



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diseño de un Sistema de Respuesta Activa de la Demanda Experimental a Partir de Generación Solar Fotovoltaica y Control de Demanda Eléctrica

Design of an Experimental Demand Active Response System from Photovoltaic Solar Generation and Electric Demand

Juan Camilo Peña Noreña

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación Manizales, Colombia

2019

Diseño de un Sistema de Respuesta Activa de la Demanda Experimental a Partir de Generación Solar Fotovoltaica y Control de Demanda Eléctrica

Design of an Experimental Demand Active Response System from Photovoltaic Solar Generation and Electric Demand

Juan Camilo Peña Noreña

Trabajo de final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Ingeniería Eléctrica

Directora:

PhD. Sandra Ximena Carvajal Quintero

Línea de Investigación:

Educación en Ingeniería

Grupo de Investigación:

Environmental Energy and Education Policy

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y

Computación Manizales, Colombia

2019

Dedicatoria

A Dios y mis padres, creadores de todo mi ser.

Agradecimientos

A la universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, especialmente a la Dirección de Investigación y Extensión de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, por el apoyo para la ejecución de este trabajo, a través de la financiación del proyecto “Implementación y puesta en marcha de un sistema de generación solar fotovoltaica y gestión inteligente de demanda” Código HERMES 39053.

Desde el fondo de mi corazón agradezco a la profesora Sandra Ximena Carvajal Quintero por la oportunidad brindada, el apoyo constante y la motivación que en todo este proceso académico me brindó.

Gratitud eterna a mis padres Roberto Peña Rivera, Alba Ligia Noreña Muñoz y Blanca Nubia Noreña Muños, por apoyarme siempre y en toda circunstancia, para ellos todo mi trabajo.

Gracias a mi compañera en gran parte de esta aventura, Valentina Ospina Arcila, quien me impulsó todos los días a culminar este proyecto e iniciar otros.

A todos, Dios les pague.

Resumen

Las redes inteligentes, se consideran sistemas de energía eléctrica que pueden suministrar el servicio de electricidad de forma confiable, eficiente y gestionada desde los centros de control de los operadores de red hasta los usuarios activos del sistema. La respuesta activa de la demanda, integra y mejora la capacidad de los clientes para adaptarse a las condiciones de la red eléctrica, ofreciendo beneficios como la flexibilidad en la operación y expansión del sistema eléctrico de potencia. Este tema, cobra mayor importancia en la academia debido a los significativos avances en las tecnologías de la comunicación y la información, los sistemas de control y la generación de energía renovable solar fotovoltaica; temas que involucran un importante componente técnico, por lo tanto, se hace necesario que su estudio contenga actividades académicas de tipo práctico. En este documento, se propone el diseño de un sistema experimental de respuesta activa de la demanda a partir de generación solar fotovoltaica y control de cargas, para prácticas académicas, con su respectivo manual de usuario y guías de laboratorio para temas como: comunicación por la línea activa de potencia (PLC) y sistemas de respuesta activa de la demanda.

Palabras clave:

Comunicación por la línea activa de potencia, Energía solar fotovoltaica, Redes inteligentes, Respuesta Activa de la Demanda, Sistemas de Control de cargas.

Abstract

Design of an Experimental Demand Active Response System from Photovoltaic Solar Generation and Electric Demand

Smart grids are considered electric power systems that can provide the electricity service in a reliable, efficient and managed, way from the control centers of the network operators to the active users of the system. The active response of the demand, integrates and improves the ability of customers to adapt to the conditions of the power grid, offering benefits such as flexibility in the operation and expansion of the power electrical system. This theme becomes more important in the academy due to the significant advances in communication and information technologies, control systems and photovoltaic solar renewable energy generation; topics that involve an important technical component, therefore, it is necessary that your study contains practical academic activities. In this document, is propose the design of an experimental system of active response to demand, integrating photovoltaic solar generation and loads control, for academic practices, with its respective user manual and laboratory guides for topics such as: communication through the active power line (PLC) and active demand response systems.

Keywords:

Power Line Communication, Photovoltaic Solar Energy, Smart Grids, Active Demand Response, Load Control Systems.

Contenido

Lista de figuras.....	13
Lista de tablas	16
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	17
1. Introducción	19
1.1 Motivación	20
1.2 Objetivos	22
1.2.1 Objetivo General.....	22
1.2.2 Objetivos Específicos.....	22
1.3 Alcances, limitaciones y metodología	23
1.4 Estructura del documento.....	26
2. Respuesta activa de la demanda.....	27
2.1 La demanda activa	28
2.2 Los sistemas de respuesta activa de la demanda	30
2.2.1 Programas de respuesta activa de la demanda	31
2.2.2 Tecnologías que permiten la respuesta activa de la demanda.....	32
3. Caso de estudio y referencia de caso.....	35
3.1 Referencia de caso	36
3.2 Caso de estudio	41
4. Diseño del sistema experimental de respuesta activa de la demanda.....	43
4.1 Propuesta de diseño	44
4.1.1 Estrategias de control para el sistema experimental de respuesta a la demanda	52
4.1.2 Caracterización del sistema de comunicación PLC.....	58
4.1.3 Caracterización del sistema de generación solar fotovoltaico	63
4.1.4 Caracterización de las cargas controladas por el sistema experimental de respuesta activa de la demanda	69
4.1.5 Caracterización de los actuadores de control del sistema experimental	69
4.2 Análisis de implementación	71
4.2.1 Análisis técnico de implementación	71
4.2.2 Análisis económico de implementación	74
5. Conclusiones y trabajos futuros	82
5.1 Conclusiones.....	82
5.2 Trabajos futuros	83
5.3 Difusión académica	84
Anexos	85
Anexo A: Guía para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda eléctrica	85

Anexo B: Guía práctica de laboratorio, control automático de frecuencia con respuesta activa de la demanda	94
Anexo C: Guía práctica de laboratorio, control de demanda para el desplazamiento de picos de consumo	97
Anexo D: Guía de operación del sistema de comunicación PLC con kits TMDSPCKITV4-CEN.....	101
Anexo E: Guía práctica de laboratorio de comunicación por la línea de potencia (Power Line Communication PLC).....	106
Anexo F: Requisitos mínimos de software para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda	110
Bibliografía	113

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Diseño experimental del sistema de respuesta a la demanda propuesto. Fuente: Elaboración Propia.	23
Figura 1-2. Esquema de conexión de módulos PLC con nodo base y nodos de servicio. Fuente: Elaboración Propia.	24
Figura 2-1. Esquema de sistemas eléctricos con participación activa de la demanda. Fuente: Elaboración propia.....	28
Figura 2-2. Esquema de sistemas de respuesta activa de la demanda. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura3-1. Curva característica de la demanda del sistema eléctrico caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 4-1. Visualización del sistema de respuesta activa de la demanda y conexión de generación solar fotovoltaica diseñado. Fuente. Elaboración propia.	44
Figura 4-2. Esquema de diseño del sistema experimenta de respuesta activa de la demanda. Fuente. Elaboración propia.	45
Figura 4-3. Plano general de conexiones del sistema experimental. Fuente. Elaboración propia.	47
Figura 4-4. Conexión del sistema de generación solar fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 4-5. Plano de conexión del concentrador de datos PLC. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 4-6. Plano de conexión del microcontrolador Arduino a los relés actuadores y la interfaz. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 4-7. Plano de conexión de cargas y módulos TDMSPLCKITV4-CEN PLC. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura4-8. Render 3D de la mesa de trabajo del sistema de respuesta activa de la demanda. Fuente. Elaboración propia.....	52
Figura 4-9. Flujograma de la estrategia para el programa de limitación automática de cargas para el control de la frecuencia. Fuente. Elaboración Propia.	53
Figura 4-10. Interfaz gráfica de limitación automática de cargas para el control de baja frecuencia. Fuente. Elaboración Propia.	54
Figura 4-11. Interfaz gráfica control de frecuencia. Fuente. Elaboración Propia.	55
Figura 4-12. Flujograma de la estrategia para el desplazamiento de picos de consumo para el aplanamiento de la curva de demanda y la integración de generación distribuida. Fuente. Elaboración Propia.	56
Figura 4-13. Gráfica principal de la interfaz del operador del programa para el desplazamiento de picos de consumo en LabVIEW®. Fuente. Elaboración Propia.....	57
Figura 4-14. Registro del sistema de generación solar fotovoltaico de la interfaz del operador del programa control en LabVIEW®. Fuente. Elaboración Propia.	57

Figura 4-15. Matriz FODA de la comunicación por la línea activa de potencial PLC. Fuente: Elaboración Propia.....	60
Figura 4-16. Kit de comunicación PLC. Fuente: Texas Instruments.	61
Figura 4-17. Módulo SOM. Fuente: Texas Instruments.	62
Figura 4-18. Tarjeta de conexión. Fuente: Texas Instruments.....	62
Figura 4-19. Mapa de radiación solar promedio día para Caldas (a la derecha inferior). Fuente: Atlas interactivo IDEAM.	64
Figura 4-20. Promedio mensual de radiación solar en Manizales. Fuente: IDEAM.	64
Figura 4-21. Curva de radiación solar promedio día. Fuente: Elaboración propia, basada en datos meteorológicos del IDEAM.	65
Figura 4-22. Curva de generación solar promedio día. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 4-23. Generación del sistema solar fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia.....	67
Figura 4-24. Grafica comparativa entre la curva de radiación solar y generación PV. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 4-25. Grafica comparativa entre la generación de energía solar fotovoltaica día promedio para cada mes y el promedio mensual de radiación solar en Manizales. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 4-26. Conexión del microcontrolador Arduino. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 4-27. Planta arquitectónica del laboratorio de gestión de la energía. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 4-28. Ubicación del Módulo experimental en el laboratorio de gestión de la energía. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 4-29. Ubicación del Módulo experimental en el laboratorio de gestión de la energía. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura 4-30. Ubicación del Módulo experimental en el laboratorio de gestión de la energía. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura A-1. Componentes del sistema experimental de respuesta a la demanda. Fuente: Elaboración propia.	86
Figura A-2. Posición inicial de las protecciones del sistema. Fuente: Elaboración propia.	87
Figura A-3. Conexión Arduino para la operación del sistema de respuesta activa de la demanda. Fuente: Elaboración propia.	88
Figura A-4. Posición de las protecciones del sistema después de la revisión de la correcta conexión de los componentes. Fuente: Elaboración propia.	88
Figura A-5. Diagrama de bloques de LabVIEW®. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura A-6. Interfaz de control automático de frecuencia.	90
Figura A-7. Grafica principal y botones de la interfaz para el desplazamiento de picos de consumo. Fuente: Elaboración propia.....	92
Figura A-8. Gráficas y botones de control del sistema de generación solar fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.	92
Figura C-1 Pagina web de demanda en tiempo real. Fuente: XM.	99
Figura D-1 Kit de comunicación TMDSPCKITV4. Fuente: Texas Instruments.....	102
Figura D-2. Módem PLC. Fuente: Texas Instruments.	102

Figura D-3. SW1/SW2. Fuente: Elaboración propia.....	103
Figura D-4. Módulo SOM. Fuente: Texas Instruments.....	103
Figura D-5. Icono Zero Configuration GUI. Fuente: Texas Instruments.	104
Figura D-6. Zero Configuration GUI. Fuente: Texas Instruments.....	105
Figura F-1. Página de descarga LabVIEW®. Fuente: National Instruments.....	111
Figura F-2. Página de descarga Arduino. Fuente: www.arduino.cc	112

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1. Resumen de las expectativas de los operadores de los sistemas de transmisión y distribución con respecto a la participación activa de la demanda. Fuente: ADDRESS	37
Tabla 3-2. Resumen de condiciones para la prestación del servicio de control de frecuencia. Fuente: ADDRESS	38
Tabla 3-3. Relación de servicios de demanda activa y expectativas de los operadores de las redes de distribución y transmisión. Fuente: ADDRESS	40
Tabla 3-4. Umbrales de frecuencia para la desconexión automática. Fuente: XM	41
Tabla 4-1. Comparación entre tecnología PLC de banda ancha y PLC de banda angosta. Fuente: Texas Instruments.....	59
Tabla 4-2. Valores típicos de pérdidas en dB/km. Fuente: Texas Instruments.	59
Tabla 4-3. Bandas de comunicación compatibles con los módems PLC TMDSPCKIT-V4. Fuente: Texas Instruments.....	61
Tabla 4-4 Promedio horario de radiación solar Manizales. Fuente: IDEAM.....	65
Tabla 4-5. Características de los equipos de inversión. Fuente: Elaboración propia.	66
Tabla 4-6 Presupuesto de costo global de la propuesta.....	76
Tabla 4-7. Costos de talento humano para la operación del módulo de laboratorio.	77
Tabla 4-8. Costos de tramites de solicitud de patente.	77
Tabla 4-9. Costos equipos de comunicación.....	78
Tabla 4-10. Costos equipos de generación solar fotovoltaica.....	77
Tabla 4-11. Costo de materiales para la estructura del módulo.....	78
Tabla 4-12. Costos equipos de control.....	79
Tabla 4-13. Costos de materiales para las cargas de iluminación.....	78
Tabla 4-14. Costos de materiales para las cargas inductivas.....	79
Tabla 4-15. Costo computador.....	80
Tabla 4-16. Resumen de la cuantificación de beneficios sociales.....	80
Tabla B-1. Tabla de toma de resultados de ensayos de control de cargas para el control de la frecuencia. Fuente: Elaboración propia.	96
Tabla E-1. Tabla de toma de resultados de datos enviados por la red eléctrica sin presencia de carga. Fuente: Elaboración propia.	107
Tabla E-2. Tabla de toma de resultados de datos enviados por la red eléctrica con presencia de cargas resistivas. Fuente: Elaboración propia.....	108
Tabla E-3. Tabla de toma de resultados de datos enviados por la red eléctrica con presencia de cargas inductivas. Fuente: Elaboración propia.....	108
Tabla F-1. Especificaciones de software requeridas. Fuente: Elaboración Propia.....	110

Lista de Símbolos y abreviaturas

ADDRES	Active Distribution networks with full integration of Demand and distributed energy RESourceS
B/C	Relación costo beneficio
CEER	Consejo de Reguladores de Energía de Europa.
DALI	Digital Addressable Lighting
DER	Recursos Energéticos Distribuidos.
E3P	Environmental energy and education policy
EPRI	Electric Power Research Institute.
ETP SG	Smart Grid European Technology Platform.
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
kWh	Kilovatio hora.
NTC	Norma Técnica Colombiana.
OFGEM	Oficina de Mercados de Gas y Electricidad de Reino Unido.
OR	Operador de red.
PLC	Power Line Communication.
RD	Respuesta de la demanda.
RETIE	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.
RI	Red inteligente.
TIC	Tecnologías de la información y la comunicación.
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética.
W	Vatios.
Wp	Vatios pico.

1. Introducción

El primer capítulo del documento “Diseño de un sistema de respuesta activa de la demanda experimental a partir de generación solar fotovoltaica y control de demanda eléctrica” presenta la motivación que lleva al desarrollo de este trabajo de grado, sus principales objetivos, alcances, limitaciones, metodología utilizada y una visión general de la estructura del documento.

1.1 Motivación

Los sistemas de energía eléctrica enfrentan un gran desafío en todo el mundo, satisfacer de manera sostenible y eficiente una carga eléctrica creciente, con picos altos de consumo que se producen durante pequeños lapsos de tiempo y que además se enfrenta a crecientes niveles de penetración de generación de energía renovable intermitente. (Siano, 2014). Suministrar energía eléctrica a gran escala en estas circunstancias puede resultar costoso, se requieren de grandes inversiones económicas en sistemas de generación, infraestructura de transmisión y distribución, capaces de proporcionar el respaldo necesario para garantizar la seguridad del suministro; en este contexto, mejorar la flexibilidad del sistema eléctrico es vital para garantizar un funcionamiento confiable y seguro. Autoridades y reguladores europeos de los sistemas de energía eléctrica como el CEER, valoran cada vez más la flexibilidad de la carga, también conocida como respuesta de la demanda (RD), como una solución clave y rentable para este desafío(CEER, 2018).

El interés por gestionar la demanda de energía en los sistemas eléctricos, surgió en los inicios de la industria de la energía eléctrica en los Estados Unidos, en torno a la posibilidad de aplicar tarifas diferenciadas según la hora del día, como se describe en el artículo “Demand Response in U.S. Electric Markets”(Cappers, Goldman, & Kathan, 2010), lo que conllevó al desarrollo del concepto de respuesta de la demanda. A comienzos de la década de 1970, en los Estados Unidos el interés por este tema cobró mayor importancia, a medida que los servicios públicos comenzaron a implementar los programas de gestión de consumo y se llevaron a cabo diversos experimentos de precios (Faruqui & Malko, 1983). Sin embargo, fue la crisis energética de California en los años 2000 y 2001 lo que incentivó la implementación de mecanismos de respuesta de la demanda en los mercados de energía eléctrica, no solo en los Estados Unidos, sino también en todo el mundo (Faruqui & Sergici, 2010; Lin, 2018).

La respuesta activa de la demanda se refiere en general a la capacidad de la demanda para ser flexible, receptiva y adaptable a las señales económicas del mercado (Eid, Koliou, Valles, Reneses, & Hakvoort, 2016), una definición comúnmente aceptada de RD en los sistemas de electricidad es la capacidad que pueden tener los consumidores finales para modificar el uso de la electricidad con respecto a sus hábitos normales en respuesta a los incentivos que varían con el tiempo u otras señales económicas y regulatorias, incluidas las solicitudes de desconexión a cambio de incentivos (Siano, 2014), las respuestas de la demanda a estas señales activa su participación en el sistema. Cuando se implementan programas de gestión de la energía desde el lado de la demanda se tienen dos conceptos, los esquemas implícitos y los mecanismos explícitos:

Los esquemas implícitos o basados en el precio incentivan a los usuarios para que cambien su consumo, a través de estrategias como el cambio de precio de la electricidad en diferentes horas del día, con lo que se espera trasladar el consumo de la electricidad a diferentes períodos de tiempo, por lo que los consumidores finales que respondan

voluntariamente a esta señal del mercado pueden beneficiarse de un servicio de energía eléctrica más económico (Valencia López, 2016).

Los mecanismos explícitos permiten a los consumidores recibir una recompensa específica a cambio de ajustar en tiempo real el consumo de energía eléctrica hacia abajo o hacia arriba y a pedido del operador de la red, lo que proporciona un servicio muy valioso para el sistema. Estos programas requieren sistemas de control de cargas, infraestructura de medición inteligente y mecanismos de comunicación, que permiten la interacción entre el operador de la red de energía eléctrica y el usuario. Para alcanzar la implementación de los mecanismos explícitos de respuesta a la demanda, se deben tener en cuenta aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales (Valencia López, 2016), en la figura 1-1 se muestran las actividades que los diferentes agentes del sistema eléctrico deben desarrollar para el diseño los programas de respuesta a la demanda. El presente trabajo de grado se centra en el componente técnico del diseño de sistemas de respuesta activa de la demanda, de forma experimental y académica.

En las facultades de ingeniería eléctrica, temas como las redes inteligentes (RI), la eficiencia energética y los mercados de energía han cobrado gran importancia, estos campos de estudio tienen en común la respuesta de la demanda, dado a que son las RI el concepto que dispone de las condiciones técnicas ideales para su implementación y la aplicación de incentivos a la respuesta de la demanda en los mercados de energía los que generan la apertura del cliente para ser flexible, haciendo que el sistema eléctrico mejore su eficiencia.

El estudio de la respuesta a la demanda y los temas descritos en el párrafo anterior requiere no solo de clases magistrales y teóricas, sino también prácticas, debido a su componente técnico, además este tipo de actividades académicas se convierten en una herramienta de investigación para estudiantes y grupos que trabajan en estas líneas de investigación.

Como trabajo de grado se pretende diseñar un sistema experimental de respuesta activa de la demanda de energía eléctrica a partir de generación solar fotovoltaica y control de cargas, direccionado a actividades académicas de tipo práctico, con guías de laboratorio que permitan la interacción segura de los usuarios y su correcto aprovechamiento, con los que se puedan simular casos de estudio de estudios internacionales.

1.2 Objetivos

El objetivo general del trabajo de grado y los objetivos específicos planteados se presentan a continuación:

1.2.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de respuesta activa de la demanda experimental que contemple generación solar fotovoltaica y cargas eléctricas, para el diseño de laboratorios de prácticas académicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar los criterios que componen los sistemas de respuesta a la demanda con el fin de determinar las oportunidades y desafíos para el diseño de laboratorios académicos para el estudio de este tema.
- Diseñar un sistema de respuesta a la demanda experimental que permita controlar el comportamiento de diferentes cargas eléctricas.

