

DIMENSIONAMIENTO DE UN LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS
AVANZADOS PARA LA UNIVERSIDAD DEL VALLE

YESID GONZALO GIRALDO CARO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA,
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2015

DIMENSIONAMIENTO DE UN LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS
AVANZADOS PARA LA UNIVERSIDAD DEL VALLE

YESID GONZALO GIRALDO CARO

Proyecto de Grado presentado como requisito para optar el título de
INGENIERO ELECTRICISTA

DIRECTORES:

DIEGO FERNANDO ECHEVERRY

Ingeniero Electricista Ph.D

CARLOS ARTURO LOZANO

Ingeniero Electricista Ph.D

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA,

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

SANTIAGO DE CALI

2015

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por iluminarme y mantenerme en todo momento firme con mis objetivos. A mis padres y hermano por brindarme apoyo incondicional durante toda mi vida.

Agradezco a mis directores de tesis, el profesor Diego Fernando Echeverry y el profesor Carlos Arturo Lozano por brindarme el conocimiento y apoyo que hizo posible el desarrollo de mi trabajo de grado.

Agradezco a mi novia Valentina y a mis compañeros Jaiber, Danny, Jhon, Hector, David, Ericson por haberme brindado su preciada e incondicional ayuda y por haberme dado la posibilidad de compartir buenos momentos a su lado.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1 LABORATORIOS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS AVANZADOS EN INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN SUPERIOR.....	12
1.1 Laboratorio de Investigación de Sistemas de Energía de la Universidad Internacional de la Florida	12
1.2 Laboratorio de Distribución de Energía y laboratorio de Transmisión de Energía de la Universidad de Drexel	16
1.3 Centro de Diseño para Sistemas Modulares (DeMoTec) del ISET y Universidad de Kassel.....	20
1.4 Laboratorio de sistemas de energía eléctrica, Osun State College of Technology, Nigeria	22
1.5 Laboratorio de la Universidad de New Jersey	24
2 CONCEPTOS Y TECNOLOGÍAS DE LAS REDES ELÉCTRICAS AVANZADAS O SMART GRID.....	27
2.1 Generación Distribuida	27
2.2 Automatización de redes de distribución	32
2.3 Protecciones en redes inteligentes.....	33
2.4 Comunicación y Medición.....	36
3 ESTRUCTURA DEL LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS AVANZADOS PARA LA UNIVERSIDAD DEL VALLE.....	41
3.1 Etapas del laboratorio de sistemas eléctricos avanzados	42
3.2 Disposición de los elementos del laboratorio.....	46
4 SOLUCIONES COMERCIALES OFRECIDAS POR PROVEEDORES Y FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO.....	50
4.1 Solución de ICL didáctica Ltda, Leybold-Amatrol	50
4.2 Productos ofrecidos por Lucas Nülle	52
4.3 Solución comercial ofrecida por EDIBON	55
4.4 Solución comercial ofrecida por Impointer, equipos LabVolt	59
4.5 Estimación económica de soluciones comerciales	60

4.6	Factibilidad Técnica y Económica de la implementación del laboratorio de sistemas eléctricos y avanzados	62
5	CONCLUSIONES.....	64
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS.....		70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama unifilar del laboratorio de investigación de sistemas de energía de la Universidad Internacional de la Florida	13
Figura 2. Esquema general del laboratorio de distribución de la Universidad de Drexel	17
Figura 3. Esquema estructural del laboratorio de transmisión de la universidad de Drexel	19
Figura 4. Esquema de la estructura del laboratorio DEMOTEC.....	20
Figura 5. Esquema de la topología del laboratorio de Osun state College of Technology	23
Figura 6. Esquema de la topología del laboratorio de la universidad de New Jersey	25
Figura 7. Capas del modelo OSI.....	38
Figura 8. Topologías de redes de comunicación	39
Figura 9. Diagrama unifilar propuesto para la estructura del laboratorio de sistemas eléctricos avanzados	47
Figura 10. Cotización del costo de la solución propuesta en el numeral 4.1	61
Figura 11. Cotización del costo de la solución propuesta en el numeral 4.3	61
Figura 12. Cotización del costo de la solución propuesta en el numeral 4.4	62

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: LISTA DE LABORATORIOS CONSULTADOS.....	70
ANEXO 2: DIAGRAMA CONCEPTUAL DE LA ESTRUCTURA DEL LABORATORIO.....	71
ANEXO 3: DISTRIBUCIÓN Y UBICACIÓN FÍSICA DE LOS MÓDULOS QUE COMPONEN EL LABORATORIO	72
ANEXO 4: CUADRO COMPARATIVO DE LABORATORIOS CONSULTADOS	73
ANEXO 5: CUADRO RESUMEN SOLUCIONES COMERCIALES	78

RESUMEN

En este trabajo de grado se presentan las características y requerimientos mínimos que se deben tener en cuenta en el diseño de detalle e implementación de un laboratorio que emule un sistema eléctrico avanzado. Para ello se consultaron artículos sobre la estructura de dieciocho laboratorios dedicados a realizar estudios de sistemas eléctricos, de los cuales se seleccionaron cinco para un estudio más detallado. Posteriormente se realiza una investigación sobre conceptos y tecnologías de las redes eléctricas avanzadas y micro-redes, con el fin de conocer los tipos de tecnologías que se deben integrar en la estructura del laboratorio. Gracias a esto se propone una topología para el laboratorio, se especifican las características de las etapas que se deben integrar en el laboratorio y se propone una distribución y disposición física de los módulos que componen las etapas.

Finalmente se consultan proveedores de equipos que puedan suministrar soluciones a las necesidades definidas para el laboratorio de sistemas eléctricos avanzados y se realiza una cotización global sobre el costo de los módulos que componen cada solución.

Con este proyecto se espera contribuir a la implementación de espacios de aprendizaje en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica que permitan desarrollar competencias en la Concepción, Diseño, Implementación y Operación de Sistemas Eléctricos Avanzados.

Palabras Clave: Sistema Eléctrico, Micro red, Generación distribuida, Emulador, sistema SCADA, Smart Grid, Laboratorio, Medición Avanzada.

ABSTRACT

In this degree work is presented the features and minimum requirements to be taken into account in the detailed design and implementation of a lab that emulates an advanced electrical system. Eighteen Articles were consulted about the structure of laboratories for studies of electrical systems, and five were selected for more detailed study. Later, it researched on concepts and technologies of advanced electrical networks and micro-networks, in order to know the types of technologies to be integrated into the structure of the laboratory. Thanks to this, a topology for the laboratory it is proposed, the characteristics of the stages to be integrated into the laboratory are specified and physical distribution and arrangement of the modules comprising the steps is proposed.

Finally, equipment suppliers that can provide solutions to the needs defined to Laboratory advanced electrical systems are queried and global cost of the modules that make up each solution is performed.

This project is expected to contribute to the implementation of learning spaces in the School of Electrical Engineering and Electronics in order to develop skills in the conception, design, implementation and operation of Advanced Electrical Systems.

Keywords: Electric System, microgrid, distributed generation, emulator, Smart Grid, Advanced measurement, laboratory, SCADA system.

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la demanda de energía y los requerimientos medioambientales ha llevado a que se requieran grandes avances tecnológicos aplicados a los sistemas eléctricos. Este rápido crecimiento ha transformado los sistemas de potencia en redes con estructuras complejas y difíciles de controlar, en donde además se espera que el cliente pueda desempeñar el papel de consumidor y productor de energía eléctrica. Es en este contexto donde las redes inteligentes (smart grid) juegan un papel importante en el monitoreo, control, optimización y la confiabilidad de estos sistemas. Las smart grids contemplan tecnologías de automatización, control y comunicaciones que permiten integrar de un modo inteligente el comportamiento y acciones de todos los agentes conectados a la red (generadores y consumidores) en función de un suministro eléctrico eficiente, flexible y confiable.(Groot, R., et al, 2012).

De cara a esta situación se requiere la infraestructura necesaria para facilitar el aprendizaje y el desarrollo de competencias en el ámbito de las nuevas tecnologías y conceptos aplicados a la generación, transmisión, distribución y consumo de energía, que le permita al estudiante o profesional situarse en un ambiente que emule una red eléctrica moderna y que cuente con las herramientas necesarias para adquirir el conocimiento a través de un aprendizaje dinámico.

Un Laboratorio de Sistemas Eléctricos Avanzados que incorpore las nuevas tendencias en generación y distribución de energía, comunicación, medición, protecciones, entre otras, permite desarrollar competencias en los futuros ingenieros y al personal que trabaja en la red eléctrica en un ambiente que emula los fenómenos de una red moderna y que permite la adquisición de experiencias académicas y de investigación; Además, brinda la posibilidad de probar tecnologías, métodos de análisis y gestión antes de ser implementados en la red.

En la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle se tiene proyectada la construcción de un laboratorio de sistemas eléctricos avanzados que facilite los procesos de enseñanza-aprendizaje y potencialice la investigación en temas de vanguardia. Debido a que el diseño e implementación de este tipo de laboratorios es complejo y costoso, en el grupo de Investigación en Alta Tensión se planteó realizar estudios preliminares que potencialicen la viabilidad del proyecto.

En este trabajo de grado se tiene como objetivo principal dimensionar un laboratorio de sistemas eléctricos avanzados y analizar la factibilidad de su implementación en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle; como objetivos específicos se planteó:

- Especificar los requerimientos de las etapas necesarias para la implementación de un laboratorio de sistemas eléctricos avanzados considerando aspectos didácticos.
- Realizar una propuesta de la distribución y disposición de los elementos que componen el laboratorio considerando aspectos como la potencia instalada y modularidad.
- Estimar los recursos económicos necesarios para la puesta en marcha de la solución propuesta.

En el primer capítulo se realiza una investigación acerca de laboratorios de sistemas eléctricos avanzados que han sido implementados en centros de investigación e instituciones de educación superior, con el fin de conocer las tecnologías y características que dichos laboratorios integran. En el segundo capítulo se presenta una investigación realizada sobre conceptos y tecnologías de las redes eléctricas modernas, con el fin de reforzar la base teórica que ayudará a especificar las etapas del laboratorio. En el tercer capítulo se plantea la topología del laboratorio y se especifican los requerimientos de las etapas que conforman el laboratorio de sistemas eléctricos avanzados. En el cuarto capítulo se consultan las soluciones comerciales que ofrecen los proveedores y que cubren gran parte de los requerimientos planteados en el capítulo tres, y se presenta una cotización con el costo de los módulos que conforman el laboratorio. Por último, se plantean las conclusiones generales.

1 LABORATORIOS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS AVANZADOS EN INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN SUPERIOR

Se consultó las características de dieciocho laboratorios (ver anexo 1), que se han implementado en centros de estudio o instituciones de educación superior alrededor del mundo, de los cuales se seleccionaron cinco para el análisis detallado de su estructura y concepción. En algunos casos se descartaron laboratorios, debido a que no se encontró información que especificara las características de sus estructuras. Para la selección de los laboratorios se plantearon los siguientes criterios, que nos aproximan a las características que debe tener el laboratorio de sistemas eléctricos avanzados para la Universidad del Valle.

- El laboratorio debe contar con elementos simuladores y/o emuladores de red, tales como generadores, transformadores, líneas de transmisión, subestaciones y cargas.
- El laboratorio debe contar con elementos de monitoreo y control tales como se encuentran en un sistema SCADA. Así como sistemas de protección y medición avanzada.
- El laboratorio debe tener fuentes de generación renovables y su respectivo control de generación.

De los anteriores criterios, los dos primeros se hacen esenciales para la selección de los laboratorios a consultar. El tercer criterio no aplica para algunos laboratorios que se seleccionaron, sin embargo se incluyeron debido a que las características de estos laboratorios aportaban valiosa información para definir las etapas y estructura del laboratorio para la Universidad del Valle.

En la descripción que se realizará a continuación acerca de las etapas de los laboratorios, falta alguna información de características eléctricas de los módulos debido a que en los artículos consultados no se mencionan dichas características.

1.1 LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS DE ENERGÍA DE LA UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LA FLORIDA

En el centro de investigación de sistemas de potencia en la Universidad Internacional de la Florida se implementó un laboratorio de sistemas inteligentes de energía con una capacidad de potencia total de 72 kW. Este laboratorio utiliza

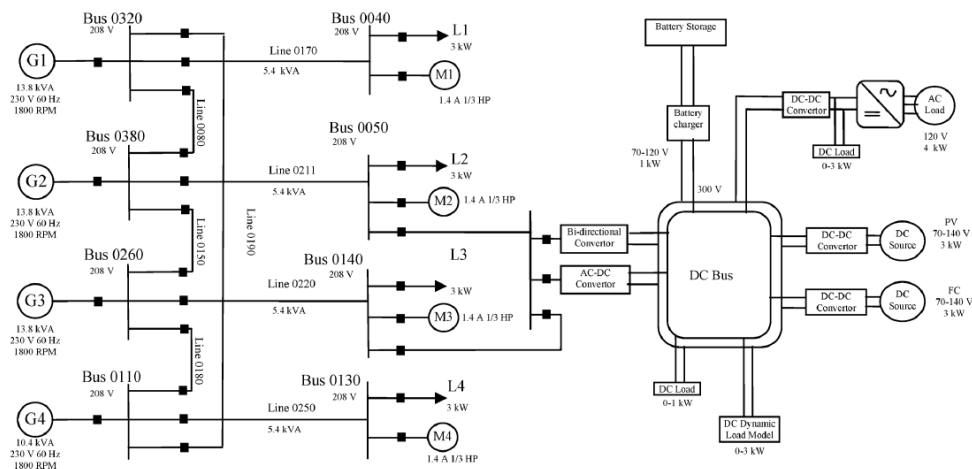
componentes a escala y hardware comercial para modelar un comportamiento realista de los grandes sistemas de potencia.

En el laboratorio se puede investigar acerca de temas tales como:

- Integración de fuentes de energía distribuida, incluyendo recursos renovables (energía eólica, solar, celdas de combustible, etc) en la generación de energía y su estructura totalmente controlada.
- Esquemas inteligentes de protección y su aplicación en la detección, mitigación y prevención de los cortes en cascada, situación en isla, entre otras.
- Integración de sistemas híbridos ac-dc creando nuevas soluciones de micro-redes para aplicaciones residenciales e industriales.
- Control en tiempo real de la gestión y demanda de energía, mediante algoritmos.

En la Figura 1 se presenta el diagrama unifilar del laboratorio.

Figura 1. Diagrama unifilar del laboratorio de investigación de sistemas de energía de la Universidad Internacional de la Florida



Fuente: Salehi, V., Mohamed, A., Mazloomzadeh, A., & Mohammed, O. (2012). *Laboratory-Based Smart Power System, Part I : Design and System Development*

A continuación se presentará los elementos más destacados de cada etapa del laboratorio.

1.1.1 Generación

El laboratorio cuenta con generación sincrónica, emulador de generación fotovoltaica y emulador de celda de combustible.

1.1.1.1 Generación sincrónica

El sistema de generación consta de 4 generadores trifásicos sincrónicos conectados en anillo, tres de los cuales son de 13,8kVA y uno de 10,4kVA; los cuatro operan a 60Hz, 208V y 1800rpm. Cada generador está conectado a un primo motor de inducción trifásico, de 4hp, 230V controlado por un variador de frecuencia. Los generadores están equipados con reguladores de tensión automáticos con el fin de garantizar la tensión en bornes.

Todos los generadores tienen un equipo sincronizador que garantiza que al conectarse un generador en paralelo al sistema eléctrico, este pueda hacerlo sin causar perturbaciones al sistema, y asegura que el generador no presente daños al realizar una conexión paralela inadecuada.

Los generadores se controlan mediante software en tiempo real a través del envío de comandos de control a los reguladores del primo-motor. Este software también permite distribuir el nivel de generación cuando uno de los generadores se encuentra sobrecargado.

1.1.1.2 Emulador fotovoltaico

El laboratorio cuenta con una fuente de DC programable de 3kW, que es utilizada para emular las características de una curva típica de corriente-tensión. También permite introducir el efecto de variación de la intensidad de la radiación solar. El emulador se conecta al sistema de distribución de DC a través de un convertidor.

1.1.1.3 Emulador de celda de combustible

Se utiliza una fuente de alimentación programable de DC, para emular características de celdas óxido sólido. La fuente de alimentación DC puede ser programada con unas tablas que representan la relación entre tensión y corriente en función del tiempo.

1.1.2 Transmisión y distribución

Las líneas de transmisión emulan diferentes longitudes de línea por medio de parámetros RLC variables, y adoptan el modelo pi. En el caso de una eventual falla, las líneas están protegidas por fusibles con el fin de evitar daños en los

componentes de hardware. Los componentes de la línea de transmisión están diseñados para 250 V línea a línea y 15 A por fase.

El sistema de distribución se divide en dos partes, la primera es el sistema de distribución en AC y la segunda es el sistema de distribución en DC. Para la conexión de ambos, se utiliza un convertidor bidireccional. En la red de DC se pueden conectar cargas de AC y cargas de DC gracias a que se tienen convertidores AC/DC y DC/DC.

Conectado al sistema de distribución de DC, se encuentra el sistema de almacenamiento de energía, que consta de doce baterías de plomo-acido de 12V. La carga y descarga de las baterías se controla por medio de un convertidor bidireccional.

