



Universidad del Norte
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Programa de Ingeniería Eléctrica

Interconexión Eléctrica entre el Aerogenerador del Bloque K y UniGRID

Informe Final

José Armando Barreto Rosales

David Dimitrio García

Barranquilla, Atlántico – Colombia

20 de noviembre de 2019

Informe final del proyecto presentado el 20 de noviembre de 2019 ante el departamento de ingeniería eléctrica y electrónica de la facultad de ingenierías de la Universidad del Norte, para optar al grado académico de Ingeniero Electricista. Revisado por:

Ph. D. Adriana Arango Manrique

Asesor

Ph. D. Mauricio Pardo González

Asesor

M. Sc. José Daniel Soto Ortiz

Asesor

DEDICATORIA

José Barreto.

A mi madre Dilia, por darme todo lo que tengo, y hacer de mí la persona que soy hoy día.

A mis hermanos, Eduardo y Luis, por el amor y apoyo que me han brindado.

A mi querida Laura, por el cariño, compañía y apoyo incondicional que me ha ofrecido en los momentos difíciles a lo largo de estos últimos años.

David Dimitrio.

A mis padres, Jorge y Silvia, por su apoyo incondicional y su constante motivación a seguir adelante.

A mis hermanos, Juan y Jorge, por el amor que me han brindado y la motivación que me inspiran.

A mi tía Ingrid, por el cariño y apoyo que me ha ofrecido a lo largo de toda mi vida.

A toda mi familia, por guiarme y apoyarme en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A Dios,

Por darnos la sabiduría y fuerza para seguir adelante en todo momento y culminar esta etapa académica.

A nuestros asesores, Ph. D. Adriana Arango, Ph. D. Mauricio Pardo, y M. Sc. José Soto.

Por orientarnos de la mejor manera, por su paciencia y por compartir con nosotros su conocimiento.

A los docentes, Ph. D. Juan Pulgarín, y Ph. D. César Orozco.

Por ofrecernos su invaluable conocimiento y experiencia, por su paciencia y sus consejos.

Al Arq. Jim Hurtado (Oficina de Planeación).

Por sus valiosos aportes, consejos e información suministrada para el desarrollo de nuestro proyecto.

Al Tec. José Escaño (Departamento de Mantenimiento).

Por su disposición, ayuda y acompañamiento en los recorridos realizados en el campus.

A los docentes del Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica: M. Sc. Jairo Cardona, M. Sc. Rafael Castillo, Esp. Gustavo Espitia, M. Sc. Diego Gómez, Ph. D. Ingrid Oliveros, Ph. D. Winston Percybrooks, Ph. D. Christian Quintero, M. Sc. Juan Tello, M. Sc. Luis Torres, M. Sc. César Viloría, Ing. Pedro Narváez, Ing. Loraine Navarro y demás docentes y catedráticos de la Universidad del Norte.

Por sus conocimientos y experiencia que contribuyeron en nuestra formación como profesionales.

Al personal administrativo del Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica: Ing. Gisella Fontalvo, Ing. María Fernanda Palencia, Tec. Edwin Angulo, Aux. Reynaldo Pérez, Sec. Sindy Teherán.

Por su colaboración y entrega día a día en sus labores que permiten el correcto funcionamiento de las actividades del departamento.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. Objetivo general.....	7
2.2. Objetivos específicos.....	7
3. DELIMITACIÓN.....	7
3.1. Alcances.....	7
3.2. Limitaciones.....	7
3.3. Entregables.....	7
4. ESTADO DEL ARTE.....	8
5. DESCRIPCIÓN DETALLADA.....	10
5.1. Metodología.....	10
5.2. Diseño de ingeniería.....	12
5.2.1. Planteamiento del problema.....	12
5.2.2. Alternativas de diseño.....	13
5.2.3. Evaluación y selección.....	13
5.2.4. Diseño de la alternativa seleccionada.....	14
6. RESULTADOS.....	17
6.1. Diseño de experimento.....	17
6.2. Prueba.....	18
6.3. Análisis de resultados.....	19
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	20
8. BIBLIOGRAFÍA.....	21
9. ANEXOS.....	22

1. INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la ingeniería eléctrica, uno de los aspectos fundamentales que engloba el ejercicio de la profesión ha sido la generación de energía eléctrica. El reto de la generación comprende diversos aspectos más allá de la tecnología y/o los combustibles utilizados para el proceso, extendiéndose hacia el análisis de la ubicación y conexión de la generación en los sistemas eléctricos, apuntando al impacto que tienen estas decisiones en los conceptos de pérdidas y estabilidad del sistema.

Hoy por hoy, estamos viviendo una revolución en torno a la infraestructura tecnológica y de negocios de los sistemas de potencia, impulsada por desarrollos como automatización, dispositivos de potencia personalizados, aplicaciones inteligentes, software de optimización de operaciones, entre otros, logrando extender la capacidad de los sistemas eléctricos más allá de sus capacidades tradicionales, pero ninguna de estas tecnologías resulta tan emocionante o con el suficiente potencial de revolucionar el diseño, operación y ventas de la energía eléctrica, como la generación distribuida [1].

La generación distribuida puede definirse como la generación de energía eléctrica dentro de las redes de distribución o en el lado del cliente de la red [2]. Recientemente, se ha reportado un incremento en la integración de elementos de generación distribuida en diferentes partes del mundo, debido a la desregulación del mercado energético, el impacto ambiental de las fuentes convencionales de generación, la demanda de energía confiable por parte de los consumidores y el desarrollo de tecnologías de generación distribuida renovables [3]. Sin embargo, dado que las redes de distribución normalmente no están diseñadas para la conexión de dispositivos de generación [2], es necesario llevar a cabo estudios estratégicos para la correcta ubicación y dimensionamiento de las unidades de generación distribuida, puesto que, si la ubicación de dichas unidades no fuese la adecuada, esto podría ocasionar aumento en las pérdidas del sistema, caídas de tensión, armónicos y problemas en la estabilidad de baja tensión [3].

Actualmente, la Universidad del Norte, a través del departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica cuenta con un laboratorio que dispone de una micro-red basada en un modelo a escala del sistema de pruebas IEEE de 13 nodos, denominada UniGRID. Dicha micro-red es utilizada por estudiantes, docentes y grupos de investigación del departamento para conducir diversos experimentos, incluyendo aquellos relacionados con la inclusión de fuentes de generación no convencionales. Las pruebas y experimentos ligados al uso de fuentes no convencionales como la generación eólica, son comúnmente llevados a cabo mediante simulaciones por software como en [4] o mediante la emulación de los dispositivos de generación con motores y generadores. El Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica cuenta con un aerogenerador instalado a las afueras del edificio de ingenierías (Bloque K), pero actualmente no existe una conexión que permita llevar la energía generada por el aerogenerador hasta la micro-red. Dado que hay una distancia considerable entre los dos puntos, la microrred ya se encuentra instalada y el punto de instalación del aerogenerador fue seleccionado teniendo en cuenta las condiciones topográficas que permiten maximizar la densidad del viento, resulta necesario la evaluación de un camino que permita la interconexión de estos dos elementos.

