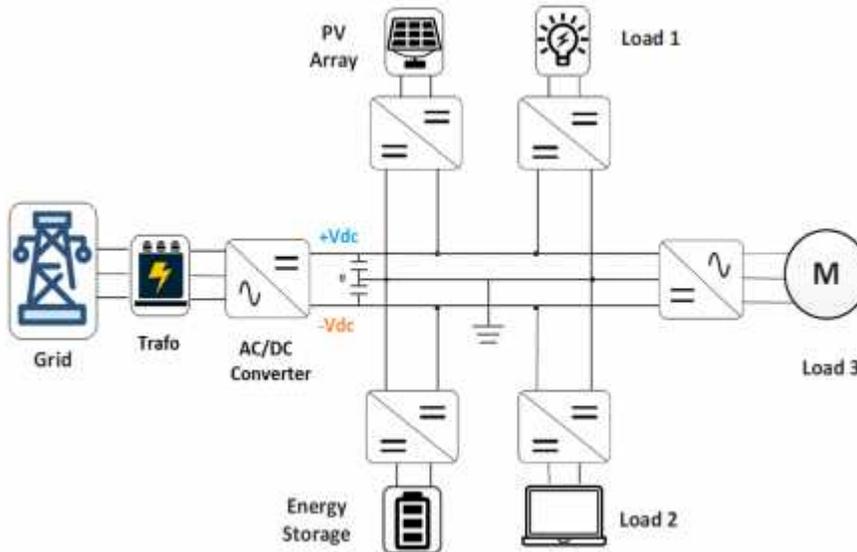
En el sistema DC unipolar, las fuentes y las cargas están conectadas entre el polo positivo y el polo negativo del bus DC, como se ilustra en la Figura 12a. La selección del nivel de voltaje del bus DC es un factor clave en el sistema unipolar, pues solo se cuenta con esta opción para conseguir la energización de las cargas.

2.4.2. Sistema Bipolar

El sistema DC bipolar consiste en $+V_{dc}$, $-V_{dc}$ y línea neutra como se ilustra en la Figura 12b. En esta configuración los clientes tienen la opción de elegir tres niveles de voltaje diferentes: $+V_{dc}$, $-V_{dc}$ y $2V_{dc}$. Además, bajo una situación de falla en uno de los polos DC, la alimentación puede ser suministrada por los otros



a) Unipolar



b) Bipolar

Figura 12. Polaridad microrred DC.

dos cables, aumentando su fiabilidad y disponibilidad de energía [1], [23].

2.5. NIVEL DE VOLTAJE

El nivel de voltaje no estandarizado es uno de los mayores obstáculos en las microrredes DC. Por ejemplo, sin normalización de voltaje, es imposible estandarizar aparatos, dispositivos y equipos conectados directamente a redes de corriente continua. Uno de los grandes desafíos para la normalización de voltaje es el uso de diferentes niveles de tensión en generación distribuida en espacios de aplicación con cargas residenciales, comerciales e industriales [1], [20].

Según la International Electrotechnical Commission (IEC) y el grupo de evaluación del sistema (SEG4) enfocado en aplicaciones de LVDC, no se usa un nivel de voltaje estándar para cargas DC. Los resultados de una encuesta realizada en 2014 [24] que soportan esta afirmación, se muestran en la Tabla VII.

Aplicación	Voltaje (Vdc)
USB y pequeños equipos electrónicos	5 V
Vehículos	12 V
Computadores portátiles	18 – 20 V
Luminarias LED	24 V
Telecomunicaciones	-48 V
Power Over Ethernet	50 V
Sistemas de almacenamiento de energía	24 – 48 V
Centros de datos	380 V
Carga de vehículos eléctricos	400 V
Distribución futura de energía en edificios comerciales y residenciales	350 – 450 V
Industria y transporte	600 – 900 V
Sistemas de tracción, marinos y sistemas de aeronaves	1000 – 1500 V

Por encima de la discusión se destaca la necesidad creciente de nuevos desarrollos en estándares para todos los aspectos de una microrred DC, entre ellos la estandarización de voltaje [24], [25]. Los esfuerzos se remontan varios años atrás llegando hasta la actualidad con el análisis de distintos voltajes, destacándose niveles de 24 V, 48 V, 326 V, 380 V entre otros, con el fin de comparar su rendimiento frente al voltaje AC y destacar las ventajas de la distribución DC [20], [23], [25] – [35].

De acuerdo a los resultados obtenidos, en los últimos años las redes de 380 VDC han ganado popularidad en los centros de datos y muchos edificios residenciales y comerciales [36] – [39]. Con el sistema de corriente continua de 380 V, el área de la sección transversal del conductor del cable se puede disminuir perceptiblemente sin sacrificar la eficiencia del sistema. Por ejemplo, es factible utilizar un cable largo para optimizar el espacio requerido en las instalaciones de telecomunicaciones comparadas con las anteriores instalaciones de -48 V.

2.6. ESTÁNDARES

El interés reciente en el sistema de microrred DC atrae a varias organizaciones de estándares internacionales [31], [40] – [42], algunas de las cuales ya han comenzado a trabajar en esta área como es el caso de la International Electrotechnical Commission (IEC), The Institute of Electrical and Electronic Engineering Standard Association (IEEE-SA), EMerge Alliance, The European Telecom Standard Institute (ETSI), The International Telecommunication Union (ITU), Chinese Communication Standards Association (CCSA). Estas instituciones han desarrollado o actualizado estándares para aplicaciones DC existentes y además han trabajado en una serie de actividades sobre cómo utilizar las distribuciones de potencia en sistemas de corriente continua en muchas aplicaciones dentro del sector de las telecomunicaciones y las TIC. El adelanto de estas normas y estándares permite crear lineamientos que rijan diseño de una microrred DC en miras de una posible implementación práctica.

Dentro del selecto grupo de empresas internacionales que enfocan sus esfuerzos en el desarrollo de sistemas de distribución DC se destacan Starline, ARDA Power, Nextek Power Systems, Eltek, Delta Products Corporation, EPRI y EMerge Alliance. Estas compañías en conjunto con universidades y laboratorios de investigación trabajan para promover sistemas de distribución DC en aplicaciones residenciales y comerciales. En el año 2012, la asociación Emerge Alliance lanzó dos estándares que aún se encuentran vigentes, enfocados en el desarrollo principal de un sistema de 24 y 380 VDC [43], [44]. El *EMerge Alliance Occupied Space Standard* se centra principalmente en el sistema de distribución de 24 VDC en edificios residenciales y comerciales, mientras que el *EMerge Alliance Data/Telecom Center Standard*, recomienda la distribución de energía de 380 VDC para centros de datos y telecomunicaciones para reducir la pérdida de energía y mejorar la confiabilidad del sistema.

Dentro de los conceptos importantes para el desarrollo de las microrredes DC, es destacable tratar con los esquemas de protección del sistema. El esquema de protección para las microrredes DC requiere un enfoque diferente a las microrredes convencionales porque enfrenta diferentes desafíos, principalmente la inmadurez de los estándares y directrices, y la experiencia práctica limitada [42], [79].

Además, la protección en un sistema DC es más difícil que la del sistema AC debido a la ausencia de punto de cruce por cero de la corriente. Los sistemas de protección DC requieren una cámara de enfriamiento para dividir el arco en arcos más pequeños, esto hace que el dispositivo de protección sea más voluminoso y costoso [78].

Sin embargo, dispositivos de protección como fusibles, interruptores y sistemas electrónicos de potencia están disponibles comercialmente para sistemas LVDC. Algunos de estos modelos están especialmente diseñados DC, pero la mayoría se puede usar en aplicaciones de AC bajo circunstancias específicas de diseño [80].

2.7. ARQUITECTURAS

Teniendo en cuenta un sentido general de conexión de dispositivos a la red DC y su interacción con la interfaz AC, se realiza un estudio en la literatura acerca de las arquitecturas genéricas y sin una aplicación específica para una microrred DC. Las microrredes DC pueden ser clasificadas en función de su topología en estructuras radiales, en anillo o interconectadas.

2.7.1. Configuración radial

En esta configuración, solo existe una ruta disponible que interconecta el bus DC con la red AC y al mismo tiempo permite el flujo de energía hacia las cargas. Una estructura radial presenta flujos de potencia fáciles de predecir, permitiendo aplicar algoritmos de control más sencillos. En la Figura 13 se muestra un diagrama lineal del sistema DC radial, en el que un número de FERs, sistemas de almacenamiento de energía y cargas, están conectados al único bus DC. Esta topología de red es favorable para alimentar cargas dispersas y remotas, sin embargo es poco robusta a condiciones de fallo que afectarían a todos los clientes del sistema [1], [23]. Este tipo de arquitectura se puede utilizar en edificios residenciales, donde se prefiere el bus DC de baja tensión para que coincida con el nivel de voltaje de muchos aparatos y así evitar cualquier conversión DC/DC adicional.

2.7.2. Configuración de anillo

Esta configuración consiste en dos o más rutas entre la interfaz de red AC y los clientes, implicando redundancia entre sí y mejorando la confiabilidad de la red [45]. Sin embargo, el control del flujo de potencia, la detección de fallas y los esquemas de protección son comparativamente más complejos que en la topología de red radial. De tal manera, se utiliza un dispositivo electrónico para controlar cada bus y su interfaz con otros buses vecinos [23], [66]. Los interruptores se colocan en ambos extremos de cada bus DC para ofrecer la flexibilidad de aislar el bus defectuoso del sistema como se muestra en la Figura 14. Este tipo de sistema de distribución puede ser utilizado en entornos urbanos e industriales. Las dos configuraciones tratadas hasta el momento dependen del suministro de red AC. Si se produce algún fallo en la red, la microrred DC no puede obtener el suministro de energía requerido y debería entonces actuar en modo aislado.

2.7.3. Configuración interconectada

La fiabilidad de la microrred DC se puede mejorar aún más asegurando un suministro de red AC alternativo a los clientes en caso de fallo de uno o más alimentadores. Esto puede hacerse interconectando el bus DC con más de un suministro de la red de AC, en configuraciones tales como:

- Microrred DC Tipo Malla
- Microrred DC Tipo Zona

En una microrred DC tipo malla se conectan múltiples interfaces de red AC a las redes de DC, cada una a través de un convertidor de AC/DC [1]. Este tipo de red contiene dos o más redes en anillo. Su estructura es más compleja y los caminos del flujo de potencia son inciertos, lo que hace que sea más difícil de controlar. Por lo tanto, es probable que una microrred DC mallada necesite controladores de flujo de potencia [18]. Es posible realizar diferentes arquitecturas de microrred basándose en esta configuración. Por ejemplo, la Figura 15 muestra una de tales arquitecturas.

Para mejorar aún más la fiabilidad del sistema, se ha propuesto un sistema de distribución eléctrica zonal en [45], [46], donde el sistema de distribución está subdividido en un número de zonas y cada zona tiene dos buses DC redundantes como se muestra en la Figura 16. De hecho, esta arquitectura de red DC consiste en sistemas de microrred de corriente continua en cascada con una configuración simétrica [23].

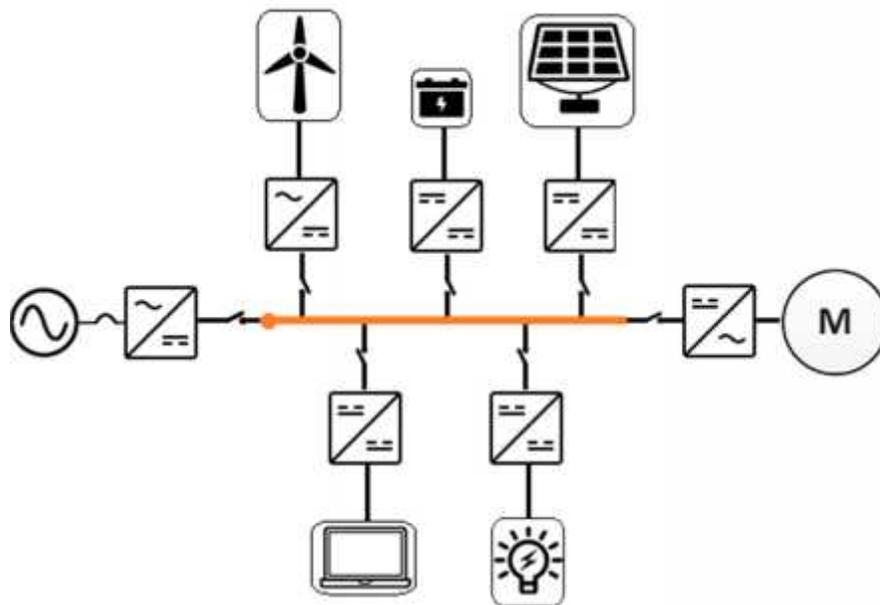


Figura 13. Arquitectura radial. Adaptada de [1], [23] y [45].

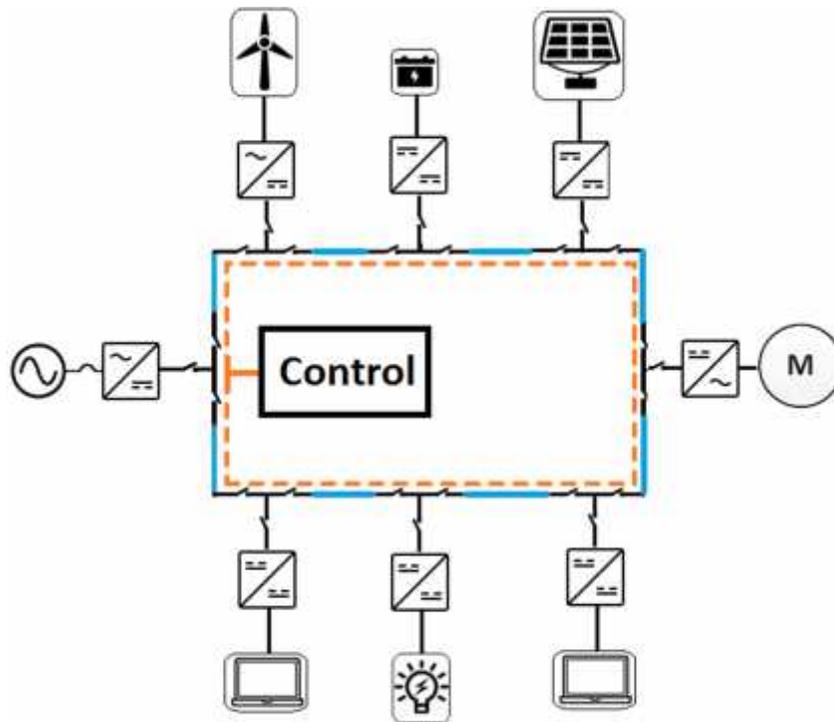


Figura 14. Arquitectura en anillo. Adaptada de [1], [23] y [45].

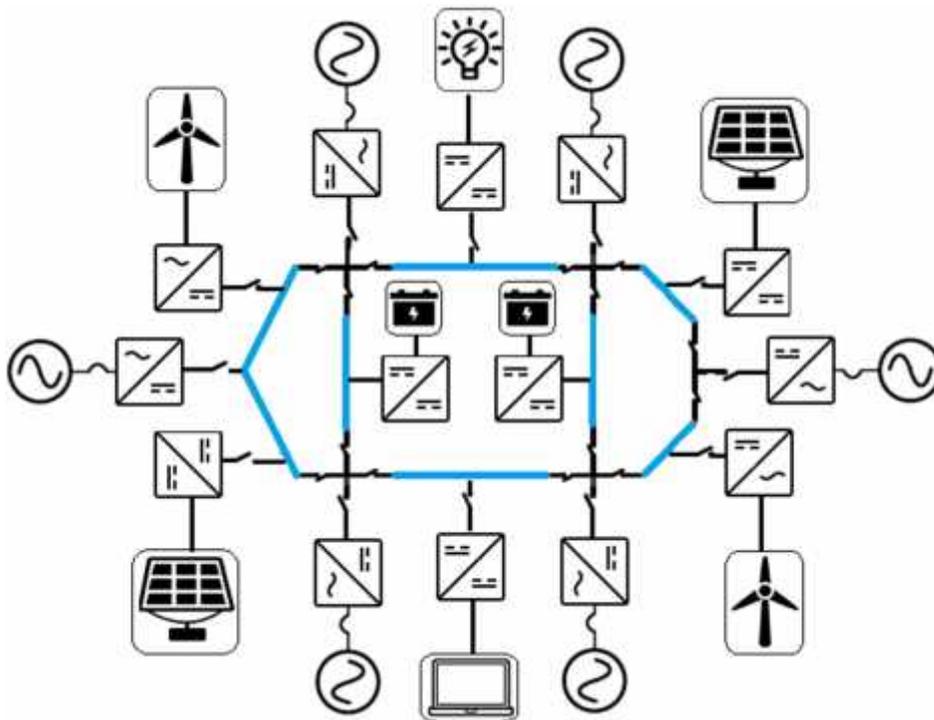


Figura 15. Arquitectura en malla. Adaptada de [1], [23] y [45].