1.1.3 Cargas

El laboratorio incorpora cargas resistivas entre 0,3kW y 3kW con 10 niveles de conmutación. Estas cargas son controladas por un software que puede emular distintos patrones de carga.

También cuenta con motores de inducción de 250W que representan cargas dinámicas de alta demanda de potencia reactiva. Estos motores tienen acoplado a sus ejes máquinas de DC que actúan como generadores, y están asociados a un software de control de carga en tiempo real.

1.1.4 Sistema de protección

Se utilizan dispositivos de adquisición de datos (DAQs) para transferir las mediciones de los TCs y TP's al software. Estos datos se utilizan dentro del entorno en tiempo real con el fin de imitar las funciones del relé. Dentro del software se desarrolló un relé digital con las siguientes funciones:

- Sobre / bajo voltaje
- Sobre / baja frecuencia
- Variación de frecuencia
- Sobre corriente
- Relé de distancia
- Flujo de potencia inversa
- Desbalance de tensiones
- Desbalance de corriente

1.1.5 Monitoreo y control

La configuración del laboratorio, junto a todo el hardware relacionado, fue diseñada para utilizar DAQs (dispositivos de adquisición de datos). El uso de diferentes DAQs hace que el monitoreo y control de todos los componentes del sistema sea posible.

El software desarrollado es una herramienta gráfica para control y visualización, en tiempo real, de todas las variables eléctricas del sistema. Dicha herramienta es un instrumento virtual (VI) dentro del entorno de LabVIEW. (Salehi, V, 2012), (Salehi, V. 2012).

1.2 LABORATORIO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA Y LABORATORIO DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE DREXEL

En la Universidad de Drexel se implementaron dos laboratorios para realizar estudios de los sistemas de transmisión y distribución de energía. A continuación se describen las características más destacadas.

1.2.1 Laboratorio de sistemas de distribución de energía

El laboratorio permite realizar experimentos de análisis de flujo de potencia, reconfiguración de la red, restauración del servicio después de una falla, regulación de tensión. También permite probar esquemas de control sobre la red de distribución.

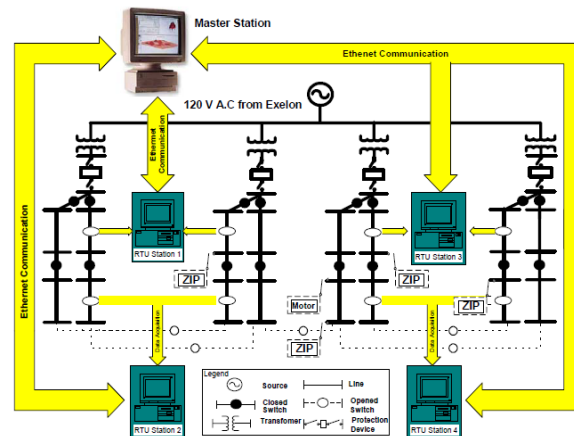
El laboratorio consta de cuatro estaciones modulares que pueden combinarse para un total de 36 buses, 16 líneas, 16 interruptores normalmente cerrados y un variado número de conexiones de carga. Se implementó un sistema de control, supervisión y adquisición de datos (SCADA) con cuatro terminales (computadores) remotas.

El sistema de distribución emula un sistema configurado de forma radial, formado por 4 estaciones de trabajo con iguales características. Cada estación cuenta con:

- Estación de alimentación (subestación).
- Estación de distribución.
- Estación de transferencia.
- Estación maestra para el control y la adquisición de datos.

En la Figura 2 muestra el esquema general del laboratorio de distribución.

Figura 2. Esquema general del laboratorio de distribución de la Universidad de Drexel



Fuente: Miu, K., Nwankpa, C., Yang, X., & Madonna, A. (2001). *Hardware Design and Layout of a Reconfigurable Power Distribution Automation and Control Laboratory (RDAC)*

A continuación se describen los módulos o estaciones que componen este laboratorio.

1.2.1.1 Estación de alimentación (subestación)

Las 4 estaciones de alimentación se energizan desde el mismo barraje, y están compuestas por un transformador 1:1 y un dispositivo de protección. El módulo de alimentación ubicado en cada estación permite la conexión entre los elementos eléctricos, y proporciona varias salidas de 208VAC trifásicos o una salida de 120 V DC que se implementará mediante un rectificador trifásico. Cada módulo de estos sirve para alimentar el módulo siguiente.

1.2.1.2 Estación de distribución

Las estaciones de alimentación proporcionan energía a los módulos de distribución que están constituidos de varias líneas de distribución y buses donde las cargas se pueden conectar. Cada módulo cuenta con dos líneas de distribución en paralelo y con el sistema de protección de la línea.

Todas las líneas tienen la misma longitud y cada una soporta hasta 5A bajo condición nominal.

1.2.1.3 Estación de transferencia

Cada módulo de distribución se conecta a un módulo de transferencia. Esta estación tiene como fin la realización de las conexiones eléctricas de las cargas a los buses que se encuentran a lo largo del alimentador.

Hay 4 buses a lo largo de un alimentador y 4 a lo largo del lateral para un total de 8 buses trifásicos. Además, las estaciones de transferencia permiten realizar conexiones entre las diferentes estaciones de distribución, a través de interruptores. El módulo integra 12 relés digitales normalmente abiertos que se utilizan para emular 4 interruptores trifásicos de enlace, además hay 6 relés digitales en el panel lateral que son utilizados para la creación fallas (monofásica, bifásica, trifásica) en las líneas.

1.2.1.4 Sistema de gestión en la distribución de energía.

El sistema de gestión en la distribución de energía permite:

- Supervisión del funcionamiento del sistema.
- Toma de datos utilizando el hardware de adquisición de datos y visualización de variables de medida: voltaje, corriente y potencia.
- Transformar la estructura de la red para realizar diferentes experimentos. (Miu, K., et al, 2001) (Xiaoguang Y., et al, 2001).

1.2.2 Laboratorio de sistemas de transmisión de energía

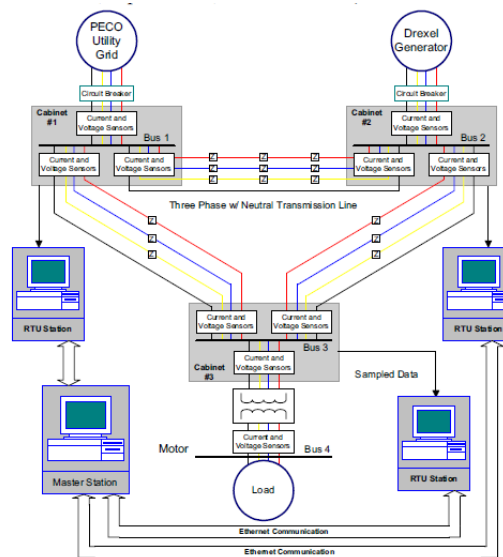
El laboratorio es utilizado para estudio de flujo de potencia en los sistemas de transmisión de energía. Al igual que el laboratorio de distribución, este laboratorio opera a 208 V y 60 Hz. Está compuesto por 4 terminales; el terminal 1 y 2 son los generadores, el terminal 3 es una subestación y el 4 es la carga.

En el laboratorio se pueden emular fenómenos como:

- Análisis de fallas.
- Pruebas monofásica de AC.
- Pruebas trifásicas de AC.
- Experimentos de componentes simétricas.

En la Figura 3 se muestra el esquema estructural del laboratorio de sistemas de transmisión de energía y posteriormente se describen las partes más destacadas del laboratorio.

Figura 3. Esquema estructural del laboratorio de transmisión de la universidad de Drexel



Fuente: Xiaoguang Y., Bruni C., Cheung D., Mao Y., & Sokol G, (2001). Power Transmission and Distribution System Laboratories at Drexel University

1.2.2.1 Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión emulan un modelo pi de línea. Tienen parámetros RLC variables y se pueden configurar para representar una línea corta, media o larga, cambiando el valor de los parámetros. Las líneas están diseñadas para que se puedan realizar fallas a lo largo de la línea (por ejemplo: 0%, 33%, 66% y 100% de la línea).

1.2.2.2 Sistema de gestión de energía

El laboratorio se puede configurar para diferentes tipos de pruebas, en donde se requiere que el sistema se aprecie como una barra infinita. También se puede configurar para estudios de un perfil de carga de un generador, en donde se requiere que el sistema se aprecie sin barra infinita.

Las unidades terminales remotas (RTU) del sistema pueden realizar funciones como:

- Mostrar valores de tensión y corriente rms, frecuencia, potencia activa y reactiva, factor de potencia del sistema.
- Suministrar información sobre condiciones de falla.
- Enviar los datos procesados a través de la red a la estación maestra.

Las estaciones están constituidas por los siguientes equipos:

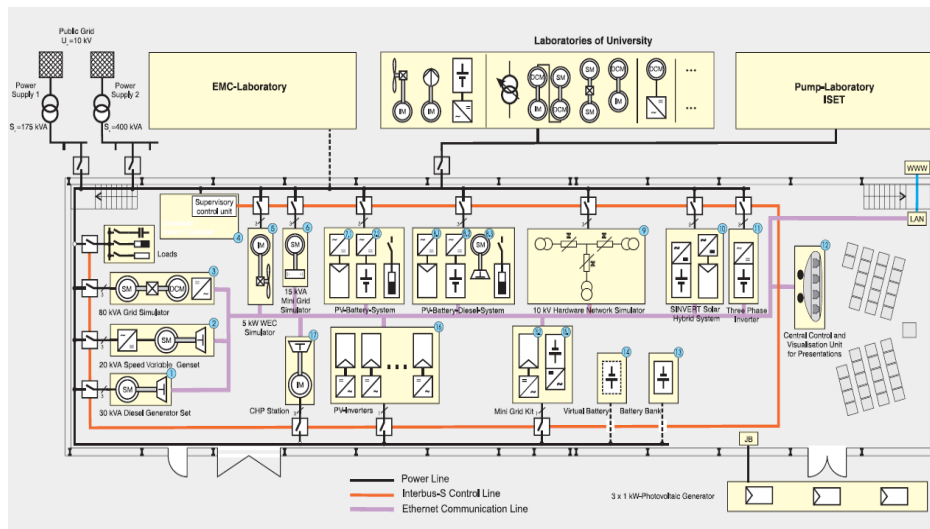
- Una fuente de red de suministro eléctrico trifásico (regulado a 110 V/220V).
- Un módulo de línea de transmisión trifásica (impedancia total de 18 ohm / fase).
- Dos módulos de acondicionamiento de señal (Cada módulo es capaz de manejar ocho señales de entrada)
- Dos tarjetas de adquisición de datos (National Instruments AT-MIO-16E-2).
- Computadoras en donde se realiza el control y monitoreo de las pruebas.
- Generador síncrono de 5kVA, 110V/220V. (Xiaoguang Y., et al, 2001).

1.3 CENTRO DE DISEÑO PARA SISTEMAS MODULARES (DEMOTEC) DEL ISET Y UNIVERSIDAD DE KASSEL

El centro de diseño para sistemas modulares, es utilizado para desarrollar y demostrar las últimas tendencias del suministro de energía. Cuenta con tecnología relacionada con la generación convencional, generación distribuida, transmisión, distribución, micro redes, almacenamiento y conversión de energía. El laboratorio tiene una superficie de casi 600 m² y una potencia instalada de 200kW.

En la Figura 4 se muestra la topología del laboratorio.

Figura 4. Esquema de la estructura del laboratorio DEMOTEC



Fuente: Hardt Hardt, C. (2005). *Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids*

A continuación se describen características de las partes más destacadas del laboratorio.

1.3.1 Generación

1.3.1.1 Grupo generador diesel

El laboratorio cuenta con dos grupos motor/generador diesel. El primer grupo generador consiste en un motor diesel de 32 kW y un generador síncrono trifásico de 400 V, 32kVA a 50 Hz, con factor de potencia 0,8. El segundo grupo generador está constituido por un motor diesel de 30kW con variador de velocidad y un generador síncrono trifásico de 400 V, 20kVA.

1.3.1.2 Estación de cogeneración

La unidad de cogeneración se utiliza para el estudio de mezclas de combustibles que mejoren la eficiencia de los motores diesel, en función de diferentes cargas eléctricas conectadas a la red. El conjunto generador tiene capacidad nominal eléctrica de 5,5kW

1.3.1.3 Grupo generador eléctrico

El grupo generador eléctrico está constituido por una máquina de DC y una máquina síncrona trifásica con una potencia total de 80kVA, que funciona a una frecuencia de 50-60Hz.

1.3.1.4 Emulador eólico

El grupo está constituido por un motor de DC (realiza la función del primo-motor, emulando la turbina eólica), un volante de inercia y un generador asíncrono trifásico. La potencia total es de 5kW y está controlado por un PLC que simula el comportamiento de los flujos de aire.

1.3.1.5 Emulador solar

Es una fuente controlada que mediante software reproduce la curva característica de generación de un sistema fotovoltaico. También se tiene un convertidor conectado a la red del laboratorio, el cual es el encargado de controlar la carga y descarga de un conjunto de baterías de 30kW.

1.3.2 Sistema de transmisión y distribución

El sistema de transmisión y distribución consta de tres líneas, de longitud variable, interconectadas, y de tres transformadores de 100kVA con relación de transformación 10kV/0,4kV. Este sistema se utiliza para investigar el comportamiento de la transmisión y distribución de energía en función de la

longitud de las líneas y del tipo de cargas. Para ello, las líneas tienen parámetros RLC variables.

1.3.3 Cargas

El laboratorio cuenta con cargas típicas monofásicas residenciales y con bancos trifásicos de cargas RLC que integran un sistema con varios niveles de conmutación accionado de forma remota por software. También cuenta con motores de inducción (cargas dinámicas) acoplados a generadores que actúan como freno del motor.

1.3.4 Sistema de control y monitoreo

El control y monitoreo se realiza a través de un sistema SCADA. La comunicación con los equipos se realiza por tarjetas de adquisición de datos que se conectan a unidades terminales remotas. Para la comunicación de las unidades terminales remotas con la estación maestra se utiliza una red Ethernet. (Hardt, C, 2005).

1.4 LABORATORIO DE SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA, OSUN STATE COLLEGE OF TECHNOLOGY, NIGERIA

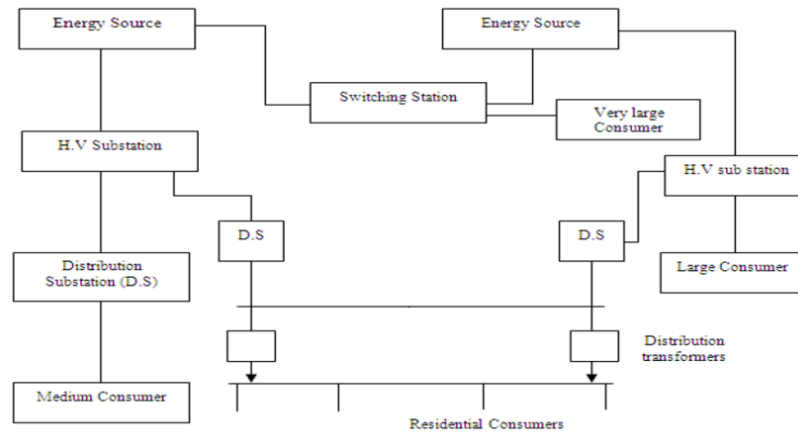
El laboratorio tiene una potencia de 10kVA, con un nivel de tensión 220VAC línea a línea. Emula las partes más importantes de un sistema de potencia, incluido las protecciones. Cada sección incluye relés de protección industrial que realizan funciones específicas: protección del generador, protección de distancia en las líneas de transmisión y la protección de transformadores de distribución. Este laboratorio cuenta con cuatro partes principales: Generación, transmisión, distribución y carga.

En el laboratorio se pueden realizar las siguientes pruebas:

- Generador: Sincronización, regulación de tensión, estudios de estabilidad.
- Transmisión, distribución: Flujo de carga, fallas simétricas, fallas asimétricas, interrupción de circuito.
- Protección general: Falla de línea a línea, falla a tierra, protección de distancia, protecciones del generador, reconexión.

En la Figura 5 se muestra un diagrama con la topología del laboratorio.

Figura 5. Esquema de la topología del laboratorio de Osun state College of Technology



Fuente: Adedokun, G., & Eng, R. (2010). *Development of Electrical Power System Simulator*

A continuación se describen las características más relevantes de las etapas del laboratorio.

1.4.1 Generación y subestación

Cuenta con dos generadores sincrónicos trifásicos con potencia máxima de 6kVA, polos salientes, 1800 rpm, con control de excitación manual y automático. Los generadores se encuentran acoplados a motores de inducción asociados a un control electrónico de inercia de cuatro cuadrantes. La salida del generador se conecta a un transformador y posteriormente se lleva a la línea de transmisión. El transformador es de relación 1:1, 5kVA con intercambiador de derivaciones

1.4.2 Transmisión y sub-transmisión

La línea de transmisión adopta el modelo pi y se puede emular diferentes distancias de líneas de transmisión (parámetros RLC variables). El nivel de tensión de líneas es controlado por un banco de capacitores y reactores que se encuentra instalados en los módulos de subestaciones de transmisión.

Cada línea incluye puntos de prueba para monitorear las condiciones a lo largo de las mismas. El usuario puede emular fallos en diferentes lugares a lo largo de las líneas de transmisión. Un relé de protección de distancia protege las líneas y puede indicar a qué distancia de la línea se ha producido la falla.