Es por este motivo, que el siguiente trabajo estará enfocado en el diseño de una interconexión eléctrica entre el aerogenerador y la UniGRID, basado en criterios de ingeniería y normativas aplicables, con el fin de satisfacer las necesidades del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Diseñar la interconexión eléctrica entre el aerogenerador ubicado en el Bloque K y la micro-red UniGRID de la Universidad del Norte.

2.2. Objetivos específicos

- Evaluar y seleccionar el camino más adecuado que permita la interconexión entre los puntos.
- Diseñar la variante seleccionada para la interconexión eléctrica.
- Validar el diseño realizado con las normas.

3. DELIMITACIÓN

3.1. Alcances

- Se presentarán los planos eléctricos de la instalación.
- Se realizará la selección y dimensionamiento de los conductores.
- Se escogerá la configuración y dimensionamiento del sistema de protecciones.
- Se realizarán los APU y presupuestos para la materialización del proyecto.
- Se verificará que el diseño realizado cumpla con las normas que rigen este tipo de instalaciones.
- Se armará un pliego de condiciones para una futura licitación con base en la información obtenida a lo largo del desarrollo del proyecto.

3.2. Limitaciones

- La materialización del diseño no estará contemplada dentro del desarrollo del proyecto.
- Solo se contemplarán materiales homologados en Colombia.
- No se considerarán cambios en la ubicación geográfica de aerogenerador ni UniGRID.
- No se considerarán estudios de efecto del aerogenerador sobre UniGRID.

3.3. Entregables

- Planos eléctricos, cálculos de regulación y pérdidas.
- Dimensionamiento y configuración del sistema de protecciones.
- Informe de avances.
- APUs y Presupuesto.
- Video del proyecto.
- Informe final.
- Póster del proyecto.

4. ESTADO DEL ARTE

A lo largo de las últimas décadas, la innovación tecnológica junto con un ambiente económico y regulatorio cambiante, ha propiciado un interés significativo hacia la generación distribuida, basado en los diversos avances tecnológicos en materia de generación, las restricciones con respecto a la construcción de nuevas líneas de transmisión, el incremento de la demanda de energía eléctrica altamente confiable por parte de los consumidores, la liberalización del mercado y las crecientes preocupaciones acerca del cambio climático [5].

Actualmente, existen diversas definiciones acerca del concepto de generación distribuida, puesto que esta puede ser definida en función de su ubicación, clasificación, propósito, tecnología, modo de operación, y área de suministro de energía [3]. Sin embargo, al realizar una revisión de la literatura existente sobre el tema, es común definir el concepto, de la misma manera en que se definió anteriormente, como la generación a pequeña escala dentro de las redes de distribución, del lado del cliente o cerca de los puntos de consumo [2], [3], [5].

Uno de los temas más importantes a la hora de realizar la interconexión de este tipo de elementos a la red es precisamente, cuál es la manera adecuada, o cómo debe realizarse la interconexión de estos elementos y qué consideraciones se deben tener en cuenta en este sentido.

En [6], se muestra una recopilación de guías y estándares para la interconexión de generación distribuida en redes de distribución. El primero es la regulación establecida por la Comisión Reguladora Federal de Energía de los Estados Unidos, que establece una serie de reglas para la interconexión de la generación distribuida. Inicialmente se clasifica la instalación en tres grupos según la capacidad instalada y la tensión de interconexión. Posteriormente, según el grupo, se realiza un procedimiento, realizando una distinción entre el procedimiento súper acelerado para las instalaciones más pequeñas y el procedimiento acelerado para las instalaciones de mediana capacidad. El procedimiento súper acelerado consiste en una revisión acerca de tipo de conexión, tamaño del alimentador radial, contribución a cortocircuito, capacidad de cortocircuito de los equipos, información de estabilidad, tipo de generador, capacidad de generador trifásico, tipo de conexión de generación monofásica, y posición del punto de acople común. El procedimiento para instalaciones de tamaño medio es una versión simplificada del anterior con tolerancias distintas.

El segundo estándar que se muestra es el desarrollado por IEEE, que define los requerimientos para la interconexión en el punto de acople común. Se definen pruebas, requerimientos y especificaciones técnicas que la generación distribuida debe cumplir, con el objetivo de garantizar una interconexión al sistema de potencia de manera segura. Los requerimientos que define el estándar son: regulación de tensión, interconexión con la puesta a tierra del área, sincronización, interconexión con redes secundarias, provisión de monitoreo, dispositivo de aislamiento, protección contra interferencia electromagnética y desempeño para la resistencia a sobretensiones. Posteriormente, se evalúa la respuesta ante condiciones anormales de operación. Se establece que el recurso de generación distribuida deberá interrumpir el suministro al sistema de potencia bajo los siguientes escenarios: falla en el circuito, antes del recierre del sistema del área y en el caso de tensiones o frecuencias anormales. Se establecen distintos tiempos de despeje definidos para diversos rangos de tensión y frecuencia. Por último, se establecen una serie de requerimientos en términos de calidad de la energía, que consiste en un umbral para la inyección de corrientes DC, flicker y distorsión de corriente. Lo máximos niveles de distorsión son establecidos para distintos rangos de armónicos.

Por último, se listan algunos de los requerimientos establecidos por las compañías de utilidad para la interconexión de generación distribuida. Se tiene que las prácticas de las compañías de utilidad son muy similares y todas demandan un exhaustivo conjunto de requerimientos para aprobar la conexión. Inicialmente se clasifica la instalación según la capacidad instalada, luego se establece el rango de operación para el factor de potencia y el porcentaje de flicker máximo que puede ocasionar. Posteriormente se requiere un dispositivo para la desconexión automática de la carga ante eventos donde la carga exceda las capacidades o se presente caída de tensión. Finalmente, se establecen los dispositivos de conmutación y otros componentes necesarios según el tamaño de la unidad, como los son interruptores de desconexión, diversas funciones de protección, regulación automática de tensión, entre otros.

En [7] se muestra un resumen de las potenciales necesidades contradictorias de los sistemas de transmisión y distribución en relación a los recursos de energía distribuida. Se establece que existe una falta de coordinación entre las necesidades de seguridad de los sistemas eléctricos y los requerimientos establecidos en el estándar IEEE 1547. En este sentido, realiza un análisis y una serie de recomendaciones y consideraciones a los requerimientos de la IEEE 1547.