1.3 Alcances, limitaciones y metodología

El presente trabajo expone el diseño de un sistema experimental para prácticas académicas de respuesta activa de la demanda, control de cargas y conexión de sistemas de generación de energía solar fotovoltaica, además se presenta un estudio de factibilidad técnica de su implementación con tecnología de comunicación PLC y actuadores relés controlados por Arduino mediante programas de control diseñados en LabVIEW® para cargas de uso final, las cuales siguen los parámetros establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 2050, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE y el estándar IEEE1547, que proporcionan un marco regulatorio para la instalación de este tipo de redes.

En la figura 1-1 se presenta una visión general del sistema de respuesta a la demanda experimental, objeto del presente trabajo de grado.

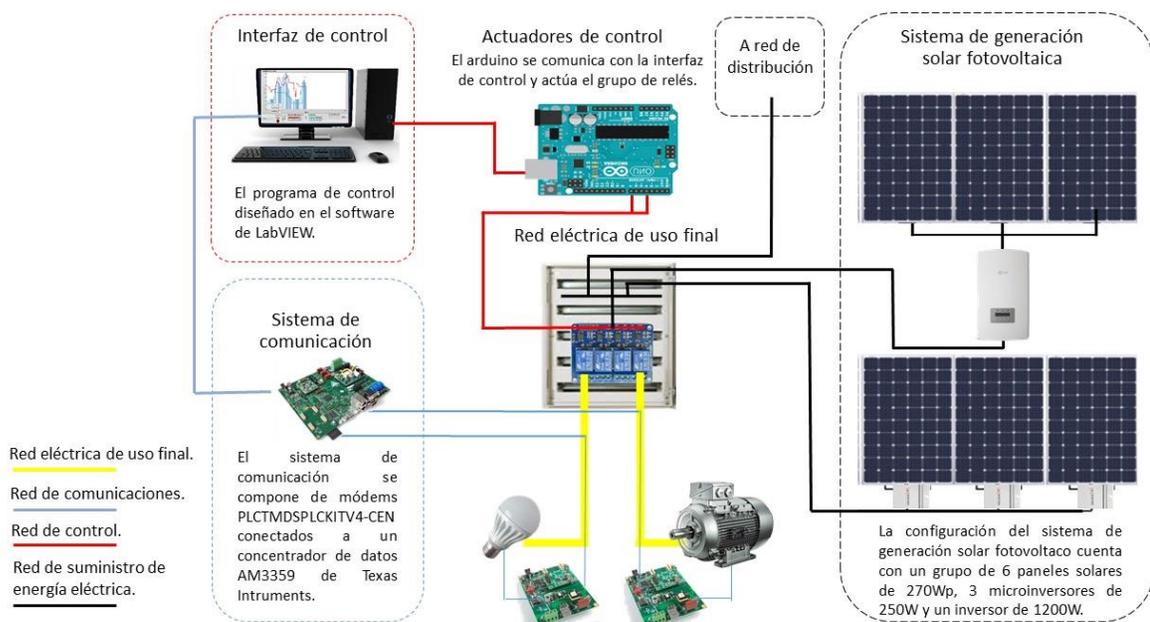


Figura 1-1. Diseño experimental del sistema de respuesta a la demanda propuesto.

Fuente: Elaboración Propia.

En el trabajo se presentan dos alternativas de comunicación diferentes al PLC, Ethernet y Radiofrecuencia; para el sistema de comunicación por la línea activa de potencia se definen los componentes y las características del sistema, se determina qué tipo de información puede ser transmitida o recibida, cuantos canales, en qué frecuencias, con qué rapidez y costo. En la figura 1-2, se muestra el modo de conexión del sistema de comunicación con módulos PLC.

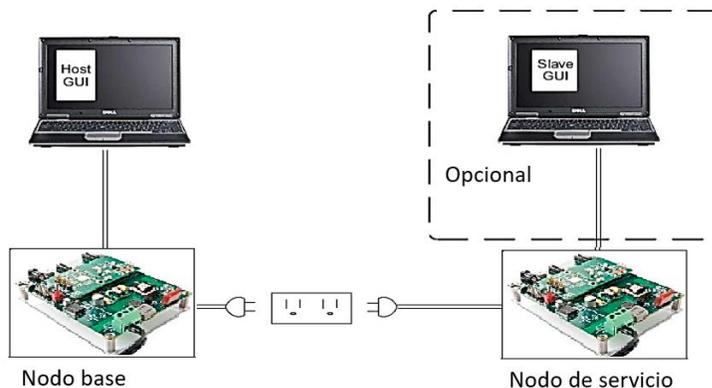


Figura 1-2. Esquema de conexión de módulos PLC con nodo base y nodos de servicio.
Fuente: Elaboración Propia.

El sistema de generación solar fotovoltaico objeto del diseño se compone de seis paneles solares de 270Wp, tres microinversores de 250W, un Inversor de 1200W y cajas de bornes que permiten realizar diferentes tipos de conexión.

La metodología utilizada durante la investigación es la experimentación, a través del software LabVIEW®, primero requiere la definición del sistema, la cual está dada por los diseños resultantes del proceso de investigación de tecnologías y los casos de estudio definidos según algunas estrategias de control, regulaciones y experiencias internacionales.

Después se formula el modelo de simulación, en este paso se definen todas las variables que forman parte del modelo, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que lo describan en forma completa.

Dependiendo del caso de estudio y de los resultados esperados, se toman los datos de entrada y se diseña el programa de simulación.

Los resultados de las simulaciones deberán ser validados, en esta etapa se pretende identificar deficiencias en la formulación del modelo o en los datos de entrada utilizados en la simulación, para validar los resultados se tendrán en cuenta los siguientes escenarios:

- La opinión de expertos sobre los resultados de la simulación.
- La exactitud con que se obtienen los datos.
- La comprobación de falla del modelo de simulación con respecto a datos históricos del sistema real.
- La aceptación y confianza en el modelo de la persona que hará uso de los resultados que arroje el experimento de simulación.

Después de que el modelo haya sido validado, se realiza la experimentación, la cual consiste en generar los datos deseados y en realizar un análisis de sensibilidad, posteriormente se interpretan los resultados que arroja la simulación y con base a esto se toma una decisión sobre la viabilidad del modelo formulado y sus resultados.

Por último, se generan dos documentos, el primero de tipo técnico con las especificaciones del diseño propuesto y el manual de usuario, que explica el funcionamiento del sistema experimental de respuesta activa de la demanda, además de guías de laboratorio para practicas académicas en temas de gestión de demanda, con lo que se facilita la interacción y el uso del modelo desarrollado.

1.4 Estructura del documento

El documento se divide en cinco capítulos, los cuales presentan los siguientes temas:

En el capítulo 1, se hace una breve descripción sobre el tema tratado en el trabajo de grado y la importancia de implementar laboratorios para la práctica y desarrollo de sistemas de respuesta activa de la demanda y su aporte en el campo de la investigación. Se presentan los objetivos, los alcances y limitaciones, metodología propuesta y los resultados esperados.

En el capítulo 2, “Respuesta activa de la demanda” se presenta una visión específica sobre el concepto de demanda activa, los sistemas y programas de respuesta activa de la demanda, las medidas energéticas que impulsan su implementación y las tecnologías de comunicación y control necesarias para su funcionamiento.

En el capítulo 3, 3. “Caso de estudio y referencia de caso”; se define el caso de estudio sobre el que se realiza el diseño del sistema experimental de respuesta activa de la demanda, este caso de estudio se basa en la implementación de dos interfaces de control de cargas que satisfacen servicios de respuesta activa de la demanda, el control de potencia activa para el control automático de la frecuencia y la reducción inteligente de cargas; además se presenta una experiencia internacional que sirve como referencia del caso de estudio.

En el capítulo 4, “Diseño de un Sistema Experimental de Respuesta Activa de la Demanda” se presenta la propuesta final de diseño, las estrategias de control cargadas en el sistema experimental de respuesta a la demanda, las tecnologías de comunicación que fueron estudiadas en el proceso de diseño y una caracterización del sistema PLC de la propuesta, la caracterización del sistema de generación solar fotovoltaica, la descripción de las cargas controladas por el sistema experimental de respuesta activa de la demanda, los requisitos mínimos de software necesarios para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda y su análisis de implementación.

En el capítulo 5, “Conclusiones y trabajos futuros”, se presentan los resultados del trabajo de grado, las conclusiones a las que condujo la investigación, la discusión académica y trabajos futuros propuestos, contribuciones y recomendaciones.

Al final del documento se presentan los anexos del trabajo realizado, los cuales contienen el manual de usuario del sistema experimental de respuesta activa de la demanda, las guías prácticas de laboratorio de conexión de sistemas de generación de energía solar fotovoltaica con inversores y microinversores, respuesta a la demanda y comunicación por la línea activa de potencia (PLC). Además del informe sobre el sistema de generación solar fotovoltaico implementado durante el proyecto de grado.

2. Respuesta activa de la demanda

En este capítulo se presenta una visión específica sobre el concepto de demanda activa, los sistemas y programas de respuesta activa de la demanda, las medidas energéticas que impulsan su implementación y las tecnologías de comunicación y control necesarias para su funcionamiento.

2.1 La demanda activa

La demanda activa se define en el proyecto europeo ADDRESS dirigido por ENEL como la participación activa de los consumidores de electricidad en los mercados de energía y en la prestación de servicios complementarios a los demás participantes del sistema; la demanda activa incluye la instalación de equipos de control y comunicación en el lado de los consumidores o prosumidores, generación distribuida o sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (Community & Programme, 2013). La demanda activa es el principal instrumento entre las estrategias de gestión demanda eléctrica que influyen directamente en la forma de consumo de los clientes (Arteconi, Dieter, & Bruninx, 2016).



Figura 2-1. Esquema de sistemas eléctricos con participación activa de la demanda.
 Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2-1 muestra una versión simplificada de la arquitectura de los sistemas eléctricos de participación activa de la demanda, donde se observan sus principales participantes y las relaciones que se establecen entre ellos; la demanda ocupa un papel crucial en el sistema, proporcionando flexibilidad y acuerdos de desconexión voluntaria de cargas; el agregador es un agente intermediario entre la demanda y el mercado; El sistema de control

de cargas permite técnicamente al agregador ofrecer los servicios de la demanda activa en el mercado; el operador del sistema de distribución es un actor crítico en el sistema, ya que las cargas se conectan directamente a la red de distribución y debe garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de la red, su configuración es clave en el funcionamiento de la demanda activa debido a que se favorece de los servicios de demanda activa para satisfacer sus propias necesidades; servicios que también benefician los sistemas de generación convencional centralizada y las líneas de transmisión(Framework, 2013).

La demanda activa ofrece por medio del agregador, principalmente tres servicios a los participantes del sistema eléctrico:

- Control de potencia activa para el control automático de la frecuencia: el control de potencia activa se usa para proporcionar servicios de desconexión de cargas solicitados por el operador del sistema de transmisión, destinados a restablecer las condiciones operativas de frecuencia y su control automático, este control de potencia garantiza que la operación del sistema se mantenga segura para la operación normal ante contingencias respecto al balance de potencia de la carga y la generación(Bailey, 2015). Cuando el operador del sistema de transmisión como medida de emergencia realiza una desconexión aleatoria de cargas (o circuitos), esta se considera una contramedida de emergencia que no se considera un servicio de demanda activa(P. Eyrolles; R. Belhomme; C. Brown; R. Gonzalez; I. Delgado; G. Valtorta; A. De Simone; S. Sartore; D. Abi Ghanem; J. Burgers; P. Kropman; D. Ectors, 2013).
- Reducción inteligente de carga: se presta para reducir cargas cuando los operadores de los sistemas de transmisión y distribución lo solicitan en un área determinada de sus redes, debido a problemas de mantenimiento o después del restablecimiento de fallas, este servicio de demanda activa pretende también reducir el impacto en el sistema de potencia en la integración de generación distribuida intermitente, lo que también mejora la eficiencia de esta técnica(Community & Programme, 2013). La reducción inteligente de carga es usada, además, cuando se solicita trasladar cargas a otras franjas horarias, una reducción puntual y localizada, preparada o planificada de la demanda con el fin de mejorar la eficiencia o la confiabilidad del sistema(A. Rezaee Jordehi, 2019).
- Regulación de tensión y control del flujo de potencia: en la actualidad, la regulación de tensión en redes de distribución "pasivas" con flujos de energía unidireccional, se realiza mediante reguladores de tensión y cambiadores de tomas en los transformadores de las subestaciones, la demanda activa desempeña un papel importante en la regulación de tensión y los servicios de control de flujo de potencia en las redes de distribución(P. Eyrolles; R. Belhomme; C. Brown; R. Gonzalez; I. Delgado; G. Valtorta; A. De Simone; S. Sartore; D. Abi Ghanem; J. Burgers; P. Kropman; D. Ectors, 2013).

2.2 Los sistemas de respuesta activa de la demanda

Los sistemas de respuesta activa de la demanda de energía eléctrica permiten conectar o desconectar cargas gestionables en los momentos más convenientes según la curva de demanda y las condiciones de la red. Esta funcionalidad puede suponer una contribución importante para el aplanamiento de la curva de demanda, para la integración de la generación solar fotovoltaica y el control de la frecuencia, en la sección 2.2 se presenta una visión de los sistemas de respuesta activa de la demanda, la implementación de programas y tecnologías de comunicación necesarios para su implementación.

En la actualidad los sistemas energéticos de los países miembros de la unión europea se caracterizan por garantizar la sostenibilidad medioambiental y el suministro de la energía eléctrica (EEA, 2017). Dicha sostenibilidad se basa en el impulso de políticas de integración de los usuarios al mercado eléctrico, cambios en las fuentes de generación de energía eléctrica y en los sistemas de comunicación (ICONTEC, 2011). Esta postura busca atender de forma eficiente e integral a todos los actores de la red eléctrica, lo que supone desafíos como aplanar la curva de demanda y hacer que los usuarios que tienen un papel pasivo en el sistema eléctrico asuman un rol activo (Somma, Graditi, Heydarian-forushani, Sha, & Siano, 2017).

Las soluciones a los diferentes desafíos que el sistema eléctrico plantea, cada vez se enfocan más desde el lado de la demanda. Los planteamientos para la gestión de la demanda, encaminados a promover la adquisición de equipos de bajo consumo, su control y uso eficiente, son considerados por expertos e instituciones una pieza fundamental en el futuro de la energía eléctrica (Mo & Sansavini, 2018).

Para consumir la electricidad de forma eficiente se debe minimizar su uso y gestionar en el tiempo dicho consumo, puesto que el costo y el impacto varían según la forma en la que se consume en el sistema eléctrico de potencia. Es por esto que las experiencias internacionales se enfocan en la implementación de sistemas de respuesta activa desde el lado de la demanda (Araque & General, 2010).

La respuesta de la demanda eléctrica se refiere a la capacidad que tiene un usuario para reaccionar activamente a señales externas que hacen referencia a niveles de demanda agregada, por ejemplo, incentivos de precio de la energía consumida durante determinado tiempo, incentivos por desconexión de cargas u otras medidas de respuesta de la demanda tomada por el operador de red o la regulación vigente. El fin de gestionar activamente la demanda eléctrica es contribuir a la reducción de las emisiones de CO₂ en la integración de las energías renovables en el sistema eléctrico y mejorar la eficiencia energética del sistema en su conjunto. Un Sistema de respuesta activa de la Demanda eléctrica es una herramienta tecnológica en la que se utilizan equipos de medida inteligente, comunicación y control, para controlar el consumo energético de un usuario en una hora específica o en tiempo real. En la actualidad se habla de dos tipos de sistemas de respuesta a la demanda eléctrica ofrecidas por los operadores de red, generadores o comercializadores; (i)

sistemas basados en el tiempo con precios en tiempo real y (ii) respuesta a la demanda basada en incentivos (Mo & Sansavini, 2018).

Los sistemas de respuesta activa de la demanda, permiten integrar la generación de energía variable, como es la energía solar fotovoltaica y eólica, mediante la implementación de redes con mayor nivel de automatización (Somma et al., 2017).

Los sistemas de respuesta activa de la demanda son sistemas compuestos por un software que permite medir y controlar los consumos de electricidad con el propósito de influir en los hábitos de consumo del usuario final. En este sentido un sistema respuesta de la demanda debe poseer una infraestructura de comunicaciones eficiente que se caracterice por el flujo bidireccional de información entre los dispositivos de consumo y los recursos tradicionales de generación, transmisión y distribución de energía, entre los consumidores y los proveedores que permita tener conocimiento constante de todos los agentes conectados a la red.

Las tecnologías de comunicación propuestas para la implementación de los sistemas de respuesta a la demanda se pueden clasificar como cableadas e inalámbricas. En las tecnologías cableadas se encuentran la fibra óptica, inmune a interferencias electromagnéticas pero costosa, y las comunicaciones por líneas de potencia.

En este documento se propone el uso de las PLC en la implementación de un sistema experimental de respuesta a la demanda que controla diferentes cargas bajo determinados casos de estudio.

2.2.1 Programas de respuesta activa de la demanda

Se distinguen dos tipos de programas de respuesta de la demanda según la procedencia de las señales para la toma de decisión de los clientes, los programas guiados por el sistema y los programas guiados por el mercado; los cuales, operan de la siguiente manera:

Los esquemas implícitos o basados en el precio incentivan a los usuarios para que cambien su consumo, a través de estrategias como el cambio de precio de la electricidad en diferentes horas del día, con lo que se espera trasladar el consumo de la electricidad a diferentes períodos de tiempo, por lo que los consumidores finales que respondan voluntariamente a esta señal del mercado pueden beneficiarse de un servicio de energía eléctrico más económico (Vallés Mercedes, 2017).

Los mecanismos explícitos permiten a los consumidores recibir una recompensa específica a cambio de ajustar en tiempo real el consumo de energía eléctrica hacia abajo o hacia arriba y a pedido del operador de la red, lo que proporciona un servicio muy valioso para el sistema. Estos programas requieren sistemas de control de cargas, infraestructura de medición inteligente y mecanismos de comunicación, que permiten la interacción entre el operador de la red de energía eléctrica y el usuario (CEER, 2018).

2.2.2 Tecnologías que permiten la respuesta activa de la demanda

Los avances tecnológicos incentivan la transición de las redes de distribución de energía eléctrica pasivas y estables, con transporte de electricidad unidireccional a sistemas eléctricos con participación activa de la demanda (Framework, 2013). Para llevar a cabo esta transición el regulador de la industria eléctrica del Reino Unido, la Oficina de Mercados de Gas y Electricidad, ha determinado que se debe incorporar un control flexible e inteligente a fin de optimizar el provecho de los servicios de demanda activa (Ofgem, 2019). Desde el punto de vista operativo, los sistemas de demanda activa deben estar equipados con sistemas de comunicación robustos y generalizados, equipos de control e interfaces electrónicas de potencia que proporcionen la flexibilidad necesaria para garantizar la operación de servicios complementarios a la red (Tarish, Sees, & Elmenreich, 2016).

En la figura 2-2 se presentan las tecnologías necesarias para la implementación de sistemas de respuesta activa de la demanda; el sistema de comunicación incluye información de todos los participantes del sistema; los equipos de control de cargas están instalados en los usuarios que son sometidos a desconexión según de negociación acordada y las interfaces electrónicas de potencia son operadas por el agente agregador de los servicios de demanda activa.