1.4.3 Transformación, distribución y cargas

El sistema cuenta con dos transformadores de distribución de iguales características, los cuales tienen intercambiador de derivaciones y relés de protección que pueden desempeñar diferentes funciones de acuerdo con el experimento que se desea realizar.

Los transformadores de distribución son de 2kVA, 220V a 110V, en configuración estrella triángulo.

Las cargas son variables de naturaleza resistiva, capacitiva e inductiva a un nivel de tensión de 220VAC trifásico (representa un cliente industrial) y 110VAC (representa un cliente residencial). La carga dinámica la emula un motor de inducción de velocidad variable.

1.4.4 Sistema de control de energía

El laboratorio está equipado con computadores que incluyen software para control y visualización en tiempo real de las variables del sistema (tensión, corriente, frecuencia, estado de los equipos, etc). Los módulos que componen las etapas cuentan con tarjetas de adquisición de datos, lo que garantiza el control sobre cada etapa del laboratorio.

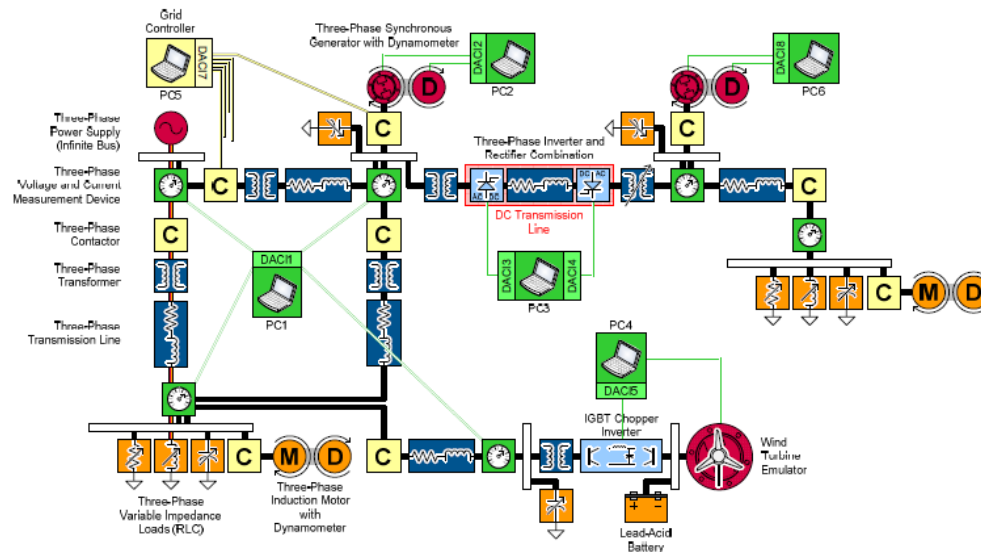
El software es industrial estándar y se comunica con los relés y otros instrumentos del emulador del sistema de potencia. (Adedokun, M., et al, 2010).

1.5 LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD DE NEW JERSEY

El Laboratorio es reconfigurable, trabaja con un nivel de tensión trifásica de 208V 60Hz y una potencia de 0,2kVA. Compuesto por dos generadores sincrónicos, cada uno conectado a un primo-motor, 3 transformadores, 6 líneas trifásicas de transmisión, 2 bancos de cargas RLC, módulos emuladores de generación renovable, 1 banco de baterías, 1 convertidor electrónico que permite al banco de baterías conectarse con la red, 6 computadores que permiten el procesamiento y control de las variables del sistema a través de tarjetas de adquisición de datos, entre otros.

En la Figura 6 se muestra un esquema de cómo está constituido el laboratorio,

Figura 6. Esquema de la topología del laboratorio de la universidad de New Jersey



Fuente: Deese, A. S. (2013). Development of Smart Electric Power System (SEPS) Laboratory at The College of New Jersey.

A continuación se describen las características más relevantes de las etapas del laboratorio.

1.5.1 Generación

En el laboratorio se tienen dos módulos de generadores síncronos acoplados a motores de inducción y un módulo de generación renovable eólica con su banco de baterías. El laboratorio no cuenta con generación fotovoltaica.

1.5.1.1 Generación sincrónica

El laboratorio cuenta con 2 módulos motor/generador trifásico sincrónico. Los generadores son trifásicos de 1800rpm con salida de 220VAC, 0,42A, 60Hz. Estos generadores están acoplados a motores trifásicos de inducción de 220VAC, 0,48A. Ambos generadores tienen módulos de sincronización manual y automática.

1.5.1.2 Emulador eólico

Es un equipo que puede funcionar como motor, generador o fuente de corriente controlada. El emulador es controlado por un software que hace que éste reproduzca el efecto del viento sobre las aspas de una turbina eólica a pequeña escala con 3 palas en el rotor de 1,15 metros de diámetro. Este módulo se

complementa con un banco de baterías de plomo ácido de 12V y 10Ah, cuya carga, descarga y conexión al sistema se realiza a través de un convertidor.

1.5.2 Línea de transmisión

El laboratorio está dotado de 6 módulos de líneas de transmisión. Cada módulo consta de tres inductores con núcleo de hierro diseñados para emular una línea de transmisión de corriente alterna de alta tensión. La impedancia de la línea se puede ajustar para cuatro valores diferentes usando un selector montado en el panel frontal. Un interruptor tripolar manual permite introducir transitorios o interrumpir momentáneamente el flujo de potencia con el fin de analizar la estabilidad del sistema. El módulo no adopta el modelo π de líneas de transmisión media o larga.

1.5.3 Subestación de transformación

El laboratorio cuenta con módulos constituidos por tres transformadores monofásicos que se pueden conectar en delta o estrella. Los devanados primario y secundario de cada transformador están protegidos contra sobre-corrientes y cortocircuitos mediante un fusible electrónico que se restablece automáticamente.

1.5.4 Cargas

Las cargas están constituidas por módulos RLC con varios niveles de conmutación accionados de forma manual por medio de interruptores. El módulo resistivo tiene una potencia entre 11 y 80W, y los módulos inductivos y capacitivos tienen una potencia entre 11 y 84VAR. Tienen conexión a niveles de tensión trifásica de 220VAC o monofásica 110VAC.

Las cargas dinámicas son motores de inducción acoplados a un electrodinamómetro que hace la función de carga mecánica (freno). El electrodinamómetro está controlado por un software en el cual se programa el nivel de carga que se desee tener.

1.5.5 Software de control de los equipos

El software de control de los equipos tiene una interfaz desde la que se puede visualizar el estado de las variables más relevantes del sistema (tensión, corriente, frecuencia) y desde la cual se puede ejercer el control de los equipos. Las funciones pueden ser activadas mediante la compra de una licencia asociada a cada función específica. (Deese, A. S, 2013).

En el anexo 4 se muestran las tablas comparativas de los laboratorios consultados en este capítulo.

2 CONCEPTOS Y TECNOLOGÍAS DE LAS REDES ELÉCTRICAS AVANZADAS O SMART GRID

Un laboratorio de sistemas eléctricos avanzados debe contar con la infraestructura necesaria para desarrollar aprendizaje y competencias en las diferentes tecnologías que conforman un sistema eléctrico de potencia, y así, suplir las necesidades presentes y futuras del sector eléctrico colombiano.

En cuanto a las necesidades futuras del sector eléctrico, se puede encontrar un nuevo concepto que está transformando los sistemas eléctricos de potencia. Se trata de las redes inteligentes o smart grid. Este nuevo concepto nace de la exploración de nuevas tecnologías que buscan:

- Mitigar el agotamiento de los recursos fósiles y el efecto contaminante causado por su uso.
- Mejorar la calidad de la energía.
- Reducir las pérdidas en los sistemas de transmisión y distribución.
- Hacer al sistema más flexible y confiable.
- Mejorar los esquemas de protección.
- Promover el ahorro y gestión de energía.

A continuación se presentan algunos conceptos en el marco de las redes eléctricas inteligentes, y que deben ser incorporados en la concepción, diseño e implementación del Laboratorio de redes eléctricas avanzadas de la Universidad del Valle.

2.1 GENERACIÓN DISTRIBUIDA

2.1.1 Definición

En la literatura no se encuentra una definición exacta acerca de lo que es la generación distribuida, pero diversos autores emplean definiciones similares. A continuación se mencionan algunas definiciones encontradas en la literatura.

- El estándar IEEE 1547 (IEEE, C., 2009) define la generación distribuida como instalaciones eléctricas de generación conectadas a un sistema eléctrico de potencia a través de un punto común de acople.
- En el Reino Unido la generación distribuida se define como una planta de generación que está conectada a una red de distribución y no a una red de

transmisión. De forma similar en Estados Unidos se conoce como la generación de energía eléctrica a pequeña escala debido a una unidad generadora situada cerca de la carga (Mukhopadhyay, S., & Singh, B. 2009).

- La generación distribuida hace referencia (Paska, J., 2007) a pequeñas instalaciones o centrales eléctricas (50-150 MW), conectadas a la red de distribución o localizados en el lado final de los consumidores, que producen electricidad a partir de fuentes de energía renovables, combustibles no convencionales y cogeneración.
- Para el sector eléctrico español se entiende por generación distribuida (David, A., & Treballe, T., 2006) al conjunto de sistemas de generación eléctrica que se encuentran conectados dentro de las redes de distribución debido a que se caracterizan por su pequeña potencia y por su ubicación en puntos cercanos al consumo.
- Según un proyecto de investigación (Botero, S., & Betancur, L., 2009) realizado por la Universidad de los Andes y la Universidad Nacional, la generación distribuida es la generación conectada a un Sistema de distribución local, que no tiene acceso directo a la red de transmisión y cumple con los requerimientos de conexión.

2.1.2 Tipos de tecnologías en generación distribuida

Los tipos de tecnologías que se pueden encontrar en la generación distribuida se pueden catalogar en renovables y no renovables (Puttgen, H., 2003).

Tecnologías renovables:

- Solar (fotovoltaica, térmica)
- Eólica
- Geotérmica
- Hidráulica

Tecnologías no renovables:

- Celdas de combustible
- Microturbinas
- Ciclo combinado (turbina de vapor, turbina de gas)
- Motores de combustión interna

Se describirá brevemente algunas de estas tecnologías.

2.1.2.1 Celdas de combustible

Es un dispositivo electroquímico, compuesto de un electrolito que se encuentra entre un electrodo combustible y otro oxidante. En el mayor de los casos, el combustible es hidrógeno y el oxidante es oxígeno. La celda de combustible produce electricidad directamente de reacciones químicas, sin necesidad de conversión a energía mecánica, lo que hace que la celda tenga alta eficiencia (Puttgen, H., 2003).

2.1.2.2 Eólica

Esta tecnología utiliza aerogeneradores para convertir la energía eólica en mecánica y posteriormente en eléctrica. La tensión obtenida en bornes del generador eléctrico es de magnitud y frecuencia variables, por tanto se convierte a DC a través de un rectificador y luego, mediante un inversor, se transforma en AC para que sea entregada a la red.

2.1.2.3 Fotovoltaica

Esta tecnología se compone de celdas semiconductoras unidas y encapsuladas en paneles modulares en forma rectangular. Se pretende que para el año 2050 esta tecnología represente entre el 6 y 8% (Rodríguez, A., 2009) de la generación de energía a nivel mundial. Los paneles son de fácil instalación a nivel residencial y requieren poco mantenimiento.

2.1.3 Beneficios

En vez del modelo actual de grandes centros productores, se busca un sistema digital y auto controlado, capaz de relacionar pequeños centros, que se ajuste a la demanda, que informe automáticamente de cualquier fallo de suministro y desconecte automáticamente cargas mediante un sistema de redes inalámbricas, afectando a la mínima cantidad de usuarios (Rodríguez, A., 2009). Esta tecnología que incluye un sistema “inteligente” trae múltiples beneficios en cuanto a aspectos técnicos, comerciales, ambientales y su objetivo es aprovechar la energía al máximo.

- El sistema de generación distribuida puede ser utilizado como respaldo, generando energía eléctrica de manera continua o intermitente en paralelo con la red de distribución. En el caso donde la red de distribución presente una falla, la red de respaldo puede entrar a cubrir la demanda del sector asociado a ella (Torres, H., et al, 2007).
- Se realiza una generación de energía limpia con fuentes renovables, se reducen las pérdidas en las redes de transmisión, aumenta la confiabilidad en el suministro de energía, se realiza control de energía reactiva,

regulación de tensión y sirve de apoyo al restablecimiento del sistema en caso de colapso total (Rodríguez, A., 2009).

- Las zonas rurales y no interconectadas que cuenten con los recursos energéticos suficientes para poner en marcha un proyecto con este tipo de tecnología, se verán altamente beneficiadas (Duque, C., & Marmolejo, E., 2004).
- En el sector eléctrico colombiano, invertir en generación distribuida, disminuye las pérdidas generadas por los ataques terroristas al sistema de transmisión.
- Permite a los consumidores gestionar el uso de la energía y escoger las ofertas de suministro de energía más eficientes económicamente.
- Con la generación distribuida y las redes inteligentes, el usuario se convierte tanto en consumidor como productor de energía, para lo cual se requieren reformas regulatorias que permitan adoptar la medición dual y permitir que los usuarios puedan vender excedentes a la red. De esta manera se obtiene el siguiente beneficio (Rodríguez, A., 2009):
 - El usuario puede comprar y vender energía para optimizar las curvas de carga y oferta
 - Tiene acceso a información, en tiempo real, relacionada con su consumo, generación y facturas.
 - Pueda contribuir en programas de eficiencia energética.

Respecto a la normatividad, es importante crear una estructura de referencia técnica y normativa de un tema que no se ha explorado a fondo en Colombia y que presenta importantes retos de la innovación en el país. Esto permitirá el establecimiento de normas para el usuario y el operador de red, tales como, las responsabilidades que cada uno debe adquirir para el control de la generación y la gestión, el suministro de energía y el uso racional de la misma (Torres, H., et al, 2007).

En Colombia la ley que establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad es la ley 143 de 1994. A su vez, la resolución CREG 070 de 1998 establece el reglamento de distribución de energía eléctrica, como parte del reglamento de operación del sistema interconectado nacional y en ella se definen criterios para la planeación, expansión y operación de los sistemas de transmisión y distribución de energía.

Un apartado regulatorio que se hace importante mencionar en la implementación y/o expansión del sistema de transmisión regional y distribución local por parte de

los operadores de red, es el contemplado en la resolución CREG 070 de 1998 en donde se definen los criterios que se deben tener en cuenta para dicha expansión:

- Atención de la demanda: La planeación de la expansión deberá estar soportada en proyecciones de demanda cuya estimación se efectuará utilizando modelos técnicos económicos disponibles para tal efecto.
- Adaptabilidad: Los planes de expansión deberán incorporar los avances de la ciencia y tecnología que aporten mayor calidad y eficiencia en la prestación del servicio al menor costo económico.
- Flexibilidad del plan de expansión: El Plan de expansión de un OR, en su ejecución, puede experimentar modificaciones. El OR podrá incluir obras no previstas y excluir aquellas que por la dinámica de la demanda, puedan ser pospuestas o eliminadas del plan inicialmente aprobado por la UPME.
- Viabilidad ambiental: Los planes de expansión deben cumplir con la normatividad ambiental vigente.
- Normas y permisos: Las obras de expansión requeridas deben cumplir con las normas pertinentes previstas por las autoridades competentes y obtener los permisos correspondientes.
- Eficiencia económica: Los Planes de Expansión e inversiones deberán considerar la minimización de costos.
- Calidad y continuidad del suministro: Los planes de inversión deberán asegurar los indicadores de calidad que reglamenta la resolución CREG 070 de 1998 y garantizar la continuidad del servicio mediante proyectos de suplencia, ampliación, automatización de la operación, modernización e inventario de repuestos, entre otros.
- Coordinación con el SIN: Teniendo en cuenta que la operación y expansión de los sistemas de transmisión regional (STR's) y/o sistemas de distribución local (SDL's) deben ser coordinadas con el resto del sistema interconectado nacional (SIN), el OR deberá planear su Sistema considerando los planes de expansión en transmisión y generación elaborados anualmente por la UPME. (CREG 1998)

Por medio de la ley 1715 del 13 de Mayo de 2014 se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. En ella se tiene como objeto “promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de

emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos busca promover gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética la respuesta de la demanda. (UPME 2014)

2.2 AUTOMATIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

Una característica muy sobresaliente de las smart grid, es que son redes que pueden restaurar el suministro de energía y reconfigurarse de forma automática, ante una falla o cambio brusco en la carga.

Este tipo de redes presentan las siguientes características:

2.2.1 Capacidad de restauración automática

Una red automatizada es una red capaz de restaurar automáticamente el suministro de energía a los clientes, en el menor tiempo posible. Detecta las fallas en el sistema y las aísla de forma remota por medio de interruptores afectando al menor número de usuarios. Después de un determinado tiempo, en caso de que la falla se haya despejado, el sistema regresa el suministro de energía a las áreas afectadas (Groot, R., et al, 2012).

Existen aplicaciones que pueden controlar distintos parámetros de medición para detectar y predecir la ocurrencia de fallo en cualquier parte de la red. De este modo, las redes inteligentes proporcionan un control adaptativo de la fuente de alimentación y el consumo en caso de mal funcionamiento del sistema (Villa, D., et al, 2011).