Para el caso de la respuesta ante condiciones anormales de operación, explica que una consecuencia no esperada de los requerimientos establecidos es la desconexión de grandes unidades de generación ante fallas del sistema eléctrico que ocasionen caídas de tensión, por lo cual propone modificar los rangos de tensión y tiempos de despeje establecidos. En el ámbito de control de potencia reactiva, sostiene que, si la generación distribuida llegase a desplazar la generación que realiza tareas de regulación de tensión, esto podría ocasionar cambios significativos en la respuesta de tensión del sistema ante perturbaciones, por lo cual se recomienda sintonizar los controles a la tensión de la red y utilizar dos lazos de control basados en la potencia de salida. Seguido de esto, afirma que, al tener grandes niveles de generación distribuida, es necesario revisar la efectividad de los esquemas de desconexión de carga ante bajas tensiones y frecuencias, dado que la influencia de la generación distribuida puede modificar el perfil de carga de los circuitos y estos no podrían ajustarse a las curvas de demandas asumidas.

En [8] se explican los diferentes estudios que deben llevarse a cabo para la interconexión de generación eólica al sistema de potencia de la utilidad. Se establece que el análisis clave para la generación distribuida es la regulación de tensión para determinar el potencial de presencia de flicker y el impacto en los dispositivos de regulación de tensión de la red de distribución. Adicionalmente, no se debe ignorar la contribución a las corrientes de falla que aporta este tipo de generación.

Debido a los factores mencionados anteriormente, se hace necesario realizar estudios y experimentos de manera constante, para obtener un mejor entendimiento de los fenómenos asociados a la inclusión de estas tecnologías, de manera que se puedan maximizar los beneficios y mitigar las posibles consecuencias negativas que esto conlleva. En este sentido, la Universidad del Norte, a través del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, como centro formativo e investigativo, se ha propuesto realizar contribuciones en materia de investigación, con relación al impacto de la implementación de generación distribuida con fuentes de generación no convencionales de energía renovable.

Recientemente, fue construido en los laboratorios del departamento un modelo a escala del sistema de pruebas IEEE-13, que ha sido utilizado por estudiantes, docentes y grupos de investigación para ejecutar pruebas y simulaciones. Algunos ejemplos de esto, son la investigación llevada a cabo por integrantes del Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos

de Potencia GISEL, donde se busca realizar un análisis de la microrred implementada bajo distintas condiciones de operación, incluyendo el modelado y simulación de la contribución de generación con energía solar variante [9]. Por otro lado, en [4], se evalúa el impacto a través de un caso de estudio, mediante simulaciones por software, de la conexión de una fuente de generación eólica teniendo en cuenta las características de la micro-red construida posteriormente. La motivación de este proyecto se encuentra dirigida a fortalecer las investigaciones en torno al impacto de la generación distribuida e inclusión de fuentes de generación no convencionales de energía renovable, al brindar las herramientas necesarias para ejecutar pruebas y experimentos con equipos reales de generación en la micro-red.

Luego de la revisión de la literatura acerca del tema es posible concluir que existen diversas consideraciones importantes para la interconexión entre fuentes

5. DESCRIPCIÓN DETALLADA

5.1. Metodología

La metodología diseñada para el desarrollo del proyecto estuvo compuesta por cinco fases distintas, donde cada una comprendió la realización de una serie de tareas agrupadas de manera estratégica para un correcto manejo del tiempo disponible para el desarrollo del proyecto. En la figura 1 se muestra un diagrama de Gantt con el cronograma del proyecto, teniendo en cuentas las fases y tareas establecidas.

Actividades	20/08/2019	26/08/2019	2/09/2019	9/09/2019	16/09/2019	23/09/2019	30/09/2019	7/10/2019	14/10/2019	21/10/2019	28/10/2019	4/11/2019	11/11/2019
Fase 1													
Visita de Campo													
Recolección de Datos													
Fase 2													
Planos eléctricos													
Conductores y tuberías													
Cálculo regulación y pérdidas													
Fase 3													
Diseño de protecciones													
Informe de avances													
Fase 4													
APUs y presupuestos													
Validación con normas													
Fase 5													
Pliego de condiciones													
Informe Final													
Póster													
Video													

Figura 1. Cronograma de actividades.

La primera fase de la metodología hace referencia a la fase de exploración, cuyo objetivo se centró en la recolección de datos del entorno y de los elementos a utilizar en el diseño del proyecto. Con el fin de obtener los datos acerca del entorno, se realizó una visita técnica en la zona para conocer y posteriormente evaluar las alternativas de diseño disponibles para el desarrollo del proyecto. Durante la visita técnica fueron planteados diversos escenarios para el diseño teniendo en cuenta las características del entorno, tales como los registros existentes, puntos de conexión, posibles obstáculos y la distancia a recorrer.

Adicionalmente, también se obtuvo información técnica acerca de la instalación del aerogenerador, con el fin de caracterizar los parámetros eléctricos pertinentes para realizar los cálculos requeridos, y especificaciones acerca de la red a la que será conectado. Para realizar la evaluación de las opciones, se tuvieron en cuenta criterios de diseño como lo son: diseño de bajo costo, afectación al entorno, regulación de tensión y pérdidas. Se elaboró un presupuesto aproximado, y se realizaron los cálculos respectivos para la regulación de tensión y las pérdidas para cada una de las opciones planteadas.

Finalmente, los resultados obtenidos anteriormente fueron consignados en una matriz de decisión, con el objetivo de comparar las opciones y escoger la que mejor cumpla con cada uno de los criterios de diseño.

La segunda fase en la metodología establecida es la fase de diseño, que consistió en realizar el diseño de la opción escogida en la fase anterior. El aerogenerador instalado actualmente, funciona a través de un generador síncrono de imanes permanentes con salida trifásica, dicha salida es conectada a un controlador de carga, convirtiendo la señal trifásica en una señal DC, posteriormente, se utiliza un inversor para convertir la señal DC del controlador de carga, en una señal AC monofásica, con una tensión de 120 voltios y una frecuencia de 60 Hertz. La potencia máxima de salida del aerogenerador es de 600W y actualmente se cuenta con un inversor de hasta 1000W para la instalación. A futuro, se tiene proyectado ampliar la potencia máxima de salida de la instalación a 3000W, realizando las inversiones necesarias en equipos de generación, inversores y baterías. El diseño se realizó a partir de la proyección que se tiene para la potencia máxima de salida de la instalación.