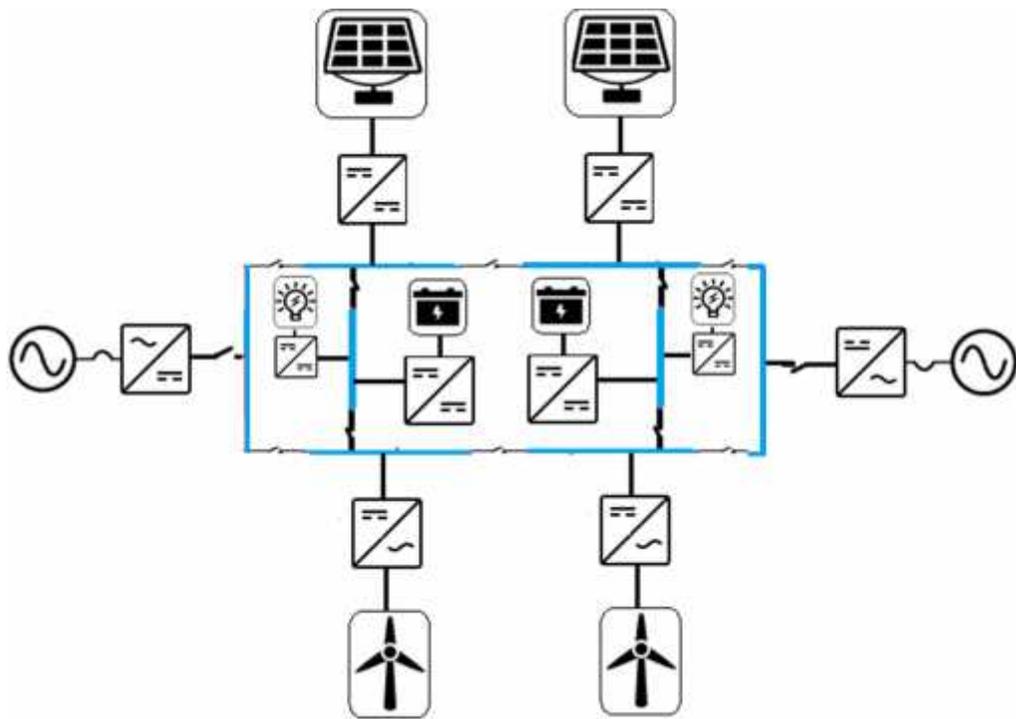


Figura 16. Arquitectura en zona. Adaptada de [1], [23] y [45].

3. DISEÑO DE UNA MICRORRED DC EN SOFTWARE ESPECIALIZADO

Existen distintos software de análisis de sistemas eléctricos de potencia (SEP) como NEPLAN, CYME, ETAP, ELPLEK, PowerFactory, etc. De los paquetes antes mencionados, muy pocos son libres o tan solo existe una versión de prueba como el caso de ETAP y CYME. Para la selección del sistema a utilizar se realizaron pruebas de manejo en NEPLAN, ETAP y PowerFactory, estableciendo el producto de la compañía DlgSILENT como el mejor catalogado, con mejores prestaciones y características para el análisis de sistemas eléctricos.

3.1. DIGSILENT POWERFACTORY: SOFTWARE DE ANÁLISIS DE SEP

El modelo y simulación de la microrred DC referente al edificio de Laboratorios de docencia de la Universidad de Nariño se realizó en el software PowerFactory de la compañía DlgSILENT. Esta es una herramienta integrada para el análisis de sistemas eléctricos de potencia caracterizando técnicas confiables y flexibles de modelado y algoritmos. Su funcionalidad permite entre otros aspectos, realizar flujos de potencia AC y DC, simular fallas generales, permitir el análisis de eventos, simulación dinámica (RMS), diagramas unifilares del sistema modelado y el uso de elementos virtuales para mostrar resultados. Además permite la programación de scripts en lenguaje DPL (*DlgSILENT Programming Language*) para la automatización de tareas dentro del programa y el uso de lenguaje DSL (*DlgSILENT Simulation Language*) para programar modelos de controladores eléctricos y otros componentes utilizados en sistemas de energía eléctrica [67]. Las características mencionadas se aplican con el fin de evaluar el comportamiento del sistema eléctrico en el bloque de laboratorios de docencia y comparar con el nuevo diseño de microrred DC sobre las mismas instalaciones.

En su totalidad las comparaciones, eventos y simulaciones giran en torno al análisis de flujo de carga o flujo de potencia efectuado en el software.

3.1.1. Análisis de flujo de potencia

El flujo de potencia se realiza usando la interfaz de programación DPL que brinda DlgSILENT PowerFactory. Los cálculos de flujo de carga se utilizan para analizar sistemas de potencia bajo condiciones de estado estacionario, es decir en condiciones en las que se supone que todas las variables y parámetros son constantes durante el período de observación. De este modo, el propósito de realizar un flujo de carga o flujo de potencia es calcular con precisión los voltajes en todos los buses de una red, potencias en cableado, cargabilidad de líneas y transformadores, corriente consumida por las cargas, y potencia suministrada por la red, entre otras variables, con el fin de analizar el comportamiento de los sistemas de potencia existentes, sistemas futuros o que se encuentren en etapas de expansión [67].

Ahora bien, un análisis adecuado de un sistema eléctrico de potencia está condicionado por eventos de cargas, de generación y de tiempos en el que se lleva a cabo este proceso. Aquí es donde la interfaz DPL adquiere importancia

permitiendo desarrollar rutinas de flujo de carga donde se involucren distintas variables, como por ejemplo la introducción de fuentes intermitentes para analizar voltajes, corrientes y potencias resultantes de cambios presentados en la red durante un periodo de tiempo determinado. El Anexo 2 presenta un código modelo que evidencia la programación en lenguaje DPL dentro de PowerFactory para llevar a cabo un test de comparación ejecutando un análisis de pérdidas mediante flujo de potencia.

3.2. COMPONENTES DEL MODELO DE MICRORRED DC

Para el desarrollo del modelo se tiene en cuenta los distintos elementos como transformadores, convertidores DC/DC, rectificadores AC/DC, líneas de transmisión, fuentes DC, baterías, buses y cargas, con sus respectivas configuraciones para efectuar la simulación. La configuración de los elementos para ser usados en la interfaz gráfica del software y obtener resultados adecuados, requiere información propia de cada dispositivo. Por ende, se procede a detallar la configuración de los elementos usados en la simulación de la microrred DC. Para profundizar en la información detallada de los parámetros de cada elemento se sugiere al lector referirse al manual técnico de DlgSILENT PowerFactory [67]. A continuación se presentan las generalidades de los equipos utilizados en el modelo.

▪ Transformador

PowerFactory cuenta con diferentes modelos de transformadores para distintas aplicaciones. El modelo usado en la simulación corresponde a *2-Winding Transformer (ElmTr2)*. El tipo de transformador de dos devanados es un modelo detallado para varios tipos de transformadores trifásicos en sistemas de potencia. Puede representar, por ejemplo, transformadores de red, desfasadores o reguladores de voltaje en media tensión. Este modelo permite crear un *Type* o elemento dentro de la biblioteca de dispositivos con características específicas del transformador, tales como:

- Tecnología del transformador
- Potencia y frecuencia nominal
- Niveles de tensión en los lados de alto y bajo voltaje
- Grupo de conexión y desfase
- Impedancia de secuencia positiva y de secuencia cero
- Distribución de reactancias de fuga
- Pérdidas

▪ Convertidor PWM AC/DC

El modelo de convertidor PWM representa un convertidor AC/DC de fuente de tensión auto conmutada (con un circuito DC capacitivo incluido), soportando

modulación sinusoidal y rectangular. El software ofrece dos modelos de convertidor PWM, uno con dos conexiones DC (DC+ y DC-) (*ElmVsc*) y uno con una sola conexión DC (*ElmVscmono*). El modelo interno utilizado en ambos casos es el mismo, pero con la diferencia que en el caso del *PWM Converter/ 1 DC-Connection* el polo negativo DC se conecta directamente a tierra.

La configuración básica del convertidor PWM concierne a los valores nominales de Voltaje AC, Voltaje DC, Potencia Aparente del dispositivo y la elección del tipo de modulación. Para el análisis de flujo de carga *Load Flow*, el modelo de convertidor PWM admite varias condiciones de control. Para el análisis realizado en este trabajo no se especifican variables de control directamente, sino que se definen dependiendo del dispositivo al que se incorpora el conversor. Los diversos modos de control son los siguientes:

- Vac – phi
- Vdc – phi
- PWM – phi
- Vdc – Q
- Vac – P
- P – Q
- Vac – Vdc

Cada modo de control tiene distintas variables controladas como voltajes, potencias, ángulos de fase, entre otros. En caso de control de voltaje, es necesario especificar la barra de distribución controlada. El significado y la aplicación típica de cada modo de control se especifican en el manual técnico [67].

Puesto que la capacidad de un convertidor PWM para ayudar a la estabilidad del sistema es limitada, es común describir esta capacidad usando un diagrama P-Q, para lo que PowerFactory permite definir la Curva de Capacidad, que se puede introducir manualmente. La característica P-Q se define usando valores por unidad (p.u.).

▪ **Conversor DC/DC**

Los convertidores DC/DC se utilizan a menudo en fuentes de alimentación de corriente continua de conmutación y en aplicaciones de accionamiento de motores de corriente continua. Por lo general, se aplica una tensión DC no regulada al convertidor procedente de un rectificador de diodo no controlado. El convertidor DC/DC entonces convierte esta tensión DC no ideal en una salida DC controlada a un nivel de voltaje deseado. El elemento *ElmDcdc* puede representar dos diferentes tipos de conversor DC/DC: Conversor elevador o boost y conversor reductor o buck.

Otros tipos de convertidores DC/DC como el convertidor buck-boost pueden ser modelados como combinaciones de este tipo básico de convertidores. En los

modelos disponibles en el software no hay pérdidas, por lo que la corriente continua y la potencia que fluye hacia el elemento es igual al valor que fluye fuera del lado secundario.

Respecto a la configuración básica del DC/DC Converter, se necesitan dos parámetros: la corriente nominal del dispositivo y la relación de las tensiones en el lado primario U_1 y en el lado secundario U_2 . La relación está definida por el parámetro α por medio de la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{U_2}{U_1} \quad \text{con} \quad 0 < \alpha < 2$$

El parámetro α se puede especificar en el rango entre 0 y 2 excepto el valor 1 que no representaría ni un convertidor elevador ni un convertidor reductor. Entonces se tiene:

Si $0 < \alpha < 1$, el convertidor DC/DC funciona como un convertidor reductor, donde el voltaje es menor que el voltaje primario.

Si $1 < \alpha < 2$, el convertidor DC/DC funciona como un convertidor elevador, donde el voltaje es mayor que el voltaje primario.

▪ Líneas de transmisión

Los modelos disponibles representan las líneas DC (unipolar) y AC para todas las posibles tecnologías de fase (trifásica, bifásica y monofásica, con o sin conductor neutro y cables de tierra) para circuitos paralelos individuales y mutuamente acoplados. El elemento de línea *ElmLne* en PowerFactory es el elemento que representa las líneas de transmisión.

En su configuración principal, la línea de transmisión permite especificar parámetros como la longitud, el factor de reducción, la puesta a tierra y el modelo de la línea. Este último está dividido en dos tipos. El modelo de parámetros distribuidos es el más utilizado en líneas de transmisión largas, proporcionando resultados muy precisos, mientras que el modelo de parámetros agrupados proporciona resultados suficientes para líneas cortas. Además el modelo permite crear un *Type* en la biblioteca de elementos que define la línea de transmisión con características particulares como:

- Voltaje y corriente nominal
- Frecuencia
- Tipo de cable y sistema
- Número de fases y neutros
- Resistencia y reactancia
- Material del conductor
- Temperatura de operación

▪ Fuentes DC y Baterías

El elemento de batería se basa en el modelo de elemento de fuente de tensión continua (*ElmDcu*). Los elementos *DC Voltage Source (ElmDcu)* y *Battery (ElmBattery)* se basan en el circuito equivalente del modelo compuesto por una fuente de voltaje DC ideal, una resistencia interna y una inductancia de salida. Por el tipo de tecnología, este tipo de elemento sólo se puede conectar a terminales DC.

Para el análisis de flujo de carga balanceado y desbalanceado de AC, se ignora la inductancia interna (*Li*) del modelo, por lo que sólo se considera la resistencia interna (*Ri*). La configuración se la realiza introduciendo valores de resistencia interna y voltaje nominal según sea la potencia que se requiera para inyectar al sistema.

▪ Generadores

El generador estático (*ElmGenstat*) es un modelo fácil de usar para representar cualquier tipo de generadores no giratorio. Los perfiles de generación se cargan automáticamente en el dispositivo usando una matriz de valores de potencia generada correspondiente a diferentes horas del día. Las aplicaciones típicas son:

- Generadores fotovoltaicos
- Celdas de combustible
- Terminales HVDC
- Compensadores de energía reactiva
- Generadores de viento

▪ Buses y cargas

Los buses, terminales o barras del sistema *Busbar (ElmTerm)* pueden representar postes, tableros generales, tableros de distribución, y acometidas, entre otros elementos que hacen parte de un sistema eléctrico de potencia. En la configuración básica este elemento tiene la posibilidad de crear un *Type* para almacenar en la biblioteca de dispositivos y ser usado en otros buses con las mismas características. El elemento *ElmTerm* requiere información de entrada para poder efectuar un flujo de carga, como:

- El tipo del sistema (AC o DC)
- La tecnología de las fases
- Voltaje nominal (Línea-Línea o Línea- Tierra)

En los sistemas eléctricos de potencia, la carga eléctrica consiste en varios tipos de dispositivos eléctricos, desde lámparas incandescentes y calentadores hasta grandes hornos y motores. PowerFactory brinda la posibilidad de usar un

modelo de carga General Load (*ElmLod*) que concentre la carga estática o dinámica de un conjunto de dispositivos eléctricos. Dentro de los parámetros básicos de configuración, existe la posibilidad de crear un *Type* para representar un tipo de carga en el circuito.

Por otra parte, para el flujo de carga es necesario especificar si la carga está balanceada o desbalanceada. Además, es posible definir los parámetros de entrada para la carga mediante un menú desplegable. Con base en los datos de consumo eléctrico de la carga disponible, se puede seleccionar la combinación apropiada de parámetros entre:

- S (potencia aparente)
- P (potencia real)
- Q (potencia reactiva)
- Cos (phi) (factor de potencia)
- I (corriente)

Dentro de la interfaz gráfica de PowerFactory, se trabaja con las representaciones de los elementos anteriormente mencionados como lo muestra la Figura 17. Es posible definir en la configuración de algunos modelos el número de elementos en paralelo que se van a usar, el valor por defecto es 1.

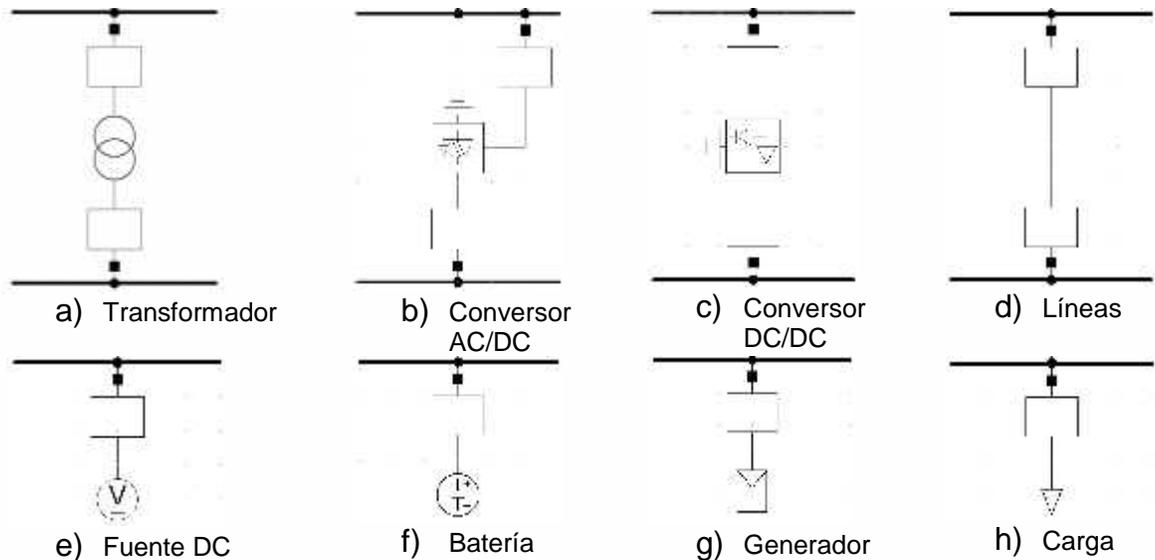


Figura 17. Elementos eléctricos de la interfaz de PowerFactory.

3.3. MODELO MICRORRED AC Y DC

Finalizado el proceso de medición de variables y de selección del software, se procede a diseñar el modelo de microrred AC y DC. Es preciso señalar que, se determinó por múltiples factores, que el lugar adecuado para el proceso inicial de diseño de la microrred DC sea el edificio de Laboratorios de docencia. Entre las características que se tuvieron en cuenta para la elección de esta locación se destaca la ubicación de los generadores distribuidos y sistemas de almacenamiento, el hecho que son nuevas instalaciones, el amplio espacio en el cuarto de control eléctrico para posible implementación, la facilidad de toma de medidas eléctricas gracias a la segmentación por pisos de las protecciones, y la buena distribución y organización de cableado, entre otros.

La implementación del modelo se realiza teniendo en cuenta parámetros reales de cada componente. Como se mencionó anteriormente, algunos componentes permiten crear elementos en la biblioteca o cargar una configuración preestablecida en el dispositivo a usar. En el caso de los transformadores se usa la configuración de PowerFactory dispuesta para capacidades de 112 kVA y 15 kVA, donde se establecen pérdidas por cobre, pérdidas sin carga, voltaje, frecuencia, etc. Los dispositivos convertidores AC/DC y DC/AC aceptan una configuración manual de sus parámetros, que se llevó a cabo considerando su eficiencia y su respuesta en distintas pruebas realizadas. Debido a la composición ideal de los convertidores DC/DC se opta por fijar un porcentaje de pérdidas que sea acorde a su eficiencia. De la misma forma las líneas de transmisión se configuran mediante distintos parámetros que el software exige para la simulación. Debido a que cada dispositivo tiene una configuración diferente, en el Anexo 1 se presenta los detalles más importantes que define la composición específica de cada componente.