2.2.2 Reconfiguración Dinámica

Las redes dinámicamente reconfigurables son aquellas cuya topología puede ser reconfigurada a través de conmutación automática. La reconfiguración se aplica para optimizar el suministro de energía, minimizando pérdidas y evitando sobrecarga de los elementos del sistema. Este tipo de red aumenta la eficiencia del sistema de distribución, la capacidad y vida útil de los equipos (Groot, R., et al, 2012).

La red debe adaptar la producción de energía a las demandas actuales de consumo de los usuarios. Con conexiones redundantes, la reconfiguración hace posible una redistribución más inteligente y automatizada de la carga a través de la red (Haughton, D., cHeydt, G., 2010).

En una red eléctrica es indispensable controlar la sobrecarga de los equipos, ya que esto acelera el proceso de envejecimiento de los mismos, generando fallas en el sistema. Por tal motivo, la prevención en la sobrecarga de transformadores y conductores posee un efecto positivo en la fiabilidad de la red. Esto se logra gracias a la reconfiguración del sistema y a los equipos que muestran el perfil de carga en diferentes nodos de la red.

Las redes inteligentes se pueden utilizar para reducir las pérdidas, que va junto con un uso óptimo de la capacidad disponible. Las reducciones significativas de pérdida de potencia se pueden lograr mediante la reconfiguración de redes (Wu, F., & Baran, M., 1989). Esta disminución de las pérdidas de potencia hace que se mejoren los perfiles de tensión.

2.3 PROTECCIONES EN REDES INTELIGENTES

El objetivo de un sistema de protección de una red eléctrica es garantizar el funcionamiento seguro del sistema y proteger tanto al personal que interactúa con él como a los equipos que lo integran. Para cumplir con este objetivo el sistema de protección debe contar con las siguientes características (Geidl, M. 2005).

- **Selectividad:** Un sistema de protección debe desconectar sólo la parte en fallo del sistema con el fin de minimizar las consecuencias de falla.
- **Redundancia:** Un sistema de protección debe ser redundante para mejorar la fiabilidad de la red.
- **Seguridad:** El sistema de protección debe estar en la capacidad de rechazar los eventos que afectan el funcionamiento normal del sistema eléctrico (descargas atmosféricas, transitorios por fallas, etc).
- **Fiabilidad:** El sistema debe ser capaz de detectar y desconectar todas las fallas que se encuentren dentro de una zona protegida.

En las redes eléctricas catalogadas como inteligentes se requiere un esquema de protección que se adapte (esquema de protección adaptativa) a una red tanto en el modo de isla como en el modo interconectado y que cumpla con las características mencionadas anteriormente. En este caso el esquema convencional de protección de sobrecorriente se enfrenta a problemas de selectividad y sensibilidad durante los fallos de red, ya que el nivel de corriente de falla en el mismo relé es diferente en cada caso (Gupta, P., et al, 2013).

2.3.1 Protección adaptativa

Al contar con generación distribuida en un sistema de potencia se tiene diferentes condiciones de falla para un mismo punto, esto hace que los relés tengan que detectar fallas de diferentes niveles de corriente, además de esto las fuentes de generación distribuida, generalmente no suministran una potencia constante en el tiempo, ya que pueden estar o no presentes en determinadas zonas horarias, por tal razón se necesita de protecciones que puedan adaptarse a diferentes condiciones gobernadas por un centro de control, PLC's o RTU's (Gers, J.M., 2013).

Para implementar una protección adaptativa se deben cumplir las siguientes condiciones (Mirsaeidi S., & Mustafa, W., (2014):

- Conocer las condiciones de todas las posibles configuraciones de la red (ajustes de protección pre-calculados en base a tablas de casos posibles)
- Establecer una infraestructura de comunicación con el fin de conocer los parámetros de activación y cambios del relé.
- Conocimiento del comportamiento de cortocircuito en los diferentes modos de funcionamiento de la red.

2.3.2 Flujo bidireccional de potencia

El tipo de protecciones eléctricas que comúnmente se utilizan en líneas radiales no contempla la direccionalidad del flujo de potencia. También se asume que las corrientes de corto circuito con las cuales se ajustan las protecciones siempre están en una sola dirección. Al introducir generación distribuida el flujo de potencia deja de ser en una sola dirección y existe un aporte a las corrientes de corto del sistema. De igual forma, con la integración de las micro redes al sistema eléctrico, se espera que el usuario aparte de consumir, también pueda inyectar potencia a la red principal en caso de que tenga exceso de generación. Esta situación provoca un flujo inverso de potencia que afecta la amplitud y dirección de la corriente de falla (Gupta, P., et al, 2013), (Geidl, M., 2005).

2.3.3 Cambio en la configuración de la red

Los parámetros de corriente de falla del sistema pueden verse afectados por cambios en la configuración de la red. Un esquema de protección adaptativo resolvería el problema de cambio frecuente en el nivel de cortocircuito, ya que el relé digital modifica las características de disparo en función de la configuración que haya adoptado la red (Ustun, T., et al, 2011).

2.3.4 Selectividad y Sensibilidad de un relé de sobrecorriente

En los fallos que se presenten en la red, el sistema de protección debe estar en la capacidad de diferenciar si la falla se presentó en la micro-red o en la red principal. Así se podrá desconectar la micro-red en el caso de que la falla haya sido en la red principal, ó se podrá aislar la sección de fallo para el caso en el que la falla haya sido en la micro-red. Al ser redundante el sistema de protección de la micro-red, la sensibilidad de los relés debe ajustarse de manera que no se afecte la selectividad del sistema de protección. (Gupta, P., et al, 2013), (Duque, C., & Marmolejo, E., 2004). El ajuste y coordinación de los relés es de vital importancia dentro del esquema de protección, ya que si no se logra la coordinación adecuada, porciones más grandes de la red se verán sometidas a interrupciones innecesarias. Por tanto uno de los principales objetivos es restringir los disturbios y fallas a un área limitada (Gao, H., et al, 2012).

2.3.5 Comunicación rápida y fiable

Un enlace de comunicación entre relés, sistema de monitoreo y generador es clave para el óptimo funcionamiento de la red. Esto obliga a que el sistema de comunicación sea rápido, fiable y robusto a la hora de presentarse una falla. La información sobre el estado de falla se transfiere por un canal de comunicación de un punto remoto a un punto local, lo que puede introducir un retardo de tiempo que puede ser visto como un desplazamiento de fase entre la medida inicial remota y la medida final local. Este retardo de tiempo puede ser minimizado con un rápido sistema de comunicación y con un relé digital que sea capaz de medir el retardo de tiempo y compensarlo durante el cálculo. El sistema de comunicación debe contar con un respaldo que actúe cuando el sistema de comunicación principal falle (Dewadasa, M., et al, 2011).

Para que un esquema de protección cumpla con las anteriores características se requieren de complejos esquemas de protección. Los autores sugieren varios esquemas que se pueden aplicar a las redes inteligentes, pero ninguno de ellos ofrece una solución completa a los problemas de coordinación de los relés (Gupta, P., et al, 2013). Dentro de los esquemas mencionados se encuentran los siguientes (Che, L., et al, 2014):

- Esquema de protección adaptativa que se modifica y actualiza los ajustes del relé mediante el sensado del cambio en la configuración de la micro-red.
- Algoritmo de protección automática de sobre corriente instantánea que calcula la impedancia de la red en tiempo real para actualizar las característica de funcionamiento del relé.

- Esquema de protección adaptativa basado en las componentes de secuencia cero de la corriente, que trabaje tanto en modo isla como conectado a la red principal.

2.4 COMUNICACIÓN Y MEDICIÓN

Las redes inteligentes se caracterizan por tener gran capacidad de monitoreo de las variables del sistema, procesamiento avanzado de las variables para apoyar el control del sistema, comunicación efectiva para satisfacer la demanda de energía y reducir su consumo y costos (Wu, F., & Baran, M., 1989).

Estas redes utilizan dispositivos de alta tecnología en medición, monitoreo y comunicación, que permite evaluar el estado de la red en tiempo real, acomodar nuevos entornos, integrar recursos distribuidos y optimizar la respuesta de los equipos electrónicos del usuario. La alta velocidad de detección de datos proporciona un control más eficiente de los sistemas de energía que mejora el rendimiento y la seguridad. Una mejor capacidad de recopilar información precisa de los puntos de consumo en el sistema se logra con sofisticados sistemas de comunicación y medición (Gao, C., & Redfem, M., 2011), (Dan, L., & Bo, H., 2012).

Una red inteligente debe tener una red de comunicación, la cual se encarga de transmitir mediciones y órdenes de ejecución de maniobras entre el operario o software de operación y los distintos actuadores de la red. La red de comunicación se encuentra paralela a todo el sistema eléctrico, siendo incluso un poco más compleja.

2.4.1 Infraestructura de medición avanzada

AMI es una solución de medición y gestión de datos, mediante la comunicación bidireccional entre el consumidor y la empresa prestadora del servicio. Permite transferir información acerca del consumo del usuario, tarifas de energía, fallas en el sistema, desconectar o reconectar a un usuario, entre otras (Huibin, S., & Lee, W. 2011). También permite medir, diagnosticar y ajustar la calidad de la energía, realizar seguimiento y controlar la generación distribuida y los dispositivos de almacenamiento de energía. La infraestructura de medición avanzada para redes inteligentes busca unificar la función, la tecnología, el tipo, el servicio, la gestión, especificación de protección y el protocolo de comunicación (Dan, L., & Bo, H. 2012).

La comunicación puede realizarse a través de las líneas eléctricas existentes (PLC) o por medio inalámbrico (RF):

2.4.1.1 Power Line Carrier - PLC

Los datos recogidos por los medidores inteligentes pueden ser transmitidos desde el medidor hasta el punto central de recolección de datos mediante el uso de las líneas eléctricas. Los datos entregados son procesados y analizados, con el fin de optimizar el sistema y obtener futuros beneficios (Shekara, S. et al (2011).

- La tecnología PLC presenta algunas ventajas; por ejemplo, se puede mejorar la rentabilidad de las líneas rurales, y hacer posible el trabajo para zonas remotas o en largas distancias.
- La tecnología PLC también presenta algunas desventajas; por ejemplo, tiene un mayor tiempo de transmisión de datos respecto a la comunicación inalámbrica, menos ancho de banda y un mayor costo en las ciudades (Zheng, J., et al, 2013).

2.4.1.2 Radio Frecuencia - RF

El contador inteligente recoge los datos de medición de los consumidores finales y luego transmite los datos por radio inalámbrica desde el medidor a una estación recolectora de datos. Posteriormente los datos son procesados y enviados a la central principal. En la literatura se pueden encontrar dos tipos diferentes de tecnologías de radio frecuencia (Zheng, J., et al, 2013), (Shekara, S. et al (2011).

- Tecnología en malla: Los medidores inteligentes se comunican entre ellos para formar una red LAN en el punto de recibo de datos. En este punto se transmite los datos a través de diversos métodos de WAN a la estación central de procesamiento. Esta tecnología posee ventajas como gran ancho de banda, y latencia aceptable.
- Tecnología punto a punto: Los medidores se comunican directamente con el punto de recibo de datos. Posteriormente los datos son enviados a una estación central de procesamiento

2.4.2 Topologías y protocolos de las redes de comunicación.

Las comunicaciones entre dispositivos van ligadas a protocolos establecidos por el fabricante, los protocolos definen la forma de enviar y recibir información. Aunque existen algunos estándares que sugieren modelos a seguir al momento de comunicar las Redes Inteligentes, aún muchos fabricantes poseen protocolos propietarios, es decir protocolos cerrados.

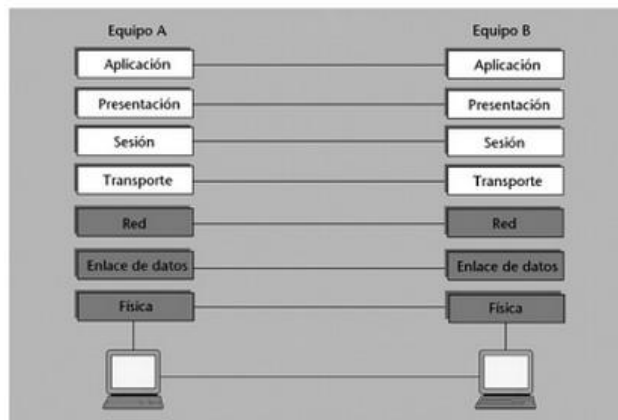
Para comprender cómo funciona la comunicación, se estudia el modelo de referencia más simple y más usado:

2.4.2.1 Modelo OSI

El modelo de referencia OSI es el modelo principal para las comunicaciones por red y está formada por siete capas que define las diferentes fases por las que deben pasar los datos para viajar de un dispositivo a otro sobre una red de comunicaciones. Aunque existen otros modelos, en la actualidad la mayoría de los fabricantes de redes relacionan sus productos con el modelo de referencia OSI, especialmente cuando desean enseñar a los usuarios cómo utilizar sus productos. Los fabricantes consideran que es la mejor herramienta disponible para enseñar cómo enviar y recibir datos a través de una red (Ordinas, J., & Peig E., 2008).

El modelo de referencia OSI (ver Figura 7) tiene siete capas que reduce el problema de comunicación, en “subprocesos simples”. (Kurose, F., & Ross, K., 2007).

Figura 7. Capas del modelo OSI

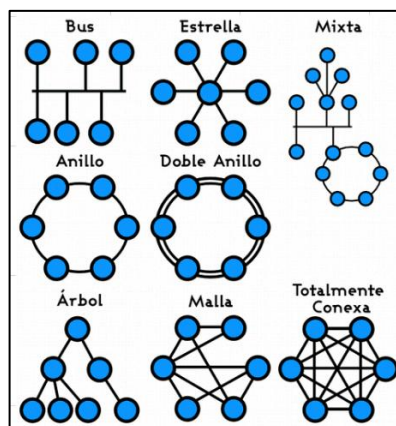


Fuente: Ordinas, J., & Peig E. (2008). Estructura de redes de computadores

2.4.2.2 Topologías de conexión de redes de comunicación.

Una topología se refiere a la forma de conectar los distintos equipos de una red. Cada topología posee particularidades especiales en cuanto a pros y contras. En la Figura 14 se muestran los distintos tipos de topologías. Posteriormente se mencionan algunas topologías de red.

Figura 8. Topologías de redes de comunicación



Fuente: Ordinas, J., & Peig E. (2008). Estructura de redes de computadores

- Red en bus: Se caracteriza por tener un único canal de comunicación, es decir, un elemento solo puede enviar información a la vez. La ventaja principal es el costo, y su desventaja más importante es la lentitud en la transmisión de los datos (Buettrich, S., 2007).
- Red en estrella: Todos los elementos están conectados a través de un servidor central, y se pueden comunicar al tiempo, estableciendo una comunicación ágil y rápida. Su principal desventaja es que si falla el servidor central, la red completa colapsa (Buettrich, S., 2007).
- Red en malla: Es una topología en donde cada nodo está conectado a todos los nodos. De esta manera la información puede viajar por distintos caminos porque cada nodo sirve de servidor, es ágil y robusta, su principal desventaja es el costo (Buettrich, S., 2007).

2.4.2.3 Algunos protocolos de comunicación industrial

Un protocolo de comunicación especifica un conjunto de reglas (por ejemplo: el idioma o formato de los mensajes) que los diferentes elementos de control del sistema deben utilizar para entenderse unos con otros y poder intercambiar información de una manera coherente.

- Protocolo X-10: El protocolo X-10 es abierto, es decir, cualquier fabricante puede producir dispositivos X-10 y ofrecerlos en su catálogo. Se basa en un formato de transmisión por corriente portadora (power line carrier, PLC) a través de la líneas eléctricas. Posee un reducido ancho de banda.

- Protocolo LonWorks: El estándar LonWorks (Local Operating Network), se basa en la utilización del protocolo Lontalk (ANSI/EIA 709) para redes de control, que implementa las siete capas del modelo OSI. En esencia se trata de un sistema de control distribuido, basado en un conjunto de nodos independientes, interconectados entre sí, y cuya red está formada por nodos o dispositivos inteligentes que se pueden programar de manera autónoma.
- Protocolo EIB (European Installation Bus): Es un estándar orientado a la gestión técnica de oficinas, hoteles, escuelas, polideportivos, grandes superficies, y en general para cualquier edificio. Se desarrolló con el objetivo de crear un estándar europeo, con el suficiente número de fabricantes, instaladores y usuarios, que permita la comunicación de todos los dispositivos de una instalación eléctrica.
- Protocolo KNX: Es el sucesor del EIB y en este sistema, la transmisión de las señales se hace a través de un bus dedicado, al que están conectados todos los dispositivos. El bus permite que todos los componentes de las instalaciones domóticas/inmóticas estén intercomunicados entre sí, de esta forma, es posible que cualquier componente de órdenes a cualquier otro, independientemente de la distancia entre ellos y su ubicación. Un laboratorio que trabaja con este sistema y que se investigó en el actual trabajo, es el laboratorio DeMoTec. (Hardt, C., 2005), (Lon Users, 2009).

3 ESTRUCTURA DEL LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS AVANZADOS PARA LA UNIVERSIDAD DEL VALLE

Un laboratorio de sistemas eléctricos avanzados destinado a la enseñanza y la investigación debe representar una oportunidad para participar en un proceso de aprendizaje donde se experimente a través de la experiencia con equipos físicos y virtuales. Según la experiencia de algunas instituciones, un laboratorio destinado a estas actividades debe incluir las siguientes características (Deese, A. S., 2013):

- Flexible: El laboratorio debe poderse operar fácilmente tanto por principiantes como por profesionales experimentados y debe permitir el estudio de temas introductorios y avanzados.
- Eficiente: El laboratorio debe tener instalaciones que proporcionen la máxima capacidad con mínimos requisitos, debido a que en ocasiones los recursos financieros y de espacio son limitados.