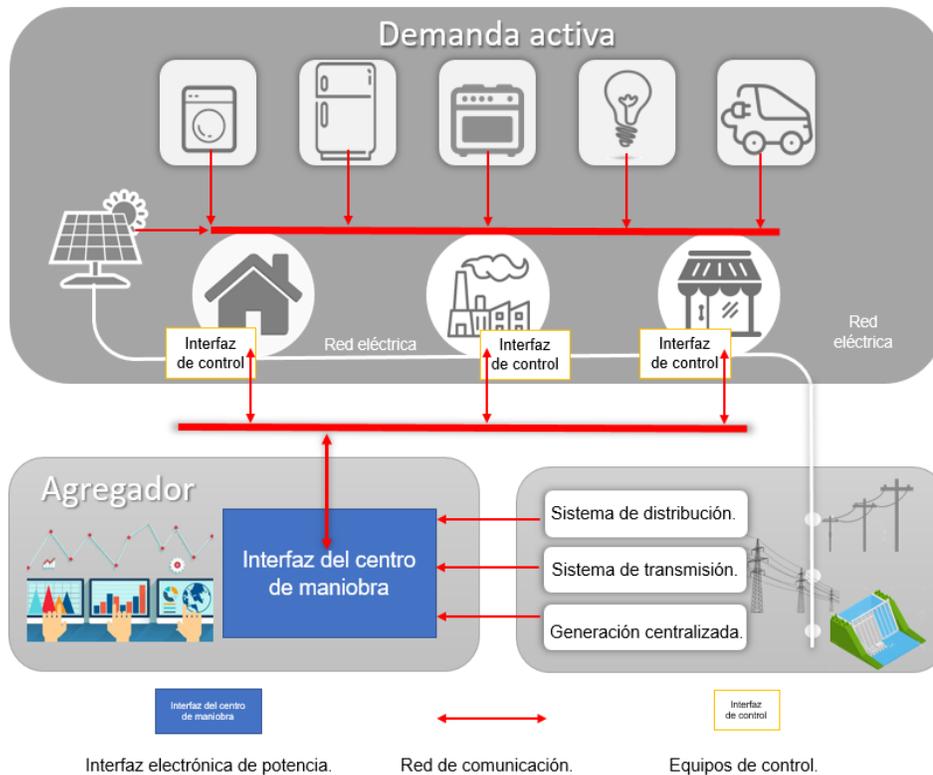


Figura 2-2. Esquema de sistemas de respuesta activa de la demanda. Fuente: Elaboración propia.

Sistema de comunicación

El sistema de comunicación se utiliza para recopilar y enviar información de la red al centro de maniobra, donde realiza la supervisión y el control de los dispositivos que conforman la red eléctrica. Las bases de datos de información en los sistemas de demanda activa proporcionan conocimiento específico del estado de todos los actores del sistema (Tarish et al., 2016).

Las tareas principales de la red de comunicación son la adquisición y envío de datos de la demanda y la información de eventos ocurridos en los diferentes participantes del sistema, en puntos sensibles como los dispositivos electrónicos inteligentes, protecciones, interruptores, cambiadores de tomas, entre otros; el sistema de comunicación también debe alertar la sobrecarga de circuitos (Valencia López, 2016).

El sistema de comunicaciones incluye todas las funciones requeridas para la supervisión del sistema de energía eléctrica y así cumplir su objetivo de permitir la señalización, el registro de las mediciones, control y monitorización de toda la red, por lo que incluye las siguientes funcionalidades:

- Adquisición, procesamiento y gestión de datos.
- Ejecución de pruebas y seguimiento de las operaciones de conmutación en la red.
- Verificar y ejecutar protocolos de conmutación en la red.
- Registrar alarmas y situación de la red.
- Adquisición y análisis los datos antes y después de las fallas.
- Análisis de la topología.

Sistema de control

Los sistemas de control de cargas son infraestructuras de medición y control que se instalan en el sitio de los consumidores, tienen la capacidad de medir, conectar y desconectar cargas en diferentes momentos, equipados con enlaces de comunicación que permiten al agregador adquirir la información actual de las cargas (A. Rezaee Jordehi, 2019). El uso de tecnologías innovadoras, como medidores inteligentes, dispositivos de comunicación y controladores de energía, es crucial para la implementación efectiva de los programas de DR (Tarish et al., 2016) (A. Rezaee Jordehi, 2019).

El primer punto clave para la implantación de los sistemas de control es la instalación de equipos de maniobra que permitan aislar circuitos y desconectar cargas (seccionadores, interruptores, relés) los cuales son conectados al sistema de comunicaciones con el fin de permitir la operación por el agregador de los elementos de maniobra desde su centro de control. La instalación de estos equipos debe contar con estudios técnicos que permitan identificar los puntos óptimos de automatización para los operadores de las redes de

transmisión y distribución. La elección de los equipos y los puntos de la red en los que se instalan, se debe hacer en función de los requisitos mínimos que garanticen la continuidad del suministro de energía eléctrica (Montoya, Ramirez, & Perez, 2015).

Las soluciones de control difieren según la tipología y necesidad del usuario, los sistemas de control están categorizados según su nivel de penetración, el primer grado de control son los equipos que permiten realizar maniobras desde un centro de control en las líneas de transmisión. Un segundo grado de control incluye la operación remota de los seccionadores instalados en los sistemas de distribución, con lo que la zona aislada en la desconexión es más reducida y, el tercer grado de control se da cuando los usuarios pueden ser gestionados individualmente desde el centro de control (Tarish et al., 2016).

Los cambios tecnológicos favorecen la implementación de la demanda activa y la inclusión de generación distribuida, lo que requiere de investigación y desarrollo de tecnologías que conlleven a la operación inteligente de los sistemas eléctricos en las siguientes áreas: (i) control activo de área amplia, (ii) protección y control adaptativo, (iii) dispositivos de administración de la red, (iv) simulación de red en tiempo real, (v) comunicación generalizada y distribuida (Anuradha, 2019).

3. Caso de estudio y referencia de caso

En el presente capítulo se define el caso de estudio sobre el que se realiza el diseño del sistema experimental de respuesta activa de la demanda, este caso de estudio se basa en la implementación de dos interfaces de control de cargas que satisfacen servicios de respuesta activa de la demanda, el control de potencia activa para el control automático de la frecuencia y la reducción inteligente de carga; además se presenta una experiencia internacional que sirve como referencia del caso de estudio.

3.1 Referencia de caso

El caso de estudio presentado en la sección 3.2, tiene como referencia el control de potencia activa para el control automático de la frecuencia y el control inteligente de cargas, programas de respuesta a la demanda desarrollados en marco del proyecto europeo “Active Distribution networks with full integration of Demand and distributed energy Resources” ADDRES cuyo objetivo principal es que los participantes de la red de eléctrica comprendan su papel en los sistemas de respuesta activa de la demanda.

El proyecto ADDRES se divide en tres componentes, el primer componente se desarrolla en torno al concepto de demanda activa, el segundo componente se centra en las experiencias de integración de sistemas de respuesta del lado de la demanda en todo el mundo, el ultimo presenta un marco técnico y comercial para el desarrollo de la demanda activa en las redes inteligentes.

El proyecto ADDRES describe las arquitecturas técnicas, comerciales y conceptuales desarrolladas para habilitar la demanda activa y explotar sus beneficios, en dichas arquitecturas describe específicamente:

- Los participantes y componentes de las redes eléctrica con participación activa de la demanda.
- Los servicios proporcionados por la demanda activa.
- Las diferentes interacciones entre los participantes del sistema y el diseño de las señales intercambiadas entre ellos en relación con la prestación de estos servicios.
- El comportamiento general del sistema, tanto desde el punto de vista comercial como desde el punto vista técnico y los requisitos básicos necesarios para la implementación de las arquitecturas de demanda activa.
- Los problemas a resolver y las barreras potenciales a eliminar.

En el proyecto se definen las expectativas que tienen los operadores de los sistemas de distribución y los sistemas de transmisión como participantes de la red eléctrica respecto a la implementación de demanda activa como prestador de servicios complementarios, en la tabla 3-1 se presenta un resumen de dichas expectativas:

#	Expectativa	Operador red de distribución	Operador red de transmisión
1	Control del flujo de potencia	X	X
2	Restablecimiento de la red / Arranque autónomo	X	X
3	Control de frecuencia / Reserva de potencia	X	X
4	Control de tensión y compensación de potencia reactiva	X	
5	Operación en isla intencional	X	X
6	Reducción de pérdidas	X	X
7	Flexibilidad de la red.	X	

Tabla 3-1. Resumen de las expectativas de los operadores de los sistemas de transmisión y distribución con respecto a la participación activa de la demanda. Fuente: ADDRESS

Las expectativas de los operadores de los sistemas de distribución y transmisión respecto a la implementación de demanda activa descritas en la tabla anterior son atendidas mediante la prestación de los siguientes tres servicios:

Control de potencia activa para el control automático de la frecuencia:

El control de potencia activa se usa para proporcionar servicios de desconexión de cargas solicitados por el operador del sistema de transmisión, destinados a restablecer las condiciones operativas de frecuencia y su control automático, este control de potencia garantiza que la operación del sistema se mantenga en condiciones normales ante contingencias respecto al balance de potencia de la carga y la generación (Framework, 2013). Cuando el operador del sistema de transmisión como medida de emergencia realiza una desconexión aleatoria de cargas (o circuitos), esta configura una contramedida de emergencia que no se considera un servicio de demanda activa (P. Eyrolles; R. Belhomme; C. Brown; R. Gonzalez; I. Delgado; G. Valtorta; A. De Simone; S. Sartore; D. Abi Ghanem; J. Burgers; P. Kropman; D. Ectors, 2013).

Este servicio de control de potencia activa para el control automático de la frecuencia es utilizado por los operadores de los sistemas de transmisión y distribución para mantener la frecuencia en niveles apropiados, se necesitan reservas de energía activa o cargas desconectables para satisfacer aumentos no planificados en la demanda o pérdidas repentinas de generación. En sistemas eléctricos pasivos este servicio es proporcionado por centrales de generación, posiblemente por centrales hidroeléctricas que tienen

capacidad de almacenar su recurso de generación, pero este servicio también puede ser proporcionado por la gestión de las cargas.

El operador del sistema de distribución se hace cargo del nivel de la frecuencia cuando en su sistema es instalada generación distribuida, por lo que se convierte en un cliente potencial del servicio de control de potencia activa para el control automático de la frecuencia.

Los operadores de la red de transmisión y distribución adquieren en el mercado el servicio de control de cargas para restablecer condiciones operativas adecuadas para el control automático de frecuencia; en la tabla 3-2, se presenta un resumen de las condiciones para la prestación del servicio.

Nombre del servicio	Control de potencia activa para el control automático de la frecuencia
Solicitante	Operador del sistema de transmisión, Operador del sistema de distribución
Proveedor del servicio	Agregador
Otros actores involucrados	Consumidores, mercado
Negociación	Las reservas de carga desconectable para el control de frecuencia se negocian a través de un mercado organizado, con ofertas que se presenten el día anterior (para mercados intradía). Son posibles escenarios de negociación, como mercados mensuales o anuales.
Disponibilidad	Intervalo de tiempo disponible para activar el servicio: - hasta 24 horas por delante (para mercados intradía). - La reserva puede ser llamada dentro del intervalo de disponibilidad negociada.
Cantidad mínima de cargas disponibles de desconexión	Establecido según las medidas regulatorias.
Estructura de pagos	Pago por disponibilidad: Tarifa que se paga al agregador por disponer cargas desconectables. Pago por desconexión: Tarifa que se paga al agregador si el usuario solicita el servicio.
Otras condiciones	- Número y frecuencia máxima de uso del servicio. - Tiempo mínimo entre usos del servicio. - Cargo / penalización por no entrega del servicio.

Tabla 3-2. Resumen de condiciones para la prestación del servicio de control de frecuencia. Fuente: ADDRESS

Reducción inteligente de carga:

Se presta para reducir cargas cuando los operadores de los sistemas de transmisión y distribución lo solicitan en un área determinada de sus redes, debido a problemas de mantenimiento o después del restablecimiento fallas, este servicio de demanda activa pretende también reducir el impacto en el sistema de potencia frente a la integración de generación distribuida intermitente, lo que también mejora la eficiencia de esta técnica (Community & Programme, 2013). La reducción inteligente de carga es usada, además, cuando se solicita trasladar consumo a otras franjas horarias, una reducción puntual y localizada, preparada o planificada de la demanda con el fin de mejorar la eficiencia o la confiabilidad del sistema (A. Rezaee Jordehi, 2019).

Tanto el operador del sistema de transmisión como el operador de la red de distribución pueden necesitar algún tipo de reducción de carga, cuando ocurren problemas de mantenimiento o fallas inesperadas; además, los cambios en la topología de la red, en los que la generación distribuida con fuentes no convencionales intermitentes cobra cada vez mayor importancia, trae consigo nuevos desafíos para el sistema.

La demanda activa permite una reducción de carga inteligente y controlable para la prestación de servicios complementarios que atienden los desafíos de estabilidad, confiabilidad y eficiencia que plantea el sistema eléctrico.

Los sistemas inteligentes de control de cargas se caracterizan por el nivel de automatización y predicción alcanzado, que permite la prestación de servicios al sistema, entre los que se identifican tres tipos diferentes, de acuerdo con el producto de demanda activa que satisfacen y el período de tiempo en el que se activan.

- **Re-perfilado programado para reducción de carga – Lento:**
Los operadores red planean con anticipación desconexiones de carga para atender maniobras de mantenimiento o trasladar cargas de los picos de consumo, recurriendo a servicios de demanda activa prestados por el agregador.
- **Re-perfilado programado para reducción de carga – Rápido:**
Durante la operación de la red, los operadores de los sistemas de distribución y transmisión requieren en tiempo real una reducción de carga para resolver estados de criticidad del sistema.
- **Re-perfilado condicional para reducción de carga – Rápido:**
Con anticipación al tiempo real, automáticamente se evidencia cierta probabilidad falla, condición crítica de funcionamiento o ineficiencia en el sistema, que puede ser atendida o subsanada por servicios de demanda activa.

Regulación de tensión y control del flujo de potencia:

La regulación de tensión en redes de distribución "pasivas" con flujos de energía unidireccional, se realiza mediante reguladores de tensión y cambiadores de tomas en los transformadores de las subestaciones, la demanda activa desempeña un papel importante en la regulación de tensión y los servicios de control de flujo de potencia en las redes de distribución (P. Eyrolles; R. Belhomme; C. Brown; R. Gonzalez; I. Delgado; G. Valtorta; A. De Simone; S. Sartore; D. Abi Ghanem; J. Burgers; P. Kropman; D. Ectors, 2013).

En la tabla 3-3 se presentan las expectativas de los operadores de los sistemas de transmisión y distribución cubiertas por los servicios de demanda activa al sistema eléctrico.

Expectativa de los operadores de las redes de transmisión y distribución	Servicio de demanda activa		
	Regulación de tensión y control de potencia.	Control de potencia activa para el control automático de la frecuencia	Reducción inteligente de carga
Control del flujo de potencia	X		X
Control de frecuencia / Reserva de potencia		X	
Control de tensión y compensación de potencia reactiva			X
Control de tensión y compensación de potencia reactiva.	X		
Reducción de pérdidas	X		X
Flexibilidad de la red	X		X

Tabla 3-3. Relación de servicios de demanda activa y expectativas de los operadores de las redes de distribución y transmisión. Fuente: ADDRESS

Contexto del uso de caso: Los servicios de la demanda activa son ofertados y gestionados por un agente agregador a los operadores de los sistemas de distribución y transmisión.

3.2 Caso de estudio

Se tiene un sistema eléctrico, que registra fallas causadas por el cambio de su frecuencia; en el que se presentan picos en la curva de demanda por fuera de la capacidad de generación de energía centralizada, en dicho sistema es creciente la instalación de recursos de generación distribuida de tipo solar fotovoltaica.

En el sistema eléctrico objeto del caso de estudio se evidencian problemas que son mitigados con la participación activa de la demanda.

El caso de estudio sobre el que se desarrolla el diseño del sistema experimental de respuesta activa de demanda, parte de la experiencia internacional ADDRES del que se toman servicios de demanda activa como la limitación de carga para el control automático de la frecuencia y la reducción inteligente de cargas, en los que participan diferentes actores del sistema eléctrico, los clientes de uso final (consumidores), el mercado, el agente agregador de servicios de demanda activa, generación distribuida y los operadores de los sistemas de transmisión y distribución.

El sistema experimental de respuesta activa de la demanda presenta dos escenarios de control de cargas, en los cuales se recrean las condiciones necesarias para la prestación de servicios de demanda activa que solucionan los problemas del sistema eléctrico en cuanto a su nivel de frecuencia, el traslado de picos de consumo y la penetración de los sistemas de generación distribuida de tipo solar fotovoltaica altamente intermitente.

Los servicios prestados en el caso de estudio se presentan en los siguientes escenarios de control:

Escenario 1: Limitación automática de cargas (para el control de la frecuencia)

En este escenario se quiere limitar automáticamente cierto porcentaje de cargas para atender alteraciones en el nivel de la frecuencia.

En la tabla 3-4 se presentan los porcentajes de cargas desconectables requeridos para atender cada etapa de desconexión para el nivel de frecuencia registrado.

Ajuste umbral de frecuencia		
Etapa	Frecuencia (Hz)	Desconexión de carga (%)
1	59,4	5
2	59,2	10
3	59,0	15
4	58,8	20

Tabla 3-4. Umbrales de frecuencia para la desconexión automática. Fuente: XM

Escenario 2: Desplazamiento de picos de consumo (aplanamiento de la curva de demanda y penetración de generación distribuida)

En este escenario se quiere aplanar la curva de demanda, a partir de control inteligente de cargas, con el fin de trasladar la demanda de horas pico a horas de bajo consumo de energía, en las que está el sistema de generación solar fotovoltaica en operación.

En la figura 3-1 se presenta la curva característica del sistema eléctrico caso de estudio y el comportamiento esperado de la demanda al aplicar el control inteligente de las cargas.

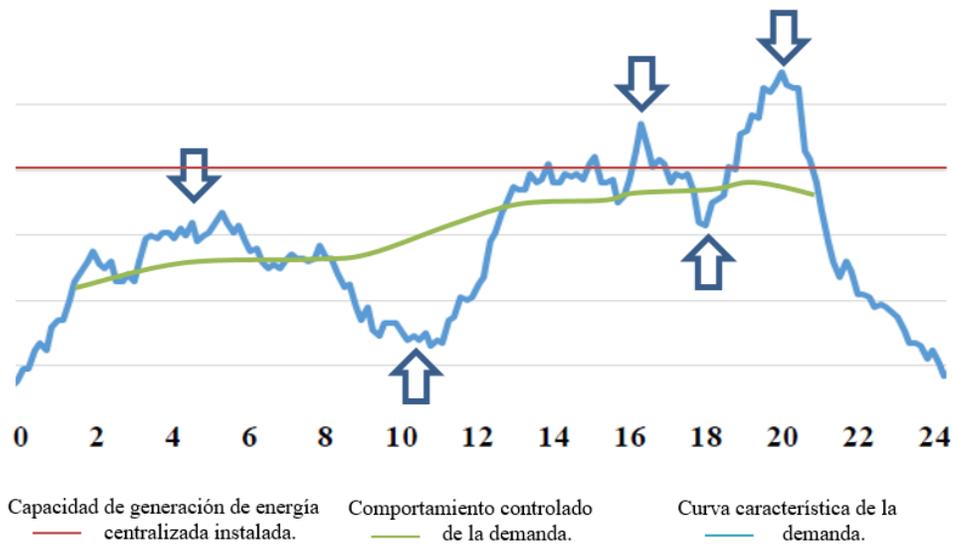


Figura3-1. Curva característica de la demanda del sistema eléctrico caso de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

4. Diseño del sistema experimental de respuesta activa de la demanda

En este capítulo se presenta el diseño propuesto del sistema experimental de respuesta activa de la demanda a partir de control de cargas y generación de energía solar fotovoltaica, los componentes y estrategias de control utilizadas, el sistema de comunicación PLC utilizado en el diseño, la caracterización del sistema de generación solar fotovoltaico, información sobre las cargas controladas y los requisitos mínimos de software para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda.

4.1 Propuesta de diseño

El sistema experimental de respuesta activa de la demanda y conexión de generación solar fotovoltaica está diseñado como una herramienta académica para prácticas de laboratorio que tiene como objetivo estimular desde la academia y la investigación, un análisis complejo de la dinámica y el papel de la demanda en los sistemas eléctricos, no solo desde el aspecto técnico, sino también, desde el pensamiento sistémico sociedad-tecnología. Esta herramienta tecnológica al servicio de la formación de estudiantes de pregrado y posgrado de ingeniería eléctrica y electrónica, se diseña para favorecer la investigación en temas de eficiencia energética, respuesta a la demanda, conexión de sistemas de generación solar fotovoltaica y comunicación por la línea activa de potencia PLC.

La herramienta tecnológica diseñada, se compone de dos espacios principales, una mesa de trabajo central y un sistema de paneles solares como se observa en la figura 4-1.