3.3.1. Modelo microrred AC

Con la finalidad de establecer una comparación y generar un foco de estudio entre estos dos tipos de microrred, se inicia presentando en la Figura 18 el diagrama unifilar actual correspondiente al edificio de Laboratorios de docencia. El diagrama está compuesto por barrajes que representan los postes y tableros en la red, líneas de transmisión que tienen su origen en la red eléctrica externa y se extienden hasta alcanzar el edificio, un transformador que reduce el nivel de tensión para alimentar en su totalidad las cargas de cada piso y las FERs que incluyen dispositivos inversores con sus respectivos sistemas de almacenamiento.

3.3.2. Modelo microrred DC

Partiendo de la red mostrada en la Figura 13, se propone un diseño de microrred DC radial sobre el edificio como el propuesto en el modelo de la Figura 19. Este modelo de microrred incorpora varios elementos nombrados en la red AC anterior y además se suman dispositivos convertidores AC/DC como interfaces entre la red principal y la red del edificio y convertidores DC/DC para los enlaces entre las fuentes de energía y los buses de 380 VDC. Para el desarrollo de este

modelo se ha elegido 380 VDC como nivel de voltaje principal sin establecer conversiones aguas abajo, con la finalidad de no sesgar el punto de comparación entre las redes. En otras palabras, los voltajes comparativos son 208 V trifásicos para la red AC y 380 V unipolares en la red DC, y se define una carga agrupada a partir de este punto. De igual forma se plantea más adelante otro tipo de pruebas donde se incluyan dispositivos individuales, conversiones y demás características.

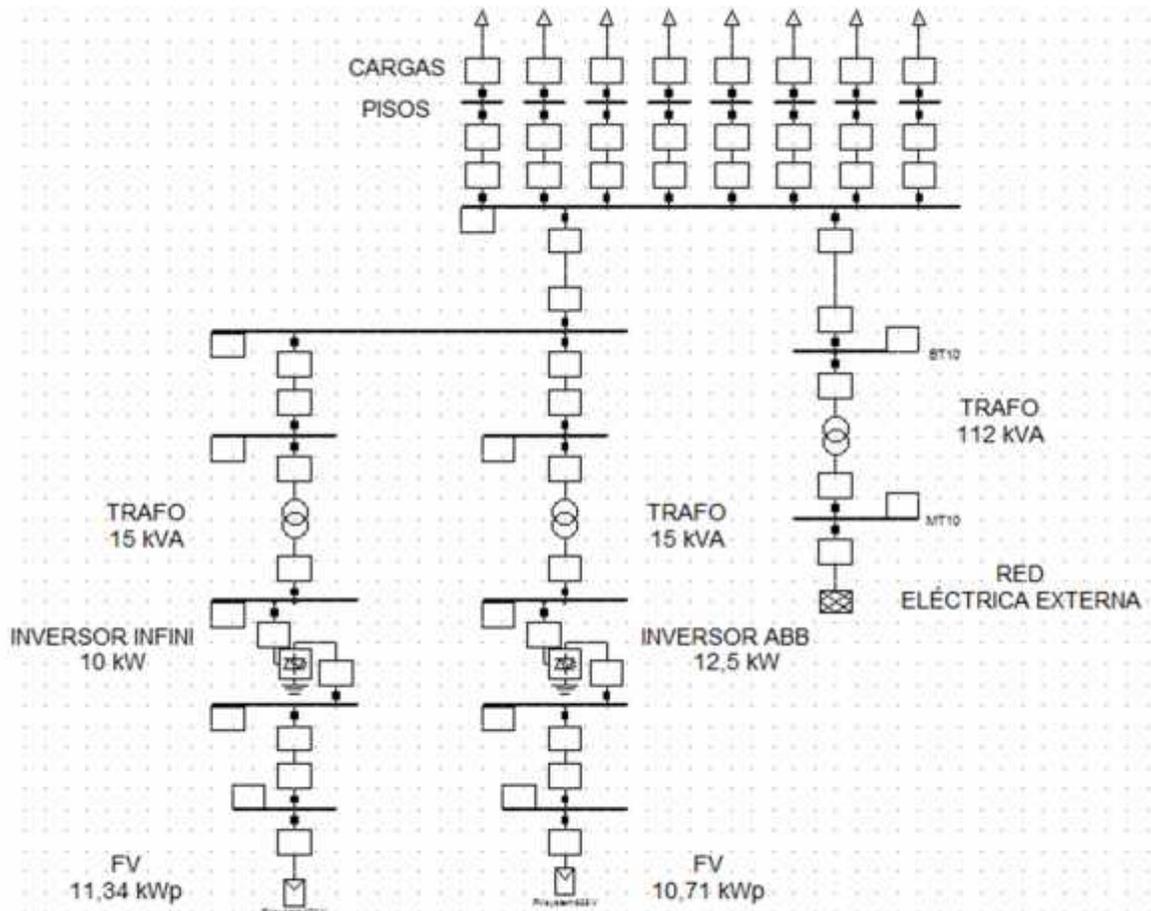


Figura 18. Modelo microrred AC edificio de Laboratorios de docencia.

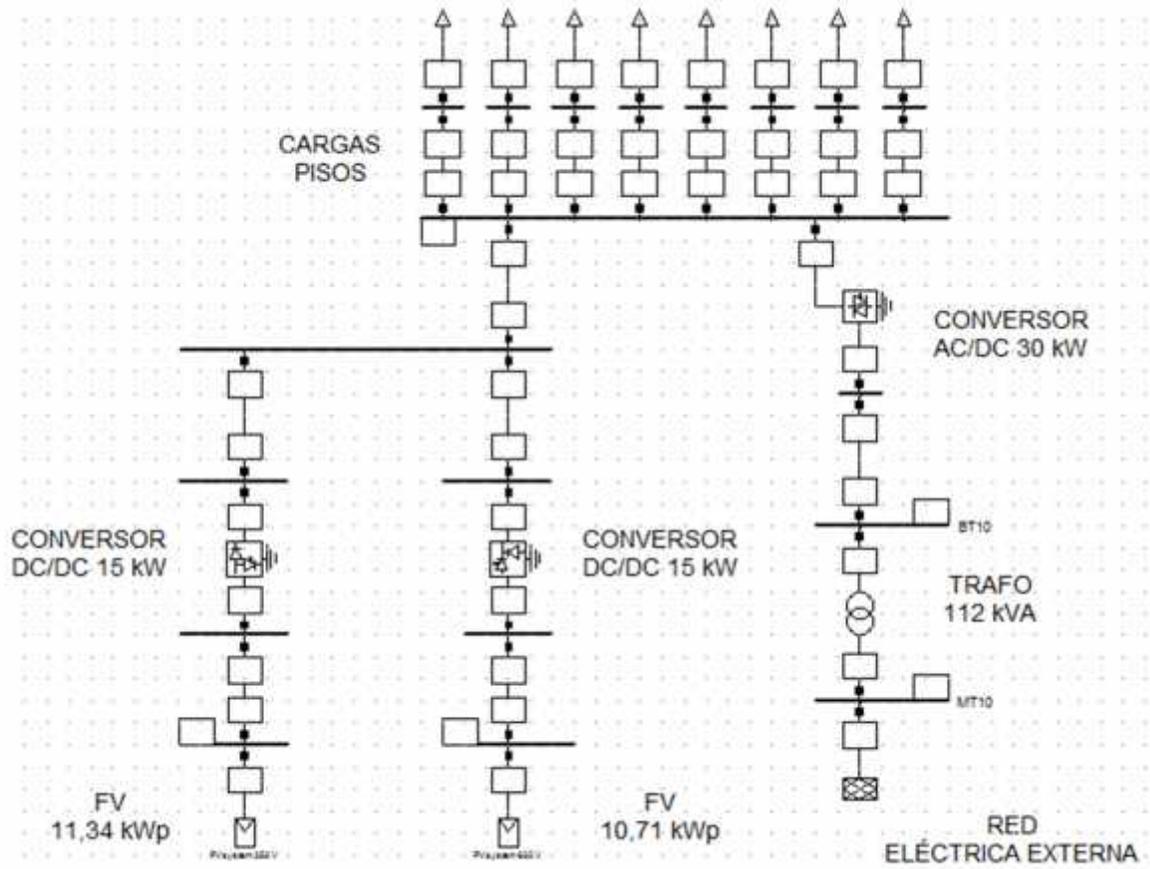


Figura 19. Modelo microrred DC edificio de Laboratorios de docencia.

4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas y simulaciones realizadas en PowerFactory relacionadas con el modelo de microrred AC actual y de microrred DC propuesto en el edificio. Las pruebas comparativas se llevan a cabo teniendo en cuenta dos aspectos principales. En primera instancia se analiza el cableado de distribución y en segundo lugar se examina el rendimiento de la generación de energía.

4.1. COMPARACION DE RENDIMIENTO DE CABLEADO

Este tipo de comparación está directamente relacionado con las pérdidas en potencia presentadas en el cableado eléctrico de cada microrred, AC y DC.

Previo a iniciar con las pruebas, es pertinente aclarar algunos conceptos. Las pérdidas de potencia equivalen a la diferencia entre la potencia suministrada y la potencia demanda, que se pueden clasificar en pérdidas técnicas y pérdidas no técnicas.

Las pérdidas técnicas constituyen una parte de la potencia que no es aprovechada y que el sistema requiere para su operación, y son debidas generalmente a las condiciones propias de las instalaciones. Estas están provocadas por la circulación de corriente eléctrica a través de la redes de transmisión y distribución. Por otra parte, las pérdidas no técnicas no establecen una pérdida total de potencia, que es utilizada por algún usuario sin retribuir costos. Estas pérdidas pueden presentarse por robo de energía, por fraude, por error de contabilización, etc. [68] – [70]. Naturalmente, el análisis de esta sección se enfoca en las pérdidas técnicas presentadas en un sistema eléctrico de potencia.

La pérdida de potencia en los cables dentro de una red es debida en gran parte a su resistencia. Es importante tener en cuenta que la resistencia de un cable para corriente alterna (AC) es distinta de la resistencia del mismo cable usado en corriente continua (DC). Cuando la corriente alterna fluye a través de un conductor, tiende a fluir hacia la superficie del mismo debido a un fenómeno llamado el efecto piel. Este efecto actúa para reducir el área eficaz de la sección transversal del conductor. Dado que la resistencia es inversamente proporcional al área de la sección transversal, el resultado es un valor elevado de resistencia comparado con el de corriente continua [65].

Con el fin de analizar las diferencias mencionadas, se compararon los valores de AC y DC de las resistencias de los cables correspondientes a algunos de los catálogos de los grandes fabricantes como General Cable, Centelsa y VIAKON, donde se encontró que la resistencia AC es mayor que la resistencia DC aproximadamente un 20% más para cables desde calibre 2 AWG hasta 14 AWG.

En resumen, la resistencia ofrecida por un cable es mayor para AC que DC, como se muestra en los estudios realizados en [71], [72].

4.1.1. Test de comparación cable N°4 AWG: Pérdidas en potencia y caída de voltaje

Mediante PowerFactory fue posible realizar esta prueba con el objetivo de comparar el rendimiento del cableado eléctrico estudiando las pérdidas de potencia y caída de voltaje en un sistema de distribución AC trifásico y un sistema de distribución DC unipolar. La Figura 20 expone los sistemas de comparación implementados usando la interfaz gráfica del software y sus componentes.

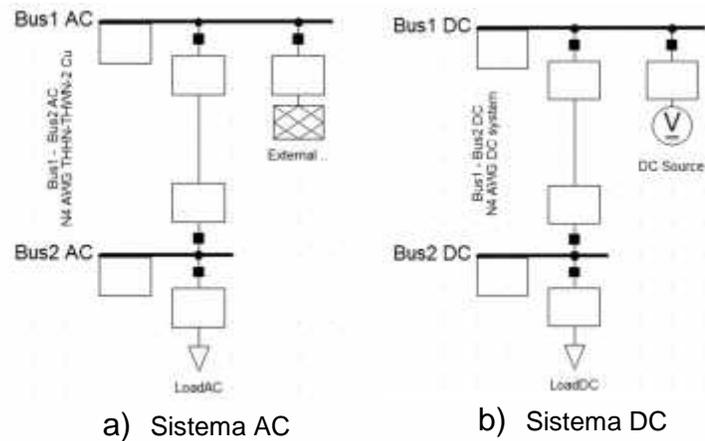


Figura 20. Sistemas AC y DC de comparación.

La evaluación se realizó teniendo en cuenta las condiciones enlistadas en la Tabla VIII. El valor de potencia de la carga del sistema se estimó en 11 kW considerando un valor promedio de consumo en el bloque de laboratorios de docencia. El cable eléctrico de calibre N° 4 AWG se eligió para las pruebas dado que es el conductor que distribuye la energía desde el cuarto eléctrico del bloque hacia cada uno de los pisos. Así se obtiene un punto de comparación real de la microrred AC frente a una microrred DC simulada. Se contempla una variación de distancia de 0 a 100 metros del cable con el objetivo de evitar resultados erróneos presenciados al aumentar la longitud a grandes distancias. Además ninguno de los cables de este calibre dentro del bloque presenta una extensión mayor a 100 m. El voltaje del bus DC se define como 380 V, en tanto el voltaje del bus AC se especifica trifásico de 208/120 V siendo esta la forma de distribución en las instalaciones.

TABLA VIII	
PARÁMETROS TEST DE CABLEADO N°4 AWG	
Potencia de la carga	11 kW
Cable conductor	N° 4 AWG
Distancia cable	0 - 100 m
Voltaje bus DC	380 V (unipolar)

Con la finalidad de comparar los sistemas de una forma más equitativa y pensando en que los sistemas de corriente continua no consumen potencia reactiva, esta no fue tomada en cuenta en el sistema de corriente alterna.

La Figura 21 muestra los resultados obtenidos durante el test relacionados con las pérdidas en potencia de cada sistema. Tanto en el sistema de distribución DC como en el AC, el aumento de las pérdidas se presenta de forma proporcional al incrementar la distancia del cable. Sin embargo, mientras que en el sistema AC las pérdidas aumentan a razón de 3 W/m, en el sistema DC las pérdidas se

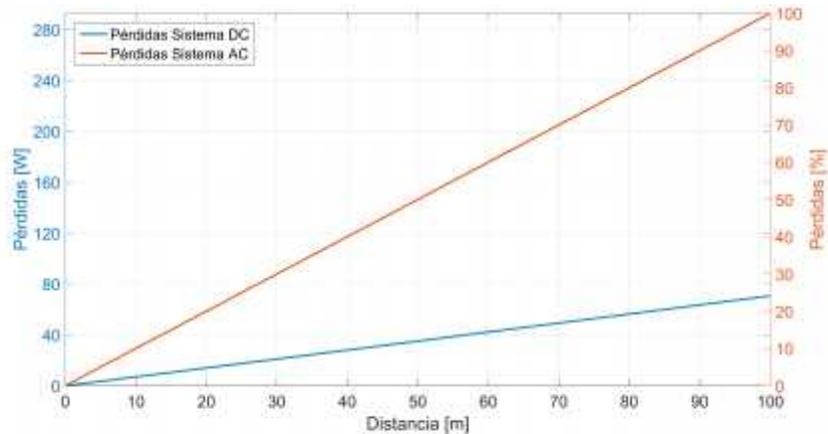


Figura 21. Pérdidas en potencia cableado N°4 AWG.

incrementan a razón de 0,7 W/m.

Los resultados finales reflejan pérdidas mucho más altas en el sistema AC. Las pérdidas alcanzan aproximadamente los 292,8 W cuando la distancia entre la fuente y la carga es de 100 m, comparado con las pérdidas en el sistema DC que tan solo son de 70,7 W en la misma distancia. Esto afirma que las pérdidas en el sistema DC tan solo alcanzan el 25% de las pérdidas totales presentadas en el sistema de distribución AC.

Estos resultados concuerdan con las comparaciones realizadas en [47] donde se afirma que al duplicar o triplicar la tensión DC en comparación con la tensión AC, las pérdidas del sistema DC serán solo del 15 al 20% de las del sistema de corriente alterna. Además, el cálculo de pérdidas tanto el sistema AC como del sistema DC obedecen a la ecuación (1) que se muestra a continuación:

$$P_{loss} = R * I^2 \quad (1)$$

Donde $I = \frac{P}{V}$ es la corriente que pasa por el cable, P es la potencia transmitida por el conductor, V es el voltaje del sistema y R es la resistencia del cable [26].

La Figura 22 indica la caída de voltaje en los dos sistemas. A medida que aumenta la distancia la caída de voltaje se hace más notoria en el sistema AC. Mientras que en el sistema DC se llega a un mínimo del 99,36% de su valor inicial, el sistema AC tiene un 2% más de caída en la misma distancia, llegando aproximadamente al 97% de 208 V. Al comparar la tasa de pérdida de cada sistema, en el caso DC se pierde aproximadamente 0,45V por cada 10 metros mientras el sistema AC pierde casi 0,6 V por cada incremento de 10 metros.

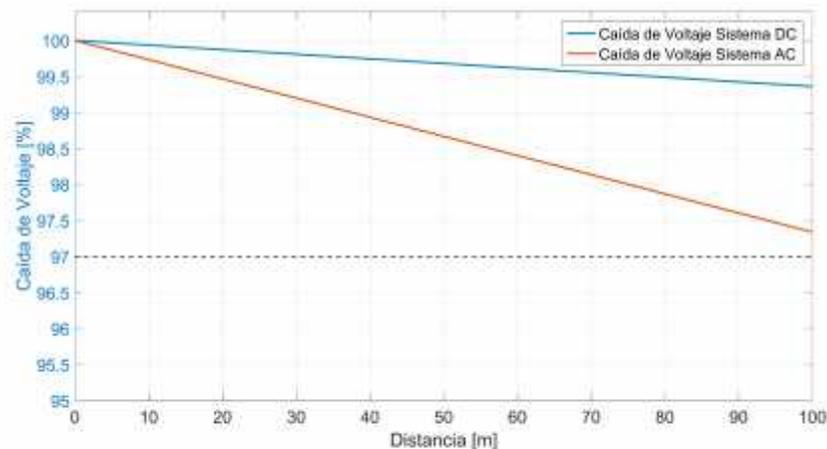


Figura 22. Caída de voltaje cableado N°4 AWG.