Los laboratorios de sistemas eléctricos avanzados, necesariamente no poseen todas las etapas que componen un sistema de potencia. Algunas universidades y centros de investigación se centran en el estudio de los fenómenos que ocurren en determinadas áreas del sistema de potencia, por tanto diseñan y construyen un laboratorio dedicado a su área de interés (generación, transmisión, distribución, cargas).

El término de “laboratorio de sistemas eléctricos avanzados” o “laboratorio inteligente” hace referencia a que posee tecnologías de información y comunicación que enlaza los equipos que conforman el sistema, permitiéndoles mediante algoritmos programados elegir la solución más óptima al momento de presentarse una contingencia o situación provocada intencionalmente. Lo que hace que una red sea inteligente es su capacidad de interconectar tecnologías de información y comunicación con la red de potencia, optimizando su operación. Las tecnologías utilizadas conectan e integran las partes de un sistema de potencia, es decir, hay una comunicación permanente entre los equipos y etapas que componen el sistema de potencia (Haughton, D., & Heydt, G., 2010).

Con base en el estado del arte realizado en el capítulo 1 y 2, se mencionan las etapas y características que podrían incluirse en el laboratorio de sistemas eléctricos avanzados para la Universidad del Valle

3.1 ETAPAS DEL LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS AVANZADOS

El laboratorio de sistemas eléctricos avanzados debe ser reconfigurable, es decir, los componentes pueden ser reorganizados para experimentos adicionales, y debe contar con un software de control, monitoreo y adquisición de datos que permita evaluar y controlar su funcionamiento en forma remota. El laboratorio incorpora una micro-red que debe presentar la opción de trabajar en modo isla para realizar pruebas de la estabilidad del sistema ante la presencia de una falla o aumento súbito de carga y la opción de trabajar conectada al sistema de distribución del laboratorio.

Las principales etapas que se tiene planeado incorporar en el laboratorio, son las mismas que se incorporan en la estructura de un sistema de potencia a gran escala:

- Generación
- Transmisión
- Distribución
- Cargas

En el Anexo 2 se muestra el diagrama conceptual del laboratorio de sistemas eléctricos avanzados.

A continuación se describen las etapas que debería tener el Laboratorio de Sistemas Eléctricos Avanzados para la Universidad del Valle

3.1.1 Generación

En la etapa de generación del laboratorio, se debe considerar una generación distribuida que integre fuentes convencionales y fuentes renovables de energía. Actualmente se está estimulando el uso de las energías renovables, por ello es indispensable que el laboratorio cuente con este tipo de tecnología.

3.1.1.1 Generación convencional

Se debe incorporar un grupo motor-generator trifásico. El generador debe ser sincrónico y estar equipado con un regulador de tensión para garantizar la tensión en bornes. El primo-motor puede ser un motor trifásico de inducción, asociado a un sistema de control que emule la respuesta de una turbina (hidráulica, vapor o gas) cuando ocurre un cambio en la carga. Debe contar con un sistema de control, monitoreo y adquisición de datos para su manipulación de forma remota, permitiendo conocer el estado de los generadores, variables eléctricas asociadas

al generador, integrarlos o sacarlos del sistema. También se debe contar con un esquema de protección que garantice el funcionamiento óptimo de esta etapa. Adicional a esto, se debe incorporar un módulo sincronizador (manual y automático) que permita realizar sincronizaciones óptimas y fallidas (introducción de perturbaciones) para estudios de estabilidad del sistema.

3.1.1.2 Generación con fuentes renovables

Los laboratorios modernos incluyen fuentes de energías renovables. Estos laboratorios destinados al desarrollo e investigación de fuentes renovables de energía, deben contar con paneles solares, turbinas eólicas o equipos dotados de un software que reproduzca el comportamiento de la generación con paneles solares y turbinas eólicas (para el estudio de la eficiencia y su influencia en la estabilidad del sistema). Los sistemas de generación distribuida incorporarán sistemas de comunicación y automatización para responder a los determinados perfiles de carga y a señales enviadas en el marco de un programa de gestión activa de la demanda

- Panel y Emulador fotovoltaico: En la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, edificio 353, actualmente se tienen instalados 12 paneles fotovoltaicos de 140 W y 4 de 85W de potencia que podrían integrarse al laboratorio. El objetivo de trabajo de estos paneles es el estudio (en desarrollo y a cargo del Grupo de Investigación GICI), con métodos de rastreo, del punto máximo de potencia a través de la reconfiguración dinámica de los paneles. En cuanto al emulador, el laboratorio debe incorporar una fuente de DC programable que es utilizada para emular las características de una curva típica de corriente-tensión de un panel fotovoltaico. El emulador debe permitir introducir el efecto de parámetros de condiciones ambientales. Se hace necesario incluir el emulador de generación distribuida fotovoltaica, debido a que en ocasiones no se cuenta con las condiciones ambientales adecuadas (falta de luz solar) para realizar una práctica de laboratorio, o, porque se desea estudiar el comportamiento de un perfil de carga de diferentes horas del día.
- Emulador eólico: Al igual que en el emulador fotovoltaico, se debe incorporar una fuente de DC programable que reproduzca fielmente el efecto del viento sobre el rotor de palas de una turbina eólica. Otra opción puede ser un motor de DC controlado por un algoritmo que reproduzca el comportamiento y par entregado por una turbina eólica. Se descarta el uso de aerogeneradores debido a que según el mapa de viento que se dispone la web de la UPME, la velocidad promedio del viento en Santiago de Cali

está entre 1 y 1,5m/S, y según los catálogos consultados (Kliux ,2015), (Direct Industry, 2015), (Enercon, 2015), la velocidad nominal requerida está entre 4 y 15m/S.

- Subestación de elevación en el nodo de generación centralizada: La subestación debe incorporar un transformador trifásico, transformadores de medida o sensores para realizar medida indirecta, transformadores de protección y un esquema de protección asociado a la subestación. También se debe incluir elementos de maniobra como interruptores y seccionadores que permitan, de forma remota, incorporar o retirar del sistema a la subestación. De igual forma se debe tener un sistema de control, monitoreo y adquisición de datos para operar el sistema y observar el estado de las variables (tensión, corriente, frecuencia, potencia activa y reactiva) de interés de forma remota.

3.1.2 Transmisión

El laboratorio deberá incorporar módulos de líneas de transmisión que puedan emular diferentes longitudes de una línea (línea corta, media y larga) de modelo PI, por tal motivo debe tener parámetros RLC variables. En el caso de una eventual falla (no programada), la línea debe estar protegida por fusibles, para evitar daños a los componentes de la misma. También debe incorporar un sistema que permita realizar fallas (línea tierra, línea a línea) a diferentes longitudes de la línea (por ejemplo: 0%, 25%, 50%, 75%, 100%). Los módulos de línea de transmisión deben tener una tarjeta de comunicación, para realizar maniobras de desconexión o conexión de forma remota a través de un software de control y monitoreo.

3.1.3 Distribución

3.1.3.1 Subestación de distribución

La subestación debe incorporar un banco de transformadores trifásicos, que reduzca la tensión a niveles adecuados para alimentar las cargas, sensores para medida indirecta, el esquema de protección de la subestación, y un sistema de comunicación para realizar el control y monitoreo de la subestación a través de software.

3.1.3.2 Red de distribución

Se debe incluir módulos de líneas de distribución que estén alimentados por la subestación, con el fin de proporcionar la potencia necesaria a las cargas AC estáticas y dinámicas del sistema. Para el caso de una eventual falla u optimización de la red, el módulo contará con la opción para reconfigurar la

topología de la red de forma remota y automáticamente a través de un algoritmo, con el fin de aislar la falla y luego de solucionar la falla restablecer el servicio.

3.1.3.3 Banco de baterías

El laboratorio debe contar con un banco de baterías que emule una estación de carga para baterías de vehículos. De igual forma el banco de baterías, mediante el sistema de gestión de energía, debe tener la posibilidad de inyectar potencia a la red de distribución en el momento que sea programado. La cantidad de carga o descarga de la batería es controlada por un algoritmo de gestión de energía utilizado para el funcionamiento del sistema.

3.1.4 Cargas

El laboratorio deberá incorporar dos tipos de cargas. El primer tipo de carga es un módulo de cargas resistivas, capacitivas e inductivas que representa una carga estática con varios niveles de conmutación para emular diferentes patrones de carga; la conmutación debe realizarse de forma remota o local. El segundo tipo de carga es un motor de inducción, que representa las cargas dinámicas del sistema. Este motor integra un control para variación de potencia. A cambio del motor se pueden utilizar emuladores electrónicos.

El software que controla las cargas debe permitir definir diferentes perfiles de demanda.

3.1.5 Sistema de protección

El sistema de protección se asocia al software de control, monitoreo y adquisición de datos para evaluar la fallas, aislarlas y reconfigurar el sistema. Debe ser un esquema de protección adaptativa que se adecue por ejemplo a la nueva topología del sistema después de haberse presentado una falla. Es necesario incluir un relé digital real, o un software que simule las funciones más importantes de un relé digital apoyado en las señales enviadas por las tarjetas de adquisición de datos. Las funciones del relé que se podrían incluir son: sobre corriente, sobre/bajo voltaje, relé de distancia, flujo de potencia inversa, sobre/baja frecuencia, etc.

3.1.6 Control, monitoreo y adquisición de datos

Se debe incorporar un software de control, monitoreo y adquisición de datos, que permita hacer seguimiento a valores de tensión, corriente, frecuencia, potencia activa y reactiva, factor de potencia del sistema, estado de los equipos del sistema, etc. De igual forma debe suministrar información sobre condiciones de falla y enviar los datos procesados a través de la red a la estación maestra, para que la red sea reconfigurada automáticamente y la falla sea aislada. El software

debe ser capaz de presentar perfiles de demanda de energía, en función de las cargas que se conmutan a través del mismo software. De igual forma el software debe permitir implementar algoritmos para realizar despachos programados y debe permitir el monitoreo de la potencia generada, a fin de cumplir con el despacho programado.

Respecto al hardware, se debe incorporar tarjetas de adquisición de datos, una red de comunicación y terminales remotos para procesamiento de información.

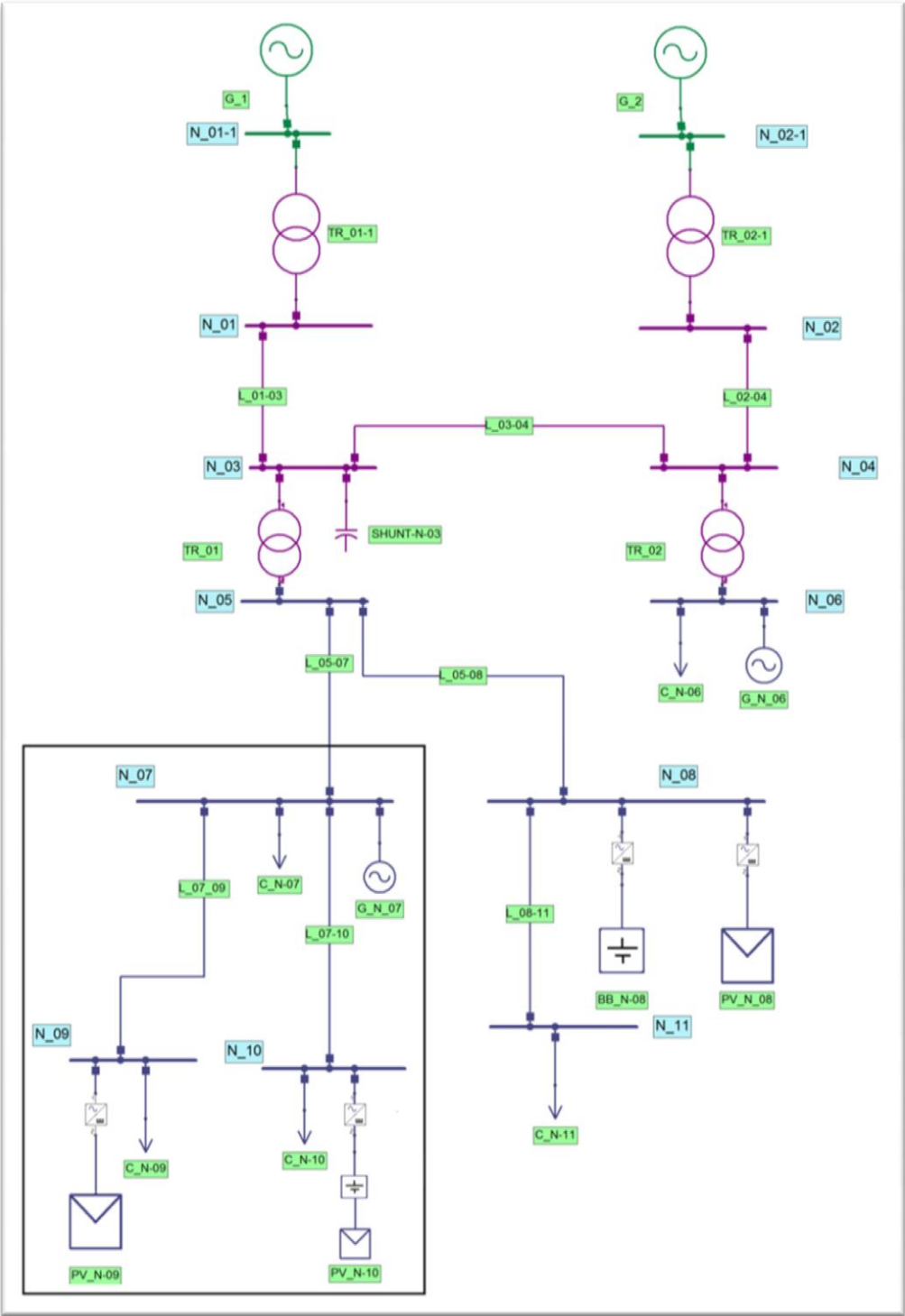
3.2 DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL LABORATORIO

En la Figura 9 se muestra un diagrama unifilar de la propuesta realizada para el laboratorio de sistemas eléctricos avanzados para la Universidad del Valle. Se tomó como base y se modificó un diseño propuesto en un trabajo de grado anterior (Gil Alejandro, C. 2014), donde se definieron conceptos acerca de la estructura de un laboratorio de sistemas eléctricos avanzados y los fenómenos que se pueden emular en él.

Las estimaciones de nivel de tensión y potencia del sistema se deducen del estado del arte realizado en el capítulo 1 y de la información consultada con proveedores de módulos didácticos para laboratorios que emulan sistemas de potencia.

La distribución y ubicación física de los elementos se puede observar en el diagrama del anexo 3. En el diagrama se realiza una distribución de los módulos de tal forma que se faciliten las prácticas, conexión y acceso a los diferentes módulos. El tamaño de los módulos se obtuvo con base a las medidas (entre 0.7m^2 y 1m^2) de los módulos ofrecidos por Lucas Nülle y Edibon. También en el diagrama se incluye un cuarto de control desde donde los alumnos pueden realizar control y visualización de las variables del sistema.

Figura 9. Diagrama unifilar propuesto para la estructura del laboratorio de sistemas eléctricos avanzados



3.2.1 Área de generación, transformación y transmisión

En el área de generación se tiene propuesto instalar dos generadores sincrónicos trifásicos en los nodos N_01-1 y N_02-1. Se estima que cada uno con una potencia aproximada de 5kVA y tensión de 220VAC. Entre los nodos N_01-1, N_01 y entre los nodos N_02-1 y N_02 se instalarán los transformadores que emularán el sistema de elevación de tensión para su posterior transmisión. Por efectos de características de los módulos ofrecidos por proveedores los transformadores pueden ser de relación 1:1 y no necesariamente elevadores.

Entre los nodos N_01 y N_02 se tendrá una línea de transmisión (L_01-03) que transportará la potencia generada por el generador 1. Entre los nodos N_03 y N_04, se tendrán una línea de transmisión (L_02-04) que transportará la potencia generada por el generador 2. Entre los nodos N_03 y N_04 se tendrá una línea de transmisión que le brinde confiabilidad al sistema y garantice el suministro de energía en caso de que una de las líneas L_01-03 o L_02-04 presenten alguna falla.

En el nodo N_04 y N_06 se tendrá un transformador reductor, el cual brindará suministro de energía al que podría ser un cliente industrial conectado al nodo N_06. En dicho nodo, se propone que se conecte una carga y un generador que represente un sistema de consumo y generación a nivel industrial (Cliente con cogeneración). Este nodo permite experimentos para estudios de generación distribuida.

Entre el nodo N_03 se conectará un compensador de reactivos y entre el nodo N_03 y N_05 se conectará un transformador reductor que alimentará una microred perteneciente al sistema de distribución. Este transformador, al igual que los transformadores conectados a las barras generadoras, puede ser de relación 1:1.