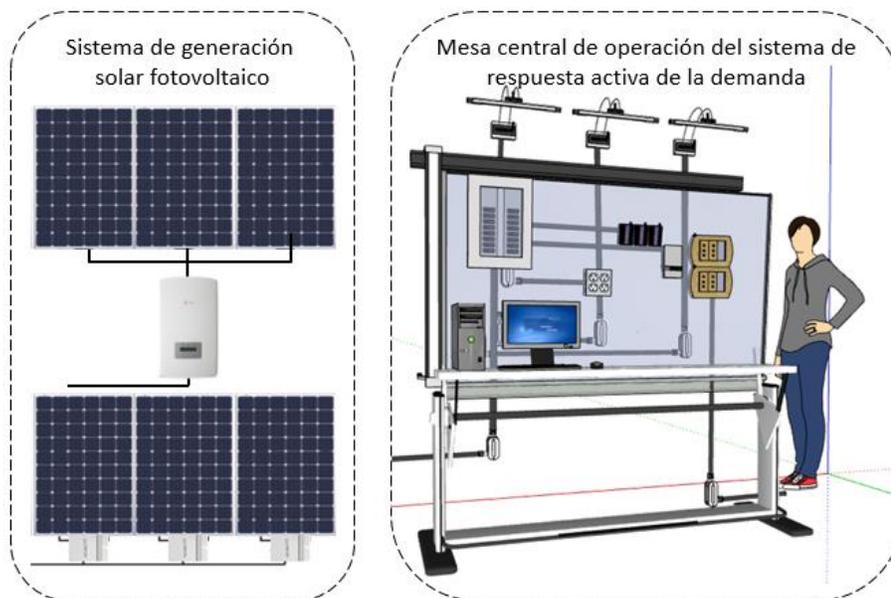


Figura 4-1. Visualización del sistema de respuesta activa de la demanda y conexión de generación solar fotovoltaica diseñado. Fuente. Elaboración propia.

El sistema experimental está compuesto por un tablero en acrílico que permite observar las conexiones internas de la red eléctrica de uso final que cuenta con cargas de diferentes tipos, como iluminación en tecnologías Led, fluorescente e incandescente; cargas resistivas variables y cargas inductivas, que pretenden simular usuarios residenciales e industriales, la caracterización de las cargas se presenta en la sección 4.1.4.

La interfaz central de control diseñada, cuenta con dos escenarios de respuesta activa de la demanda diferentes en los que se prestan dos servicios de participación activa de la demanda, estos servicios son presentados en el capítulo 3 del presente documento; la interfaz tiene la capacidad de obtener la medida de consumo de energía de las cargas, datos de generación del sistema de energía solar fotovoltaico, simular curvas de demanda y curvas características de generación solar, con esta información de entrada cada una de las estrategias de respuesta activa de la demanda programadas es operada.

Las interfaces de operación permiten una operatividad fluida y segura, tiene botones variables e interruptores virtuales; en la sección 4.1.1 se presentan las estrategias y las interfaces que permiten el control inteligente de las cargas.

En esta interfaz el usuario asume el papel del agente agregador, con lo que puede realizar diferentes maniobras de gestión como la conexión o desconexión directa de las cargas, limitar la potencia total de la demanda, establecer horarios de uso de la energía eléctrica, entre otras maniobras, con lo que logra gestionar de forma académica en tiempo real un sistema eléctrico.

El sistema experimental pretende permitir la practica en conexiones de sistemas de generación fotovoltaica, por lo que cuenta con seis paneles solares fotovoltaicos de 270Wp, cada uno conectado a un conjunto de borneras de manera independiente al módulo de laboratorio, un inversor de 1200W y tres microinversores de 250W, en la sección se muestran con detalle el sistema de generación.

A continuación, en la figura 4-3 se presenta el plano general del diseño propuesto, en las figuras posteriores los siguientes planos de detalle:

- Figura 4-4: Conexión del sistema de generación solar fotovoltaico.
- Figura 4-5: Plano de conexión del concentrador de datos PLC.
- Figura 4-6: Plano de conexión del microcontrolador Arduino a los relés actuadores y la interfaz.
- Figura 4-7. Plano de conexión de cargas y módulos TDMSPLCKITV4-CEN PLC.
- Figura 4-8: Render 3D del diseño de la mesa de trabajo del sistema experimental de respuesta a la demanda

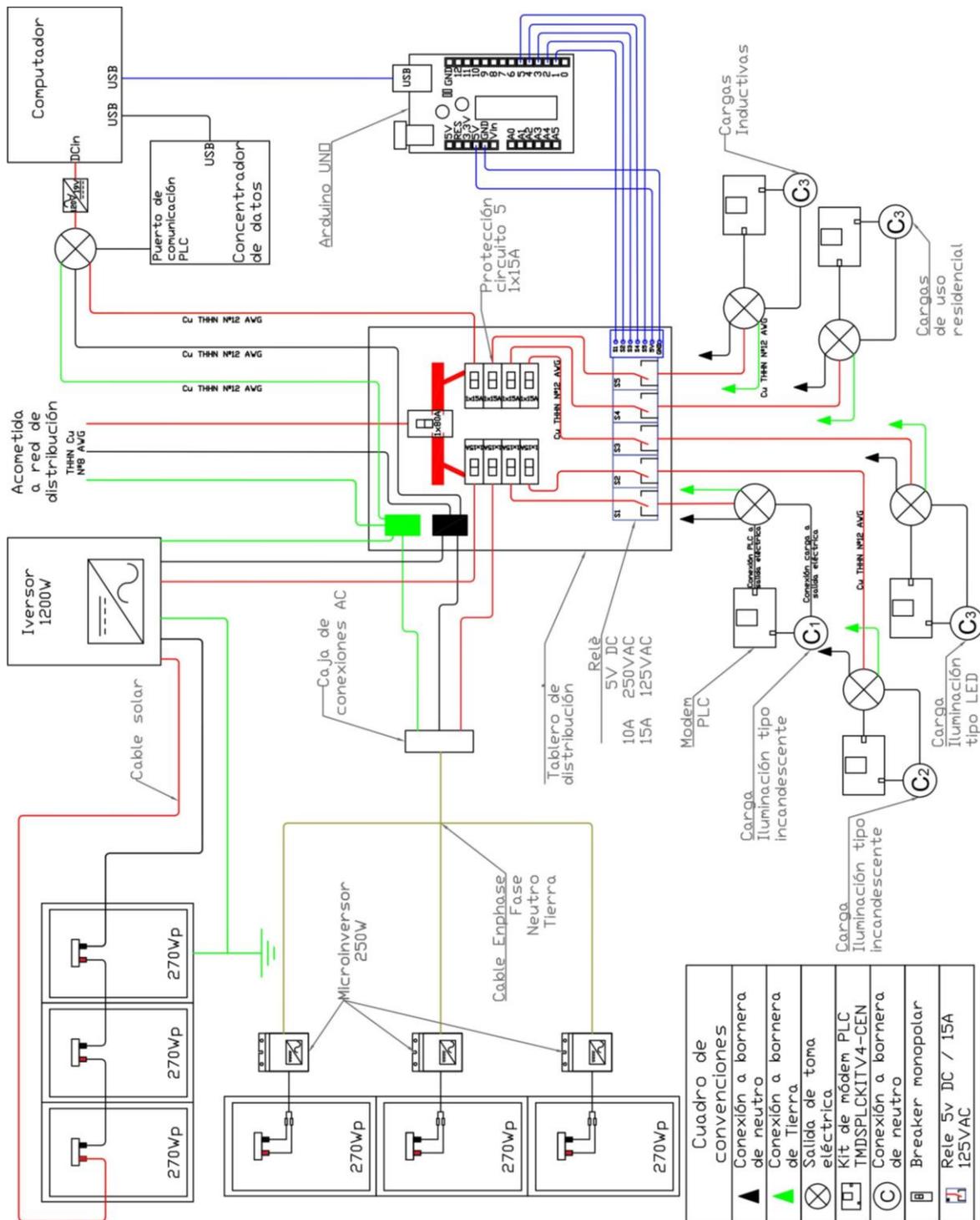


Figura 4-3. Plano general de conexiones del sistema experimental. Fuente. Elaboración propia.

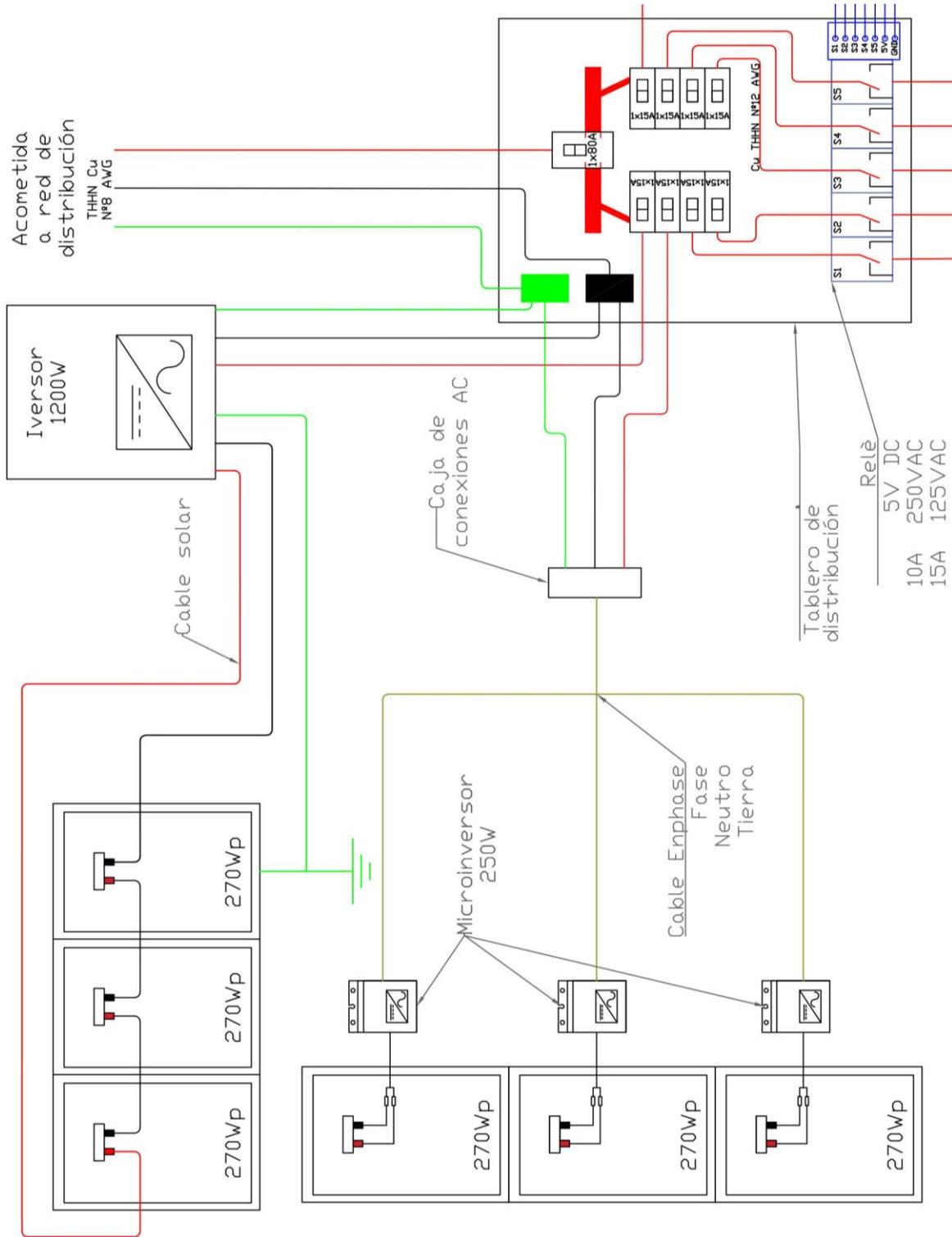


Figura 4-4. Conexión del sistema de generación solar fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia.

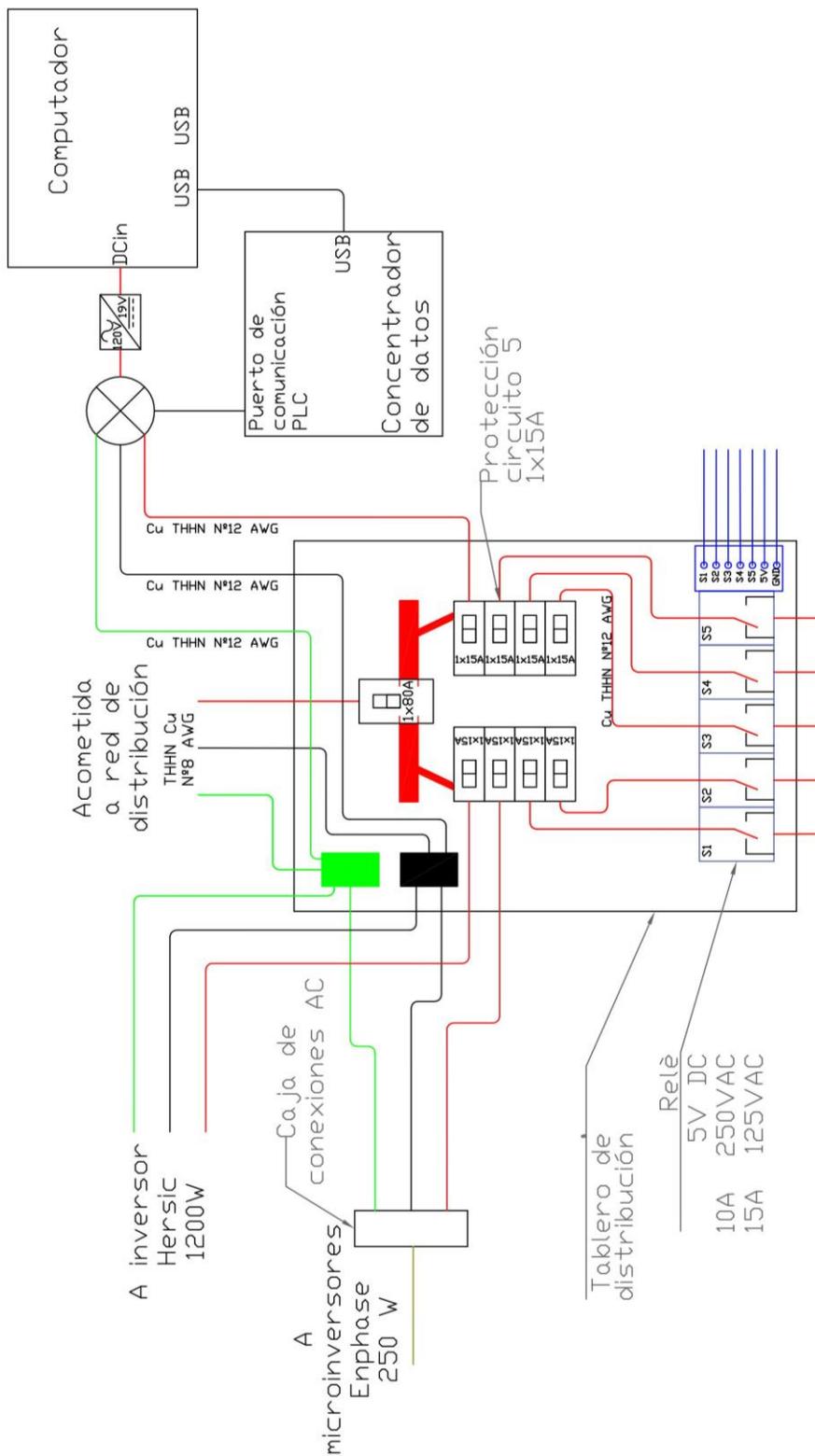


Figura 4-5. Plano de conexión del concentrador de datos PLC. Fuente: Elaboración propia.

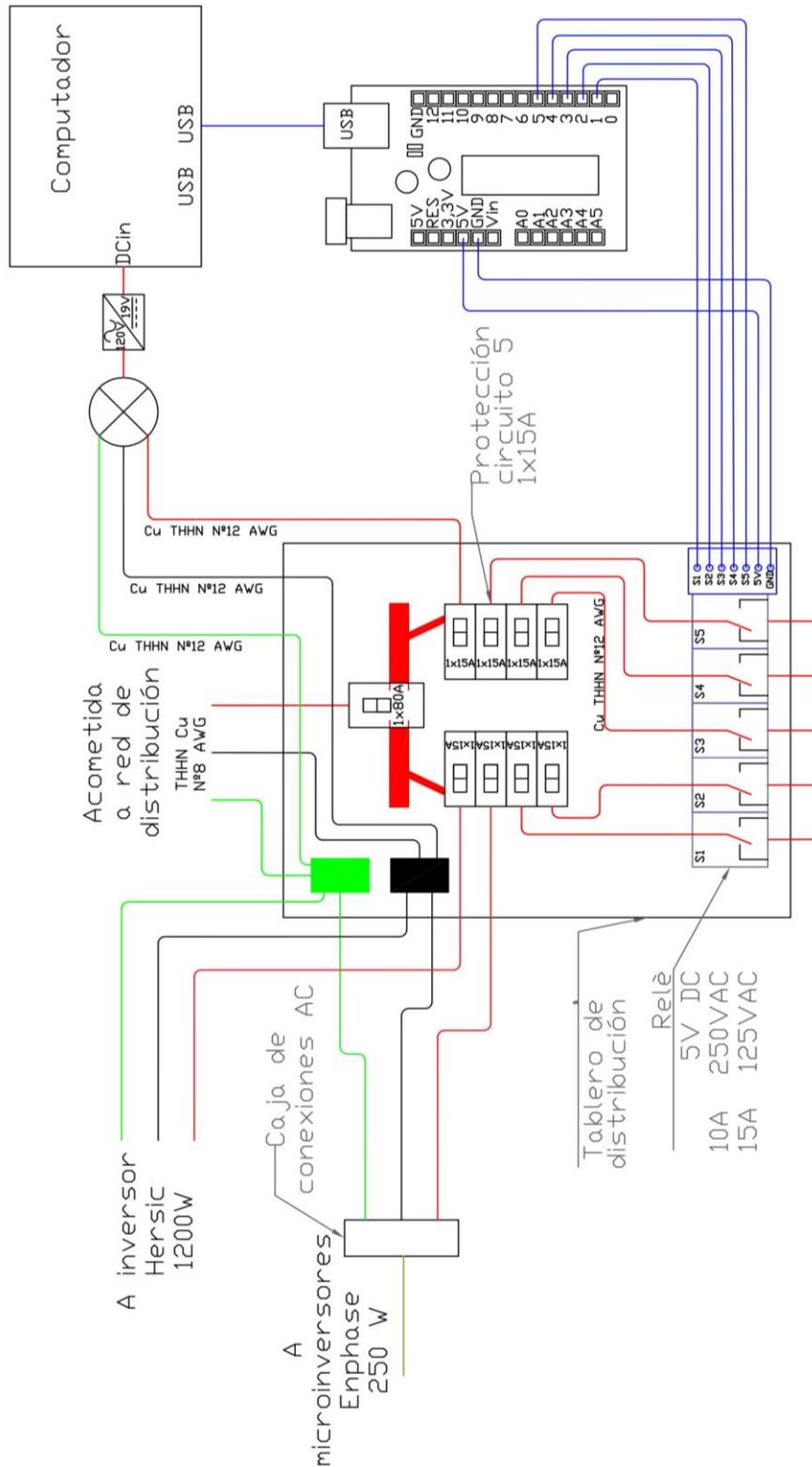


Figura 4-6. Plano de conexión del microcontrolador Arduino a los relés actuadores y la interfaz. Fuente: Elaboración propia.