Inicialmente se realizaron los cálculos para determinar las características del conductor a utilizar, teniendo en cuenta los parámetros eléctricos de la instalación (potencia máxima, tensión), posteriormente se seleccionó un conductor que cumpla con dichas características y teniendo en cuenta las dimensiones de este, se realizó la selección de la tubería a utilizar. Para obtener la información acerca de las dimensiones, características y parámetros eléctricos de los conductores y tuberías, se utilizaron catálogos de fabricantes cuyos productos se encuentran homologados en Colombia. Luego, teniendo en cuenta los parámetros eléctricos, las características del conductor y la distancia entre los puntos de conexión se realizaron los cálculos correspondientes a la estimación de la regulación de tensión y pérdidas a lo largo de la línea. Al obtener los resultados de los cálculos iniciales, fue necesario establecer si dichos resultados son aceptables según lo establecido en [10]. Fue necesario ajustar las dimensiones del tipo de conductor y tubería seleccionadas, para obtener una regulación de tensión dentro de los límites establecidos anteriormente y un calibre adecuado según lo dispuesto en [10], para el tipo de instalación.

Por último, se procedió a la realización de los planos eléctricos de la instalación, partiendo de los planos físicos del área que comprende el proyecto, estos últimos fueron suministrados por la oficina del Departamento de Planeación de la Universidad del Norte. En estos planos se muestra de manera detallada el camino escogido para realizar la instalación, los recursos existentes utilizados para su diseño y el detalle de las tuberías y registros o cajas de paso utilizadas.

En la tercera fase del desarrollo del proyecto, se realizó la selección de las protecciones contra sobrecorriente de la instalación, teniendo en cuenta lo dispuesto en la sección 450-3 de la Norma técnica colombiana 2050 [10], que establece el ajuste de disparo para los interruptores automáticos como protección de transformadores. Se diseñó un esquema de protección teniendo en cuenta los ajustes de disparo mencionados anteriormente y que permita un seccionamiento de la instalación por zonas, con el objetivo de facilitar la extracción de los equipos en caso de llevar a cabo operaciones de mantenimiento. Por otra parte, en esta etapa del desarrollo del proyecto, también fue presentado el informe de avances, dando cuenta del progreso obtenido hasta el momento, en materia de las actividades estipuladas en el cronograma establecido en la formulación de la propuesta, dificultades presentadas hasta el momento y la metodología y actividades a realizar en las semanas posteriores a la presentación del informe.

La cuarta fase, estuvo enfocada obtener los costos asociados a la realización del proyecto, y la verificación del cumplimiento de las normas y estándares pertinentes en el diseño realizado. En primer lugar, se realizaron cotizaciones con proveedores nacionales para obtener los costos asociados

a los materiales y equipos a utilizar en la materialización del proyecto. Posteriormente, se efectuaron análisis de precios unitarios (APU) para el diseño realizado, teniendo en cuenta los materiales y elementos escogidos en el diseño, equipos necesarios, y los costos obtenidos en el primer paso, con el objetivo de presentar un presupuesto detallado para la materialización del proyecto. Adicionalmente, se calculó la tasa interior de retorno del proyecto, teniendo en cuenta el presupuesto de la inversión, la proyección de horas de uso semanal del proyecto y el costo asociado a estas. Posteriormente, se realizó la verificación del diseño obtenido, en materia de regulación de tensión, calibre y material de los conductores, dimensiones y material de los conductos, protecciones eléctricas, número y ubicación de registros o cajas de paso, entre otros, con el objetivo de establecer si el diseño cumple con lo establecido en las normas aplicables a este tipo de instalaciones (RETIE), y en caso contrario, poder realizar las modificaciones necesarias para cumplir con lo exigido por la normativa.

Por último, la quinta fase del desarrollo del proyecto estuvo enfocada en la elaboración de los elementos necesarios para su presentación: pliego de condiciones, informe final, vídeo y póster. Teniendo en cuenta las características del diseño realizado, se elaboró un documento a manera de pliego de condiciones, con el objetivo de establecer los detalles y requerimientos asociados al proyecto, apuntando a la apertura de una licitación en el futuro, mediante la cual se pueda llevar a cabo la materialización de este. Luego, fue redactado el informe final del proyecto, describiendo los objetivos propuestos, la metodología empleada para el desarrollo, los resultados obtenidos y las conclusiones en torno a dichos resultados. Adicionalmente, se elaboró un vídeo de corta duración y un poster, explicando de manera breve en qué consistió el proyecto, cómo fue llevado a cabo y los resultados obtenidos.

5.2. Diseño de ingeniería

5.2.1. Planteamiento del problema

Actualmente, no existe una interconexión entre el aerogenerador instalado en inmediaciones del Bloque K y la micro-red UniGRID. Así, hay un desaprovechamiento con respecto a equipos que podrían estar siendo utilizados para realizar experimentos sobre el impacto de la penetración del uso de fuentes de generación no convencionales directamente sobre micro-redes.

Una simple interconexión del aerogenerador y UniGRID no es posible debido a la separación entre sus ubicaciones la cual asciende alrededor de 200m, y dicha distancia no puede ser modificada dado que UniGRID ya está instalada en los laboratorios del Departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica y el aerogenerador ha sido instalado buscando el lugar y condiciones topográficas que maximizan la densidad de viento. Así, aspectos como tendido de redes, regulación, protecciones, entre otros se vuelven puntos de interés al plantear soluciones que se presenten ante la Dirección de Servicios Administrativos de Uninorte. La justificación de la realización del proyecto, radica en la necesidad de realizar experimentos e investigaciones para analizar el comportamiento de la micro-red IEEE-13 implementada en la Universidad del Norte, al incluir fuentes de generación no convencionales, como el caso de la generación mediante energía eólica.

Los criterios utilizados para la evaluación de las opciones diseño fueron:

- Costo de inversión
- Regulación de tensión
- Afectación al entorno
- Pérdidas

Se estableció que los requerimientos de diseño estarían basados en el cumplimiento de las disposiciones establecidas en el Código Eléctrico Colombiano NTC 2050 [10] y el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas [11], en materia de:

- Porcentaje de ocupación de tuberías por conductores
- Regulación de tensión < 3%
- Calibre mínimo para instalaciones subterráneas
- Ajuste de disparo en protecciones eléctricas

Las restricciones de diseño definidas para el proyecto, según lo concertado con el cliente, fueron:

- No se puede modificar la ubicación geográfica de la micro-red ni del aerogenerador.
- No se deben utilizar materiales o equipos no homologados en Colombia.