El test realizado al cable demuestra un mejor rendimiento en el sistema de distribución DC en comparación con el AC, reflejado en menores pérdidas y

pequeñas caídas de voltaje. Como resultado de esto, se produce una ganancia de eficiencia del sistema de 1% - 2% para un sistema de 380V DC si se asume una caída de voltaje en el sistema de cable de AC entre 1,5% - 3,0% como se indica en la norma IEC 60364-5-52 [77]. Esta ventaja aumenta cuando se comparan los sistemas AC que tienen algunas cargas reactivas, que no son posibles en sistemas DC [13].

Este resultado se apoya también en estudios realizados anteriormente donde se comparan diferentes configuraciones de cable. Se demostró que una instalación de 5 hilos en un sistema de corriente continua es ligeramente mejor que en corriente alterna, mientras que para instalaciones de tres hilos, DC es significativamente superior a AC en términos de capacidad de transferencia de potencia [73].

Igualmente, estudios señalan que el sistema DC está libre de inductancia, capacitancia y del efecto piel como se mencionó anteriormente. Esto explica que debido a ningún efecto de inductancia, el sistema de corriente continua tiene baja caída de voltaje comparada con el sistema de corriente alterna para la misma carga, y por lo tanto, se puede lograr una mejor regulación de voltaje. También por ausencia de capacitancia en los sistemas DC, se eliminarán las pérdidas de potencia que se producen en la carga y descarga.

Para el desarrollo de la investigación es de interés realizar un análisis de pérdidas de potencia en el cableado donde se consideren distintas potencias de carga. De esta forma se presenta en el Anexo 3 los resultados pertinentes.

4.1.2. Test de comparación cable N°12 AWG: Pérdidas en potencia y caída de voltaje

En vista de los estándares nombrados anteriormente relacionados con bajo voltaje en DC, específicamente 24 VDC, se ve la necesidad de analizar el cableado usado en instalaciones como oficinas y laboratorios. Por lo tanto, este test compara el tipo de cableado usado en el edificio que energiza directamente las cargas distribuidas en el espacio ocupado. La Tabla IX expone las condiciones del test a realizar.

TABLA IX PARÁMETROS TEST DE CABLEADO N°12 AWG	
Potencia de la carga	76 W
Cable conductor	N° 12 AWG
Distancia cable	0 - 10 m
Voltaje bus DC	24 V (unipolar)
Voltaje bus AC	120 V (monofásico)

El valor de potencia de la carga del sistema se estimó en 76 W teniendo en cuenta las conexiones de luminarias LED de 24 V a 38 W que serán tenidas en

cuenta más adelante en el diseño. El cable eléctrico de calibre N° 12 AWG se eligió para las pruebas en vista de que es el conductor que distribuye la energía desde los tableros de distribución de cada piso hasta cada laboratorio u oficina. Así se obtiene un punto de comparación real de la microrred AC frente a una microrred DC simulada. Se contempla una variación de distancia de 0 a 10 metros del cable con el objetivo de evitar resultados erróneos presenciados al aumentar la longitud a grandes distancias principalmente en el sistema de distribución de corriente continua. El voltaje del bus DC se define como 24 V unipolar, en tanto el voltaje del bus AC se especifica 120 V monofásico siendo esta la forma de distribución en las instalaciones.

La Figura 23 indica los resultados conseguidos durante el test concernientes a las pérdidas en potencia de cada sistema, mostrando un incremento de pérdidas proporcional a la distancia del cable. En esta prueba donde se analizan las pérdidas de potencia en el cableado, a diferencia de la realizada con el cable N°4 AWG, las pérdidas son más altas en el sistema DC alcanzando aproximadamente 0,5 W en 10 metros de longitud del cable N° 12 AWG. Por otro lado, las pérdidas del sistema AC son 10 veces más bajas en comparación a la red DC, esto debido al voltaje que se maneja en cada sistema.

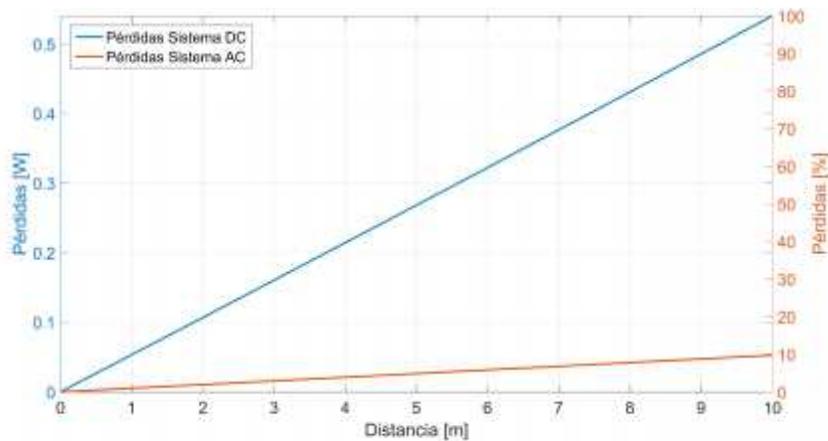


Figura 23. Pérdidas en potencia cableado N°12 AWG.

La caída de voltaje en los

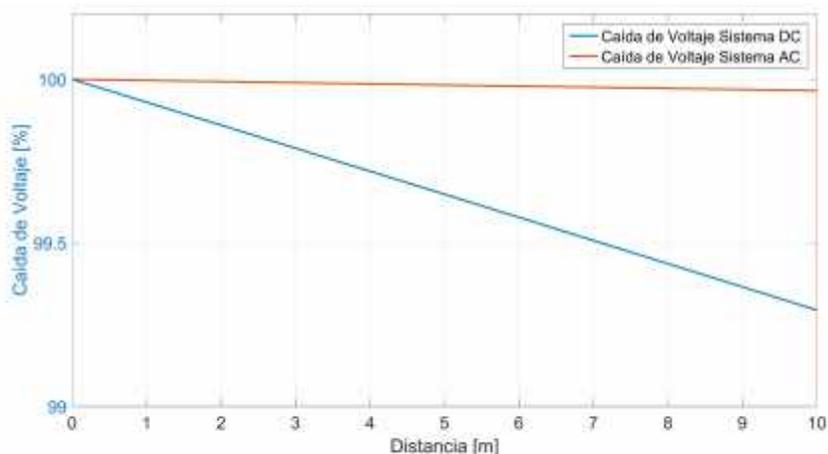


Figura señala la caída de voltaje en los

Figura 24. Caída de voltaje cableado N°12 AWG.

sistemas. A medida que aumenta la distancia la caída de voltaje se hace más notoria en el sistema DC. Mientras el sistema AC llega a un mínimo del 99,97% de su valor inicial, el sistema DC tiene un 0,68% más de caída en la misma distancia, llegando aproximadamente al 99,3% de 24 V. Aunque la caída de voltaje en DC es mayor, no se supone relevante debido a una diferencia casi inapreciable con respecto a la caída de voltaje en AC.

4.2. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

Para este test se ha contemplado el diseño de los arreglos fotovoltaicos implementados en el edificio. En el desarrollo de esta sección se tiene en cuenta un caso de estudio donde se analizan diferentes características de las pérdidas y penetración de la generación distribuida.

4.2.1. Caso de estudio: Generación semanal vs. Demanda semanal

Apreciando la información presentada en la Sección 1.2, relacionada con la caracterización de la demanda de las cargas y las FERs, se han elegido los datos de generación y de potencia medida en la carga del bloque durante una semana. Estos datos se usan para realizar el análisis con la intención de comparar distintos grados de penetración frente a diferentes consumos de las cargas.

Este estudio implica dos suposiciones de desarrollo:

- La totalidad de las cargas del sistema de distribución DC se consideran nativas con conexión directa al bus DC.
- El costo del kWh de energía en la Universidad de Nariño se ha establecido en 420 pesos colombianos (COP).

La Figura 25 muestra la información correspondiente a las pérdidas promedio obtenidas en simulación mediante valores medidos presentados durante una semana en el edificio, con base en las configuraciones estándar de microrredes AC y DC

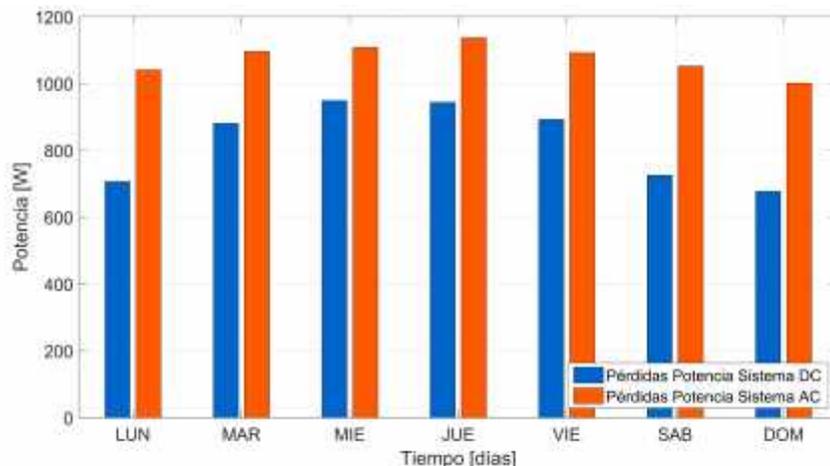


Figura 25. Pérdidas diarias en el edificio.

presentadas en la sección anterior, Figuras 18 y 19.

Según los resultados de esta prueba, las pérdidas en la microrred DC se mantienen en un valor promedio de 800 W mientras las pérdidas encontradas en la microrred AC ascienden hasta los 1100 W. Examinando la composición de las pérdidas, en el sistema AC éstas competen en un 43% a pérdidas presentadas en el transformador de 112 kVA, 18% a pérdidas de los inversores, 33% corresponden a las pérdidas en los transformadores ubicados después de los inversores y el 6% restante está reflejado en pérdidas del cableado.

Por otra parte, las pérdidas promedio en el sistema DC están compuestas por un 57% de pérdidas en el transformador principal, un 13% debido a pérdidas en el convertor AC/DC, 26% referente a los convertidores DC/DC y el 4% restante corresponde a pérdidas en el cableado.

Supuesto esto, si se representa en energía la diferencia entre las pérdidas presentadas en cada sistema, la Figura 26 indica un valor aproximado de 43 kWh de ahorro con los datos de una semana al finalizar el test. Por lo tanto, si se calcula el valor de ahorro en dinero, en una semana se ahorrarían \$18.060 COP aproximadamente. Si se aumenta el tiempo de cálculo, en un mes se ahorrarían

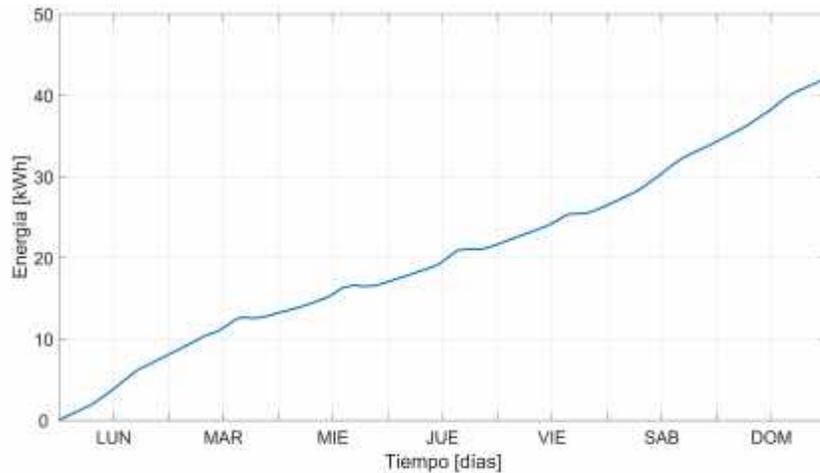


Figura 26. Energía ahorrada en una semana con un sistema DC.

\$72.240 COP y en un año el valor alcanzaría aproximadamente \$866.880 COP.

Otro tipo de análisis producto de esta sección involucra la penetración de los sistemas fotovoltaicos en el sistema. Para esto, se presenta como indicador la reducción de la energía consumida directamente de la red eléctrica como se muestra en la Figura 27.

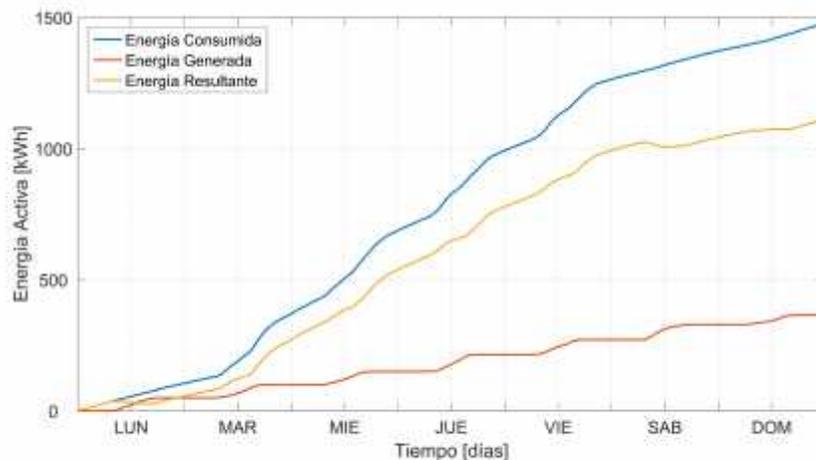


Figura 27. Energía consumida, generada y resultante en el edificio.

Esto implica que la energía generada por los sistemas fotovoltaicos se resta del consumo total, tal y como se está realizando actualmente en el edificio. Tras finalizar la semana, los arreglos solares habrán inyectado a la red un total de 365 kWh de energía generando así una reducción de \$153.300 pesos COP semanales en la factura de energía del campus universitario y realizando una estimación anual se ahorrarían \$7'358.400 pesos COP.

4.3. COMPARACIÓN DE ARQUITECTURAS APLICABLES EN EL DISEÑO DE LA MICRORRED DC

Este proceso implica el análisis de desempeño frente a las diferentes arquitecturas de microrred DC presentadas en la Sección 2.7, donde se matizan distintas características de funcionamiento y atributos propios de cada tipo. La comparación se desarrolla a través de casos de estudio realizados en

PowerFactory. Las Figuras 28, 29, 30 y 31 muestran las arquitecturas adaptadas para la microrred del edificio diseñadas en el software.

4.3.1. Respuesta frente a condición de falla

Se presentan las distintas respuestas ante un evento de falla simulado en el software. Para este test, se ha contemplado el diseño de los arreglos fotovoltaicos implementados en el edificio. En el desarrollo de esta sección se analiza la respuesta de la microrred DC en las distintas arquitecturas, examinando la robustez de las estructuras observando la capacidad de mantener el estado estable del sistema ante perturbaciones.

- Arquitectura radial: Existe la posibilidad de aislar los sistemas de generación y las cargas, sin embargo, al tener un solo bus que une todos los elementos del sistema, se dificulta la segmentación de la microrred. El control de este tipo de arquitectura no es tan complejo puesto que solo existe un bus de distribución.
- Arquitectura de anillo: A diferencia del anterior, presenta un bus alterno para corregir posibles fallas con el uso de *switches* o *reconectores* que ante la eventualidad aíslan el bus defectuoso por medio de un sistema de control de flujo de potencia.
- Arquitectura de malla: Esta arquitectura brinda distintas opciones de corrección puesto que posee variedad de rutas de aislamiento y distribución. Asimismo cuenta con múltiples interfaces con la red principal proporcionando fiabilidad en la energización de cargas.
- Arquitectura zonal: De manera similar a la anterior arquitectura, este tipo ofrece distintas posibilidades de flujo de potencia entre los generadores distribuidos y las cargas, con una diferencia marcada en cuanto a la distribución de las FERs y cargas en zonas específicas.

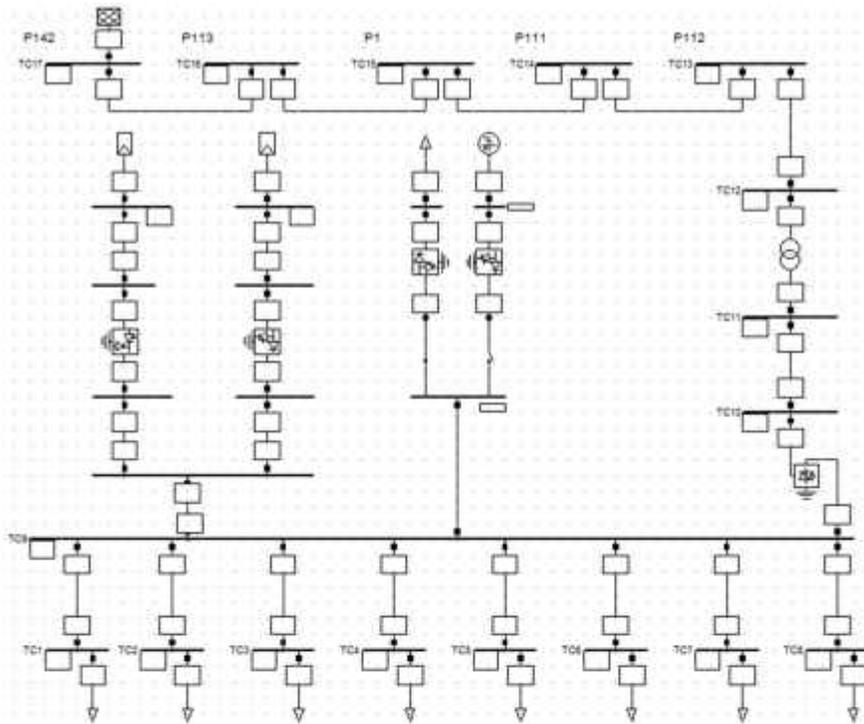


Figura 28. Arquitectura radial implementada en PowerFactory.