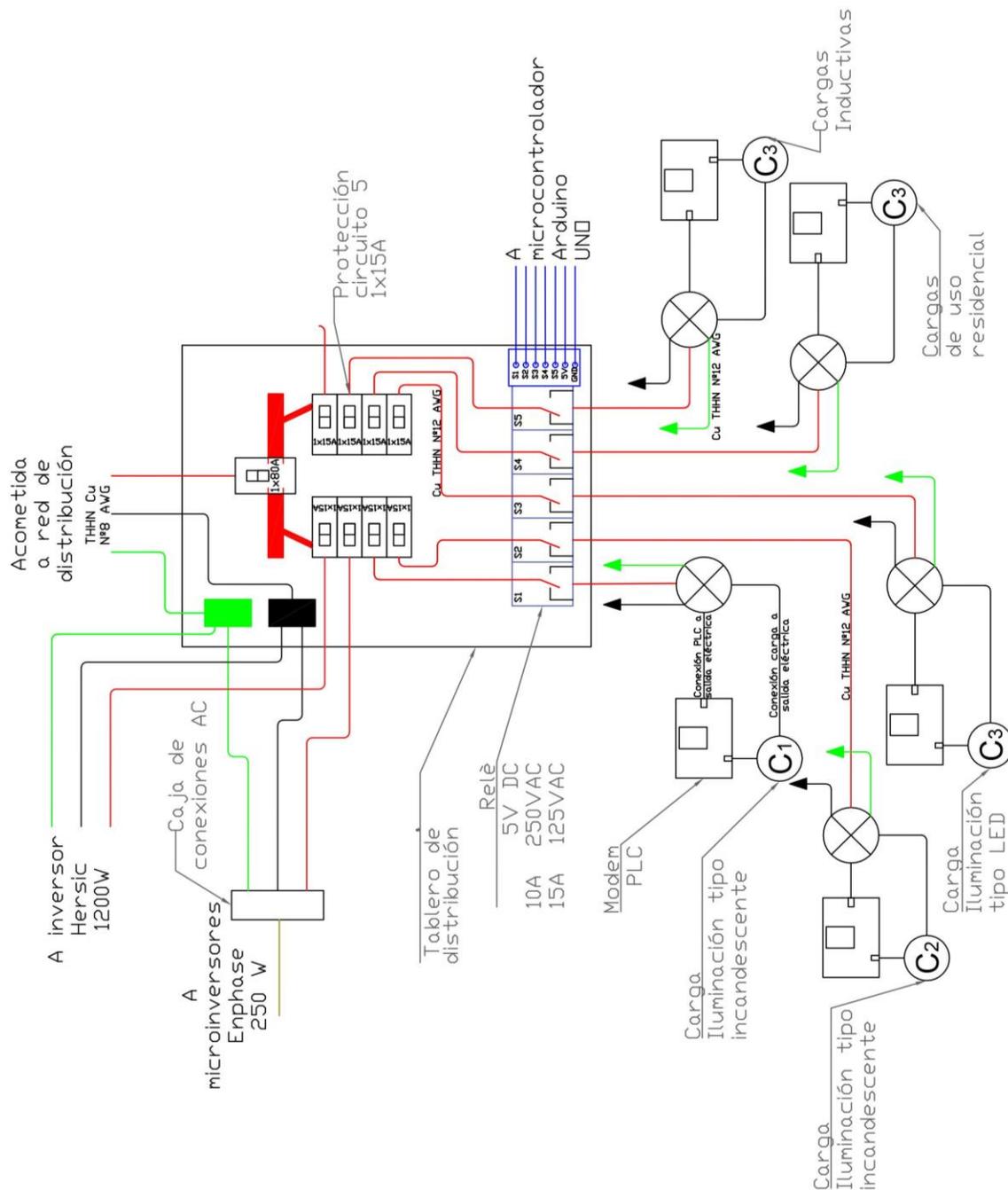


Figura 4-7. Plano de conexión de cargas y módulos TDMSPCKITV4-CEN PLC.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4-8 se muestra el render 3D del diseño de la mesa de trabajo del sistema experimental de respuesta a la demanda, comunicación por la línea activa de potencia PLC y conexión de sistemas de generación solar fotovoltaica.

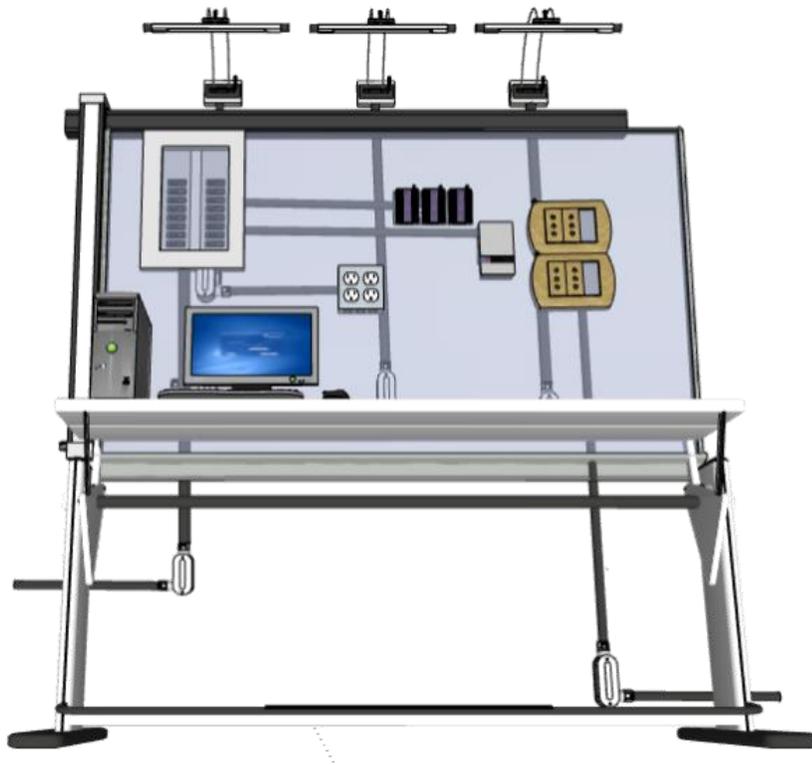


Figura4-8. Render 3D de la mesa de trabajo del sistema de respuesta activa de la demanda. Fuente. Elaboración propia

4.1.1 Estrategias de control para el sistema experimental de respuesta a la demanda

El diseño propuesto cuenta con dos interfaces de control de cargas, basados en servicios de respuesta activa de la demanda, donde el control y las variables de entrada son gestionadas por un agregador de servicios de respuesta activa de la demanda. Los programas planteados se basan en los escenarios descritos en la sección 3.2, El primer programa plantea una estrategia de desconexión de cargas para controlar la frecuencia del sistema, el segundo programa plantea un control directo de cargas y recursos de generación solar fotovoltaicos, para el traslado de consumo y favorecer el ingreso de generación solar fotovoltaica.

Estrategia de control escenario 1. Control de cargas para el control automático de la frecuencia.

La interfaz del programa de control para el control automático de la frecuencia permite realizar desconexiones automáticas de cargas, cuando ocurren cambios en la frecuencia

del sistema de potencia según las etapas descritas en el caso de estudio; la interfaz cuenta con diferentes espacios, en los que el usuario puede accionar diferentes ensayos y observar la frecuencia del sistema eléctrico, los pilotos de control de la etapa de desconexión, el tiempo transcurrido de la falla y la gráfica del comportamiento de la frecuencia.

La estrategia de control tiene como variable de entrada la frecuencia del sistema eléctrico, y el consumo de energía eléctrica de las cargas, establecido como la energía consumida por la demanda, en la figura 4-9 se presenta el diagrama de bloques de la estrategia de control para el programa de desconexión de cargas del sistema experimental de gestión activa de la demanda.

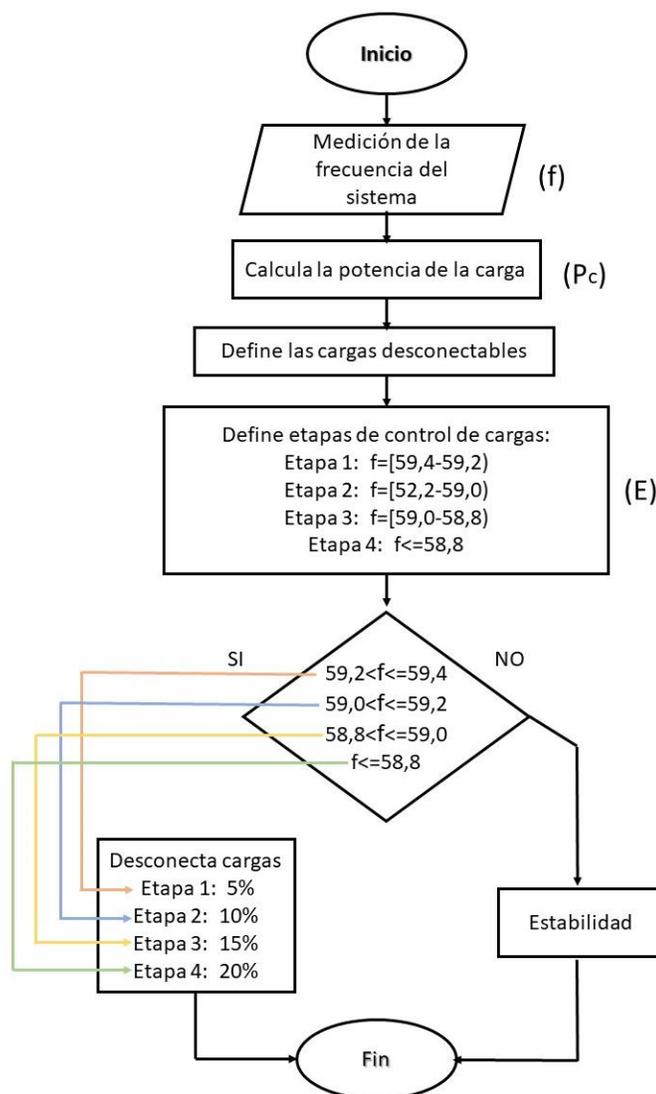


Figura 4-9. Flujograma de la estrategia para el programa de limitación automática de cargas para el control de la frecuencia. Fuente. Elaboración Propia.

En la estrategia se realiza una comparación de la frecuencia respecto a cuatro rangos definidos como etapas, para los cuales se toma una decisión de desconexión de cargas como se observa en el flujograma propuesto, cuando la variable “f” está dentro del valor de alguno de los rangos establecidos a cada una de las etapas se efectúa la acción asociada.

La interfaz del programa de limitación automática de cargas para el control de la frecuencia diseñada en el software LabVIEW®, el diagrama de bloques de la programación puede consultarse en el anexo: A. Guía para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda eléctrica. Por otro lado, en las figuras 4-10 y 4-11, se presenta la interfaz gráfica del programa, donde se pueden observar los botones y gráficas interactivas de la práctica.

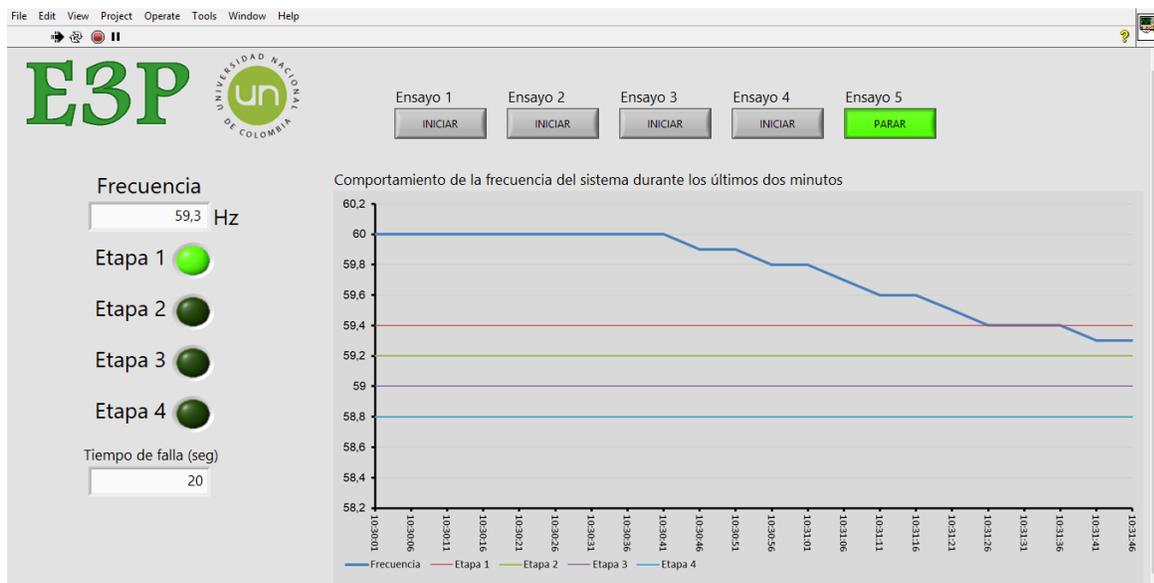


Figura 4-10. Interfaz gráfica de limitación automática de cargas para el control de baja frecuencia. Fuente. Elaboración Propia.

En la figura 4-10 se muestra el ambiente de interacción virtual de la estrategia propuesta para el control de la frecuencia con desconexión automática de cargas; en esta interfaz se pueden observar diferentes espacios, en la parte superior izquierda se muestra la frecuencia del sistema, de bajo de este registro se observa un panel de pilotos de control que indica la etapa de desconexión de cargas y en la parte inferior izquierda se presenta el tiempo que el sistema ha estado sometido a desconexiones de carga.

En el área superior derecha se encuentran los botones para la ejecución de cada uno de los cinco ensayos que se pueden realizar en la interfaz.

A la derecha de la interfaz se presenta la gráfica del comportamiento de la frecuencia del sistema en los últimos dos minutos de operación, el eje horizontal refiere la hora de la toma

del dato y el eje vertical muestra el valor de la frecuencia, en la gráfica también se muestran cada una de las etapas.

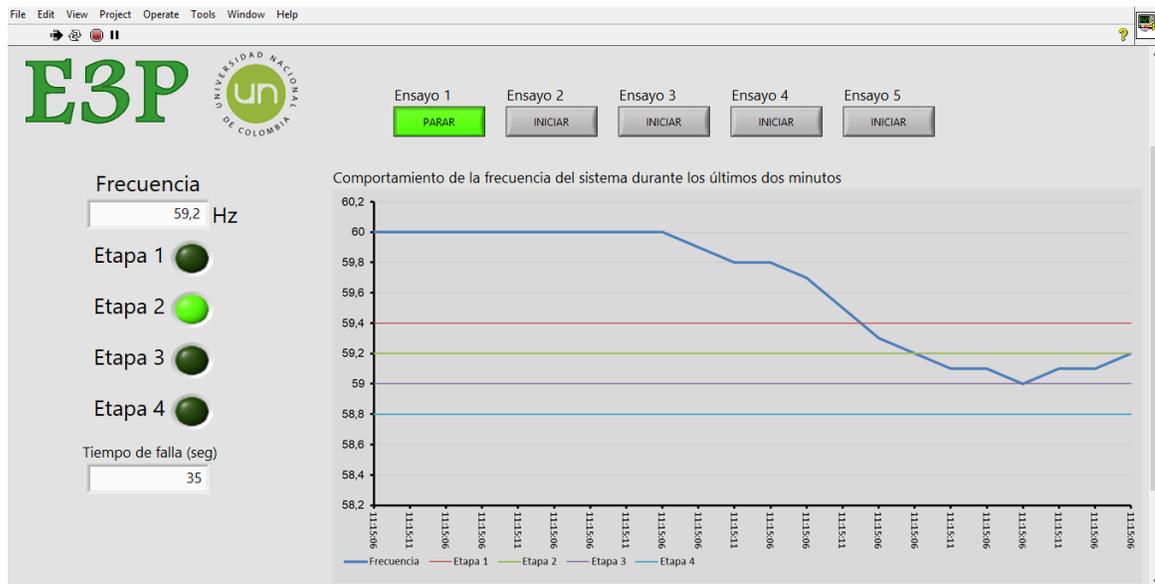


Figura 4-11. Interfaz gráfica control de frecuencia. Fuente. Elaboración Propia.

En la figura 4-11 se observa un escenario en el que el sistema se encuentra en la etapa 2 de desconexión de cargas, con una frecuencia de 59,2Hz.

En el anexo “Guía para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda eléctrica” se explica de manera detallada el inicio, manejo y salida segura de la interfaz.

Estrategia escenario 2. Desplazamiento de picos de consumo para el aplanamiento de la curva de demanda y la integración de generación distribuida.

Esta interfaz permite al operador definir umbrales de potencia a las cargas y limitar su consumo de forma automática, dependiendo de las condiciones del sistema eléctrico y la generación en tiempo real de un sistema de generación solar fotovoltaico; hecho por el cual esta interfaz cuenta con dos espacios principales, en la ventana superior se puede visualizar la curva de demanda de energía y definir el umbral de potencia para los usuarios, la otra grafica muestra la capacidad de generación solar fotovoltaica instalada por los usuarios y su generación de energía en tiempo real.

La estrategia de control tiene como variables de entrada el consumo de energía de los usuarios, establecido como la energía consumida de la red de distribución menos la generación de energía solar fotovoltaica de su propiedad, el operador de red define según los eventos del sistema eléctrico y el comportamiento de la curva de demanda los límites de potencia a los usuarios, con lo que se realiza una comparación que define la acción de

control respecto a las cargas de los usuarios, en la figura 4-12 se presenta el flujograma con la estrategia de control.

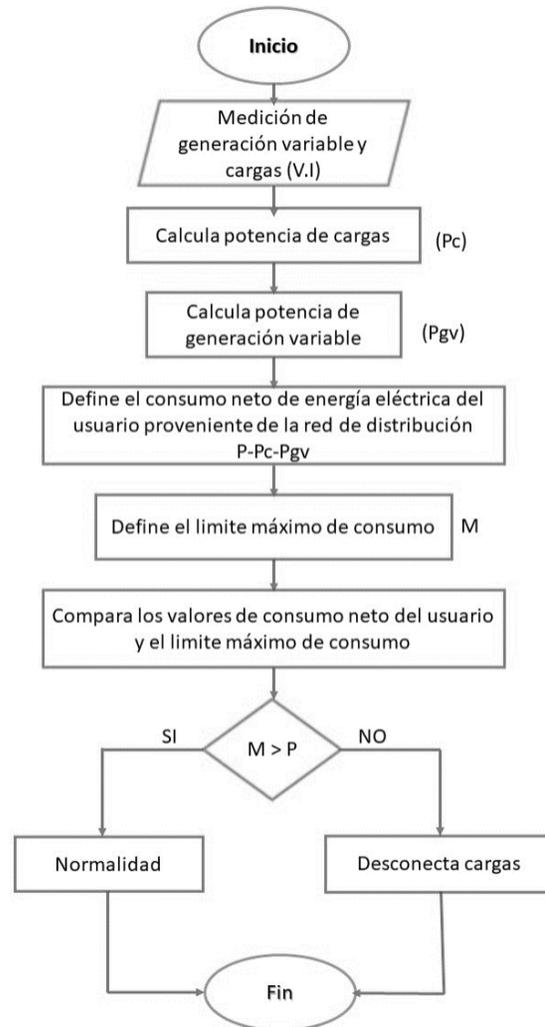


Figura 4-12. Flujograma de la estrategia para el desplazamiento de picos de consumo para el aplanamiento de la curva de demanda y la integración de generación distribuida. Fuente. Elaboración Propia.

El programa de control es montado en el software LabVIEW®, esta herramienta cuenta con un lenguaje de programación por bloques; la estructura del diagrama de bloques para el programa puede consultarse en el anexo A: Guía para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda eléctrica.

En las figuras 4-13 y 4-14 se presenta la interfaz gráfica del programa de control para el traslado de picos de consumo, en ellas se puede observar la gráfica principal de control y las gráficas de registro del sistema de generación solar fotovoltaico.

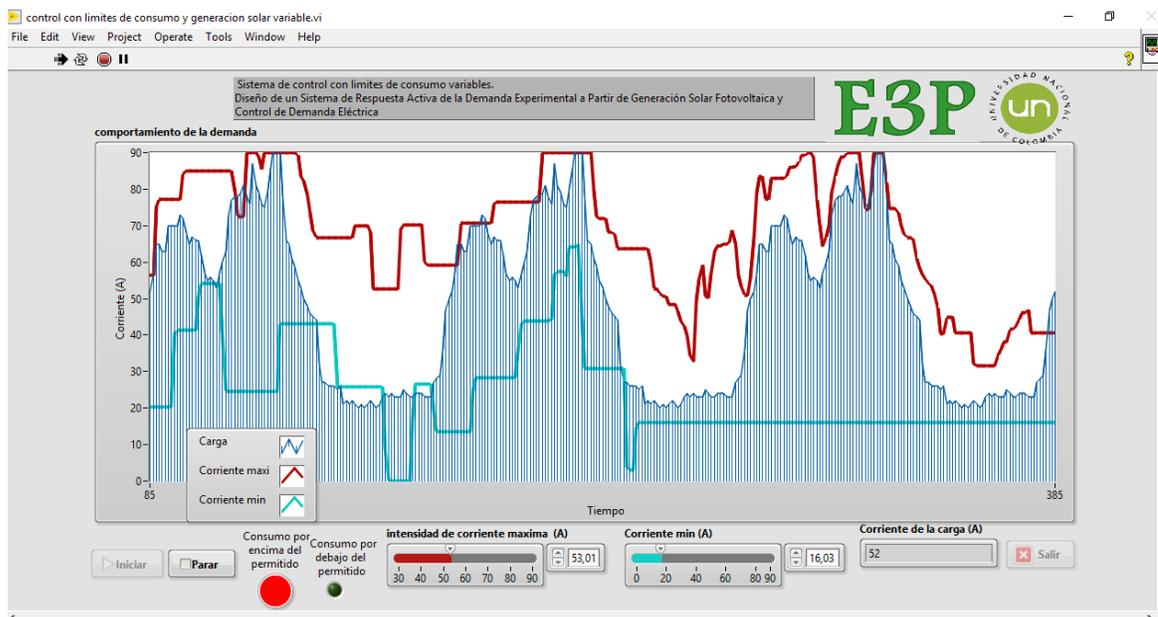


Figura 4-13. Gráfica principal de la interfaz del operador del programa para el desplazamiento de picos de consumo en LabVIEW®. Fuente. Elaboración Propia.