3.2.2 Área de distribución de energía y micro-red

En el área de distribución se tiene una micro-red y dos nodos adicionales (N_08 y N_11) que no pertenece a la micro-red. El nodo N_08 cuenta con un banco de almacenamiento de energía que representa una estación de servicio de carga baterías para vehículos eléctricos (puede emular un gran parqueadero de buses eléctricos de servicio público). En este nodo (N_08) también hay un sistema de paneles fotovoltaicos o emulador fotovoltaico que carga el sistema de baterías. También se espera que en algún momento el sistema de baterías inyecte potencia a la red para cubrir picos de demanda. Por su parte el nodo N_11 representa una carga residencial convencional.

Los nodos N_07, N_09, y N_10 conforman la micro-red que puede trabajar en isla o conectada a la red principal. En el nodo N_07 se tendrá conectado el equivalente a varias cargas residenciales (C_N-07) que cuentan con generación eólica (emulador eólico). En el nodo N_09 se tendrá conectado un arreglo de paneles fotovoltaicos (o emulador) trifásicos de inyección directa a la red, el cual representa un pequeño o mediano parque de generación distribuida fotovoltaica, también se incluye en este nodo una carga (C_N-09) equivalente a varios consumidores residenciales. En el nodo N_10 se tendrá conectado una carga que representa un usuario residencial y un panel fotovoltaico monofásico que representa la generación debida a este usuario residencial, la cual debería contar con un sistema domótico.

El nivel de tensión que puede tenerse en el laboratorio se presenta de dos maneras, según lo encontrado en los catálogos de los proveedores (capítulo 4).

- 220VAC para generación, 440VAC para transmisión y 220/110 VAC para distribución.
- 220VAC para generación, 220VAC para transmisión y 220/110VAC para distribución. En este caso todos los transformadores serían de relación 1:1.

4 SOLUCIONES COMERCIALES OFRECIDAS POR PROVEEDORES Y FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO

Para realizar la selección de productos y proveedores, se consultó los catálogos de seis proveedores de equipos didácticos para estudios de ingeniería eléctrica. Los proveedores consultados son Leybold, Amatrol, Lucas Nüelle, Edibon, Lab volt y Terco. De estos seis proveedores se seleccionaron las tres soluciones que mejor se adaptaban a las características de las etapas planteadas en el capítulo anterior.

Las tres soluciones seleccionadas son de los proveedores Lucas Nüelle, Edibon y una combinación de Leybold y Amatrol. El proveedor ICL Didáctica Ltda, representante de Leybold y Amatrol en Colombia ofreció un solución que combinaba ambas marcas (Leybold y Amatrol).

A continuación se describen algunos equipos de las soluciones consultadas.

4.1 SOLUCIÓN DE ICL DIDÁCTICA LTDA, LEYBOLD-AMATROL

La solución ofrecida por ICL es una combinación de productos de Leybold y Amatrol. Los equipos están a una escala de 1:1000 respecto a las magnitudes eléctricas (tensión y corriente) y el sistema tiene la ventaja de poder integrar equipos de otras marcas que tengan protocolos de comunicación estándar.

4.1.1 Generación

En la etapa de generación, se ofrece un módulo de generación sincrónica, un módulo emulador-simulador fotovoltaico y un módulo emulador-simulador eólico.

4.1.1.1 Generación sincrónica

Compuesto por una máquina sincrónica de cuatro polos, de 1kVA, 230/400VAC de salida, 2,66/1,52A, 1800 rpm. El generador está acoplado a una máquina de DC de 2kW que actúa como primo-motor y que cuenta con control de par giro.

4.1.1.2 Generación fotovoltaica

El sistema fotovoltaico está compuesto por un inversor con capacidad de 2,5kVA para conexión automática a la red, sistema de seguimiento de radiación solar y opción de conexión con paneles pre-instalados en el techo de la edificación. Se puede incluir un set de paneles para interiores que funcionan con lámparas de

halógeno. Opcional se puede incluir una fuente de DC (195W) controlada para obtener diferentes situaciones de radiación solar en cortos tiempos.

4.1.1.3 Generación eólica

Está compuesto por una máquina de inducción, que emula el aerogenerador, con variador de velocidad para obtener diferentes condiciones de viento, incluye un inversor de 2kVA para conexión a la red. A este sistema también se le puede conectar aerogeneradores de hasta 2kVA.

4.1.1.4 Subestación de transformación

Incluye un transformador trifásico de 0,8kVA, tensión de entrada 400VAC y tensión de salida de 380VAC, tiene distintos puntos de conexión para control de regulación de tensión. El sistema tiene elementos de maniobra (interruptores) accionados de forma remota y transformadores de medida para corriente y tensión.

4.1.2 Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión modelan una línea de 380kV, adopta el modelo pi y se pueden obtener distancias de 360km, 216km y 144km. Las líneas tienen elementos de maniobra para conexión o desconexión. Se puede agregar un módulo relé digital para estudios de protección de las líneas.

4.1.3 Sistema de distribución

Se utiliza un transformador trifásico reductor de 1kVA, de 400VAC de entrada y 115VAC de salida. Tiene elementos de maniobra para conexión y desconexión y transformadores de medida para corriente y tensión.

También se incluye un módulo de barras colectoras para realizar diferentes configuraciones (barraje doble, simple con transferencia, etc) o para realizar maniobras de conexión y desconexión de cargas. Se puede incluir un módulo para sincronizar con la red.

4.1.4 Cargas

Las cargas estáticas son de tipo RLC con parámetros variables. La carga resistiva es de 1kW y las inductivas y capacitivas de 890VAR. También se puede incluir un motor de inducción con control de perfil de carga que emula una carga dinámica.

4.1.5 Sistema de control, monitoreo y adquisición de datos

Todos los módulos del sistema están monitoreados a través de equipos de medida (analizadores de red). Las etapas también incluyen un relé programable

que protege y permite la gestión del estado de los módulos. La interfaz se apoya de Lab View y Matlab.

4.2 PRODUCTOS OFRECIDOS POR LUCAS NÜLLE

Se consultó el catálogo de productos de Lucas Nülle que se enfoca en la enseñanza de ingeniería eléctrica, y se encontró gran cubrimiento de los requerimientos de las etapas planteadas para el laboratorio. En la siguiente descripción se incluyen los elementos que se consideran como los más destacados de cada etapa, ya que el fabricante ofrece en su catálogo productos (conectores, cables, estructuras metálicas, cubiertas de plástico, etc) que no son relevantes para los fines de este trabajo. Todos los bancos son modulares, esto permite configurarlos según las necesidades.

4.2.1 Planta generación sincrónica trifásica

El banco de generación permite realizar prácticas de sincronización automática o manual del generador, permite un control automático de potencia y cuenta con sistema de protección para el generador. Un servomotor acoplado al generador y controlado por un software, reproduce el comportamiento típico de una turbina hidráulica.

Los elementos del banco de generación son los siguientes:

- Máquina sincrónica trifásica:
 - Potencia nominal: 1kVA
 - Velocidad: 1500rpm
 - Tensión nominal: 400/230V
 - Corriente nominal: 1,5/2,6A,
 - Tensión y corriente de excitación: 220V, 1,6A.
- Servomotor: Tiene un tensión de conexión de 400V, y una potencia máxima de salida:1kVA
- Relé multifuncional: El relé multifuncional realiza la función de protección, control automático de potencia y sincronización automática del generador. En cuanto a las funciones de protección, se tiene: protección por sobrecorriente, potencia inversa, baja frecuencia y alta frecuencia.

Al ofrecer bancos de pruebas modulares, el fabricante ofrece diferentes opciones para constituir el banco de generación, como por ejemplo incluir un módulo de

carga de 1kW, en caso de que solo se desee adquirir el banco de generación sincrónica o la opción de incluir un módulo protección diferencial de generadores ó el módulo contra fallos a tierra del rotor. Estas opciones de configuración de los bancos se presentan para todas las etapas que se mencionarán.

4.2.2 Generación fotovoltaica

El banco de generación fotovoltaica permite realizar prácticas relacionadas con el estudio de la composición y aplicación de los paneles solares en sus diferentes configuraciones. También permite trabajar en isla con inyección directa de potencia o con acumulador (batería), gracias al convertidor inversor que se encarga de controlar el nivel de tensión y frecuencia del sistema.

Los elementos más destacados de este banco son:

- Emulador solar: Son tres fuentes independientes, que se pueden conectar en paralelo o serie, en función de los requerimientos que se tengan. El ajuste de la intensidad de la radiación es manual. Las características eléctricas son las siguientes.
 - Tensión generada: 23V cada fuente
 - Corriente: Máximo 2A cada fuente
 - Intensidad de radiación: de 20% a 100%
 - Potencia: 40VA cada fuente
- Panel Solar con luz artificial (lámpara): Es un panel fotovoltaico con posición (ángulo) variable, y una lámpara de halógeno que sustituye la presencia del sol. La intensidad de la lámpara puede variar por medio de un regulador. Las características son las siguientes:
 - Potencia de la lámpara: 500W
 - Tensión de alimentación de la lámpara: 230V
 - Tensión de salida del panel: 21V
 - Corriente de salida del panel: 650mA
 - Potencia máxima del panel: 10W
- Batería, regulador de batería, inversor y contador de energía: La batería es de plomo y con tensión de 12V y capacidad de 7Ah, que es controlada en su carga y descarga por el regulador de la batería. Se incluye un inversor de 275VA que controla la frecuencia y tensión del sistema cuando trabaja en isla. También se incluye un contador de energía bidireccional y comunicación para medida remota.

En el catálogo del fabricante no se encontró alguna alternativa de programación de un perfil de generación para estudio o prácticas de la incidencia del sol en

determinadas horas del día, lo cual se espera tener en el nuevo laboratorio de la Universidad. Esto se podría lograr con el software asociado al control del emulador.

4.2.3 Generación eólica

El banco de generación eólica permite el análisis de las plantas eólicas con generadores asíncronos. Para poder emular un sistema de gran escala, se utiliza un motor acoplado a un servomotor, apoyado de un software computacional que reproduce el comportamiento del viento en diferentes condiciones ambientales.

Los módulos más relevantes del banco de generación son los siguientes:

- Máquina asíncrona trifásica
 - Tensión nominal: 400/230 VAC
 - Corriente nominal: 1,5 / 2,6A
 - Potencia nominal: 1kVA
 - Tensión y corriente de excitación: 130VAC - 4A

El servomotor que se utiliza como primo-motor del generador es de iguales características que el utilizado en el banco de generación sincrónica. Lo mismo aplica para el inversor, el banco de batería y regulador de carga.

4.2.3.1 Transformador

El banco de pruebas de transformadores permite realizar prácticas básicas de transformadores, estudio y pruebas de protecciones del transformador (protección diferencial, temporizada de sobre-corriente). El transformador es de 1kVA con relación de transformación 1:1 y tensión de 400V. Puede acompañarse de un relé de protección para sobrecargas y cortocircuitos.

4.2.4 Transmisión de energía

El banco de transmisión permite realizar prácticas en niveles bajos de tensión, conservando las principales características de un sistema de alta tensión. Las líneas adoptan el modelo PI y se puede emular distancias de 150 a 300km (Parámetros RLC variables). En este banco se pueden realizar estudios sobre fallas simétricas y asimétricas en la línea, efecto de las distancias sobre los niveles de tensión, flujo de potencia, entre otras. El módulo es para un nivel de tensión de 400VAC, 1,5A y soporta cargas hasta de 1kVA. El banco también incluye un relé de protección de distancia, sobre-corriente y sobre-tensión para proteger la línea y realizar práctica de protección.

4.2.5 Distribución de energía

El banco de distribución de energía cuenta con un sistema doble de barras colectoras compuesto por un módulo para alimentar una carga y otro módulo para realizar acoplamiento entre dos barrajes. Los módulos tienen elementos de maniobra (seccionador e interruptor) con accionamiento a distancia a través de un pulsador o a través del software del sistema. El software permite conocer el estado de los elementos de maniobra y los valores de las variables eléctricas del sistema.

El proveedor no indica la capacidad de potencia del módulo, pero observando que los módulos de carga son de 1kW y de 1kVA se puede asumir que la capacidad de este módulo es de 1kVA.

4.2.6 Cargas

En las cargas se encontraron dos tipos: las estáticas y las dinámicas. Las cargas estáticas son módulos resistivos, capacitivos e inductivos, de 1kW, 1kVAR y 1kVAR respectivamente, todos trifásicos. Este tipo de equipos no permite niveles de conmutación a distancia o por medio de un software.

En las cargas dinámicas se utiliza un motor trifásico asíncrono conectado a un servomotor que actúa como freno regenerativo. Esta acción se realiza por medio del software asociado al servomotor. El motor es de 1kVA a 400VAC.

4.2.7 Software del sistema

El proveedor proporciona 2 software para el aprendizaje y control del sistema. El primero de ellos es el “Interactive Lab Assistant” que es una guía para realizar los experimentos asociados con el banco adquirido, el cual contiene todos los manuales para la utilización de equipos. El segundo software es el “SCADA Viewer” que es para el control de algunos equipos del sistema, saber el estado en que se encuentran y para la visualización en tiempo real de las variables eléctricas del sistema.

4.3 SOLUCIÓN COMERCIAL OFRECIDA POR EDIBON

El fabricante EDIBON propone varias soluciones comerciales enfocadas al área educativa. En este caso se realiza la revisión de un laboratorio que emula un sistema de potencia y que cuenta con la mejor tecnología que puede ofrecer el fabricante. Este laboratorio se divide en dos áreas, la primera es donde se encuentran los equipos y la segunda es una sala donde se ubican los escritorios y computadores para los alumnos; en este último espacio mencionado se realiza el

control, total o parcial, de los equipos del laboratorio por medio de software SCADA.

La solución propuesta está compuesta por 3 partes principales:

- Emulador de sistemas eléctricos avanzados
- Planta de energía mecánica y simulador de energía (renovables)
- Sistema de enseñanza EDIBON SCADA-NET

A continuación se describe cada parte.

4.3.1 Emulador de sistemas eléctricos avanzados

Este emulador tiene etapa de generación, transmisión, distribución y cargas. Presenta la posibilidad de trabajar en isla y la posibilidad de adaptar otro grupo de equipos en paralelo para obtener un doble circuito controlado por la misma consola. Algunos experimentos que se pueden realizar se mencionan a continuación:

- Operación en isla con control automático de frecuencia y tensión.
- Estudios de Flujo de carga con diferentes distancias de líneas.
- Fallas simétricas y asimétricas a diferentes longitudes de la línea.
- Verificación de la operación de control automático de frecuencia bajo pequeñas perturbaciones del sistema. Se realiza en modo isla.
- Verificación de la operación del regulador automático de voltaje (AVR) bajo pequeñas perturbaciones del sistema. Se realiza en modo isla.
- Verificación de las funciones de protección del sistema.

4.3.1.1 Sistema de energía eléctrica con SCADA

Este módulo contiene el ordenador, el sistema SCADA, los puertos de comunicación y el software adecuado para controlar los equipos.

La consola tiene tres pantallas (dos táctiles), que mediante el sistema SCADA permite supervisar y controlar los parámetros y estados de los equipos. En la consola se realiza control de frecuencia, control de tensión, control de potencia activa, control de potencia reactiva, control de factor de potencia y permite sincronizar los generadores de forma automática o manual.

También se puede realizar el ajuste de las cargas (disminuir o aumentar carga) y fallas que el usuario desee. Se pueden visualizar detalles acerca de los ajustes y datos recogidos en cada relé de protección, medidores instalados en los equipos, alarmas disparadas, etc

4.3.1.2 Sistema de generación

En este conjunto de equipos se tiene un generador sincrónico trifásico de 7kVA, 230/240VAC, 1500rpm, fp:0,8. El generador está acoplado a un motor trifásico jaula de ardilla de 7kW, 1500rpm, 400VAC, fp:0,8.

El gabinete tiene inductancias para emular estados transitorios y subtransitorios del generador; también está dotado con transformadores de corriente, transformadores de tensión, AVR (regulador automático de voltaje), analizadores de energía, relés de protección (sobrecorriente, sobrevoltaje, bajo voltaje, diferencial, potencia inversa, direccional, etc.) y un módulo sincronizador automático para el generador.

4.3.1.3 Subestación y Línea de transmisión

La subestación tiene dos transformadores, uno para alimentar el sistema de distribución (transformador de 5kVA) y un transformador (2kVA) para alimentar una carga que representa un cliente industrial. El sistema de líneas de transmisión es modelo pi y tiene resistencias, inductancias y condensadores variables para ajustar las longitudes de las líneas. También cuenta con transformadores de corriente y tensión, relés de protección (sobrecorriente, sobrevoltaje, bajo voltaje, diferencial, potencia inversa, direccional, etc.) y PLC's.

El fabricante no especifica que longitudes de línea se pueden emular con los parámetros RLC variables.

4.3.1.4 Subestación de distribución y cargas

La subestación de distribución tiene un transformador trifásico de 5kVA. La subestación alimenta cargas estáticas compuestas por inductores, capacitores, resistores. También contiene transformadores de tensión y corriente para medida, relés de protección (sobrecorriente, sobrevoltaje, bajo voltaje, diferencial, potencia inversa, direccional, etc.), un PLC y elementos de maniobra (contactores) con accionamiento remoto. La carga dinámica es un motor de inducción conectado a un accionamiento que funciona como freno regenerativo.

En este caso el fabricante no brinda las especificaciones eléctricas de las cargas. Pero teniendo en cuenta la capacidad de generación (5kVA), se puede concluir que la carga debe estar en el orden de los 5kVA.