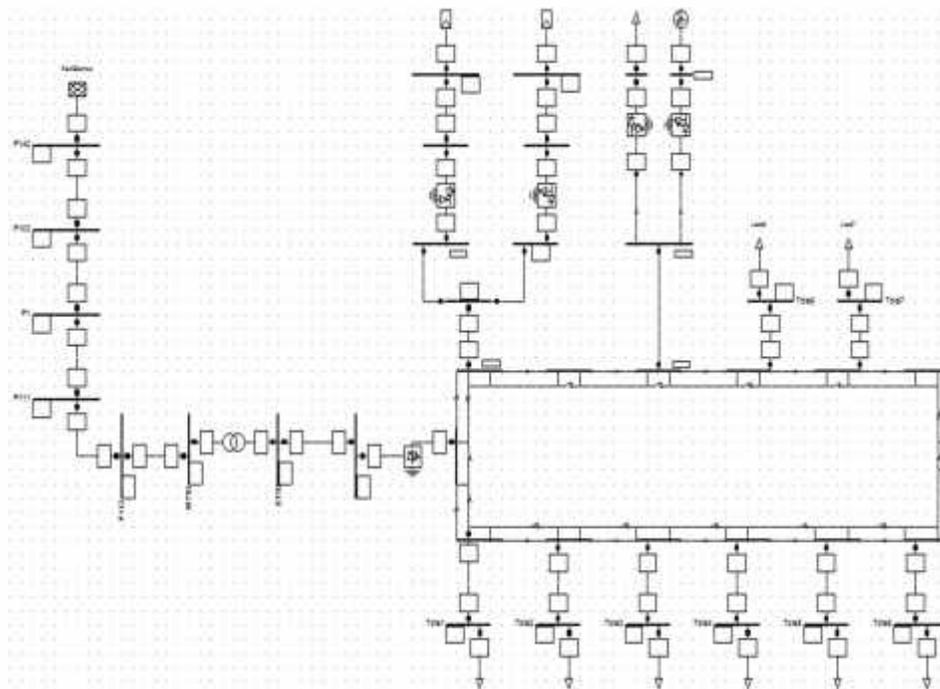


Figura 29. Arquitectura de anillo implementada en PowerFactory.

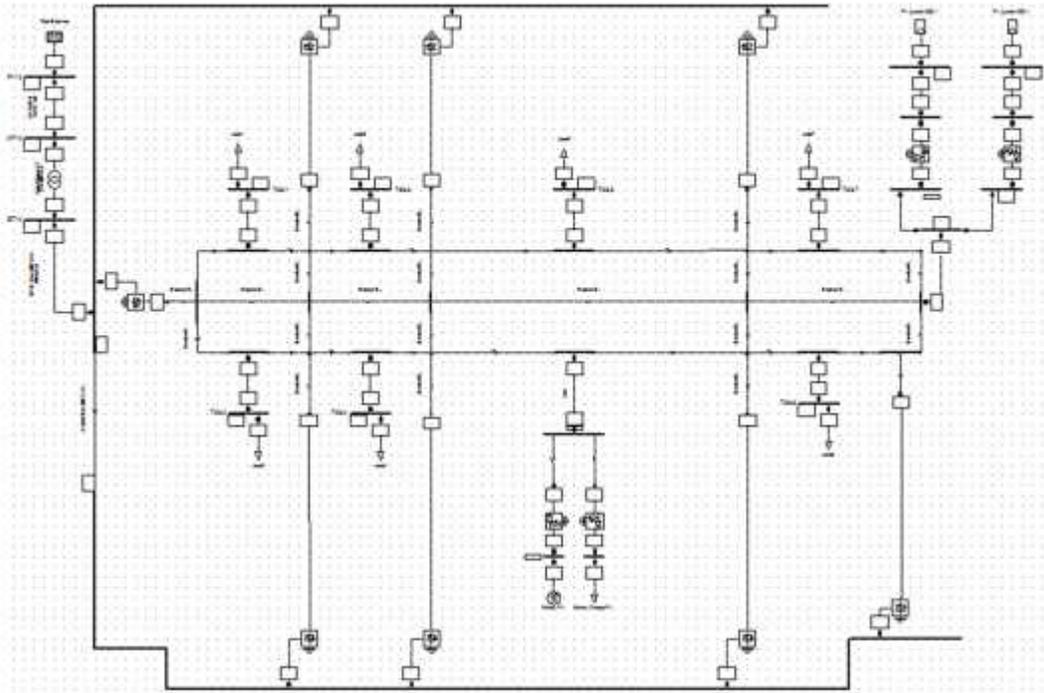


Figura 30. Arquitectura de malla implementada en PowerFactory.

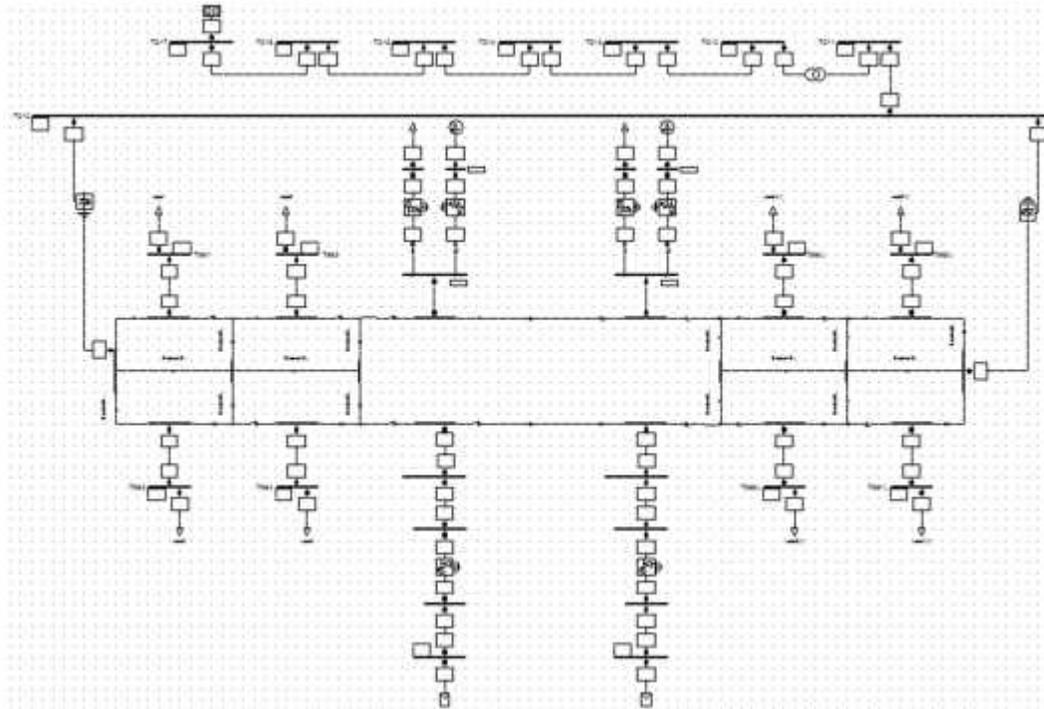


Figura 31. Arquitectura zonal implementada en PowerFactory.

4.3.2. Funcionamiento en modo isla

En general las microrredes poseen la capacidad de operar de forma aislada o desconectada de la red principal, valiéndose de las opciones provistas por los generadores distribuidos y sistemas de almacenamiento de energía. Dos condiciones son significativas para un correcto funcionamiento. Primero satisfacer la demanda total de energía del edificio (o de las cargas prioritarias seleccionadas) y segundo controlar la estabilidad de voltaje del sistema. Estas dos circunstancias pueden ser resueltas con la generación de energía por parte de las FERs y en caso de no ser suficiente se procede a inyectar energía por parte de los sistemas de almacenamiento.

PowerFactory permite crear eventos de desconexión de la red eléctrica en cualquier lapso de tiempo. En ese instante se realiza un diagnóstico tanto de generación como de demanda de energía para tomar una decisión y lograr suplir el consumo de las cargas.

Cuando la demanda es menor que la generación de energía, los generadores distribuidos se dedican a la carga de baterías y distribución de potencia para no sobrecargar los buses evitando elevaciones de voltaje que perjudiquen el sistema.

Si la generación no es capaz de suplir el consumo, las baterías del sistema entran en funcionamiento para satisfacer la potencia demandada y por supuesto controlar la estabilidad del voltaje. Este es un inconveniente común para el funcionamiento en modo isla, puesto que en condiciones extremas se determina una energización simplemente de cargas prioritarias, con una demanda menor a la entregada por las FERs y sistemas de almacenamiento de energía. La respuesta del sistema frente a este evento depende casi exclusivamente del método de control empleado.

La simulación de este caso de estudio tiene en cuenta varias consideraciones para el funcionamiento aislado de la microrred DC:

- En vista de las ventajas presentadas y ser la arquitectura que mejor se adapta al diseño de la microrred DC en el edificio, se elige la arquitectura de malla para realizar las pruebas.
- Para efectuar el evento de desconexión se ha elegido el día de la semana con mayor demanda de potencia por parte de las cargas.
- Por su parte, se ha elegido el día de mayor generación de los sistemas fotovoltaicos instalados.

La Figura 32 apunta una representación de un evento de desconexión de la red, provocando el funcionamiento en modo isla de la microrred DC. En este caso, la hora de desconexión en el edificio se presenta a las 9:30 am de un día con las condiciones de consumo y generación antes expuestas.

La inyección de energía por parte del sistema de almacenamiento respalda la generación fotovoltaica con la finalidad de suplir la demanda de las cargas del edificio y mantener la estabilidad de voltaje del sistema como se indica en la Figura 33. La caída de voltaje en el bus principal de la microrred DC no es mayor al 0,07% permaneciendo en un voltaje adecuado para la operación.

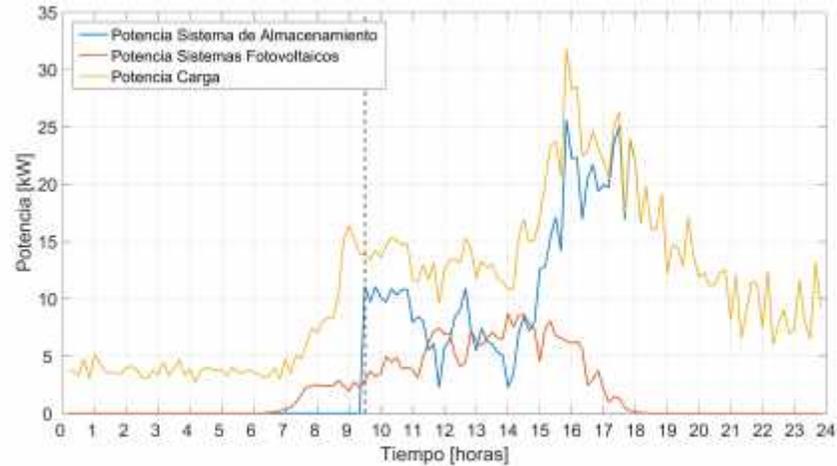


Figura 32. Funcionamiento en isla de la microrred DC.

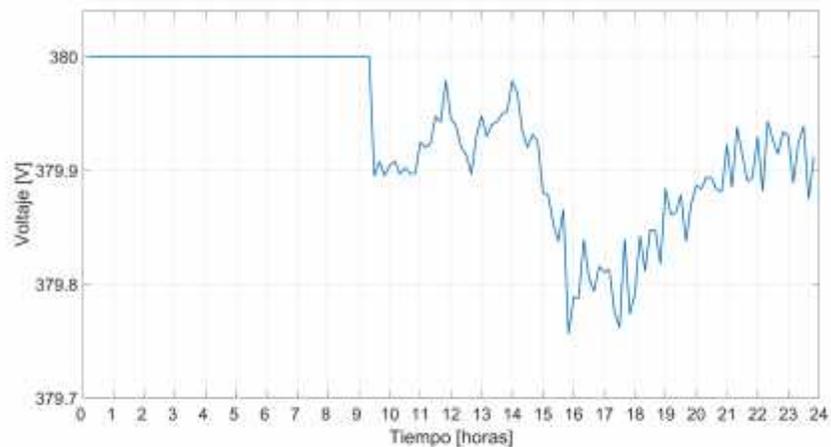


Figura 33. Caída de voltaje en modo isla de la microrred DC.

4.4. ANÁLISIS TÉCNICO-ECÓNOMICO

El análisis técnico - económico puede ser examinado en dos etapas. La primera fase analiza la factibilidad técnica del sistema DC y propone una solución

con los dispositivos que la componen. En la segunda parte se determina el costo de cada dispositivo y de la microrred DC en su totalidad. Igualmente, esta sección está destinada a una comparación entre el plan propuesto de microrred y la microrred implementada actualmente en el campus.

4.4.1. Plan propuesto de microrred DC para el edificio

Como se ha señalado en la Sección 2.5, los sistemas de distribución DC carecen de regulación y estandarización de normas generales, por lo que hay varias configuraciones diferentes y niveles de voltaje que pueden ser empleados.

Un aspecto fundamental en el diseño está relacionado con la definición de la escala de la microrred DC. Los niveles de tensión que se utilizan en una microrred DC son importantes puesto que definen parte de su estructura topológica ya que es diferente si se establece un valor de tensión único para toda la microrred o se consideran más de uno. En consecuencia, utilizar valores adecuados de tensión es significativo en la operación de la microrred [18].

Entendido esto, la elección de la escala y la arquitectura con la que se va a diseñar la microrred DC se basa en el análisis de las actuales instalaciones demostrativas existentes alrededor del mundo [11] – [17], y los esfuerzos de normalización de organizaciones internacionales antes mencionados. Dado que los sistemas de distribución DC han sido ampliamente implementados en la industria de las telecomunicaciones, los niveles de voltaje utilizados para aplicaciones residenciales y edificios parecen coincidir a los estándares utilizados en los centros de datos (380-400 VDC) [20], [40], [56], [74].

4.4.1.1. Parámetros de diseño de la microrred DC

Para definir los parámetros de diseño como potencia, voltaje, escala, dispositivos y cargas, se examinan resultados obtenidos en capítulos anteriores correspondientes a particularidades de la microrred y características de las instalaciones donde se encuentra implementada.

▪ Potencia

Un aspecto importante para el diseño de la microrred DC es la información obtenida durante el proceso de caracterización de la demanda en el Capítulo 1. Del procedimiento mencionado se destaca para el diseño la potencia pico promedio registrada durante uno de los días con un valor aproximado de 30 kW.

Así mismo, el procesamiento de la información conseguida en las mediciones resulta útil para presentar valores máximos de potencia activa y reactiva registrada en cada piso durante los siete días como lo indica la Tabla X. El valor total de potencia activa y reactiva son 46,5 kW y 10,7 kVAR respectivamente. Al igual que el valor pico registrado, estos valores se consideran parámetros de diseño de la microrred DC.

TABLA X		
POTENCIA MÁXIMA REGISTRADA POR PISO		
Piso	Activa [W]	Reactiva [Var]
Sótano	8582,8	2375,6
Morgue	1368,5	708,7
Piso 1	4708	1453,7
Piso 2	165,4	15,6
Piso 3	11093,4	1860,3
Piso 4	6832	775,9
Piso 5	4377,4	192,1
Piso 6	9323,3	3340,2
Total	46451	10722

▪ Voltaje y polaridad

La elección del voltaje nominal del sistema presenta diferentes puntos de discusión como: las normas de seguridad de acuerdo con las leyes y normas de varios países, el voltaje de las fuentes de generación de energía distribuida, las convenciones en el campo de las telecomunicaciones, las tensiones que se han utilizado en las pruebas de verificación anteriores, las tensiones nominales de los componentes del equipo, las formas de onda de voltaje AC y los méritos de un sistema de distribución de HVDC en eficiencia y condiciones de cableado [25]. Así, según estas condiciones se establece que 380 VDC es un voltaje adecuado y que cumple con todas las requisitos para aplicar en un sistema distribución DC.

Además, con base en los estándares desarrollados por EMerge Alliance y la contribución de estándares [24], [75] por parte de organizaciones internacionales como ETSI y IEC SEG4, se determina para el plan propuesto la escala de la microrred DC en el edificio. La arquitectura de la microrred se basa en un bus DC de 3 hilos, con polos positivo, negativo y neutro. La distribución de corriente continua proporciona un rango de voltaje de +/- 190 V (380 V) bipolar y 24 V unipolar, a través del cual integrará un número de fuentes de energía renovable, como generadores fotovoltaicos, eólicos, sistemas de almacenamiento basados en baterías y las cargas del sistema. Este tipo de arquitectura brinda confiabilidad y disponibilidad de abastecimiento de energía frente a una condición de falla de uno de los polos. Asimismo, buscando eficiencia y confiabilidad en la operación de la microrred, se opta por una arquitectura mallada juzgando las ventajas que trae a la microrred estudiadas en anteriores capítulos.

4.4.1.2. Componentes de la microrred DC

Una microrred DC se puede diferenciar dependiendo de los elementos que la componen. Los componentes comunes presentados en una microrred son las fuentes de generación distribuida y las cargas que consumirán la energía del

sistema. Además, puede constituirse por un sistema de almacenamiento para tener un respaldo de energía [61], [74].

En este apartado se presentan los dispositivos añadidos a la red tradicional con la finalidad de desarrollar un diseño de microrred DC. Durante el proceso de búsqueda, se crea un inventario de dispositivos de distintos proveedores con diferentes características con el objetivo de comparar y seleccionar el que mejor se adecue al diseño. Los dispositivos que cumplen con las condiciones de diseño de la microrred DC y se adaptan de mejor manera al sistema, se describen a continuación.

- **Transformador**

El transformador de 112 kVA, usado en la microrred actual cuenta con la posibilidad de ser reconfigurado y trabajar en los voltajes adecuados dentro de la microrred DC. Por este motivo es un dispositivo que puede usarse en los dos tipos de microrred, tanto para 208 V trifásico como para 408 V trifásico.