Figura 4-14. Registro del sistema de generación solar fotovoltaico de la interfaz del operador del programa control en LabVIEW®. Fuente. Elaboración Propia.

En la interfaz presentada en las figuras 4-13 y 4-14 se observan tres gráficas, La gráfica principal (figura 4-13), ubicada en la mitad superior, muestra una región resaltada en azul con líneas verticales que representa la energía eléctrica consumida por el usuario; una

línea roja que muestra los cambios en el punto máximo de consumo permitido por el operador del sistema de gestión; y una línea celeste que muestra el umbral mínimo de consumo requerido por el operador del sistema de respuesta activa de la demanda. Los cambios en los umbrales máximos y mínimos de consumo de energía eléctrica son realizados desde la misma interfaz del sistema, aumentando o disminuyendo las barras horizontales que se encuentran debajo de esta gráfica; además, cuenta con dos alarmas que le indican al operador que se han superado los niveles de consumo requeridos (los dos círculos ubicados bajo esta gráfica) la alarma roja indica que la carga está sobrepasando el límite máximo establecido y la alarma verde avisa que el usuario está por debajo del consumo mínimo de energía eléctrica por lo que debe conectar cargas, además, la interfaz cuenta con botones de inicio, pausa y aborto de la práctica de respuesta a la demanda(ubicados bajo la gráfica, “Iniciar”, “Parar” y “Salir”).

En la parte inferior de la interfaz se muestran dos gráficas (figura 4-14), estas muestran el comportamiento de generación variable asociada al sistema, en este caso el usuario tiene instalados 6 paneles solares fotovoltaicos de 270 Wp, y en las gráficas se muestra la curva de generación de energía eléctrica (a la izquierda) y la potencia consumida por el usuario de este recurso energético (a la derecha).

En la parte inferior de la interfaz (figura 4-14), se encuentran dos botones, desde el primero (“Numero de paneles conectados”) el operador del sistema puede controlar la generación solar fotovoltaica del usuario gestionado energéticamente, gracias a la comunicación con los nodos de servicio PLC conectados al inversor o microinversores instalados al sistema de paneles solares. El botón gris con verde ubicado al final de la interfaz tiene la capacidad de conectar o desconectar el sistema de generación de energía eléctrica del usuario.

En el anexo “Guía para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda eléctrica” se explica de manera detallada el inicio, manejo y salida segura de la interfaz.

4.1.2 Caracterización del sistema de comunicación PLC

Power Line Communication o PLC es una tecnología de comunicación que usa las líneas eléctricas como medio, también conocido como PLT (Power Line Telecommunications) y DPL (Digital Power Line) en sus inicios(Cañon de Antonio, 2016).

Esta tecnología de comunicación tiene como principio la modulación de una señal portadora de alta frecuencia desde un transmisor; la cual se acopla a la línea de transmisión eléctrica y es enviada a través de ella a un receptor.

Mediante la tecnología PLC, se puede tener acceso a servicios de telecomunicación, convirtiendo las salidas eléctricas en puntos de conexión de comunicación; la integración

de PLC en los sistemas eléctricos permite realizar la medición de magnitudes físicas, consumo de energía u otros parámetros eléctricos, y el posterior envío de la información.

Una ventaja de la implementación de PLC en las redes eléctricas es el uso de las mismas líneas que componen la red, lo que evita todos los inconvenientes asociados a la construcción de tendidos de red adicionales.

La tecnología PLC se clasifica en PLC de banda ancha (Broadband Power line communication) y PLC de banda angosta (Narrowband Power line Communication). En la Tabla 4-1 se muestra la comparación de estos dos tipos de PLC en términos de frecuencia, velocidad y modulación.

Característica	PLC banda angosta	PLC banda ancha
Frecuencia	Hasta 500KHz	Más de 2 MHz
Velocidad de datos	Hasta 200Kbs	Más de 1 Mbs
Modulación	FSK, SSBPSK	OFDM

Tabla 4-1. Comparación entre tecnología PLC de banda ancha y PLC de banda angosta.
Fuente: Texas Instruments.

La elección del tipo de tecnología PLC a instalar en las redes eléctricas se ajusta al escenario de aplicación y sus características, cuestiones técnicas y aspectos regulatorios y comerciales. El ahorro que supone usar con la infraestructura eléctrica existente debe sopesarse contra el costo de despliegue de módems repetidores y acopladores que mejoren el índice de pérdidas. Aunque no se tienen valores universales para las pérdidas, ya que muchos factores influyen en ella (cables aéreos o subterráneos, tipo de cables, la carga, el tiempo, etc.), los valores típicos de pérdida por kilómetro para el canal de PLC en dB se presentan en la tabla 4-2.

Nivel de tensión	Frecuencia = 100 kHz (dB)	Frecuencia = 10 kHz (dB)
Baja tensión	0,5 - 3	160 - 200
Media tensión	0,5 - 1	30 -50

Tabla 4-2. Valores típicos de pérdidas en dB/km. Fuente: Texas Instruments.

En la figura 4-15 se muestra la matriz FODA para la implementación de la tecnología de comunicación PLC en sistemas de distribución, en esta se identifican Fortalezas (factores críticos positivos propios del sistema), Oportunidades (aspectos externos positivos),

debilidades, (factores críticos negativos que se deben eliminar o reducir) y Amenazas, (aspectos negativos externos que obstaculizan alcanzar el objetivo).

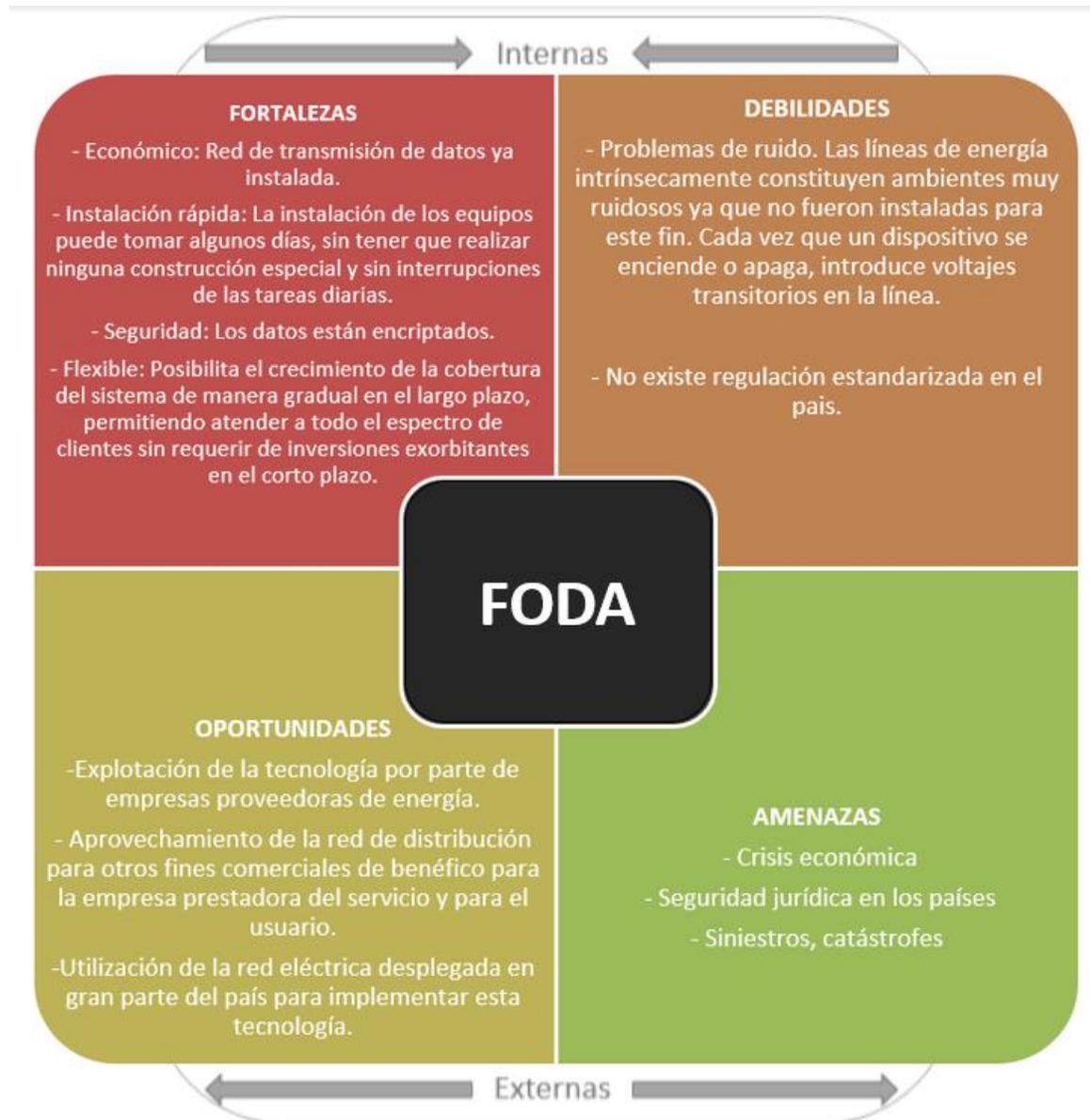


Figura 4-15. Matriz FODA de la comunicación por la línea activa de potencial PLC.

Fuente. Elaboración Propia.

Los equipos de comunicación PLC elegidos en el diseño son los módems de Texas Instrumentes TMDSPCKIT-V4 los cuales operan como puntos de servicio y el concertador de datos AM3359 de la misma casa matriz que ocupa el papel punto base; los kit de módems PLC TMDSPCKIT-V4 se componen una tarjeta de conexión y un módulo (SOM) que permite la comunicación en la banda de frecuencia angosta en un rango entre 35,9 y 450 kHz, dependiendo el protocolo utilizado; en la tabla 4-3 se presentan las bandas de

comunicación compatibles con estos equipos de comunicación relacionando su rango de frecuencia. Los principales usos comerciales de los equipos seleccionados según el fabricante son el control de iluminación, motores e inversores de generación solar.

Banda	CENELEC				FCC			ARIB	
	A	B	BC	BCD	Low	High	Full	Low	High
Frecuencia (kHz)	35,9 - 90,6	98,4 - 121,9	98,4 - 137,5	98,4 - 146,9	145,3 - 314	314 - 478,1	145,3 - 478,1	10 - 200	200 - 450

Tabla 4-3. Bandas de comunicación compatibles con los módems PLC TMDSPCKIT-V4.
Fuente: Texas Instruments

Los puntos de servicio adquieren y envían las señales de la medida de consumo de energía eléctrica de cada una de las cargas, por la línea de potencia al punto base, este a su vez se comunica con el software de control en LabVIEW® por los puertos RS32 y ethernet.

En la figura 4-16 se presenta el modem de comunicación PLC TMDSPCKIT-V4, en la figura 4-17 se muestra el módulo SOM y en la figura 4-18 la Tarjeta de conexión que componen el kit.



Figura 4-16. Kit de comunicación PLC. Fuente: Texas Instruments.

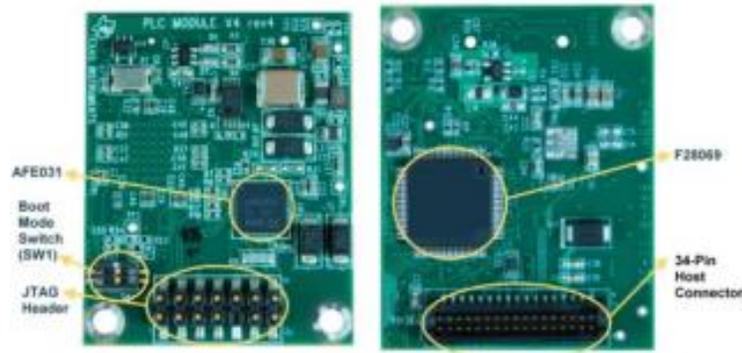


Figura 4-17. Módulo SOM. Fuente: Texas Instruments.

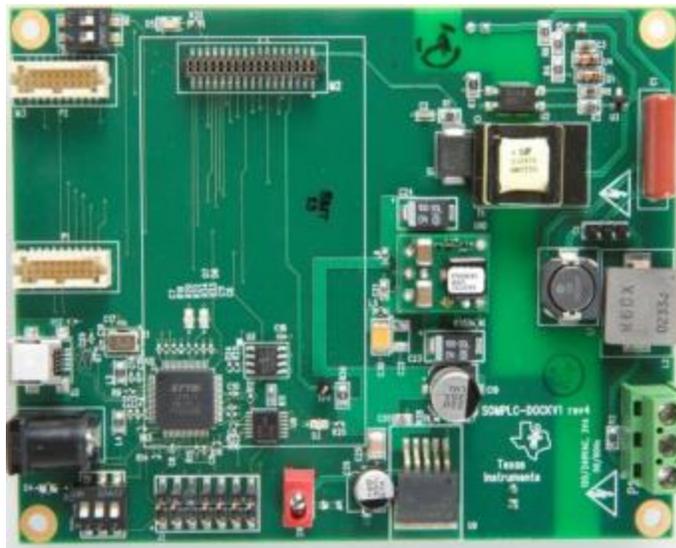


Figura 4-18. Tarjeta de conexión. Fuente: Texas Instruments.

El kit de desarrollo de Texas Instruments PLC TMDSPCKIT-V4 contiene los siguientes componentes principales y características compatibles:

- Microcontrolador Texas Instruments F28PLC83
- Placa de acoplamiento que incluye el circuito de conexión y la fuente de alimentación
- Velocidades de transmisión de datos de 5.592 kbps a 34.16
- Número de portadores de datos usados entre 36 y 72
- Modulación diferencial de fase (ROBO / DBPSK / DQPSK / D8PSK)
- Intercalado de bits para la reducción del efecto del ruido

- Protocolo para detección de errores
- Transmisión de datos aleatorios para potencia uniforme distribución
- Máscara de tono para la coexistencia de SFSK
- Mapeo de tonos adaptativos y control de potencia de transmisión
- Control de ganancia automático
- Detección de cruce por cero
- Puerto RS-232 para diagnóstico
- LED y puntos de prueba para depuración de firmware y hardware
- USB / JTAG para descarga de firmware personalizado

El uso de los diferentes componentes, salidas y entradas de los módulos y las conexiones necesarias de para la transmisión de datos por la línea activa de potencia con estos equipos se describe de en el Anexo D. “Guía práctica de laboratorio, operación del kit TMDSPCKITV4-CEN y comunicación por la línea de potencia”.

4.1.3 Caracterización del sistema de generación solar fotovoltaico

El sistema experimental de respuesta activa de la demanda propuesto en el presente documento está diseñado teniendo en cuenta las particularidades climatológicas de la ciudad de Manizales, donde se ubica el Campus La Nubia de la Universidad Nacional de Colombia, lugar donde se proyecta su instalación.

El indicador climatológico más importante a tener en cuenta es la radiación solar, debido a que el módulo de laboratorio cuenta con un sistema de generación solar fotovoltaico, en la figura 4-19, se presenta el mapa de radiación solar que el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, publica en el aplicativo virtual “Atlas Interactivo”, en este Manizales se encuentra en una región con un promedio de radiación solar día entre 4 y 4,5 kWh/km².

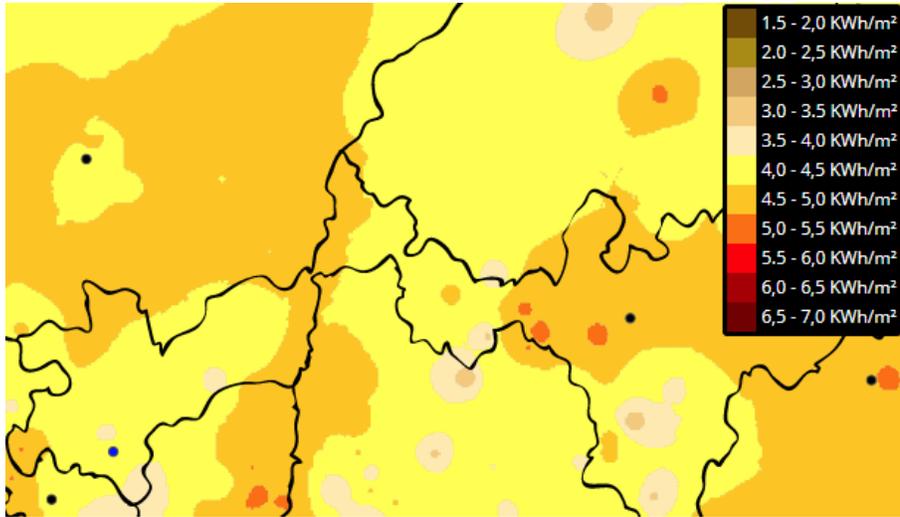


Figura 4-19. Mapa de radiación solar promedio día para Caldas (a la derecha inferior).
Fuente: Atlas interactivo IDEAM.

El comportamiento promedio de la radiación solar en la ciudad de Manizales varía durante el año, como se puede observar en la figura 4-20, los datos de tomados para la elaboración de esta grafica fueron tomados por un periodo de diez años entre el 1 de mayo del año 2005 y el 31 de diciembre de 2015 en la estación meteorológica EMAS, ubicada a 2207 metros sobre el nivel del mar en la latitud 5,09 y longitud -75,51.

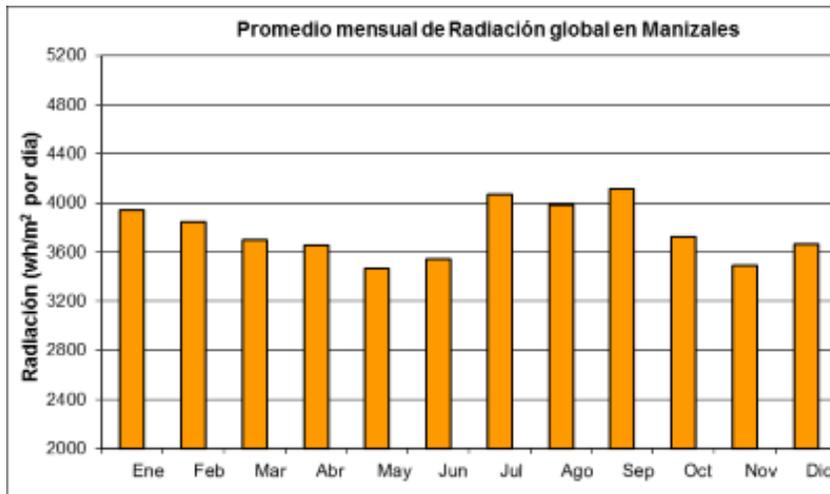


Figura 4-20. Promedio mensual de radiación solar en Manizales. Fuente: IDEAM.

En el propósito de estudiar el escenario de control de cargas propuesto para trasladar picos de consumo a franjas horarias con penetración de generación solar fotovoltaica, es importante conocer el comportamiento promedio de la radiación solar día en la ciudad de Manizales, en la tabla 4-4 se presenta el promedio horario de radiación solar registrado por el IDEAM con el que se construye la curva promedio radiación solar que se observa en la figura 4-21.