4.3.2 Planta de energía mecánica y simulador de energía (renovables)

Es una consola que incluye un sistema de control de energía con software SCADA y un paquete de licencias (cada licencia tiene un costo adicional) para el adecuado funcionamiento del sistema.

La función principal de esta consola es el control y la simulación de un modelo matemático que representa la conversión de la energía primaria de las 12 centrales de generación que se pueden incluir en el paquete. Otra función es el intercambio de datos con la consola del emulador de sistemas eléctricos.

La consola puede simular 12 diferentes centrales de generación de energía:

- Convencionales
 - Planta de ciclo combinado
 - Planta de energía nuclear
 - Planta de combustible diesel
 - Planta de combustible fósil: carbón
 - Planta de gas
- Renovables
 - Planta hidroeléctrica
 - Planta de energía eólica
 - Planta de energía fotovoltaica
 - Planta de energía de biomasa
 - Planta de energía de celdas de combustibles
 - Planta de energía geotérmica

El fabricante brinda la opción de obtener cada sistema de generación por separado, mediante 1 licencia que tiene un costo adicional. En total son 12 licencias, 1 por cada sistema de generación.

4.3.3 Sistema de enseñanza EDIBON SCADA-NET

El sistema consiste en módulos controlados de forma remota a través de computadores integrados a la red local. Un equipo administrador (computador del profesor) gestiona el acceso al laboratorio que tienen los computadores de los alumnos, habilitando o deshabilitando el equipo del alumno para que pueda visualizar o controlar uno o varios módulos del laboratorio.

Algunos módulos tienen instalada una cámara para que el alumno pueda visualizar el estado físico del módulo y cómo se presentan los cambios en el mismo, cuando se ejecuta una acción.

4.4 SOLUCIÓN COMERCIAL OFRECIDA POR IMPOINTER, EQUIPOS LABVOLT

Se contactó al proveedor de soluciones didácticas e industriales Impointer SA quien presentó una solución basada en módulos de la marca LabVolt. El proveedor aclaró que la solución planteada por ellos es una aproximación al laboratorio dimensionado en este trabajo, y que dado el caso donde se pacte un acuerdo con ellos, se podría realizar un estudio profundo, con ambas partes involucradas, para obtener un diseño de laboratorio que cubra todas las necesidades que se planteen. También planteó la posibilidad de integrar módulos de diferentes marcas. A continuación se realiza una breve descripción de la solución.

4.4.1 Sistema de generación

4.4.1.1 Generación convencional

Se cuenta con un banco motor/generador trifásico sincrónico que consiste en una máquina de 4 polos de 2 kW funcionando como motor y 1,5kVA funcionando como generador. El banco puede incluir un dinamómetro que cumple la función de primo-motor y emular el par generado por una turbina hidráulica, eólica, etc.

4.4.1.2 Generación renovable eólica/solar

El banco de generación renovable eólica/solar está compuesto por equipos industriales e incluye dispositivos que permite emular condiciones ambientales (flujo de viento y radiación solar) por medio de fuentes de corriente controladas por software. También se puede incluir una turbina eólica y paneles solares.

4.4.2 Transmisión de energía

El banco de las líneas de transmisión tiene parámetros RLC variables para obtener diferentes longitudes de líneas, y cuenta con interruptores que permiten introducir fallas. El cambio de en los parámetros RLC se realizan de forma manual, pero el proveedor aclaró que podrían diseñar un sistema para hacerlo de forma remota a través de la tarjeta de adquisición de datos.

4.4.3 Banco de electrónica de potencia

Con este sistema se podrá realizar las acciones de control usando electrónica de potencia, así mismo se podría usar para desarrollar temáticas de investigación en el tema de transmisión de alta tensión en DC (HVDC).

4.4.4 Interfaz de adquisición de datos

Esta herramienta permitirá comunicar los equipos y realizar todas las mediciones necesarias del sistema. Posteriormente los datos se transmiten a una central maestra donde se pueden visualizar las variables eléctricas y realizar el control de los equipos.

4.4.5 Sistema de protección

Los módulos de relés están equipados con interruptores de falla que permiten la inserción de fallas al sistema para la solución de problemas. Los siguientes tipos de relés de protección están disponibles: baja corriente, sobrecorriente, baja tensión, sobretensión, de sincronismo, baja frecuencia, alta frecuencia, balance fase, secuencia de fase, potencia inversa, y factor de potencia

4.4.6 Software de control

El software ofrece la posibilidad de controlar las entradas y salidas de la interfaz de adquisición y control de datos. El software se puede enlazar con Matlab o LabView para realizar esquemas de control del sistema.

4.5 ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE SOLUCIONES COMERCIALES

Se contactó a los proveedores de las tres soluciones consultadas para recibir una cotización global de los productos que componen cada solución. El proveedor ICL DIDACTICA Ltda, IMPOINTER Y EDIBON respondieron al pedido.

4.5.1 Cotización ICL DIDACTICA

A continuación se muestra una imagen con el resumen económico de la cotización recibida y que corresponde a la solución descrita en el numeral 4.1. La cotización completa (con detalles por etapas) se encuentra en los anexos del medio digital (CD).

Figura 10. Cotización del costo de la solución propuesta en el numeral 4.1

Resumen Económico		
Sección	Descripción	V. Unitario
1.0	Generación	\$ 234,003,173
2.0	Subestación de Transformación para Líneas de Transmisión	\$ 129,591,331
3.0	Líneas de transmisión	\$ 479,692,534
4.0	Subestación de Transformación para distribución	\$ 126,363,392
5.0	Estación de distribución y sincronización	\$ 173,675,075
6.0	Cargas	\$ 26,807,511
7.0	Generación distribuida-Sistema Fotovoltaico	\$ 162,122,757
8.0	Generación distribuida-Sistema Eólico	\$ 186,015,406
9.0	Sistema de control, monitoreo y adquisición de datos	\$ -
Subtotal		\$ 1,518,271,178
IVA 16%		\$ 242,923,389
Total		\$ 1,761,194,567

4.5.2 Cotización EDIBON

A continuación se muestra una imagen con el resumen económico de la cotización recibida y que corresponde a la solución descrita en el numeral 4.3.

Figura 11. Cotización del costo de la solución propuesta en el numeral 4.3

Resumen Económico	
Descripción	Valor
Sistema de energía eléctrica con SCADA (HUB 1)	\$ 755.702.700,00
Sistema de generación (G1)	\$ 647.745.900,00
Transformación (T-G1) para transmisión	\$ 53.983.500,00
Subestación (elementos de maniobra, control y protección)y líneas de transmisión (LTS1)	\$ 809.681.100,00
Subestación de distribución (elementos de maniobra, control y protección) y cargas estáticas (DSL1)	\$ 809.681.100,00
Transformación (T-D1) para distribución	\$ 188.929.500,00
Cargas dinámicas (C-DL)	\$ 80.972.700,00
Subtotal	\$ 3.346.696.500,00
Iva (16%)	\$ 535.471.440,00
Total	\$ 3.882.167.940,00

4.5.3 Cotización Impointer S.A.S

A continuación se muestra una imagen con el resumen económico de la cotización recibida y que corresponde a la solución descrita en el numeral 4.4.

Figura 12. Cotización del costo de la solución propuesta en el numeral 4.4

Resumen económico	
Descripción	Valor
Sistema de entrenamiento electromecánico, maquinas y transformadores ac 2kw	\$ 284.297.016,00
dinamómetro cuatro cuadrantes	\$ 49.112.825,00
Interface de adquisición y control	\$ 18.598.601,00
sdk (software de desarrollo)	\$ 1.806.504,00
Sistema de electrónica de potencia	\$ 91.612.924,00
Sistema de transmisión de energia	\$ 55.228.175,00
Sistema de entrenamiento en rele de proteccion	\$ 191.208.469,00
Sistema de entrenamiento solar/eolica	\$ 66.043.000,00
Subtotal	\$ 757.907.514,00
Iva 16%	\$ 121.265.202,24
Total	\$ 879.172.716,24

4.6 FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS Y AVANZADOS

La implementación del nuevo laboratorio en la Universidad del Valle es factible técnica y económicamente debido a los siguientes factores:

- La Universidad del Valle cuenta con espacios físicos potenciales para la construcción del laboratorio.
- En el mercado se encuentran proveedores que ofrecen los equipos con la tecnología requerida para el laboratorio.
- Se puede ejecutar el proyecto por etapas, lo que indica que no se requiere la totalidad de los recursos económicos para la puesta en marcha de un laboratorio de las dimensiones tratadas en el presente trabajo. Al presentarse esta situación y estudiando las cotizaciones de los proveedores, se observa que la universidad estaría en capacidad de gestionar los recursos económicos suficientes para una ejecución de un proyecto por etapas.
- Una forma de financiación que se plantea es formar alianzas con empresas del sector eléctrico que estén interesadas en invertir en el laboratorio, recibiendo

como beneficio la capacitación de sus profesionales. Cabe anotar que en diálogos con personas vinculadas a estas empresas, se notó gran interés por la propuesta.

- El laboratorio puede prestar servicios de capacitación a profesionales del sector, lo que puede representar un ingreso económico.
- Una opción de minimizar costos es obteniendo módulos de un proveedor que esté dispuesto a reducir utilidades con fines de marketing, es decir, que su marca sea mostrada en los módulos del laboratorio.

En el anexo 5 se muestran cuadros resumen de las soluciones comerciales consultadas. Cabe aclarar que cada proveedor presentó la propuesta basándose en las etapas planteadas en el presente trabajo y no en datos puntuales en donde se especifique capacidad de generación, transmisión, distribución y cargas. Por tanto las propuestas difieren en especificaciones de los equipos, cantidad de equipos y por ende, en el costo total. Esta situación lleva a que la tablas presentadas en el anexo 5 no puedan tomarse como criterio económico para la selección de un proveedor.

5 CONCLUSIONES

- Gracias al estudio realizado a cinco laboratorios enfocados al área de sistemas eléctricos de potencia, se logró conocer e identificar, estructuras (red convencional, micro-red), tipos de tecnologías (emuladores, simuladores, equipos automatizados) y características (potencia, tamaño, etc) de los equipos más importantes que conforman dichos laboratorios, creando así, criterios firmes que ayudaron a especificar las características de las etapas del laboratorio para la Universidad del Valle.
- Con este trabajo se demuestra la factibilidad técnica y económica de implementar un Laboratorio de Sistemas Eléctricos Avanzados en la Universidad del Valle. Por otra parte es necesario hacer un estudio económico que aborde costos relacionados con el mantenimiento, actualización y operación de un laboratorio de esta envergadura.
- El estudio realizado acerca de las redes y micro-redes permitió identificar las características y tendencias que se están implementando a nivel mundial en las redes eléctricas y permitió plantear las necesidades de infraestructura requerida para la preparación del recurso humano en tecnologías de generación distribuida, energías renovables, redes en isla, esquemas de protecciones adaptativas, etc. Este tipo de laboratorios que emulan sistemas y no partes aisladas es una infraestructura necesaria para responder a los cambios de paradigmas de la educación y las necesidades del sector.
- Se logró dimensionar un laboratorio con características de vanguardia que pueda emular los fenómenos que se presentan en un sistema de potencia convencional y los fenómenos que pueden ocurrir en micro-redes con un esquema generación distribuida renovable.
- Se planteó un laboratorio reconfigurable, donde los módulos se puedan interconectar de diferentes maneras, con el objetivo de poder realizar modificación de la topología del laboratorio o ampliar en un futuro alguna de sus etapas.
- Con la propuesta de estructura del laboratorio planteada en el capítulo cuatro y con la consulta y análisis de las soluciones ofrecidas por los proveedores, se logró establecer una aproximación del espacio requerido para la ubicación de

los módulos que componen cada una de las etapas del laboratorio, así como también se logró proponer una distribución y disposición de dichos módulos en un espacio de aproximadamente 130m².

- Con la cotización enviada por los proveedores se estimaron los recursos económicos necesarios para la adquisición de los módulos que componen el laboratorio. Las cotizaciones solo incluyen el costo de los módulos y no el costo de adecuación de las instalaciones (obra civil y eléctrica) requeridas para la ubicación y puesta en funcionamiento del laboratorio.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Salehi, V., Mohamed, A., Mazloomzadeh, A., & Mohammed, O. (2012). *Laboratory-Based Smart Power System, Part I: Design and System Development*, 3(3), 1394–1404.

Salehi, V., Mohamed, A., Mazloomzadeh, A., & Mohammed, O. A. (2012). *Laboratory-Based Smart Power System , Part II: Control, Monitoring and Protection*, 3(3), 1405–1417.

Miu, K., Nwankpa, C., Yang, X., & Madonna, A. (2001). *Hardware Design and Layout of a Reconfigurable Power Distribution Automation and Control Laboratory (RDAC)*, 1-9.

Xiaoguang Y., Bruni C., Cheung D., Mao Y., & Sokol G, (2001). *Setup of RDAC - A Reconfigurable Distribution Automation and Control Laboratory*, 3(4), 1524–1529.

Xiaoguang Y., Bruni C., Cheung D., Mao Y., & Sokol G, (2001). *Power Transmission and Distribution System Laboratories at Drexel University*, 2(1), 1198–1205.

Hardt, C. (2005). *Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids*. 1-73.

Adedokun, G., & Eng, R. (2010). *Development of Electrical Power System Simulator*, 11(1), 114–119.

Deese, A. S. (2013). *Development of Smart Electric Power System (SEPS) Laboratory at The College of New Jersey*, 1-5.

IEEE, C. (2009). *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, 1-219.

Mukhopadhyay, S., & Singh, B. (2009). *Distributed Generation - Basic Policy , Perspective Planning , and Achievement so far in india*, 1-7.

Paska, J. (2007). *Distributed Generation and Renewable Energy Sources in Poland*, 1-6.

David, A., & Trebolle, T. (2006). *La Generación distribuida en España*. universidad pontificia icai icade comillas Madrid, 1-163.

Botero, S., & Betancur, L. (2009). *Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia*, Universidad de los Andes, 90–98.

Puttgen, H. (2003). *Distributed Generation Semantic Hype or the Dawn of a New Era*, 1 (1), 22-29.

Rodriguez, A. (2009). *La Generación Distribuida y su Posible Integración al Sistema Interconectado Nacional*, Comisión de Regulación de Energía y Gas, 1-77.

Malmquist, A., Aglén, O., Keller, E., Suter, M., & Wickström, J. (2000). *Microturbinas : hacia la generación distribuida de energía y calor*, 22–30.

Torres, H., Buitrago, L., & Parra, E. (2007). *A Status Report on Colombian Distributed Generation*, 1–5.

Duque, C., & Marmolejo, E. (2004). *Análisis De Prospectiva De La Generación Distribuida (Gd) En El Sector Eléctrico Colombiano*, 81–88.

Groot, R., Morren, J., & Slootweg, J. (2012). *Smart Integration of Distribution Automation Applications*, 1–7.

Villa, D., Martín, C., Villanueva, F., Moya, F., & López, J. (2011). *A Dynamically Reconfigurable Architecture for Smart Grids*, 57(2), 411–419.

Haughton, D., & Heydt, G. (2010). *Smart Distribution System Design: Automatic Reconfiguration for Improved Reliability*, 1-8.

Wu, F., Baran, M. (1989). *Network Reconfiguration In Distribution Systems For Loss Reduction And Load Balancing*, 4(2), 1401–1407.

Gupta, P., Bhatia, R. S., & Jain, D. K. (2013). *Adaptive Protection Schemes for the Microgrid in a Smart Grid Scenario : Technical Challenges*, 1–5.

Geidl, M. (2005). *Protection of Power Systems with Distributed Generation : State of the Art*, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, 2005.

Ustun, T. S., Ozansoy, C., & Zayegh, A. (2011). *A Microgrid Protection System with Central Protection Unit and Extensive Communication*, 1-4.

Dewadasa, M., Ghosh, A., & Ledwich, G., (2011). *Protection of Microgrids Using Differential Relays*, 1–6.

Gao, H., Pang, Q., & An, Y. (2012). *New Type of Protection and Control Method for Smart Distribution Grid*, 1-5.

Che, L., Khodayar, M., & Shahidehpour, M. (2014). Adaptive Protection System for Microgrids: Protection Practices of a functional microgrid system, 2(1) 66–80.

Momoh, J. A. (2009). *Smart Grid Design for Efficient and Flexible Power Networks Operation and Control*, 1-8.

Gao, C., & Redfem, M. (2011). *A Review of Voltage Control in Smart Grid and Smart Metering Technologies on Distribution Networks*, 1-5.

Ordinas, J., & Peig E. (2008). *Estructura de redes de computadores*, 1-354.

Zheng, J., Gao, D., & Lin, L. (2013). *Smart Meters in Smart Grid: An Overview*, 57–64.

Kurose, F., & Ross, K. (2007). *Redes de Computadoras*, Edición 5, 1-42.

Dan, L., & Bo, H. (2012). *Advanced Metering Standard Infrastructure For Smart Grid*, 1–4.

Huibin, S., Lee, W. (2011). *An AMI Based Measurement and Control System in Smart Distribution Grid*, 1-5.

Shekara, S., Reddy, S., Wang, L., Devabhaktuni, V., & Gudi, N. (2011). Smart Meters for Power Grid – Challenges , Issues , Advantages and Status, 1–7.

Buettrich, S., Escudero, A. (2007). *Topología e Infraestructura Básica de Redes Inalámbricas*, 1-22.