5.2.2. Alternativas de diseño

Alternativa 1. Uso de transformador

Opción 1: Se plantea utilizar las canalizaciones y registros existentes hallados en la visita técnica, e incrementar el calibre del conductor hasta cumplir con el requerimiento de regulación de tensión.

Opción 2: Se plantea utilizar las canalizaciones y registros existentes hallados en la visita técnica, y hacer uso de un transformador de potencia para elevar la tensión ente los dos puntos de interconexión, y de esta forma reducir el calibre necesario del cable para satisfacer el requerimiento de regulación de tensión.

Alternativa 2. Construcción de tendido/registro

Opción 1: Se plantea realizar un levantamiento para tender una línea aérea entre el edificio Julio Muvdi y el bloque C.

Opción 2: Se plantea realizar una excavación para la construcción de un registro en la zona aledaña al bloque C y la conexión de este registro con alguno de los registros presentes a las afueras del bloque Julio Muvdi.

5.2.3. Evaluación y selección

Teniendo en cuenta los criterios de diseño y requerimientos establecidos anteriormente, se realizó un presupuesto aproximado, cálculo de regulación y pérdidas y un análisis del impacto al entorno¹ para cada una de las opciones planteadas. Para la evaluación de los criterios de diseño se decidió otorgar el mismo peso a cada uno de los criterios, teniendo en cuenta los comentarios del cliente. Posteriormente, se consignaron los resultados obtenidos en una matriz de decisión, para seleccionar la opción más adecuada. En este sentido, la opción más adecuada será aquella que ofrezca mejores resultados en la evaluación de cada uno de los criterios (menor costo de inversión, menor porcentaje de regulación, menor afectación al entorno y menores pérdidas).

La escala utilizada para la evaluación del impacto al entorno se muestra en la tabla 1.

Impacto	Bajo	Moderado	Alto
Descripción	Las afectaciones no representan cambios significativos en el entorno o estos no son apreciables. Las tareas de adecuación no interrumpen actividades cotidianas del entorno.	Las afectaciones representan ligeros cambios en el entorno y estos son apreciables. Las tareas de adecuación no interrumpen las actividades cotidianas del entorno	Las afectaciones representan cambios significativos en el entorno. Es necesario interrumpir actividades cotidianas del entorno para las tareas de adecuación.

Tabla 1. Escala utilizada para la evaluación del impacto al entorno.

Criterios\Opciones	A1:Opción 1	A1: Opción 2	A2: Opción 1	A2: Opción 2
C1. Diseño de bajo costo (aprox.)	\$ 22.200.000	\$ 10.831.908	\$ 15.063.240	\$ 11.693.760
C2. Impacto al entorno	Bajo	Bajo	Alto	Alto
C3. Regulación de tensión	2,69%	2,37%	2,49%	2,62%
C4. Pérdidas en potencia [W]	40,37 W	16,42 W	37,33 W	39,23 W

Tabla 2. Matriz de decisión para la selección de la opción a diseñar.

Se escoge la opción 2 de la alternativa 1, debido a que esta obtiene los mejores resultados en los criterios de diseño establecidos y cumple con los requerimientos y restricciones establecidas.

5.2.4. Diseño de la alternativa seleccionada

El recorrido seleccionado para la interconexión se muestra en la figura 2. Se escogió este recorrido debido a la presencia de registros interconectados entre sí, que facilitarán el paso de los conductores de la instalación. La figura 3 muestra el diagrama unifilar de la instalación.

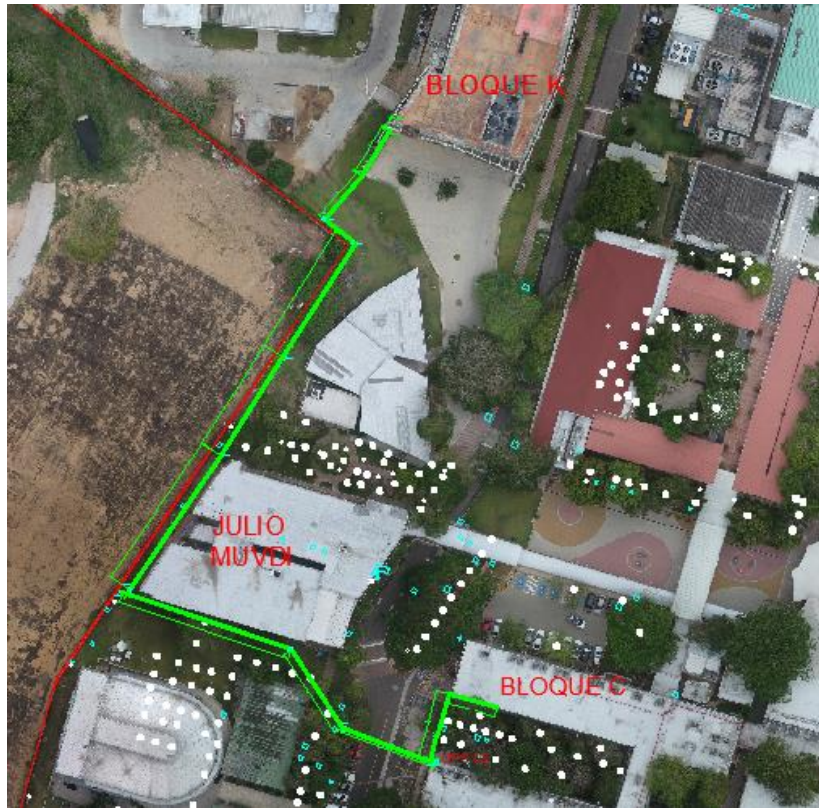


Figura 2. Recorrido seleccionado para la interconexión.