ESTACION EMAS (MANIZALES)		PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACION (Wh/m ²)											
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
0-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
2-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
3-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
4-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
5-6	0,0	0,0	0,1	0,5	1,3	0,9	0,4	0,1	0,8	1,2	1,0	0,1	
6-7	29,8	26,8	35,9	51,3	58,1	57,9	54,9	49,5	64,6	65,8	67,0	45,4	
7-8	170,4	151,8	158,3	187,8	198,3	188,6	195,0	194,2	226,5	219,4	219,6	189,2	
8-9	336,7	299,8	294,0	328,6	338,9	317,3	341,7	351,8	390,6	359,1	356,0	309,9	
9-10	449,5	411,3	409,9	425,2	428,2	425,1	452,6	477,3	498,4	470,4	421,9	413,6	
10-11	520,4	484,5	472,1	472,1	450,7	436,8	495,9	508,9	556,7	510,1	475,0	477,8	
11-12	524,2	504,0	481,8	489,0	435,7	427,9	507,1	483,0	517,3	509,9	481,2	491,4	
12-13	486,7	496,1	484,3	466,7	404,5	422,0	489,4	487,6	496,0	472,0	446,0	475,9	
13-14	488,5	481,6	462,8	418,3	377,4	407,4	486,5	452,3	459,0	414,3	396,3	438,0	
14-15	421,1	421,2	384,8	361,0	316,1	361,6	436,0	407,2	395,9	330,6	306,0	390,5	
15-16	295,6	327,4	279,5	263,3	257,0	281,8	337,2	317,3	294,7	233,0	205,0	265,0	
16-17	171,4	187,2	170,7	151,0	147,7	166,6	208,4	192,2	174,8	115,6	99,7	142,1	
17-18	48,5	55,8	60,3	42,6	47,0	51,3	67,4	60,9	41,5	19,4	15,5	28,1	
18-19	0,7	1,7	1,3	0,4	0,2	0,8	1,7	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	
19-20	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
20-21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Acumulada diaria	3943,7	3849,3	3695,8	3657,8	3461,1	3546,0	4074,1	3983,2	4117,1	3720,8	3490,2	3667,0	



Tabla 4-4 Promedio horario de radiación solar Manizales. Fuente: IDEAM

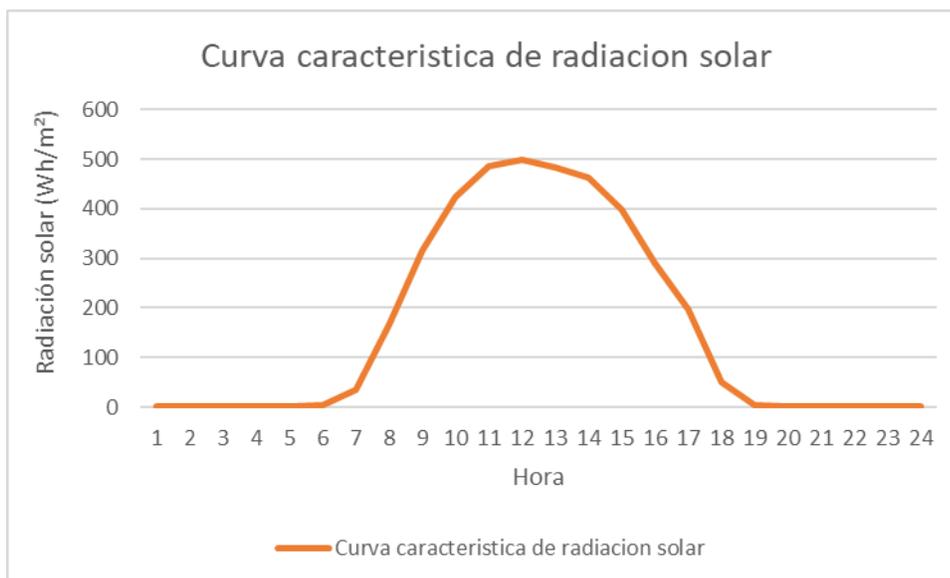


Figura 4-21. Curva de radiación solar promedio día. Fuente: Elaboración propia, basada en datos meteorológicos del IDEAM.

El sistema de generación solar fotovoltaico propuesto en el diseño del módulo experimental de respuesta activa de la demanda, se compone de seis paneles solares de 270 Wp, tres micro inversores de 250 W y un inversor de 1200W. En la tabla 4-5 se presentan las características de los equipos de inversión.

Inversor	Micro- inversor enphase	Inversor-Hersic
Referencia	Micro- inversor M250-60-2LL	Inversor solar GRID- TIE JC-H09702 1500-TL-LA
Tensión DC máxima de entrada	48 V	500 V
Intervalo de funcionamiento	16 - 48 V	100 - 500 V
Potencia máxima de salida	250 W	1650 W
Potencia de salida nominal	240 W	1200 W
Intervalo de temperatura ambiente	-40 a 65 ° C	-25 a 60° C
Rendimiento	96,50%	97%
Factor de potencia	>0,95	1

Tabla 4-5. Características de los equipos de inversión. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de generación solar fotovoltaico fue adquirido gracias al proyecto 39053, financiado por la Dirección de Investigación y Extensión de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, se encuentra en funcionamiento desde el 24 de junio del año 2018, en la gráfica de la figura 4-22 se muestra el comportamiento de un día de funcionamiento promedio, con datos tomados del sistema de generación fotovoltaico entre el día primero de julio de 2018 y el 30 de junio de 2019.

Para la modelación de la curva, fueron tomados datos cada 5 minutos, desde las cero horas del primero de julio de 2018 hasta las veinticuatro horas del 30 de junio de 2019, lo que equivale a un total de 105.120 datos, 288 datos por día; se obtuvo un promedio de los 365 datos tomados en cada registro de los 288 al día, con lo que realizo la gráfica presenta en la figura 4-22.

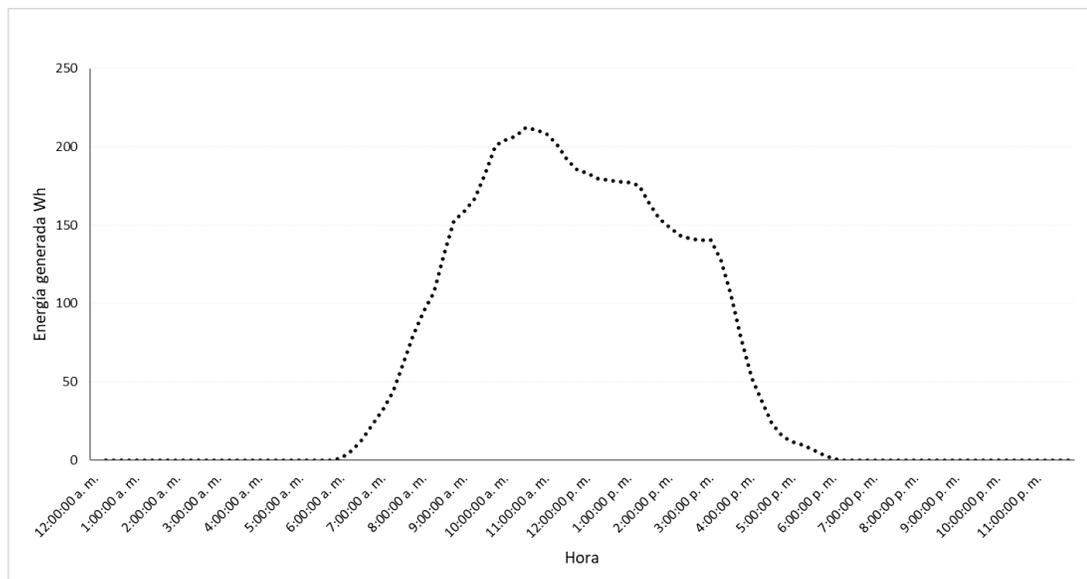


Figura 4-22. Curva de generación solar promedio día. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4-23 se muestra la gráfica de la energía generada promedio día durante cada uno de los meses en los que se tomaron los registros.

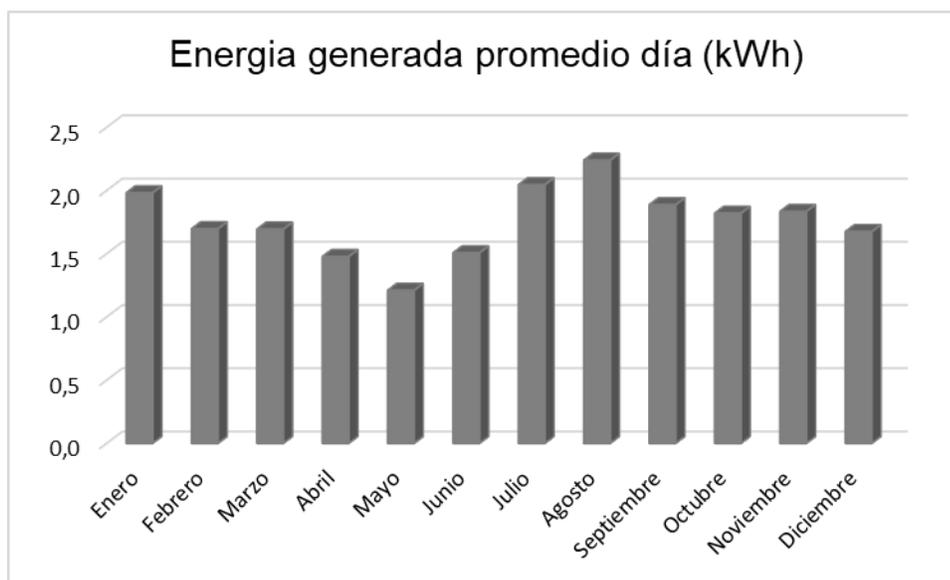


Figura 4-23. Generación del sistema solar fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4-24 se presenta la gráfica comparativa entre las curvas de radiación solar y generación de energía solar obtenidas en la caracterización del perfil de radiación y generación solar fotovoltaica registrada.

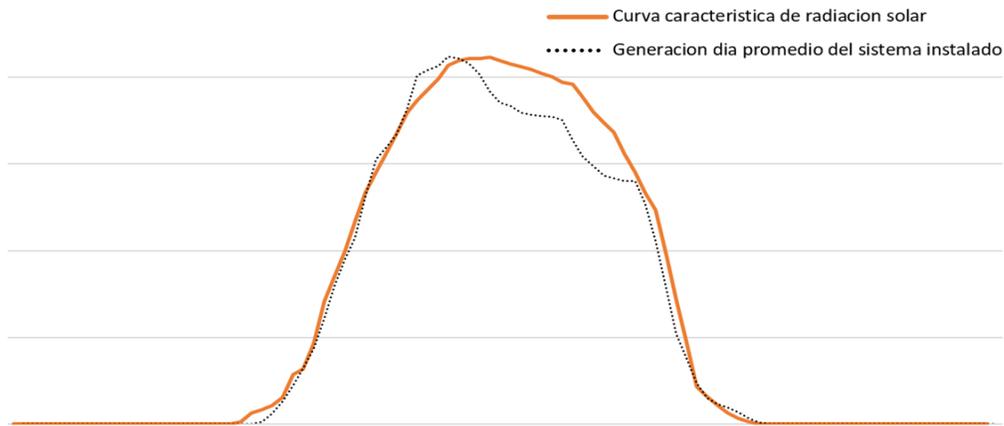


Figura 4-24. Grafica comparativa entre la curva de radiación solar y generación PV.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4-25 se presenta la gráfica comparativa entre el comportamiento de la generación de energía solar promedio de cada mes registrado por el sistema solar fotovoltaico instalado y el promedio mensual de radiación en Manizales según los registros del IDEAM en la estación EMAS; en esta grafica se puede observar un comportamiento similar con picos de rendimiento en los meses de enero, julio y agosto; en ambos registros se observa menor valor en el mes de mayo; no obstante difieren claramente en el mes de agosto, en el que el rendimiento del sistema de generación solar fotovoltaico aumenta respecto al mes de julio, mientras que en los registros de radiación solar se nota un leve descenso. Las diferencias que se muestran en la gráfica pueden ser causadas por los datos con los que se cuenta, toda vez que se tienen diez periodos de registro de radiación solar contra un solo año de datos del sistema solar fotovoltaico.

Comportamiento de la generación registrada versus la radiación solar día promedio para cada mes.

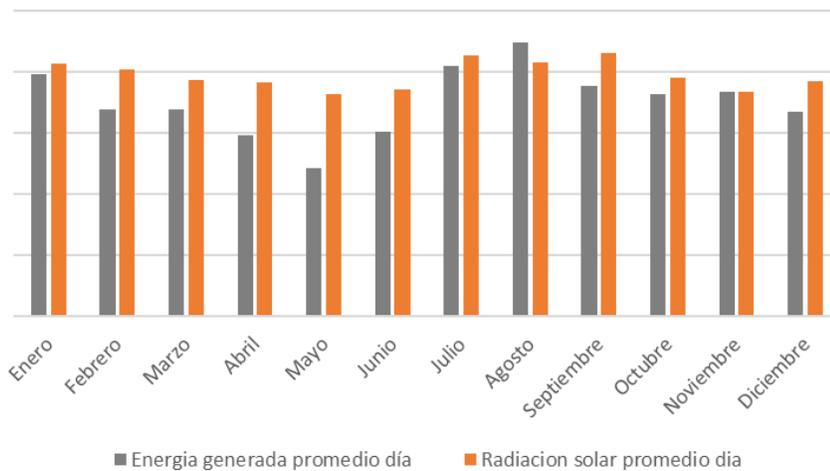


Figura 4-25. Grafica comparativa entre la generación de energía solar fotovoltaica día promedio para cada mes y el promedio mensual de radiación solar en Manizales. Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Caracterización de las cargas controladas por el sistema experimental de respuesta activa de la demanda

Las cargas controladas por el módulo diseñado para prácticas de experimentación en temas de respuesta activa de la demanda son de diferentes tipos, iluminación, resistivas e inductivas, que se describen a continuación:

- Bombillo incandescente 100W
- Lámpara Fluorescente T5 3500 Lúmenes 65w E27 Luz Fría
- Bombillo de LED 3900 Lúmenes 12w E27 Luz Blanca
- Motor universal (licuadora)
- Resistencia de potencia 3kW
- Motor de nevera
- Motor de inducción Siemens 5HP 4 polos 1LE0142-1AB86-4AA4-Z D80+D81
- Motor de inducción Siemens 10HP 4 polos 1LE0142-1CB26-4AA4-Z D80+D81
- Motor de inducción Siemens 15HP 4 polos 1LE0142-1CB86-4AA4-Z D80+D81

Con esta variedad de cargas se busca conocer el comportamiento de cargas de tipo residencial e industrial sometidas a servicios de demanda activa.

4.1.5 Caracterización de los actuadores de control del sistema experimental

El control de cargas del módulo de laboratorio de respuesta activa de la demanda se ejecuta con relés 5VDC-250VAC monofásicos de 10A, los cuales se accionan mediante señales que envía el software de control por medio de una comunicación USB al Arduino.

En la figura 4-26 se muestra la conexión del sistema Arduino a los relés y el equipo de cómputo en el que se ejecuta la interfaz.

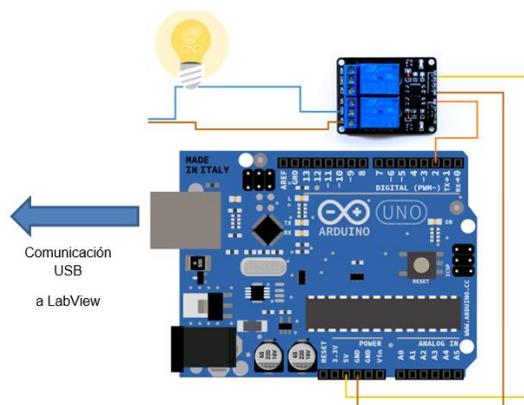


Figura 4-26. Conexión del microcontrolador Arduino. Fuente: Elaboración propia.

El Arduino debe ser programado desde el software ArduinoIDE con el siguiente código para establecer comunicación con la interfaz de control:

```
    #include <Wire.h>
    #include <SPI.h>
    #include <Servo.h>
    #include "LabVIEWInterface.h"
    void setup ()
    {
        syncLV();
    }
    /
    void loop()
    {
        checkForCommand();
        if(acqMode==1)
        {
            sampleContinuously();
        }
    }
```

Arduino es un microcontrolador de una sola placa diseñado para hacer que el proceso de uso de la electrónica en proyectos multi académicos sea más accesible. Fue inventado por primera vez a fines de 2005 y el hardware consiste básicamente en hardware de código abierto (from(Arduino), 2016). Dieciséis versiones del hardware Arduino (placas) se han producido comercialmente hasta la fecha, en este proyecto se utiliza el Arduino UNO.

Los Arduino son ampliamente utilizados para todo tipo de soluciones en todo el mundo, su popularidad ha sido impulsada por la simplicidad de su uso y la gran cantidad de sensores y bibliotecas disponibles para ampliar las capacidades básicas de estos controladores. En la última década ha sido testigo y participe de una oleada de ingeniería de software en el concepto de internet de las cosas IoT (The Internet of Things) (Barbon, Margolis, Palumbo, Raimondi, & Weldin, 2016).

4.2 Análisis de implementación

En esta sección se presenta el análisis de factibilidad técnica y la evaluación económica de la implementación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda en el campus La Nubia de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

4.2.1 Análisis técnico de implementación

El sistema experimental propuesto, es diseñado teniendo en cuenta las características técnicas y tecnológicas de las instalaciones dispuestas para el laboratorio de Gestión de la Energía del grupo de investigación E3P en el bloque S del campus La Nubia, este espacio cuenta con un área total de 90 m², dividido en dos ambientes, la sala principal, en la que se proyecta instalar el sistema de respuesta activa de la demanda propuesto y la sala de control y SCADA donde se opera el sistema de medida centralizada, controla el sistema de iluminación DALI y realiza el monitoreo energético del campus La Nubia.

En la figura 4-27 se muestra la planta arquitectónica del laboratorio de gestión de la energía, la sala principal dispone ocho puestos de trabajo en un área de 53 m², cuenta con un acceso interno a la sala de control y SCADA, espacio del laboratorio que dispone de un área 37 m² y capacidad locativa para cuatro estaciones de trabajo, además de una ubicación privilegiada al lado de la subestación del edificio separada por una estructura de vidrio que permite el contacto visual.

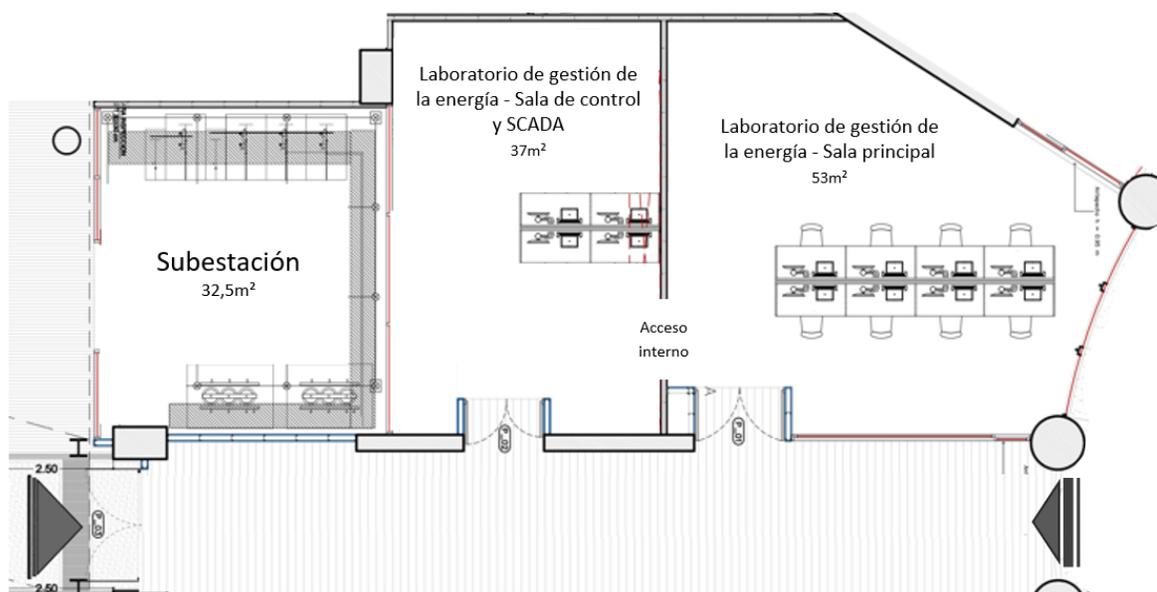


Figura 4-27. Planta arquitectónica del laboratorio de gestión de la energía. Fuente: Elaboración propia.

La ubicación del módulo experimental de respuesta activa de la demanda en el laboratorio de gestión de la energía favorece su expansión, gracias a la facilidad que supone contar con los sistemas de adquisición de información del sistema eléctrico del edificio, principalmente de las cargas de iluminación, las cuales cuentan con tecnología de control DALI (Digital Addressable Lighting) un protocolo estándar compuesto por un accionador de salidas de iluminación, sensores de ocupación y sensores fotoeléctricos, con capacidad de supervisar y controlar cada dispositivo de iluminación sin necesidad de cableado entre el controlador y los dispositivos.

El sistema de iluminación DALI puede conectarse a un sistema de automatización de edificios dando lugar a una herramienta de gestión de la energía y mantenimiento, si se programa el dispositivo para registrar el número de horas de funcionamiento de cada salida de iluminación junto con el número de ciclos de encendido y apagado. El personal de mantenimiento puede usar estos datos para reponer las lámparas en función de la disminución de los lúmenes y la vida media de las lámparas de cada dispositivo de iluminación. También es posible calcular el ahorro energético basándose en el tiempo que los dispositivos de iluminación pasan apagados.