- **Cargas**

Como consecuencia de la falta de normalización de voltajes para el desarrollo de una microrred DC, se ha dificultado estandarizar dispositivos y equipos para conexión directa a una red de corriente continua. No obstante, algunos grupos de empresas han desarrollado productos patentados con el objetivo de implementar y evaluar su rendimiento dentro de un sistema de distribución DC. Un ejemplo de dispositivos desarrollados son las luminarias LED 24V DC fabricadas por Lithonia Lighting presentados en la Figura 34.



Figura 34. Luminaria LED24 VDC 38 W

Con base en esta alternativa, el diseño de la microrred DC dentro del bloque conlleva un cambio en las luminarias de cada piso. Estos dispositivos tienen un consumo de 38 W y entregan 100 LPW, es decir un total de 3800 lúmenes en el espacio de operación. Este tipo de luminarias LED 24 V son adecuadas para reemplazar las luminarias fluorescentes actuales, puesto que son más eficientes.

▪ Conversor AC/DC

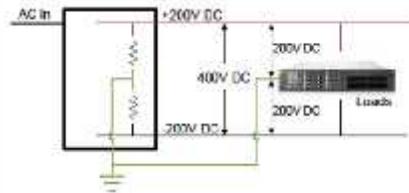
Es muy importante analizar cómo fluye la energía eléctrica entre las redes AC y DC. De hecho, las redes inteligentes DC deben ser diseñadas con base en un flujo bidireccional de energía, en el cual la electricidad generada por algunas fuentes de energía renovable, como paneles fotovoltaicos, celdas de combustible o aerogeneradores, se puede transferir de nuevo a la red de AC para respaldar la calidad y la estabilidad de la red eléctrica [1]. Teniendo en cuenta esto, la microrred DC puede tener un sistema de potencia que la conecte a la red eléctrica para inyectar y/o consumir energía de ella.

En vista de que las cargas que serán implementados dentro del edificio son principalmente luminarias DC de 38 W, y que en total consumen 25,5 kW si todas estuvieran encendidas, se ha elegido el conversor NetSure™ 4015 30 kW 400 VDC marca Vertiv (Emerson) mostrado en la Figura 35a.

Este sistema de potencia está diseñado con un método ajustable de voltaje para aplicaciones que operan hasta los 400V DC, como también a 380V DC. La base del sistema es un rectificador de 15 kW eSure™, con tecnología de conmutación de alta frecuencia. Equipado con estos rectificadores, el sistema



a) Conversor AC/DC NetSure 4015 - 30 kW 400 VDC



b) High Resistance Mid-Point Ground Converter AC/DC.

Figura 35. Conversor AC/DC NetSure 4015 y HRMP.

ofrece una alta del 97% en un amplio rango de operación y confiabilidad.

La serie NetSure 4015 incluye un punto intermedio de alta resistencia como se puede ver en la Figura 35b *High Resistance Mid-Point Ground (HRMG)* como característica incorporada de seguridad. Este concepto, que corresponde a la topología de puesta a tierra de IEC 61557 [76], no sólo aumenta la seguridad del personal, sino que también asegura la continuidad del suministro de potencia bajo condiciones de falla a tierra, permitiendo diseñar una microrred bipolar de +/- 190 V DC. Más información sobre esta configuración, las conexiones, enlace de datos de 400 V CC y equipos de telecomunicaciones se pueden consultar en [75].

▪ **Cableado**

El diseño de cableado de las instalaciones eléctricas en un edificio está directamente relacionado con el consumo de potencia por parte de las cargas, así como del voltaje y la corriente que distribuya. Pensando en un diseño del sistema adecuado y con características propias respecto al cableado, es importante analizar los consumos de potencia del bloque diferenciando cada piso como se realizó en la sección inicial del documento.

El calibre del cable usado en el diseño se ha mantenido igual a de las instalaciones puesto que no hay razón para efectuar el proceso de cambio. Entonces según lo presentado en el Capítulo 1, el cableado de distribución dentro del bloque es de calibre N° 4 AWG para llegar a cada piso desde el cuarto eléctrico y N° 12 AWG para energizar las cargas en cada laboratorio u oficina. Esto ha dado lugar a una confrontación entre la microrred AC implementada y la microrred DC diseñada. Es importante aclarar que aunque el tipo de cableado usado es el mismo, existen parámetros como la resistencia que varía según el sistema donde se esté usando como lo indica la Tabla XI [11].

TABLA XI
CARACTERÍSTICAS DEL CABLEADO THHN-THWN-2 CU

Calibre	Resistencia AC a 20°C (/Km)	Resistencia DC a 20°C (/Km)	Voltaje Nominal [V]	Capacidad Corriente [A]
N°4 AWG	1,047	0,8347	600	95
N°12 AWG	6,56	5,31	600	30

▪ **Convertor DC/DC Cargas**

Por otra parte, es también importante mantener un nivel de voltaje regulado en los buses DC del sistema. Por ejemplo, aunque los paneles fotovoltaicos pueden combinarse para lograr el voltaje deseado, sus tensiones de salida no siempre permanecen constantes.

Por lo tanto, como se muestra en la Figura 36a, se necesitan convertidores DC/DC para ajustar el sistema fotovoltaico a la tensión del bus DC. Del mismo modo, normalmente se necesitan convertidores DC/DC para la conexión de

dispositivos de almacenamiento y por supuesto para alimentar las cargas de bajo voltaje.

El Power Server Module 380 de Nextek convierte la alimentación de 380 VDC a 24 VDC a través de 16 salidas individuales de Clase 2 como se muestra en la Figura 36b. El Power Server Module tiene un control remoto inalámbrico y un sistema de monitoreo. Además, la ventaja de este dispositivo es que tiene un sistema de distribución seguro de corriente continua y de bajo voltaje que soporta la iluminación DC y otras cargas.

Este dispositivo acepta entradas de alimentación tanto de fuentes de DC como AC, para asegurar que sus sistemas nunca estén sin energía.



a) Conversor Multifuncional Power Server Module.

b) Esquema de conexión microrred DC. Adaptada de [17].

Figura 36. PSM y esquema microrred DC.

▪ Conversor DC/DC FERs

El convertor DC/DC de 15 kW de Emerson mostrado en la Figura 37, cuenta con un rango de voltaje de entrada entre 260 y 1000 VDC desde un sistema fotovoltaico y salida hacia un bus de 380 VDC. Puede ser configurado para actuar como dispositivo elevar de voltaje *Boost* o para disminuir el voltaje *Buck* según los requerimientos.



Figura 37. Conversor DC/DC MPPT 15 kW.

Está equipado con un dispositivo MPPT para conversión de energía solar realizando un seguimiento del punto de máxima potencia para regular la energía producida por un arreglo fotovoltaico u otro generador de corriente directa.

A manera de resumen, un esquema del diseño completo propuesto para la microrred se muestra en la Figura 38, incluyendo los arreglos fotovoltaicos, convertidores DC/DC MPPT dedicados para sistemas fotovoltaicos, convertidores DC/DC bidireccionales de carga de baterías, convertidores AC/DC como interfaz con la red eléctrica, convertidores multifuncionales DC/DC y las luminarias de 24 VDC.

4.4.2. Comparación técnico-económica de las microrredes

Para proporcionar estimaciones más precisas de estos costos de inversión y beneficios, este análisis presenta un estudio basado en los dispositivos de cada microrred, su consumo y sus pérdidas.

A continuación se presentan la Tabla XII y la Tabla XIII con los costos aproximados de los dispositivos convertidores que operan tanto en la microrred DC diseñada como en la microrred actual implementada, respectivamente.

Cantidad	Dispositivo	Costo estimado
1	Convertor DC/DC 2,5 kW	1'440.000 COP/kW
2	Convertor DC/DC 15 kW	900.00 COP/kW
2	Convertor AC/DC 15 kW	500.000 COP/kW
21	Power Server Module 1,6 kW	6'657.000 COP/kW
672	Luminarias LED 24 VDC 38 W	3'006.315 COP/W

El costo total de la microrred DC, considerando los dispositivos de los 7 pisos, es aproximadamente 148,8 millones de pesos. Es claro que debido a la condición emergente de esta nueva tecnología, los componentes poseen un precio elevado en comparación con los elementos que componen una red tradicional. Para comparar, la Tabla XIII presenta el valor aproximado de los dispositivos equiparables de la microrred AC.

Cantidad	Dispositivo	Costo estimado
1	Inversor Híbrido DC/AC 10 kW	1'400.000 COP/kW

1	Inversor DC/AC 12,5 kW	670.000 COP/kW
672	Luminarias Fluorescentes 4x17 T8 68 W	296.470 COP/W
672	Balastos electrónicos 4x17 W 68 W	444.705 COP/W

El valor final asciende aproximadamente a 72,7 millones de pesos COP. Es evidente una reducción en la inversión inicial de la microrred AC, no obstante conforme con los test realizados anteriormente, con el transcurso del tiempo se recuperaría la inversión y a largo plazo se reflejaría un ahorro de energía.

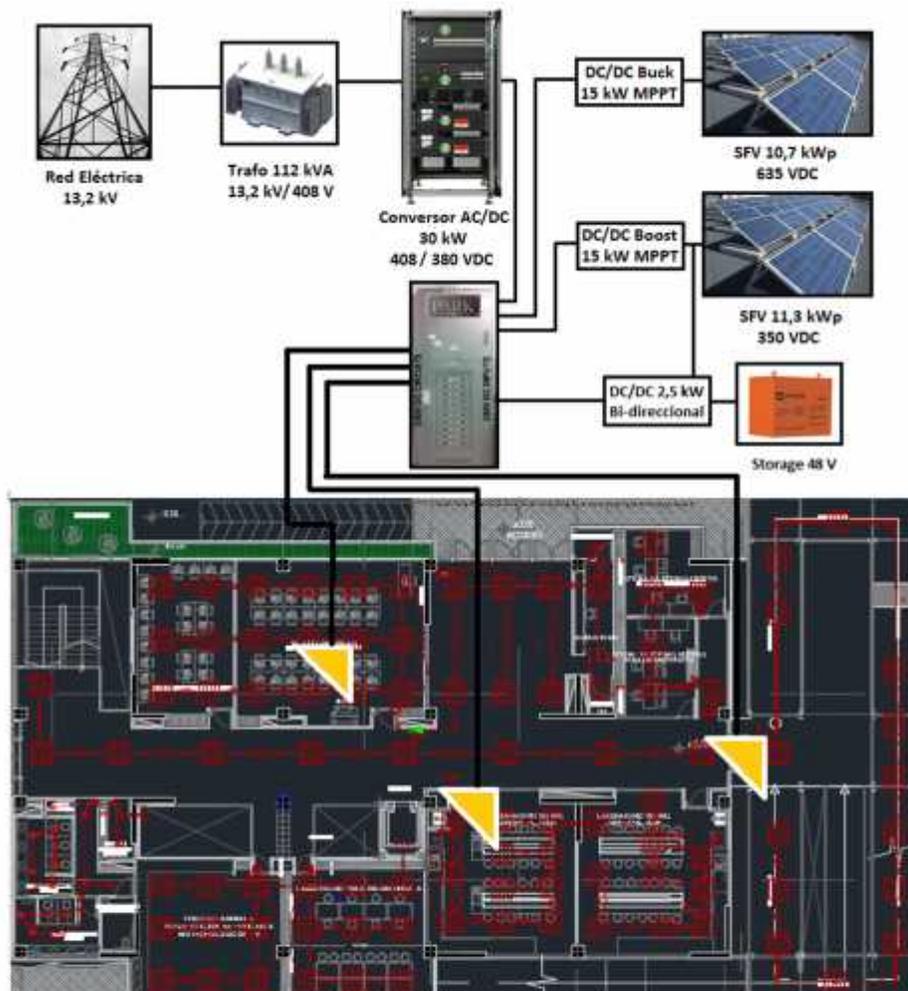


Figura 38. Plan propuesto de microrred DC para un piso en el edificio.

Teniendo en cuenta una mayor eficiencia de las luminarias LED, el consumo de potencia por parte de cada dispositivo disminuye 30 W en comparación a las luminarias fluorescentes actuales. Por consiguiente, realizando una estimación de

las horas de uso de las lámparas en todo el edificio y considerando que las horas de funcionamiento de estos dispositivos en todos los pisos a menudo no coinciden, se ha determinado que permanecen encendidas en una observación global de la siguiente forma:

- Luminarias pasillos: 3 horas al día.
- Luminarias laboratorios y demás oficinas: 5 horas al día.

Por lo tanto, considerando que los pasillos contienen 9 luminarias, en conjunto consumen 13,98 kWh/día en todo el edificio, mientras el resto, es decir las 87 luminarias consumen 225,33 kWh/día. Si este mismo procedimiento se realiza con las luminarias LED 24 VDC de 38 W, la energía consumida sería aproximadamente 7,2 kWh/día para las lámparas en los pasillos y 115,7 kWh/día representando el consumo del resto de lámparas.

Interpretando estos valores en costo, en un día se estaría ahorrando alrededor de 48.900 pesos COP. En un mes el ahorro alcanzaría los 978 mil pesos teniendo en cuenta solo 5 días de la semana y durante un año se ahorraría \$11'734.128 pesos COP. Asimismo, efectuando una visión general de las microrredes conforme a la inversión inicial, al cabo de seis años no existiría diferencia entre el sistema AC y DC.

Ahora bien, considerando las pérdidas de cada sistema mediante un diseño donde tan solo se definen las luminarias como cargas, se tiene 9,52 kWh/día y 5,43 kWh/día de pérdidas de energía en los sistemas AC y DC respectivamente. La diferencia entre estos dos valores representa un ahorro de 1.605 pesos COP en un día, 8.025 pesos COP semanales, 32.100 pesos COP mensuales y 385.200 pesos COP anuales.

Para finalizar, integrando los resultados de consumo y de pérdidas, en años posteriores se precisa un ahorro en el consumo y en el capital, estimándose un tiempo inferior a 13 años para la recuperación de la inversión. Como complemento de la investigación, el Anexo 4 presenta los costos estimados de los dispositivos que conforman cada microrred y su eficiencia en el sistema.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los edificios constituyen uno de los campos de aplicación potencialmente más interesantes para el desarrollo de las microrredes DC. En presencia de cargas nativas en DC y la creciente integración de las fuentes de energía renovable, los microrredes basadas en corriente continua pueden aportar beneficios adicionales, demostrando que es la forma más destacada para la distribución de energía eléctrica. Sin embargo, hoy en día existen etapas de conversión múltiples que reducen la eficiencia general y la fiabilidad de los sistemas. Algunas de estas etapas de conversión pueden ser reducidas o reemplazadas por un convertidor DC/DC de alta eficiencia y conversores AC/DC centralizados que conformen la microrred DC.

Es pertinente resaltar que actualmente el esfuerzo se gasta en la regulación de la calidad de la alimentación AC, mientras que pocos de los aparatos conectados utilizan la energía en esa forma. Aquí es donde la electrónica de potencia desempeña un papel clave que plantea retos en el uso de alimentación DC, tanto para aspectos técnicos como económicos. No obstante, el mayor obstáculo de las microrredes DC es el requisito de estandarizar el nivel de voltaje, nuevas regulaciones de seguridad y soluciones de protección adecuadas.

La caracterización del edificio de laboratorios de docencia de la Universidad de Nariño se convirtió en un objetivo sustancial para el desarrollo del trabajo, puesto que fue el punto de partida para desarticular cada etapa de diseño propuesta. El trabajo incluyó la medición y procesamiento de variables, donde se exigió precisión para el manejo de dispositivos inteligentes conectados en media tensión.

Por otra parte, la penetración de los generadores distribuidos en microrred del edificio permite una reducción de la energía consumida de la red principal en consecuencia de la cantidad de energía proporcionada en el transcurso de los días.

El diseño planteado de la microrred DC en el campus de la Universidad de Nariño, ha devuelto resultados satisfactorios relacionados principalmente con la reducción de pérdidas de potencia en el sistema y una baja caída de voltaje que permite brindar estabilidad a la microrred. Un aspecto destacable en el diseño tiene que ver con el software de análisis de sistemas eléctricos de potencia elegido, pues permitió desarrollar rutinas con la finalidad de automatizar procesos que permitieron obtener productos importantes en el trabajo desarrollado. De la misma forma, PowerFactory dio la posibilidad de crear un modelo de microrred AC y DC robusto para ser usado en múltiples pruebas y eventos de flujo de potencia.

Por otra parte, el análisis técnico-económico revela una inversión inicial superior respecto a una microrred tradicional cuando se consideran cargas y dispositivos de conversión, que con el transcurso del tiempo será intrascendente en vista del ahorro tanto energético como en capital.

Según los resultados encontrados, los sistemas de almacenamiento de energía proporcionan una estabilidad notable cuando la microrred DC trabaja en modo aislado. Esto se debe a la dependencia de las condiciones climáticas de cualquier FER que manifiesta un comportamiento variable e incierto y no permite satisfacer necesidades de potencia y voltaje de la microrred.

Uno de los obstáculos en el desarrollo de la tecnología DC concierne con los dispositivos conversores usados dentro del sistema. El voltaje de salida de los arreglos fotovoltaicos y de los sistemas de almacenamiento está relacionado con los componentes de conversión existentes y con estándares publicados.

Aunque la implementación de una microrred DC total aún carece de estándares para su gestión, su desarrollo implicaría una reducción significativa en consumo de energía reactiva en el sistema. Una propuesta para disminuir los índices de potencia reactiva en la microrred actual refiere a la instalación de un banco de condensadores capaz de controlar los altos niveles de potencia demandada.

Si fuese necesario un diseño que abarque la totalidad del campus universitario, se tiene como parámetro inicial el prototipo desarrollado en este trabajo. En pruebas realizadas teniendo en cuenta toda la red eléctrica de la Universidad, se obtuvieron sobrecargas de líneas y de transformadores. Estos problemas pueden ser resueltos sin duda con la implementación de una microrred DC a futuro.