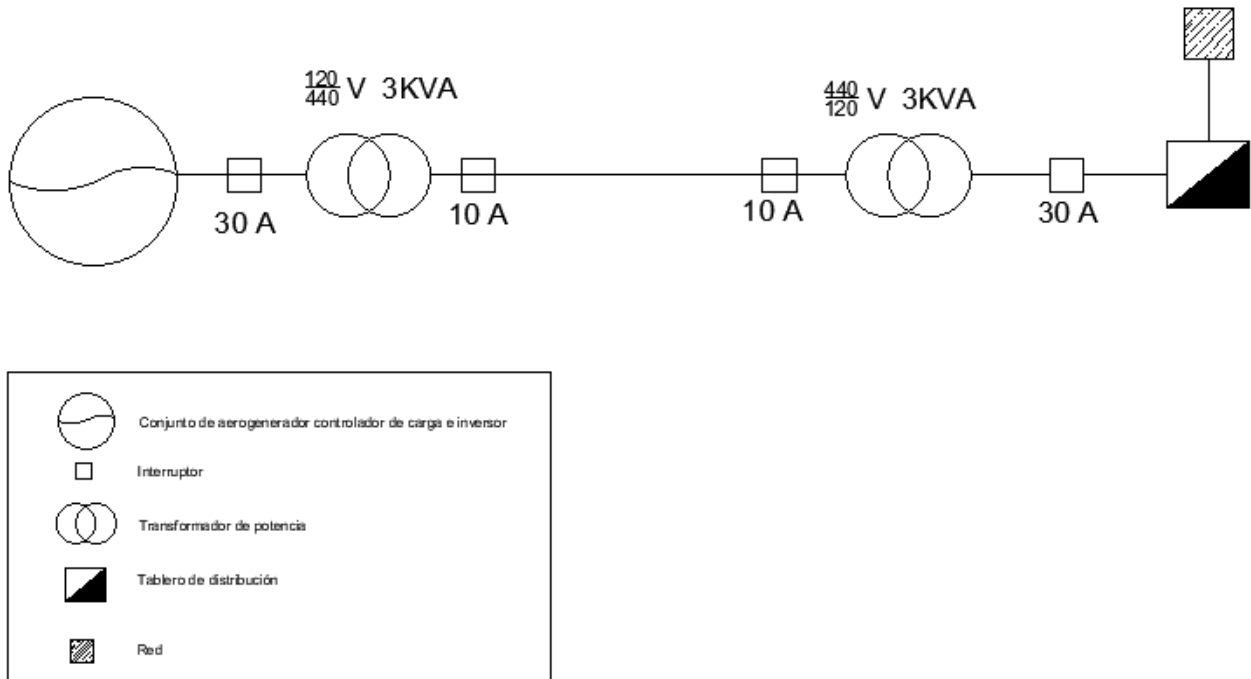


Figura 3. Diagrama unifilar de la instalación

En primer lugar, se realizó la selección del conductor para la instalación. Teniendo en cuenta que el código eléctrico colombiano (sección 230-31, inciso b) establece que para un conductor en una acometida subterránea el calibre mínimo a utilizar deber ser de 8 AWG [10], se decidió utilizar un conductor con este calibre para la instalación, dado que la mayor parte del recorrido se realiza a través de registros subterráneos.

La selección de las tuberías se realizó según las disposiciones presentes en el código eléctrico colombiano (capítulo 9, tabla 1, tabla 4 y tabla 5) donde se establece que el porcentaje de la sección transversal en tuberías para el llenado de conductores, dimensiones y porcentaje de la sección transversal de tubos y tuberías y dimensiones de los conductores aislados y cables de aparatos [10]. En esta instalación fueron utilizados tres conductores (fase, neutro y tierra), por lo cual se debe multiplicar la sección transversal de un conductor calibre 8 AWG, y buscar una tubería cuyo 40% de la sección transversal sea mayor al resultado obtenido anteriormente.

Para la ubicación y selección de cajas de paso y conduletas, fueron tenidas en cuentas las disposiciones establecidas en el código eléctrico colombiano (sección 300-15, 300-16, 370-16 y 370-28) [10].

La selección del transformador se realizó teniendo en cuenta la potencia máxima de salida de la unidad generadora y la relación de transformación se escogió con el objetivo obtener un bajo porcentaje de regulación de tensión y una tensión de operación dentro de los rangos de operación para interruptores.

Posteriormente, se procedió a realizar el cálculo de la corriente máxima a circular en el circuito, teniendo en cuenta la tensión en el lado de baja de los transformadores y la potencia instalada en la instalación del aerogenerador, haciendo uso de la ecuación 1 y 2, tomada de [12].

$$S = V_{rms} I_{rms} \text{ [VA]}$$

Ecuación 1. Potencia aparente en corriente alterna. Tomada de [12].

$$fp = \frac{P}{S}$$

Ecuación 2. Factor de potencia. Tomada de [12].

Para calcular la regulación de tensión de la instalación, esta fue dividida en 3 secciones, la primera del aerogenerador al transformador 120/440 V, la segunda entre los dos transformadores, y la última entre el transformador 440/120V y el tablero de distribución. Primero se calculó la tensión que llega al primer transformador de envío, restando la caída de tensión de la línea (ecuación 3) a la tensión de envío.

$$V = Z_{ef} \cdot 2 \cdot L \cdot I \text{ [V]}$$

Ecuación 3. Caída de tensión para circuito monofásico. Tomada de [13]

Donde Z_{ef} representa la impedancia eficaz, suministrada por el proveedor, en unidades de ohm/km, y L representa la longitud del conductor en km. Luego, se utilizó la relación de transformación del transformador para obtener la tensión en el secundario y se repitió el procedimiento del primer paso para obtener la tensión del lado de alta del segundo transformador. Por último, se repitió el paso anterior para hallar la tensión presente en el punto de conexión del tablero de distribución y se emplea la ecuación 4 para determinar la regulación de tensión total, siendo U_1 la tensión a la salida de la unidad de generación, y U_2 la tensión en el punto de conexión del tablero de distribución.

$$\Delta V = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \cdot 100$$

Ecuación 4. Regulación de tensión. Tomada de [13].

Seguidamente, se realizó el cálculo de pérdidas haciendo uso de la ecuación 5, se calculó la potencia disipada en cada tramo de la interconexión y el total se obtuvo sumando la potencia disipada en cada tramo. Para hallar la corriente del tramo entre transformadores, se tuvo en cuenta que la relación de transformación para la corriente, es inversa a la relación de transformación de tensión del transformador.

$$P = V \cdot I \text{ [W]}$$

Ecuación 5. Potencia disipada

El diseño del esquema y selección de las protecciones se realizó teniendo en cuenta las disposiciones contenidas en el código eléctrico colombiano (sección 450-3, inciso b), que establece que los transformadores de 600V nominales o menos deben estar protegidos por un dispositivo de protección con valor nominal o ajuste de disparo no mayor al 125% de la corriente nominal del primario del transformador y si se tuviese una corriente menor a 9 A, se permite un ajuste no mayor al 167% de la corriente nominal [10]. Se seleccionaron interruptores automáticos termomagnéticos con los ajustes de disparo correspondientes para cada escenario según lo descrito anteriormente, y tensiones nominales adecuadas según la tensión normal de operación de la instalación. La ubicación de los interruptores se escogió de tal forma que el sistema pueda ser seccionado de por zonas, permitiendo la desenergización de los equipos de manera sencilla a la hora de realizar labores de mantenimiento.

Finalmente, se realizó un análisis de precios unitarios para cada uno de los equipos, materiales y obras necesarias para la materialización del diseño, junto con un presupuesto general de este.