Lon Users. (2009). *Introducción a la tecnología LonWorks*, 1-9.

Gers, J.M. (2013). *Distribution System Analysis and Automation*, Power and Energy Series 68, 1-329.

Mirsaeidi S., Said, D., Mustafa, W. (2014). *Progress and problems in micro-grid protection schemes*, 37(1), 834-839.

Gil Alejandro, C. (2014). *Diseño Conceptual y Especificaciones de un Laboratorio de Sistemas Eléctricos Avanzados para la Universidad del Valle* (Tesis de pregrado). Universidad del Valle, Santiago de Cali.

Kliux (2015), *Aerogenerador de Eje Vertical Kliux Zebra*, Recuperado de <http://www.kliux.com/productos/aerogenerador-de-eje-vertical/>

Direct Industry (2015), *Aerogeneradores de Eje Vertica*, Recuperado de <http://www.directindustry.es/prod/poduhvat-160476.html>

Enercon (2015), *Aerogeneradores Enercon*, Recuperado de [http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON Produkt es_web_032014.pdf](http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON_Produkt_es_web_032014.pdf)

CREG (1998). *Resolución Número 070 del 28 de Mayo de 1998*, 1-63.

Codensa, Isagen (2013), *Regulación sector eléctrico*, Recuperado de <https://sites.google.com/site/regulacionsectorelectrico/colombia>

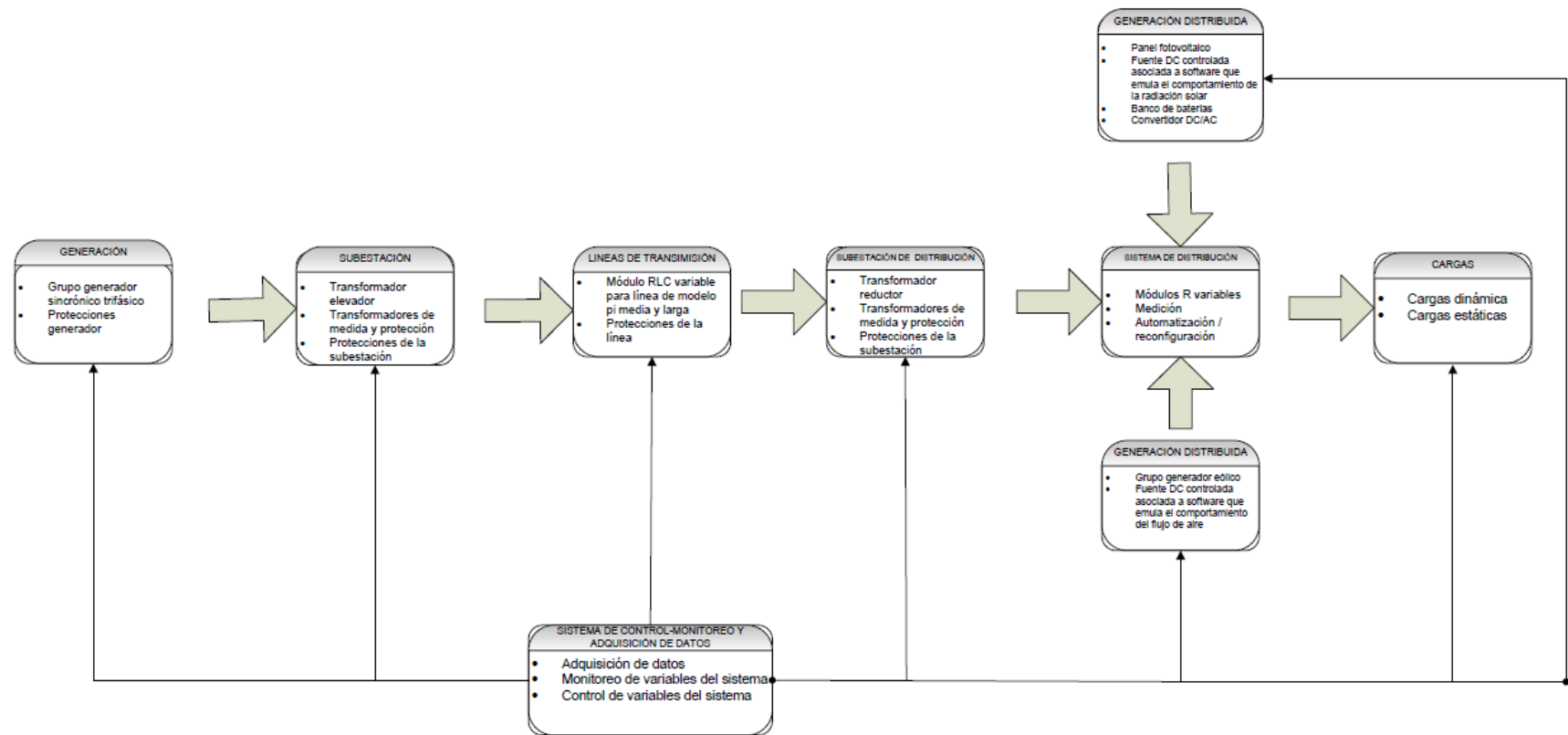
UPME (2014), *Ley N° 1715 del 13 de Mayo de 2014*, Recuperado de http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf

ANEXOS

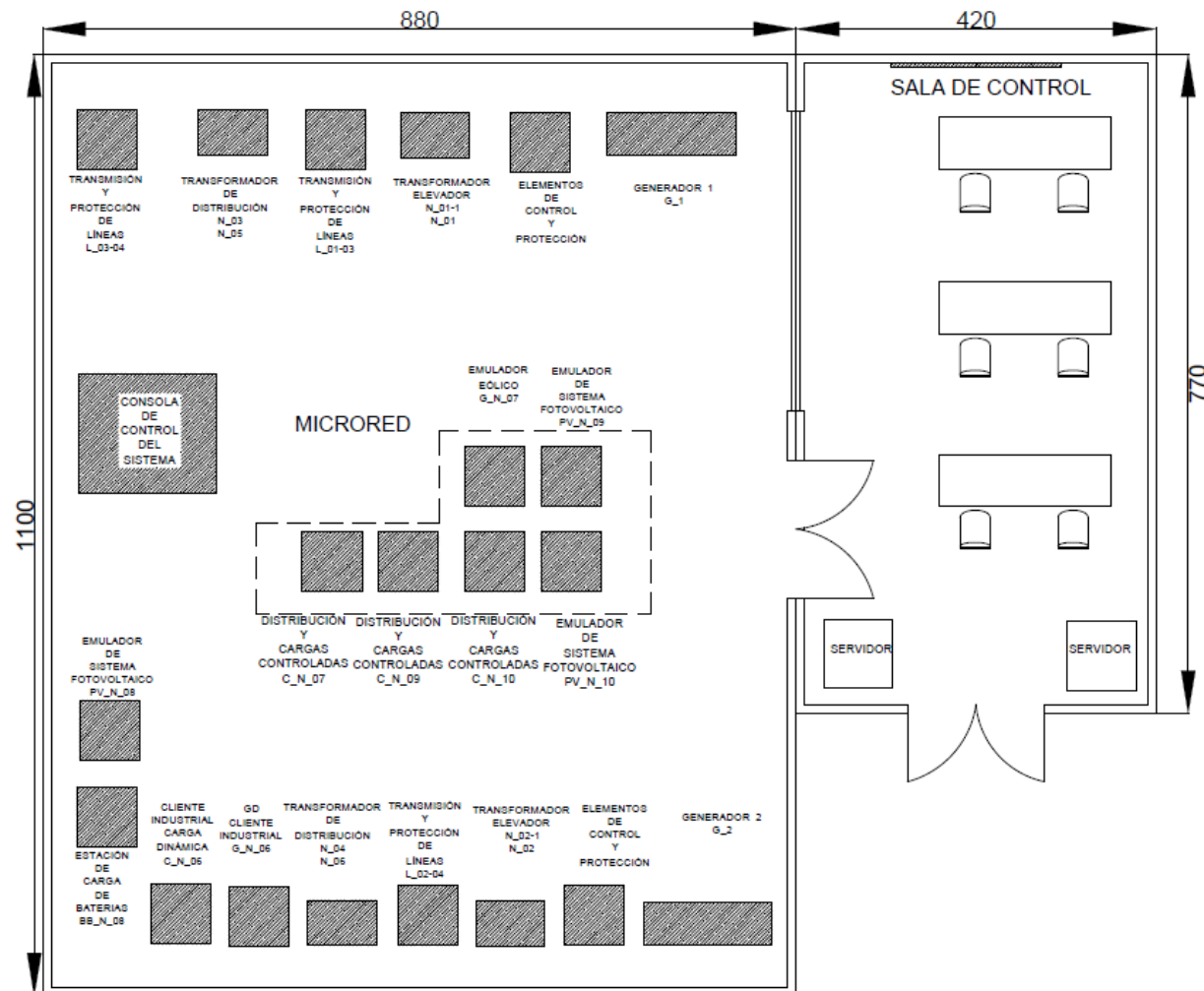
ANEXO 1: LISTA DE LABORATORIOS CONSULTADOS

	Universidad / Centro de Estudio
1	National Technical University of Athens
2	Universidad de New Jersey
3	Florida International University
4	Osun State College of Technology
5	Buffalo state college and University at Buffalo
6	Victoria University
7	Sultan Qaboos University
8	Technical University of Denmark
9	Georgia state university
10	British Columbia Institute of Technology
11	Blekinge Institute of Technology
12	Durham University
13	Georgia Institute of Technology
14	Drexel University
15	Tennessee Tech University
16	University Kassel DEMOTEC
17	University of Chile
18	Osaka University

ANEXO 2: DIAGRAMA CONCEPTUAL DE LA ESTRUCTURA DEL LABORATORIO



ANEXO 3: DISTRIBUCIÓN Y UBICACIÓN FÍSICA DE LOS MÓDULOS QUE COMPONEN EL LABORATORIO



ANEXO 4: CUADRO COMPARATIVO DE LABORATORIOS CONSULTADOS

LABORATORIO	GENERACIÓN	TRANSMISIÓN	DISTRIBUCIÓN	CARGAS	GESTION CONTROL Y MONITOREO
Laboratorio de Sistemas de Energía de la Universidad Internacional de la Florida	4 generadores síncronos (3 de 13,8kVA, 1 de 10,4kVA). Todos con control de tensión y frecuencia	Líneas de transmisión con parámetros RLC variables para emular diferentes distancias de las líneas. Modelo pi de línea	Lineas de distribución en AC y líneas de distribución en DC	Cargas estáticas de 3kVA con varios niveles de conmutación, controladas para definir varios patrones de carga.	Los equipos cuentan con tarjetas de adquisición de datos que dirige los datos a una estación de control. El software utilizado para control y visualización es LabView
	1 fuente de DC de 3kW como emulador fotovoltaico. Con control de condiciones climáticas				
	1 fuente de DC de 3kW como emulador de celda de combustible. Con control de tensión corriente			Motores de inducción de 250VA como cargas dinámicas	Para el sistema de protección se utiliza un relé digital virtual que simula gran variedad de funciones del relé

CONTINUACIÓN ANEXO 4

LABORATORIO	GENERACIÓN	TRANSMISIÓN	DISTRIBUCIÓN	CARGAS	GESTION CONTROL Y MONITOREO
Laboratorio de Sistemas Distribución y de Sistemas de transmisión de Energía	2 Generadores síncronos con control de frecuencia y tensión	Líneas de transmisión con parámetros RLC variables para emular diferentes longitudes de la línea. Cuenta con elementos para provocar fallas a diferentes distancias	Módulos reconfigurables con elementos de maniobra(interruptores y seccionadores)para obtener diferentes topologías en la red de distribución	Motor de inducción como carga dinámica controlada. También se puede conectar como carga el laboratorio de distribución	Cuenta con dos tarjetas de adquisición de datos y cuatro estaciones de control y visualización de datos. En el software se puede obtener diferentes perfiles de generación y carga

CONTINUACIÓN ANEXO 4

LABORATORIO	GENERACIÓN	TRANSMISIÓN	DISTRIBUCIÓN	CARGAS	GESTION CONTROL MONITOREO Y
Centro de Diseño para Sistemas Modulares DEMOTEC	1 Grupo motor generador diesel de 32kVA, 1 motor generador diesel de 20kVA	Líneas de transmisión con parámetros RLC variables para emular diferentes longitudes de línea.	Líneas de distribución con elementos de maniobra para reconfiguración de la topología	Banco de cargas RLC variables con distintos niveles de conmutación y motores de inducción que actúan como cargas dinámicas	Los equipos cuentan con tarjetas de adquisición de datos que envían los datos a una central con software para control y visualización de las variables eléctricas
	1 estación de cogeneración de 5,5kW				
	1 grupo motor generador eléctrico síncrono 80kVA				
	1 fuente de DC controlada como emulador fotovoltaico con banco de baterías de 30kW				
	1 motor de DC controlado como emulador eólico de 5kW				

CONTINUACIÓN ANEXO 4

LABORATORIO	GENERACIÓN	TRANSMISIÓN	DISTRIBUCIÓN	CARGAS	GESTION CONTROL Y MONITOREO
Laboratorio de Sistemas de Energía Eléctrica Osun State of Technology	2 Generadores síncronos de 6kVA con control de tensión y frecuencia	Modelo de línea pi con parámetros RLC variables para emular diferentes longitudes de línea	Líneas de distribución con elementos de maniobra para cambiar topología de la red y con elementos para provocar fallas en el sistema de distribución	Cargas estáticas RLC variables y un motor de inducción como carga dinámica	Los equipos cuentan con tarjetas de adquisición de datos. Los datos son enviados a un computador dotado de un software industrial para control y visualización de las variables del sistema

CONTINUACIÓN ANEXO 4

LABORATORIO	GENERACIÓN	TRANSMISIÓN	DISTRIBUCIÓN	CARGAS	GESTION CONTROL Y MONITOREO
Laboratorio de la Universidad de New Jersey	2 grupos motor generador síncronos de 110VA	Línea de transmisión con parámetros RLC variables, con modelo de línea π y elementos de maniobra que permiten introducir a diferentes longitudes de la línea	Los módulos de distribución se pueden conectar de diferentes formas para obtener diferentes topologías de la red de distribución	Módulos resistivos de 80W y reactivos de 84 VAR con diferentes niveles de conmutación. Motores de inducción como cargas dinámicas	Los módulos tienen tarjetas de adquisición de datos para comunicarse con la estación central para el control y visualización de las variables del sistema
	Fuente de corriente controlada de DC con software que reproduce el comportamiento del viento				

ANEXO 5: CUADRO RESÚMEN SOLUCIONES COMERCIALES

PROVEEDOR	GENERACIÓN	TRANSMISIÓN	DISTRIBUCIÓN	CARGAS	GESTION CONTROL Y MONITOREO
ICL Didactica LTDA, Leybold, Amatro	Módulo motor-generador síncrono 1kVA	Líneas de transmisión de modelo pi con parámetros RLC variables con elementos de conexión y desconexión	Módulo de distribución con elementos de conexión y desconexión para variar topología de la red	Cargas estáticas RLC de 1kVA con diferentes niveles de conmutación y un motor de inducción controlado como carga dinámica	Módulos del sistema monitoreados por analizadores de red que envían información a un computador. La interfaz se apoya en LabView y Matlab
	Fuente DC controlada como emulador fotovoltaico de 195W				
	Máquina de inducción controlada como emulador eólico de 2kVA o aerogenerador de 2kVA				

CONTINUACIÓN ANEXO 5

PROVEEDOR	GENERACIÓN	TRANSMISIÓN	DISTRIBUCIÓN	CARGAS	GESTION CONTROL Y MONITOREO
Lucas Nülle	Grupo motor generador síncrono de 1kVA con control de tensión y frecuencia	Líneas de transmisión de modelo pi y con parámetros RLC variables para distancias entre 150 y 300km. Elementos para provocar fallas a diferentes longitudes	Sistema de barras colectoras con elementos de conexión y desconexión para cambiar la topología del sistema de distribución	Módulos RLC de 1kVA con diferentes niveles de conmutación y motor asíncrono acoplado a generador para emular cargas dinámicas.	Se utilizan dos tipos de software, el SCADA VIEWER para control y visualización de las variables y el Interactive Lab Assistant para guiar los experimentos que se pueden realizar con los módulos
	Fuente de DC 40VA controlada con ajuste de parámetros de intensidad de radiación solar a través de software				
	Grupo motor generador de inducción de 1kVA controlado para emular turbina de viento y simular diferentes condiciones de viento con software				

CONTINUACIÓN ANEXO 5

PROVEEDOR	GENERACIÓN	TRANSMISIÓN	DISTRIBUCIÓN	CARGAS	GESTION CONTROL Y MONITOREO
EDIBON	Grupo motor-generator síncrono de 7kVA con sistema de control de tensión y frecuencia	Líneas de transmisión de modelo pi con parámetros RLC variables para diferentes longitudes y elementos de conexión y desconexión para introducir fallas	Módulo con elementos de maniobra para cambiar topología del sistema de distribución	Cargas RLC variables con diferentes niveles de conmutación y motor de inducción acoplado a generador como carga dinámica	Todos los módulos y equipos se pueden monitorear y controlar de forma remota a través de tarjetas de adquisición de datos y el software EDIBON SCADA NET
	Consola simuladora de plantas fotovoltaicas, eólicas, nucleares, de ciclo combinado, gas, diesel, biomasa				