En áreas remotas, donde la red eléctrica principal no siempre está disponible, la energía es suministrada por FERs. En estas aplicaciones, la implementación de un sistema DC debe considerarse como la primera opción para distribuir la energía, considerando las múltiples ventajas relacionadas en este trabajo.

Respecto al análisis técnico-económico, los dispositivos que conforman la microrred DC deben ser importados para una posible implementación. Esto traería valores adicionales de importación y aranceles y por ende el costo podría verse más elevado.

REFERENCIAS

- [1] D. Kumar, F. Zare and A. Ghosh, "DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 12230-12256, 2017.
- [2] G. S. Seo, J. Baek, K. Choi, H. Bae and B. Cho, "Modeling and analysis of DC distribution systems," *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, Jeju, 2011, pp. 223-227.
- [3] B. Nordman and K. Christensen, "DC local power distribution: Technology, deployment, and pathways to success," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 29–36, Jun 2016.
- [4] N. Eghtedarpour and E. Farjah, "Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1494–1505, May 2014.
- [5] J. Hu, J. Duan, H. Ma, and M. Y. Chow, "Distributed adaptive droop control for optimal power dispatch in DC-microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
- [6] N. L. Diaz, T. Dragičević, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "Intelligent Distributed Generation and Storage Units for DC Microgrids—A New Concept on Cooperative Control Without Communications Beyond Droop Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2476-2485, Sept. 2014.
- [7] E. Rodriguez-Diaz, A. Anvari-Moghaddam, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "Multi-level energy management and optimal control of a residential DC microgrid," *2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Las Vegas, NV, 2017, pp. 312-313.
- [8] D. Salomonsson, L. Soder and A. Sannino, "An Adaptive Control System for a DC Microgrid for Data Centers," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 6, pp. 1910-1917, Nov.-dec. 2008.
- [9] J. Schonbergerschönberger, R. Duke, and S. D. Round, "DC-bus signaling: A distributed control strategy for a hybrid renewable nanogrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1453–1460, Oct 2006.

- [10] R. S. Balog and P. T. Krein, "Bus selection in multibus DC microgrids, " *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 860–867, Mar 2011.
- [11] A. T. Elsayed, A. A. Mohamed, and O. A. Mohammed, "DC microgrids and distribution systems: An overview, " *Electric Power Systems Research*, vol. 119, pp. 407–417, 2015.
- [12] M. H. Ryu, H. S. Kim, J. H. Kim, J. W. Baek, and J. H. Jung, "Test bed implementation of 380V DC distribution system using isolated bidirectional power converters, " in 2013 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sept 2013, pp. 2948–2954.
- [13] R. Weiss, L. Ott, and U. Boeke, "Energy efficient low-voltage DC-grids for commercial buildings, " in 2015 *IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Jun 2015, pp. 154–158.
- [14] B. Wunder, L. Ott, M. Szpek, U. Boeke, and R. Wei, "Energy efficient DC-grids for commercial buildings, " in 2014 *IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Sept 2014, pp. 1–8.
- [15] M. H. Ryu, H. S. Kim, J. W. Baek, H. G. Kim, and J. H. Jung, "Effective test bed of 380-V DC distribution system using isolated power converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 7, pp. 4525–4536, Jul 2015.
- [16] K. Hirose, "DC power demonstrations in Japan, " in 8th *International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, May 2011, pp. 242– 247.
- [17] D. Fregosi, S. Ravula, D. Brhlik, J. Saussele, S. Frank, E. Bonnema, J. Scheib, and E. Wilson, "A comparative study of DC and AC microgrids in commercial buildings across different climates and operating profiles," in 2015 *IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Jun 2015, pp. 159–164.
- [18] A. Sanchez, P. Mercado, and M. Molina, "Desarrollo e implementación de micro-redes eléctricas de corriente continua con integración de recursos energéticos distribuidos," in *Decimosexto Encuentro Regional Iberoamericano De Cigré*, Iguazú, May 2015.
- [19] T. Kaipia, P. Salonen, J. Lassila, and J. Partanen, "Possibilities of the low voltage DC distribution systems," in *Nordac, Nordic Distribution and Asset Management Conference*, 2006, pp. 1–10.

- [20] E. Rodriguez-Diaz, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "An overview of low voltage DC distribution systems for residential applications," pp. 318–322, Sept 2015.
- [21] P. Salonen, T. Kaipia, P. Nuutinen, P. Peltoniemi, J. Partanen et al., "An LVDC distribution system concept," in *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE/2008)*, Espoo, Finland. Helsinki University of Technology, Jun 2008.
- [22] H. Kakigano, Y. Miura, and T. Ise, "Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 3066–3075, Dec 2010.
- [23] T. Dragičević, X. Lu, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "DC microgrids-Part II: A review of power architectures, applications, and standardization issues," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3528–3549, May 2016.
- [24] *Implementing the standardization framework to support the development of Low Voltage Direct Current and electricity access*, SEG4 Std.
- [25] W. Li, X. Mou, Y. Zhou, and C. Marnay, "On voltage standards for DC home microgrids energized by distributed sources," in *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, vol. 3, Jun 2012, pp. 2282–2286.
- [26] M. Amin, Y. Arafat, S. Lundberg, and S. Mangold, "Low voltage DC distribution system compared with 230 V AC," in 2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference, Oct 2011, pp. 340–345.
- [27] K. Engelen, E. L. Shun, P. Vermeyen, I. Pardon, R. D'hulst, J. Driesen, and R. Belmans, "The feasibility of small-scale residential DC distribution systems," in *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, Nov 2006, pp. 2618–2623.
- [28] P. Paajanen, T. Kaipia, and J. Partanen, "DC supply of low-voltage electricity appliances in residential buildings," in *CIREN 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1*, Jun 2009, pp. 1-4.
- [29] E. Cetin, A. Yilanci, H. K. Ozturk, M. Colak, I. Kasikci, and S. Iplikci, "A micro-DC power distribution system for a residential application energized by photovoltaic–wind/fuel cell hybrid energy systems," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 8, pp. 1344–1352, 2010.

- [30] R. K. Chauhan, B. S. Rajpurohit, R. E. Hebner, S. N. Singh, and F. M. Gonzalez-Longatt, "Voltage standardization of DC distribution system for residential buildings," 2015.
- [31] D. J. Becker and B. J. Sonnenberg, "DC microgrids in buildings and data centers," in *2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Oct 2011, pp. 1–7.
- [32] T. Hakala, T. Lähdeaho, and R. Komsu, "LVDC pilot implementation in public distribution network," in *Proc. 23rd International Conference on Electricity Distribution, CIGRE*, 2015, pp. 1–4.
- [33] S. Anand and B. G. Fernandes, "Optimal voltage level for DC microgrids," in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Nov 2010, pp. 3034–3039.
- [34] J. Karppanen, M. Kaipia et al., "Selection of voltage level in low voltage DC utility distribution system," *CIGRE*, Lyon, France, 2015.
- [35] J. Cho, J.-H. Kim, W. Chae, H. Lee, and J. Kim, "Design and construction of korean LVDC distribution system for supplying DC power to customer," in *23RD International Conference on Electricity Distribution*, vol. 18, 2015.
- [36] G. AlLee and W. Tschudi, "Edison redux: 380 Vdc brings reliability and efficiency to sustainable data centers," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 10, no. 6, pp. 50–59, Nov 2012.
- [37] A. Pratt, P. Kumar, and T. V. Aldridge, "Evaluation of 400V DC distribution in telco and data centers to improve energy efficiency," in *INTELEC 07 - 29th International Telecommunications Energy Conference*, Sept 2007, pp. 32–39.
- [38] K. Hirose, "Consideration of voltage range of a 380 VDC distribution system for international standardization," in *Intelec 2013; 35th International Telecommunications Energy Conference, SMART POWER AND EFFICIENCY*, Oct 2013, pp. 1–6.
- [39] J. Inamori, H. Hoshi, T. Tanaka, T. Babasaki, and K. Hirose, "380-VDC power distribution system for 4-MW-scale cloud facility," in *2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Sept 2014, pp. 1–8.
- [40] M. Fantauzzi, D. Iannuzzi, M. Pagano, A. Scalfati, and M. Roscia, "Building DC microgrids: Planning of an experimental platform with power hardware in the loop

features," in *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Nov 2015, pp. 1507–1512.

[41] L. E. Zubieta, "Are microgrids the future of energy?: DC microgrids from concept to demonstration to deployment," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 37–44, Jun 2016.

[42] E. Planas, J. Andreu, J. I. Gárate, I. M. de Alegría, and E. Ibarra, "AC and DC technology in microgrids: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 726–749, 2015.

[43] *Public Overview of the Emerge, Public Overview of the Emerge Alliance Occupied Space Standard Version 1.1*, EMerge Alliance Std.

[44] *Public Overview of the Emerge Alliance Data/Telecom Center Standard Version 1.0*, EMerge Alliance Std.

[45] A. Kwasinski, "Advanced power electronics enabled distribution architectures: Design, operation, and control," in *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, May 2011, pp. 1484–1491.

[46] E. Tironi, M. Corti, and G. Ubezio, "Zonal electrical distribution systems in large ships: Topology and control," in *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Oct 2015, pp. 1–6.

[47] F. Wang, Y. Pei, D. Boroyevich, R. Burgos, and K. Ngo, "AC vs. DC distribution for off-shore power delivery, " in *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Nov 2008, pp. 2113–2118.

[48] D. Andrade and A. Pantoja, "Levantamiento, análisis y diagnóstico de la red eléctrica actual de la Universidad de Nariño como base de un microred.," Universidad de Nariño, reporte de investigación, 2015.

[49] *Configuración, Programación y organización del Software de adquisición de datos P.A.S. de SATEC*, SATEC Power Solutions, 2015.

[50] B. Lasseter, "Microgrids," *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, Columbus, OH, 2001, pp. 146-149 vol.1.

[51] R. H. Lasseter, "MicroGrids," *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, 2002, pp. 305-308 vol.1.

- [52] D. E. Olivares *et al.*, "Trends in Microgrid Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, July 2014
- [53] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, "Microgrids," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 78-94, July-Aug. 2007.
- [54] H. Bevrani, "Microgrid control: A solution for penetration of renewable power," *2017 International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, Singapore, 2017, pp. 46-51.
- [55] L. E. Zubieta, "Are Microgrids the Future of Energy?: DC Microgrids from Concept to Demonstration to Deployment," in *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 37-44, June 2016.
- [56] P. A. Madduri, J. Poon, J. Rosa, M. Podolsky, E. Brewer and S. Sanders, "A scalable dc microgrid architecture for rural electrification in emerging regions," *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Charlotte, NC, 2015, pp. 703-708.
- [57] A. P. N. Tahim, D. J. Pagano, E. Lenz and V. Stramosk, "Modeling and Stability Analysis of Islanded DC Microgrids Under Droop Control," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 8, pp. 4597-4607, Aug. 2015.
- [58] L. Qi *et al.*, "DC power distribution: New opportunities and challenges," *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Nuremburg, 2017, pp. 40-46.
- [59] M. H. F. Ahamed, U. D. S. D. Dissanayake, H. M. P. De Silva, H. R. C. G. P. Pradeep and N. W. A. Lidula, "Modelling and simulation of a solar PV and battery based DC microgrid system," *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, 2016, pp. 1706-1711.
- [60] X. Lu, J. M. Guerrero, K. Sun and J. C. Vasquez, "An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 4, pp. 1800-1812, April 2014.
- [61] A. De Los Santos, E. Rodríguez and N. Visairo, "Modelado, control y simulación de elementos básicos que componen una micro red de CD", *Pistas Educativas*, no. 112, pp. 797-817, Nov 2015.

- [62] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee and J. Jung, "AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 387-405, 2013.
- [63] J. López, "Sistemas de almacenamiento de energía a partir de bancos de baterías para la integración de fuentes de energía renovable en microredes en DC," Trabajo de grado, Pereira, 2015.
- [64] R. Tiwari and K. M. A. Kumar, "Integration and distribution of renewable sources in DC micro grid with energy storage system," *International Conference on Innovations in Engineering and Technology, IEEE*, vol. 3, no. 3, 2014.
- [65] R. K. Chauhan and B. S. Rajpurohit, "DC distribution system for energy efficient buildings," *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, Guwahati, 2014, pp. 1-6.
- [66] J. D. Park, J. Candelaria, L. Ma and K. Dunn, "DC Ring-Bus Microgrid Fault Protection and Identification of Fault Location," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 4, pp. 2574-2584, Oct. 2013.
- [67] *DlgSILENT PoweFactory 15 User Manual*, DlgSILENT, Germany, 2013.
- [68] N. Penner, A. L. Bettiol, J. A. Cortina, L. F. d. N. Passos, A. Carniato and R. P. Martin, "Equipment for monitoring and combating of non-technical losses in distribution networks: Design and preliminary results," *2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Cluj-Napoca, 2014, pp. 1-4.
- [69] V. Annathurai, C. K. Gan, K. A. Ibrahim and M. R. A. Ghani, "Technical losses assessment of reference networks in Malaysia," *2016 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Melaka, 2016, pp. 280-284.
- [70] S. Chatterjee, V. Archana, K. Suresh, R. Saha, R. Gupta and F. Doshi, "Detection of non-technical losses using advanced metering infrastructure and deep recurrent neural networks," *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Milan, 2017, pp. 1-6.
- [71] A. W. Cirino, H. de Paula, R. C. Mesquita and E. Saraiva, "Cable parameter determination focusing on proximity effect inclusion using finite element analysis," *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, Bonito-Mato Grosso do Sul, 2009, pp. 402-409.

- [72] X. Yuan, D. Liu and Q. Li, "Construction Costs and Transmission Efficiency Comparison of AC and DC Distribution System," 2016.
- [73] D. Salomonsson and A. Sannino, "Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronic Loads," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1620-1627, July 2007.
- [74] S. Backhaus, et al, "DC Microgrids Scoping Study - Estimate of Technical and Economic Benefits ", *Los Alamos National Lab (LANL)*, Los Alamos, 2015.
- [75] *ETSI EN 300 132-3-1 - Environmental Engineering (EE); Power supply interface at the input to telecommunications and datacom (ICT) equipment*, European Standard EN 300 132-3-1 V2.1.1, 2012.
- [76] *IEC 61557-16:2014 - Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c*, IEC Standard, 2014.
- [77] *IEC 60364-5-52 - Electrical installations of buildings*. IEC Standard, 2008.
- [78] Aswani J and P. Kanakasabapathy, "Protection of a low-voltage DC ring microgrid system," *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*, Nagercoil, 2016, pp. 17-22.
- [79] R. M. Cuzner and G. Venkataramanan, "The Status of DC Micro-Grid Protection," *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Edmonton, Alta., 2008, pp. 1-8.
- [80] D. Salomonsson, L. Soder and A. Sannino, "Protection of Low-Voltage DC Microgrids," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1045-1053, July 2009.

ANEXOS

Anexo 1 Configuración de dispositivos que conforman la red eléctrica en

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\T10 DC 112 kVA TypTr2

Basic Data	Name: T10DC112kVA
Load Flow	Technology: Three Phase Transformer
VDE/IEC Short-Circuit	Rated Power: 0,112 MVA
Complete Short-Circuit	Nominal Frequency: 60 Hz
ANSI Short-Circuit	Rated Voltage:
IEC 61363	HV-Side: 13,2 kV
DC Short-Circuit	LV-Side: 0,408 kV
RMS Simulation	Vector Group:
EMT Simulation	HV-Side: D
Harmonics/Power Quality	LV-Side: YN
Protection	Phase Shift: 0 *30deg
Optimal Power Flow	Name: Dyn0
Reliability	Positive Sequence Impedance:
Generation Adequacy	Short-Circuit Voltage uk: 3,5 %
Description	Copper Losses: 1,55 kW
	Zero Sequence Impedance:
	Short-Circuit Voltage uk0: 3,5 %
	SHC-Voltage (Re)uk0: 1,38 %

Datos básicos Transformador trifásico 112 kVA

PowerFactory

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\T10 DC 112 kVA.TypTr2

Basic Data	General Tap Changer Saturation Advanced
Load Flow	
VDE/IEC Short-Circuit	
Complete Short-Circuit	
ANSI Short-Circuit	
IEC 61363	
DC Short Circuit	
RMS-Simulation	
EMT-Simulation	
Harmonics/Power Quality	
Protection	
Optimal Power Flow	
Reliability	
Generation Adequacy	

Magnetizing Impedance	
No Load Current	3,1 %
No Load Losses	0,52 kW
Distribution of Leakage Reactances (p.u.)	
x, Pos. Seq. HV-Side	0,5
x, Pos. Seq. LV-Side	0,5
Distribution of Leakage Resistances (p.u.)	
r, Pos. Seq. HV-Side	0,5
r, Pos. Seq. LV-Side	0,5

Datos de Flujo de Carga Transformador 112 kVA

PWM Converter/1 DC-Connection - DG Test DC\NetSure 9500 45 kW Power System.ElmVscmona

Basic Data	Name: NetSure 9500 45 kW Power System
Load Flow	Terminal AC: DG Test DC\Terminal\Cub_2 Terminal
VDE/IEC Short-Circuit	Terminal DC: DG Test DC\Bus 380 VDC(T)\Cub_15 Bus 380 VDC(1)
Complete Short-Circuit	Zone: Terminal AC
ANSI Short-Circuit	Area: Terminal AC
IEC 61363	<input type="checkbox"/> Out of Service
DC Short Circuit	Number of parallel Converters: 1
RMS-Simulation	
EMT-Simulation	
Harmonics/Power Quality	
Optimal Power Flow	
Reliability	
Generation Adequacy	