Calibre del conductor	8 AWG
Tamaño de la tubería [pulgadas]	3/4
Material tubería exteriores	EMT
Material tubería subterránea	PVC
Relación de transformación del transformador	120/440
Capacidad del transformador [kVA]	3
Corriente HV [A]	25
Corriente LV [A]	6,82
Regulación de tensión	2,42%
Pérdidas [W]	35,51
Ajuste disparo HV [A]	30
Ajuste disparo LV [A]	10

Tabla 3. Resumen parámetros de diseño.

6. RESULTADOS

6.1. Diseño de experimento

Para la validación del diseño realizado, se verificó el cumplimiento de las disposiciones establecidas en el código eléctrico colombiano y el reglamento técnico de instalaciones eléctricas, y se realizó una

simulación utilizando la herramienta Simulink de MATLAB para verificar los valores obtenidos en los cálculos de corriente, pérdidas y regulación de tensión.

Para la validación del diseño con las normas se realizó una comparación entre los parámetros asignados según los cálculos al diseño y las disposiciones establecidas por las normas en materia de:

- Calibre mínimo para instalaciones subterráneas
- Porcentaje de ocupación de tuberías por conductores
- Regulación de tensión.
- Ajuste de disparo en protecciones eléctricas

Para la verificación de los cálculos realizados se implementó un circuito equivalente de la instalación en la herramienta Simulink de MATLAB, teniendo en cuenta el seccionamiento realizado para los cálculos, así como los parámetros de la red y las resistencias asociadas a la línea en las distintas secciones. Se realizaron mediciones en la simulación que permitieron calcular la regulación de tensión y las pérdidas y se comparan con los valores obtenidos mediante cálculos.

6.2. Prueba

La tabla 4, muestra la comparación entre los cálculos obtenidos según las disposiciones establecidas en las normas y los parámetros utilizados para el diseño.

Descripción	Disposición de la norma	Diseño
Calibre mínimo para instalación subterránea.	8 AWG	8AWG
Porcentaje de ocupación de tuberías por conductores.	$\leq 137,42 \text{ mm}^2$	$71,27 \text{ mm}^2$
Regulación de tensión.	$\leq 3\%$	2,42 %
Ajuste de disparo en protecciones eléctricas.	Lado primario a 120V: $\leq 31,25 \text{ A}$ Lado secundario a 440V: $\leq 11.38 \text{ A}$ Lado primario a 440 V: $\leq 11.38 \text{ A}$ Lado secundario a 120V: $\leq 31,25 \text{ A}$	P-120: 30 A. S-440: 10 A. P-440: 10 A. S-120: 30 A.

Tabla 4. Comparación entre norma y diseño.

En la figura 4, se muestra el circuito equivalente simulado en la herramienta Simulink de Matlab para modelar el comportamiento de la instalación. La figura 5 muestra los resultados arrojados por el software al ejecutar la simulación.

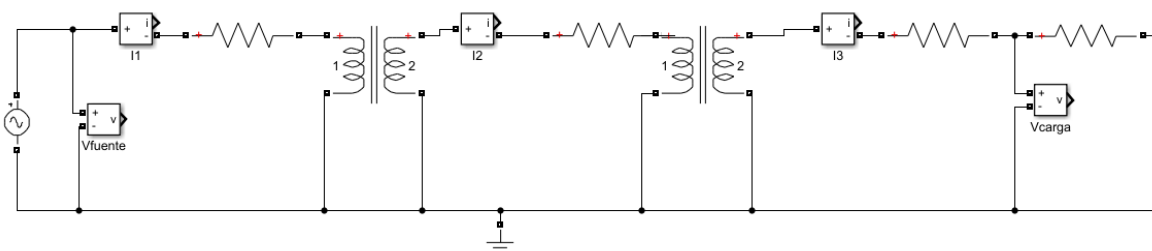


Figura 4. Sistema simulado en Simulink de MATLAB.

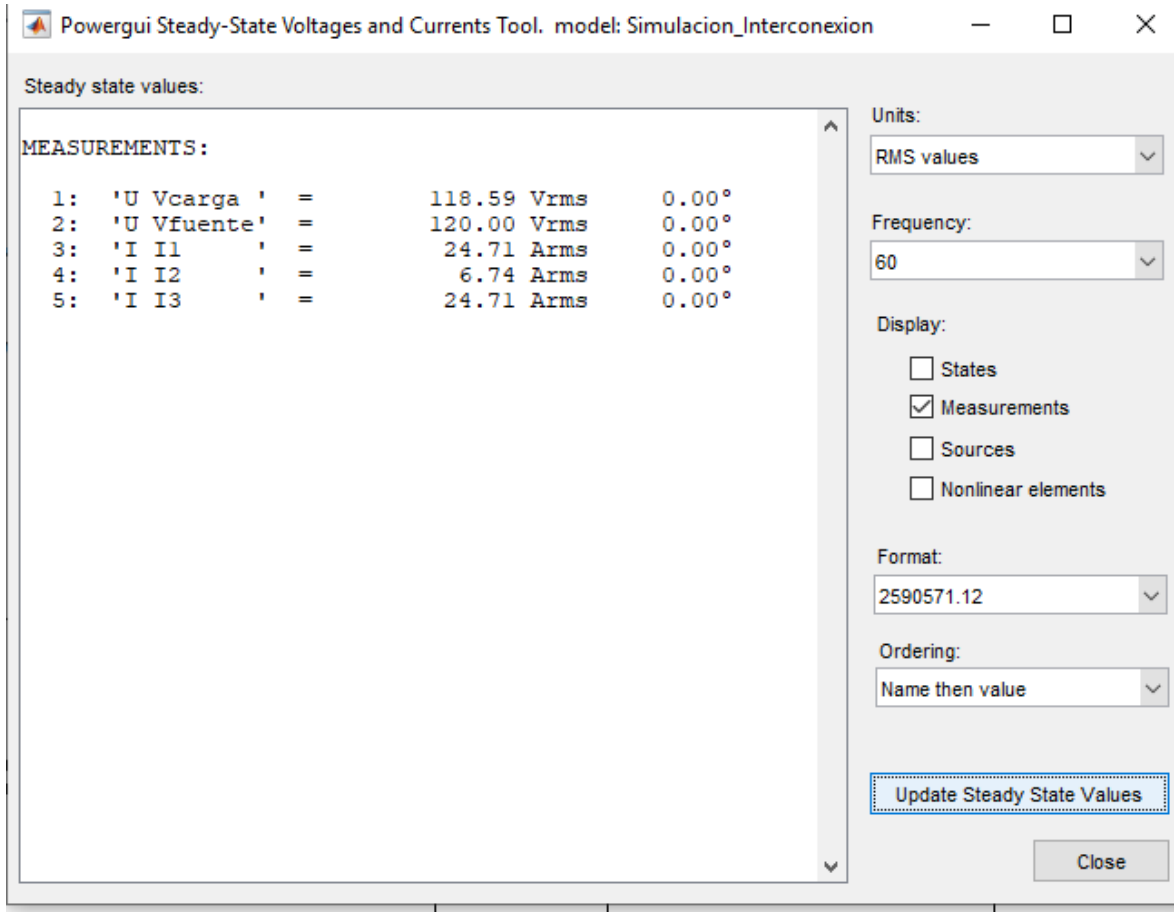


Figura 5. Resultados de la simulación.

6.3. Análisis de resultados

Al observar la comparación presentada en la tabla 4, es posible afirmar que el diseño cumple con las disposiciones establecidas en [10] y [11], puesto que se utiliza un calibre para las acometidas subterráneas dentro del rango mínimo, el porcentaje de ocupación de los conductores seleccionados es menor al 40% de la sección transversal de la tubería seleccionada, la regulación de tensión es menor al límite dispuesto por la norma y el ajuste de disparo de las protecciones se encuentra de los rangos que establece la norma.

La tabla 5 muestra la comparación entre los valores obtenidos en la simulación y los valores obtenidos mediante cálculos.

Parámetro	Simulación	Cálculos	Error
Corriente LV [A]	24,71	25	1,17%
Corriente HV [A]	6,74	6,82	1,19%
Tensión Recepción [V]	118,59	117,16	1,21%
Regulación de tensión	2,35%	2,37%	0,85%
Pérdidas [W]	34,70	35,51	2,33%

Tabla 5. Comparación simulación-cálculos.

Al observar la comparación, se puede evidenciar que los valores obtenidos mediante la simulación no difieren demasiado de los valores obtenidos mediante cálculos. Para todos los valores comparados se obtuvo un error menor al 3%, por lo que es posible establecer que los cálculos utilizados para el diseño de la instalación son confiables.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de analizar los resultados obtenidos en la validación del diseño con las normas, es posible afirmar que el diseño cumple con las disposiciones establecidas en el código eléctrico colombiano y el reglamento técnico de instalaciones eléctricas, normativas aplicables al diseño de instalaciones eléctricas en el país. Adicionalmente, se tiene que, al verificar los cálculos realizados para el diseño con la simulación de la instalación, se obtienen porcentajes de error muy bajos, lo cual es un indicador positivo con respecto a la validez del diseño. El diseño fue realizado teniendo en cuenta todas las requerimientos y restricciones, y seleccionando la alternativa más adecuada según los criterios de diseño, por lo cual se dio cumplimiento a los objetivos planteados al inicio del proyecto.

Se recomienda que, al momento de materializar el diseño, se realice un estudio de cortocircuito teniendo en cuenta las características reales de las unidades de generación, dado que en el diseño realizado se hizo con base en una estimación de la proyección que se tiene a largo plazo para la instalación de más unidades de generación.

El proceso de diseño de la instalación fue un ejercicio de ingeniería a través del cual fueron aplicados diversos conceptos y conocimientos adquiridos a lo largo del estudio de la carrera de ingeniería eléctrica. Al realizar este tipo de proyectos, es posible observar las habilidades y conocimientos que requiere un ingeniero electricista en el ejercicio de su profesión.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. L. Willis y W. G. Scott, *Distributed Power Generation: Planning and Evaluation*, New York: Marcel Dekker, Inc., 2000.
- [2] T. Ackermann, G. Andersson y L. Söder, «Distributed generation: a definition,» *Electric Power Systems Research*, vol. 57, nº 3, pp. 195-204, 2001.
- [3] T. Adefarati y R. C. Bansal, «Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review,» *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, nº 7, pp. 873-884, 2016.
- [4] E. Eguis y K. Padilla, *Micro red: Caso de estudio eólico del laboratorio de energías renovables*, Barranquilla: Universidad del Norte, 2017.
- [5] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, W. D'haeseleer y B. R., «DISTRIBUTED GENERATION: DEFINITION, BENEFITS AND ISSUES,» *Energy Policy*, vol. 33, nº 6, pp. 787-798, 2005.
- [6] M. M. Begovic, B. Radibratovic, A. Rohatgi y F. C. Lambert, *Distributed Renewable Generation: Interconnection and Performance*, Atlanta, GA.
- [7] D. L. Brooks y M. Patel, *Panel: Standards & Interconnection Requirements for Wind and Solar Generation NERC Integrating Variable Task Force*, 2012.
- [8] J. W. Smith, J. A. Taylor, D. L. Brooks y R. C. Dugan, «Interconnection Studies for Wind Generation,» de *Rural Electric Power Conference*, 2004.
- [9] P. De La Hoz, E. Jimenez, I. Oliveros, A. Silva, R. Castillo-Sierra y M. Pardo, «UniGRID: Photovoltaic Study Case for the Universidad del Norte Renewable Energies Laboratory,» de *15th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Automatic Control (CCE)*, Ciudad de México, 2018.
- [10] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), *Código Eléctrico Colombiano: Norma técnica colombiana NTC 2050*, Bogotá D.C.: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC, 2002.
- [11] Ministerio de Minas y Energía, *Reglamento técnico de instalaciones eléctricas*, Bogotá D.C., 2013.
- [12] M. N. O. Sadiku y C. K. Alexander, *Fundamentos de circuitos eléctricos* 5ta Edición, McGraw Hill Education, 2013.
- [13] R. M. Mujal Rosas, *Cálculo de líneas y redes eléctricas*, Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.

9. ANEXOS

ANEXO 1. DISTANCIAS DE INTERCONEXIÓN.

ANEXO 2. CÁLCULOS DE REGULACIÓN, PÉRDIDAS Y DIMENSIONES DE TUBERÍA.

ANEXO 3. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS Y PRESUPUESTO GENERAL.

ANEXO 4. PLANO GENERAL.

ANEXO 5. DIAGRAMA UNIFILAR.

ANEXO 6. PLANO URBANÍSTICO.

ANEXO 7. PLANO ELÉCTRICO BLOQUE B Y DATA CENTER.

ANEXO 8. PLANO EXTERIOR SÓTANO.

ANEXO 9. PLANO ELÉCTRICO SÓTANO C.

ANEXO 10. DETALLE 1 – PLANO GENERAL.

ANEXO 11. DETALLE 2 – PLANO GENERAL.

ANEXO 12. DETALLE 3 – PLANO GENERAL.

ANEXO 13. PLANO GENERAL BLOQUE K.

ANEXO 14. PLIEGO DE CONDICIONES.

ANEXO 15. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.