Ratings	Modulation
Rated AC-Voltage: 0,408 kV	<input checked="" type="radio"/> Sinusoidal PWM
Rated DC-Voltage (DC): 0,38 kV	<input type="radio"/> Rectangular PWM
Rated Power: 0,045 MVA	<input type="radio"/> No Modulation

PWM Converter/1 DC-Connection - DG Test DC\NetSure 9500 45 kW Power System.ElmVscmona

Basic Data	General Advanced
Load Flow	Control Mode: Vdc-Q
VDE/IEC Short-Circuit	DC Voltage Setpoint: 1 p.u.
Complete Short-Circuit	Controlled Node (DC):
ANSI Short-Circuit	Reactive Power Setpoint: 0 Mvar
IEC 61363	Controlled Flow:
DC Short Circuit	External Station Controller:
RMS-Simulation	
EMT-Simulation	
Harmonics/Power Quality	
Optimal Power Flow	
Reliability	
Generation Adequacy	

Reactive Power Limits	Capability Curve
Min: 0 p.u. 0 Mvar	
Max: 0 p.u. 0 Mvar	
Scaling Factor (min.): 100 %	
Scaling Factor (max.): 100 %	
Setpoint for DC Load Flow	
Active Power Setpoint: 0,045 MW	
Controlled Flow:	

Datos de Flujo de Carga Conversor AC/DC 45 kW

Line Type - Equipment Type Library\N4 AWG DC system, TypLine

Basic Data	Name:	N4 AWG DC system	
Load Flow	Rated Voltage:	0,6	kV
VDE/IEC Short-Circuit	Rated Current:	0,095	kA (in ground) Rated Current (in air) 0,14 kA
Complete Short-Circuit	Nominal Frequency:	60	Hz
ANSI Short-Circuit	Cable / OHS:	Cable	
IEC 61363	System Type:	DC	
DC Short-Circuit	Parameters per Length 1,2-Sequence:	Parameters per Length Zero Sequence:	
RMS Simulation	AC-Resistance R(20°C):	0,8327	Ohm/km
EMT Simulation	Reactance X':	0,103	Ohm/km
Harmonics-Power Quality			
Protection			

Datos básicos Cable N4 AWG

DC/DC Converter - DG Test DC\DC/DC Converter Emerson 15 kW Buck.ElmDcdc

Basic Data	Name:	DC/DC Converter Emerson 15 kW Buck
Load Flow	Terminal 1:	DG Test DC\Bus 635 In DC/DC(1)\Cub_6
VDE/IEC Short-Circuit	Terminal 2:	DG Test DC\TP4 Buck\Cub_1
Complete Short-Circuit	Zone:	Terminal 1
ANSI Short-Circuit	Area:	Terminal 1
IEC 61363	<input type="checkbox"/> Out of Service	
DC Short-Circuit	Rated Current:	40, A
RMS Simulation	Alpha U2/U1:	0,5984252

Datos básicos Conversor DC/DC Buck

Anexo 2 Script modelo desarrollado en DPL PowerFactory para comparación entre sistemas AC y DC.

```

! Variable declarations
double lossesPdc, L, Suma, Resta, G1, G2, Ls, I, Ld, R;
double Trafo;
int i, j, l;
string FiltroLoad, Lod, FiltroLine, Lne;
set sLoad, sLine, sPVsystem635, sPVsystem350;
set sACDC, sTrafo;
object ldf, oLoad, oLine, oPVsystem635, oPVsystem350, Summary;
object oACDC, oTrafo;

ClearOutput();

Losses.Init(149,2); !LossesDevice.Init(149,2);
!PowerGeneration.Init(1008,2);

sPVsystem635 = PVsystem635.Get(); sLoad = Load.Get();
sACDC = ACDC.Get(); sLine = Line.Get();
sTrafo = T112.Get(); sPVsystem350 = PVsystem350.Get();

Lod = 'Load'; Lne = 'Line';

for (i=1;i<=1008;i+=1){

    for (j=1;j<=8;j+=1){

        FiltroLoad = sprintf('%s%d%s',Lod,j,'.ElmLod');
        oLoad = sLoad.FirstFilt(FiltroLoad);

        I = ActivePower.Get(i,j);
        oLoad.plini = I;

    }

    !Power PV system 635V
    oPVsystem635 = sPVsystem635.First();
    G1 = PowerGeneration.Get(i,1);
    oPVsystem635.pgini = G1;

    !Power PV system 350V
    oPVsystem350 = sPVsystem350.First();
    G2 = PowerGeneration.Get(i,2);
    oPVsystem350.pgini = G2;

    ldf = GetCaseObject('ComLdf');
    ldf.Execute();

    for (l=1;l<=14;l+=1){

        FiltroLine = sprintf('%s%d%s',Lne,l,'.ElmLine');
        oLine = sLine.FirstFilt(FiltroLine);

        LossesLine.Set (i,l,(oLine.c:Losses)*1000);

    }

    oACDC = sACDC.First();
    Losses.Set (i,2,oACDC.m:Ploss:busac);

    oTrafo = sTrafo.First();
    Losses.Set (i,1,oTrafo.m:Ploss:bushv);

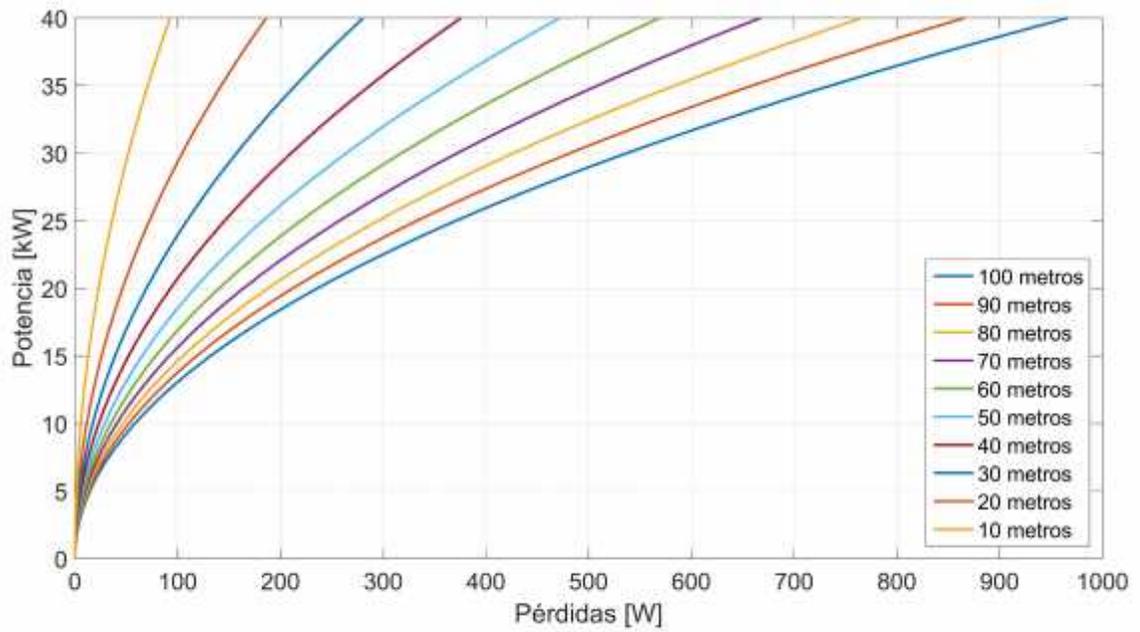
    Summary = SummaryGrid();

    lossesPdc = Summary.c:LossF;
    Losses.Set (i,5,lossesPdc+240);

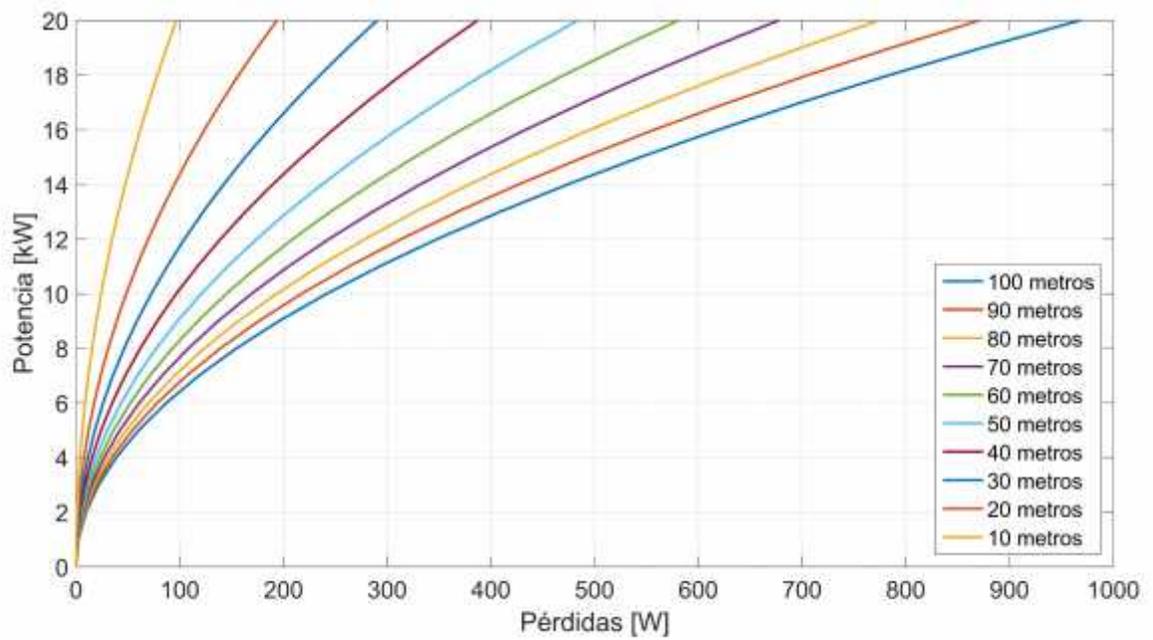
}

```

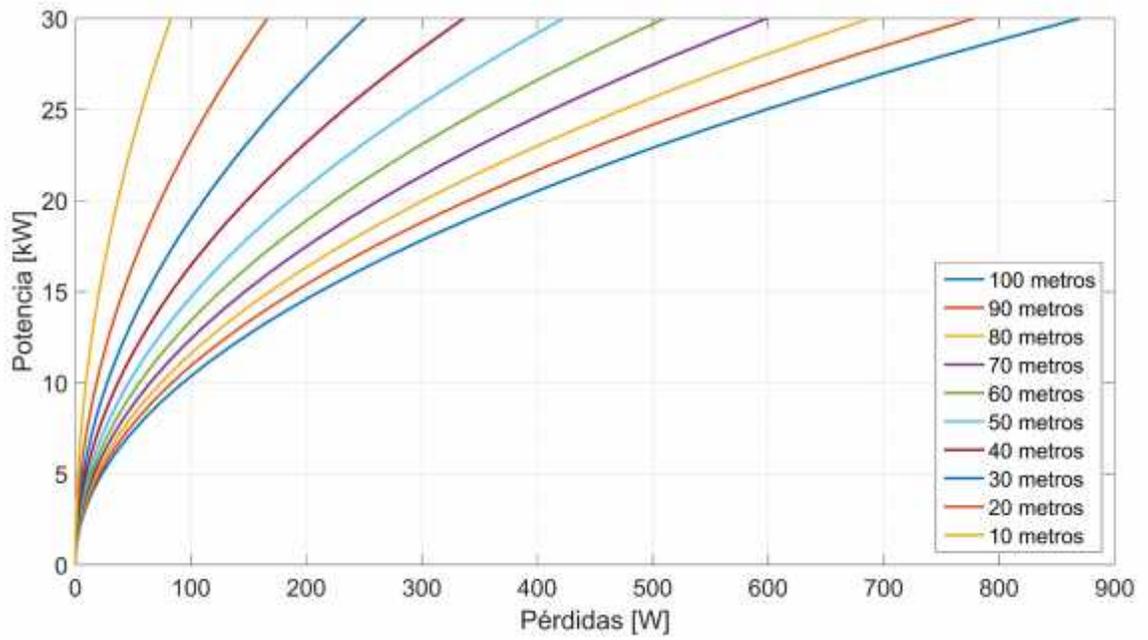
Anexo 3 Análisis complementario de pérdidas para diferentes potencias de carga.



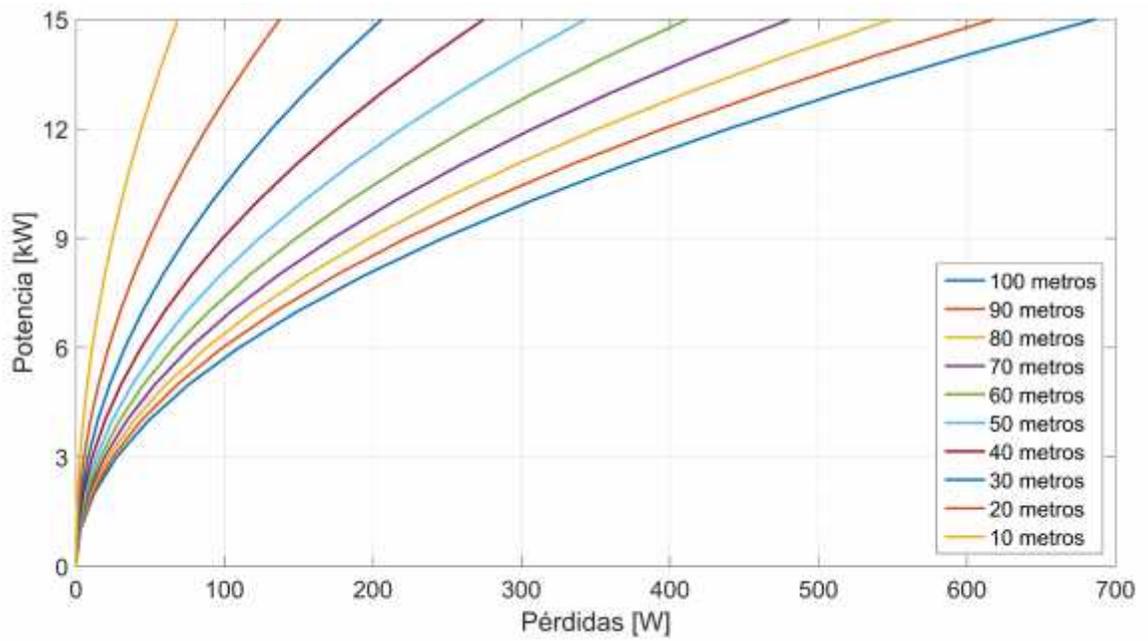
Pérdidas cable N°4 AWG sistema DC



Pérdidas cable N°4 AWG sistema AC



Pérdidas cable N°6 AWG sistema DC



Pérdidas cable N°6 AWG sistema AC

Anexo 4 Tablas comparativas de los dispositivos que conforman la microrred AC y la microrred DC.

COSTOS APROXIMADOS DE LOS DISPOSITIVOS DE LA MICRORRED				
CONVERSIÓN DESDE LOS GENERADORES DISTRIBUIDOS HASTA EL BUS PRINCIPAL				
Tipo	Componente	Eficiencia	Características Técnicas	Costo
Microrred DC	Convertor DC/DC 15 kW Vertiv	97%	MPPT Config: Boost or Buck Vin: 260 – 1000 VDC Vout: 380 VDC	450.000 COP/kW
	Convertor Bidireccional DC/DC 2,5 kW TDK - Lambda	92%	HVDC: 300-380 VDC LVDC: 36 – 60 VDC	1'440.000 COP/kW
Microrred AC	Inversor ABB 12,5 kW	97.8%	2 MPPT Vin: 360-750 VDC Vout: 400 VAC (3)	670.000 COP/kW
	Inversor Infiny 10 kW + Battery Charger	96%	2 MPPT Vin: 400-800 VDC Vout: 400 VAC (3)	1'400.000 COP/kW
		91%	Vin: 48 V Vout: 400 VAC (3)	
CONVERSIÓN DESDE MEDIA TENSIÓN HASTA LA MICRORRED				
Microrred DC	Convertor AC/DC eSure 15 kW Vertiv	97%	Vin: 260 – 530 VAC (3 – 4 wire) Vout: 290 - 400 VDC	250.000 COP/kW
	Transformador 112 kVA Magnetron	95%	Vin: 13,2 kV Vout: 408/230 V	71.400 COP/kW
Microrred AC	Transformador 112 kVA Magnetron	95%	Vin: 13,2 kV Vout: 208/120 V	71.400 COP/kW
CONVERSIÓN DESDE EL BUS PRINCIPAL HASTA LA CARGA				
Microrred DC	Power Server Module (PSM) 1,6 kW	96%	Vin: 330 – 390 VDC Vout: 24 VDC 16 Channels 95 W	317.000 COP/kW
Microrred AC	Los convertidores AC/DC vienen incluidos con cada dispositivo electrónico.			

COMPARACIÓN GENERAL AC VS DC		
Característica	Microrred DC	Microrred AC
Cargas	Aumento de cargas nativas DC en edificio comerciales y residenciales	Las cargas totalmente AC representan una pequeña fracción en determinados sistemas
FERs	Fácil integración a la red DC debido a una disminución en	Requieren sincronización para inyectar energía al sistema

conversiones		
Potencia Reactiva	No presenta	Presenta distintos niveles de este tipo de potencia dependiendo del sistema de aplicación
Armónicos	No presenta	Existe la posibilidad de presentar distorsión en la forma de onda senoidal del sistema debido a cargas electrónicas.
Voltaje	No estandarizado por completo	Se emplean distintos valores dependiendo de la zona de aplicación
Frecuencia de la red	No presenta	50 Hz y 60 Hz dependiendo de la zona de aplicación
Pérdidas de potencia	Bajas	Altas debido a efectos inductivos y capacitivos del sistema
Etapas de conversión	Solo es necesaria una etapa de conversión DC/DC entre los GD y las cargas.	Son necesarias tres etapas incluyendo DC/DC y DC/AC del inversor desde los GD y además un adaptador AC/DC para llegar a las cargas.