En la figura 4-28 se presenta la ubicación del módulo de respuesta activa de la demanda en el laboratorio de gestión de la energía.

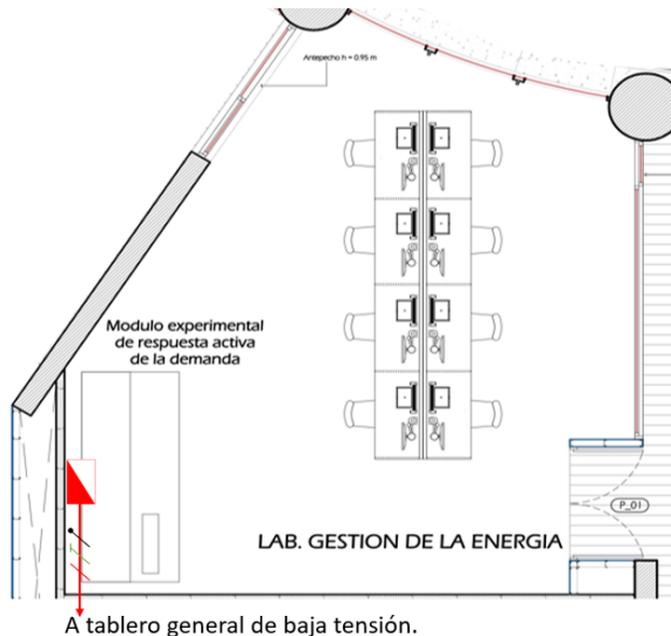
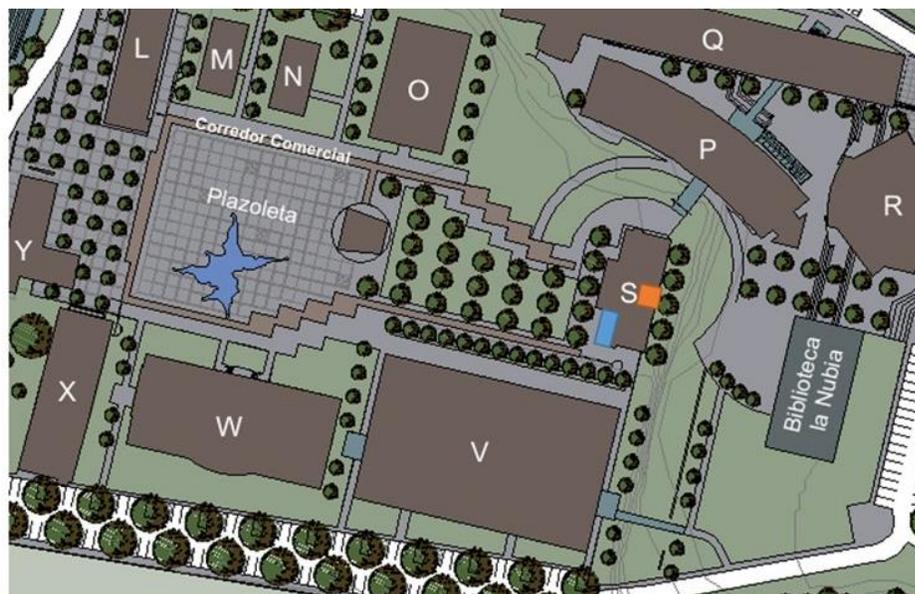


Figura 4-28. Ubicación del Módulo experimental en el laboratorio de gestión de la energía. Fuente: Elaboración propia.

El diseño propuesto se compone de un sistema de control de cargas y un sistema de generación solar fotovoltaico, cuyos paneles se ubicarán en el techo del ascensor del bloque S del campus La Nubia, lugar en el que se optimiza la eficiencia de generación y la

distancia al grupo de inversores ubicados en la mesa central del sistema experimental, obteniendo el menor índice de pérdidas posibles. En la figura 4-29 se muestra la vista en planta del campus La Nubia, en ella, la ubicación del laboratorio el arreglo de paneles fotovoltaicos, en la figura 4-30 se muestra el tramo en cable solar que conecta los paneles al grupo de inversores.



Ubicación paneles fotovoltaicos

Ubicación sistema experimental de respuesta activa de la demanda

Figura 4-29. Ubicación del Módulo experimental en el laboratorio de gestión de la energía. Fuente: Elaboración propia.

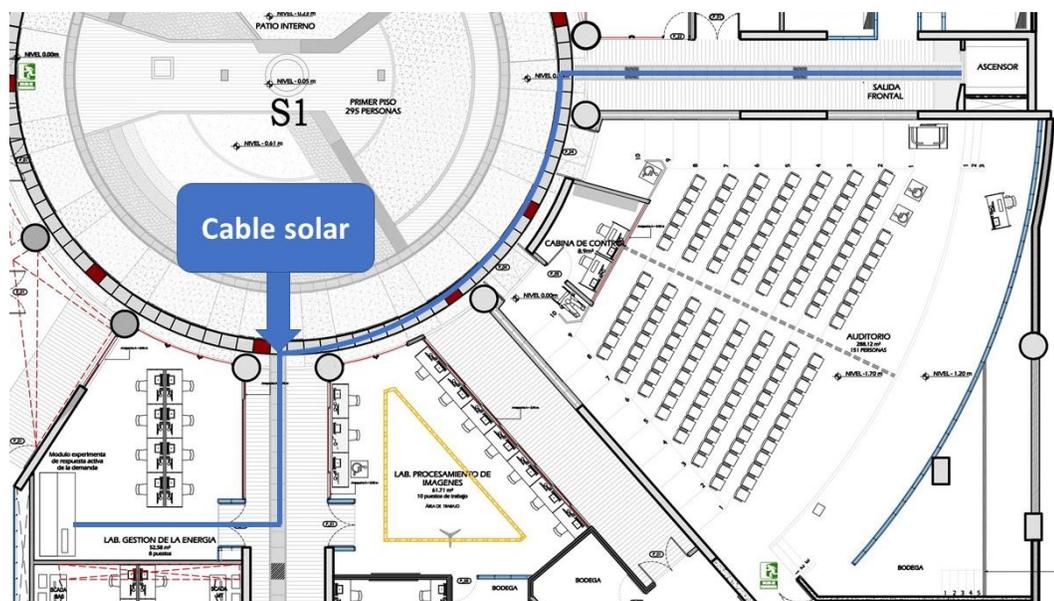


Figura 4-30. Ubicación del Módulo experimental en el laboratorio de gestión de la energía. Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones técnicas descritas en la presente sección son apropiadas para la instalación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda en el bloque S de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, toda vez que cuenta con un espacio apropiado, con puntos de conexión eléctrica, un lugar óptimo para la instalación del conjunto de paneles fotovoltaicos, puestos de trabajo suficientes y tecnologías de potencial integración al módulo de laboratorio, que impactaran de forma significativa en el crecimiento y robustez de las practicas académicas que los estudiantes e investigadores desarrollen.

4.2.2 Análisis económico de implementación

En esta sección se presentan un resumen económico del proyecto de implementación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda a partir de generación de solar fotovoltaica y control de cargas, del cual se presenta su diseño en el presente capitulo.

Generalmente se confunde la evaluación económica con el análisis el financiero, en el segundo caso se considera únicamente el flujo de dinero de un proyecto con el objetivo de considerar su rentabilidad en términos del flujo de caja. Mientras que en la evaluación económica se integran para su análisis tanto los costos monetarios como en los beneficios expresados en otras unidades, relacionadas con las mejoras en las condiciones de vida de un grupo. Podemos hablar entonces de rentabilidad o beneficios de tipo social(Cardona, 2005).

A continuación, se define la función social, costos, beneficios e indicador de evaluación:

Función social:

Promover la investigación en temas de redes inteligentes, gestión de cargas, generación solar fotovoltaica y análisis de en un espacio académico experimental de respuesta activa de la demanda. La contribución en el desarrollo investigativo de cada uno de estos temas está determinada tanto por sus desarrollos individuales; como por la identificación de desarrollos transversales al incorporar bases de datos, generación solar fotovoltaica, procesamiento de información e integración de inteligencia artificial en los procesos de gestión de la demanda.

Costos:

- Costos directos: Gastos de inversión en bienes, personal, formación, entre otras. Se relacionan directamente con las actividades y resultados planificados. En total los gastos directos ascienden a \$ 69.949.707 pesos.
- Costos indirectos: No están relacionados directamente con actividades o resultados. Se les suele llamar gastos de administración o de funcionamiento los costos indirectos del proyecto suman \$ 11.386.500 pesos.

- Costos de oportunidad: Es el costo en el que se deja de incurrir por seleccionar una alternativa y rechazar otra. En este caso se dejan de generar gastos por usos de software, herramientas de búsqueda bibliográfica y construcción de edificaciones, al elegir softwares de libre uso, bases de datos pagadas por la universidad y un espacio destinado al grupo de investigación E3P para la ejecución del proyecto.

Beneficios:

Los beneficios descritos para la evaluación económica del proyecto son de tipo social, que posteriormente serán cuantificados para realizar el cálculo de los indicadores de evaluación. A continuación, se presentan los beneficios que serán sujeto de la evaluación por su condición de cuantificación económica.

- El proyecto brinda a los estudiantes de pregrado y posgrado de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales espacios de experimentales para practicas académicas en cursos como Redes Inteligentes y Microrredes, Eficiencia Energética, Mercados de Energía, Comunicaciones y Generación de Energía.
- Laboratorio de investigación en líneas como Mercados Energéticos, Regulación y Políticas Energéticas y Educación en Ingeniería.
- Prestar el servicio del laboratorio a organismos externos como entes reguladores, operadores red, entre otros interesados, por medio de proyectos de extensión.

Indicador de evaluación:

La evaluación económica se realiza con el análisis de la relación costo beneficio, indicador de evaluación que parte de estudiar el retorno, no sólo financiero de la inversión, sino también de aspectos sociales del proyecto.

La relación costo beneficio (B/C), es un cociente que se obtiene al dividir el Valor Actual de los Ingresos totales netos o beneficios netos (VAI) entre el Valor Actual de los Costos de inversión o costos totales (VAC) de un proyecto.

$$B/C = VAI / VAC$$

Según el análisis de costo-beneficio, el proyecto será rentable cuando la relación costo beneficio es mayor que la unidad.

Costos totales

En la tabla 4-6 se presenta el presupuesto de costo global para la implementación del sistema experimental de gestión de cargas, que en total requiere una inversión de \$81.336.207 en su primer año de funcionamiento.

RUBROS	VALOR	OBSERVACIÓN
Personal	\$ 9.937.392	El personal requerido para la operación del módulo de laboratorio se refiere a la contratación de estudiantes auxiliares de maestría, durante el primer año de funcionamiento.
Materiales y equipos	\$ 54.012.315	Los equipos y materiales que componen el sistema de respuesta activa de la demanda y el sistema de generación solar fotovoltaico.
Software	\$ 0	Los softwares utilizados en la propuesta son de libre uso y Desarrollo.
Material bibliográfico	\$ 0	Las búsquedas e investigaciones se realizan por las bases de datos disponibles en los recursos electrónicos de la biblioteca virtual de la Universidad Nacional.
Patentes	\$ 3.886.500	Costos de tramites patente de invención.
Servicios técnicos	\$ 6.000.000	Estos costos se refieren a la contratación de terceros para la instalación de equipos especiales como el sistema de generación solar fotovoltaico.
Viajes	\$5.000.000	Este gasto se prevé para solventar los desplazamientos a eventos de difusión académica.
Construcciones	\$ 0	En la actualidad se cuenta con un espacio de 52,58 m ² en el bloque S del campus La Nubia para el grupo de investigación E3P donde se proyecta la instalación.
Mantenimiento	\$ 2.500.000	Se discrimina el costo de mantenimiento de todos los componentes del sistema experimental para el primer año de funcionamiento.
Otros costos de administración	\$ 0	No se proyectan otros gastos administrativos dentro de la instalación, puesta en marcha y operación del sistema experimental.
TOTAL	\$ 81.336.207	

Tabla 4-6 Presupuesto de costo global de la propuesta.

En la tabla 4-7 se presenta el costo invertido en talento humano para la operación y la prestación del servicio del laboratorio, estableciendo un apoyo económico equivalente a un salario mínimo legal vigente durante un año para un estudiante de posgrado, capacitado como monitor del espacio.

Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
12 (meses)	Estudiante auxiliar de posgrado para ejercer la labor de monitor de laboratorio.	828.116	\$ 9.937.392

Tabla 4-7. Costos de talento humano para la operación del módulo de laboratorio.

En la tabla 4-8 se presentan los costos en los que se incurre al tramitar patentes para este tipo de equipos, en los costos se tomó la alternativa más costosa, que es el tramite físico de la solicitud, costo que asciende a los \$3.886.500 pesos; pero esta diligencia puede ser realizada de forma virtual.

Trámite	Costo	
	En línea	En físico
Solicitud de patente de invención	76.000	95.000
Examen de patentabilidad de una solicitud de patente	1.256.500	1.504.500
Reivindicación para patente de invención	40.500	47.500
Solicitud de licencia	1.646.000	1.985.000
Invocación de prioridad	208.500	254.500
Total	3.227.500	3.886.500

Tabla 4-8. Costos de tramites de solicitud de patente.

En las tablas de la 4-9 a la 4-15 se presentan los costos de materiales y equipos necesarios para la construcción del módulo experimental de respuesta activa de la demanda.

Equipos del sistema de generación solar fotovoltaico			
Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Total
6	Paneles solares 265 W/270W	430.000	2.580.000
3	Microinversores 250 W (Ref. enphase)	410.000	1.230.000
1	Sistema de monitoreo Envoy	1.584.065	1.584.065
1	Microinversor 1200 W	2.533.500	2.533.500
1	Sistema de monitoreo inversor 1200 W	503.000	503.000
2	Terminal de Ramal	74.500	149.000
150	Cable solar (m)	9.345	1.401.750
Valor Total			9.981.315

Tabla 4-9. Costos equipos de generación solar fotovoltaica.

Equipos de comunicación PLC			
Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Total
4	TMDSPLOCKITV4 Power Line Communications Developer Kits for CENELEC Frequency Band	1.760.000	7.040.000
1	TMDSDC3359 PLC Data Concentrator Evaluation Module	2.400.000	2.400.000
Valor Total			9.440.000

Tabla 4-10. Costos equipos de comunicación.

Materiales para la estructura de la mesa			
Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Total
1	Mesa de trabajo	400.000	400.000
1	Tablero en acrílico de 4mm	1.000.000	1.000.000
3	Cable troncal portátil 240VAC 4 conductores (GBL)	65.000	195.000
Valor Total			1.595.000

Tabla 4-11. Costo de materiales para la estructura del módulo.

Materiales para la instalación de cargas de iluminación y resistivas			
Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Total
3	Bombillo incandescente 100W	3.000	9.000
3	Lampara Fluorescente T5 3500 Lúmenes 65w E27 Luz Fría	34.900	104.700
3	Bombillo de LED 3 900 Lúmenes 12w E27 Luz Blanca	18.900	56.700
4	TOMACORRIENTE DOBLE 2P+T GFCI	97.900	391.600
4	Tomacorriente monofásico 110v	9.900	39.600
1	Interruptor triple	17.900	17.900
1	Motor universal (licuadora)	100.000	100.000
2	Resistencia de potencia 3kW	45.000	90.000
1	Motor de nevera	150.000	150.000
1	Caja de distribución	117.000	117.000
3	Protección breaker 15A	9.900	29.700
2	Protección breaker 20A	9.900	19.800
1	Analizador de redes	275.000	275.000
Valor Total			1.401.000

Tabla 4-12. Costos de materiales para las cargas de iluminación.

Materiales para el sistema de control con Arduino			
Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Total
2	Arduino Due	145.000	290.000
20	Relé 5VDC-250VAC monofásicos	8000	160.000
Valor Total			450.000

Tabla 4-13. Costos equipos de control.

Materiales para la instalación de cargas inductivas			
Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Total
1	Motor de inducción Siemens 5HP 4 polos 1LE0142-1AB86-4AA4-Z D80+D81	1.139.000	1.139.000
1	Motor de inducción Siemens 10HP 4 polos 1LE0142-1CB26-4AA4-Z D80+D81	1.878.000	1.878.000
1	Motor de inducción Siemens 15HP 4 polos 1LE0142-1CB86-4AA4-Z D80+D81	2.323.000	2.323.000
2	Variador electrónico de velocidad SINAMICS G120: RLW-003503 4-10 HP	692.400	1.384.800
1	Variador electrónico de velocidad SINAMICS G120: RLW-004603	845.700	845.700
1	Interruptores 3VL2 con unidad de disparo Termo magnética regulable 3VL2706-2DC33-0AA0 50-63A	940.800	940.800
6	Pulsador verde + NO 3SU1130-0AB40-1BA0	47.900	287.400
6	Pulsador rojo + NC 3SU1130-0AB20-1CA0	47.900	287.400
4	Posiciones 0 - I con llave de seguridad 3SU1130-4BF11-1BA0	121.600	486.400
3	Muletilla de dos posiciones 3SU1130-2BF60-1BA0	61.300	183.900
2	Contactador 3RT1025-1AN24 220v 6HP	223.800	447.600
1	Contactador 3RT1034-1AN24 220v 12HP	450.300	450.300
1	Contactador 3RT1035-1AN24 220v 15HP	536.400	536.400
2	Contactador 3RT1026-1AN24 220v 9HP	307.100	614.200
2	Relé electrónico de sobrecarga 3RB2026-1QB0 6-25 A	244.800	489.600
2	Relé electrónico de sobrecarga 3RB2036-1UB0 13-50 A	392.100	784.200
3	Guarda motor 3RV1021-4DA10 5HP	305.900	917.700
2	Guarda motor 3RV1031-4FA10 10HP	624.900	1.249.800
1	Guarda motor 3RV1041-4JA10 15HP	659.000	659.000
2	Pulsador rojo de hongo 40mm + 1NC,	91.300	182.600
2	¡LOGO! 230 RCE 6ED1 052-1FB00-0BA8	677.800	1.355.600
1	PAC 5100 con Display gráfico LCD	5.701.600	5.701.600
Valor Total			23.145.000

Tabla 4-14. Costos de materiales para las cargas inductivas.

Equipo para la operación de la interfaz			
Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Total
1	Computador	8.000.000	8.000.000

Tabla 4-15. Costo computador.

Cuantificación de los beneficios

Los beneficios serán cuantificados para el primer año de funcionamiento, como se muestra a continuación:

- **Prácticas académicas:** El beneficio social percibido por los estudiantes de pregrado y posgrado de la Universidad Nacional Sede Manizales es cuantificado dando un valor de \$25.000 pesos por sesión práctica realizada, en las asignaturas, Redes Inteligentes y Microrredes, Eficiencia Energética, Mercados de Energía, Comunicaciones y Generación de Energía. En cada curso se estima un promedio de 30 estudiantes que realizarán dos prácticas por semestre, ejecutando un total de 600 prácticas de laboratorio.
- **Actividades de investigación:** El Laboratorio busca brindar un espacio de investigación en líneas como Mercados Energéticos, Regulación y Políticas Energéticas y Educación en Ingeniería, cuantificada en el primer año por \$40.000.000 de pesos, por participación en proyectos de investigación asociados a estos temas.
- **Proyectos de extensión:** Se prestará el servicio del laboratorio a organismos externos como entes reguladores, operadores red, entre otros interesados, por medio de proyectos de extensión. Obteniendo valor de conocimiento y proyectos por \$30.000.000 de pesos en el primer año.

Beneficio	Descripción	cantidad	valor unitario	valor total
Prácticas académicas	Valor práctica por estudiante.	600	\$ 25.000	\$15.000.000
Actividades de investigación	Valor generado por participación en proyectos de investigación y generación de nuevo conocimiento.	1	\$40.000.000	\$40.000.000
Proyectos de extensión	Valor percibido por agentes externos en proyectos de extensión.	1	\$30.000.000	\$30.000.000
			Total	\$85.000.000

Tabla 4-16. Resumen de la cuantificación de beneficios sociales.

Relación costo beneficio

La relación costo beneficio se calcula al dividir el valor los beneficios netos (VAI) entre el valor de los costos totales (VAC).

$$B/C = VAI / VAC$$

$$VAC = \$ 81.336.207$$

$$VAI = \$ 85.000.000$$

$$B/C = 85.000.000 / 81.336.207$$

$$B/C = 1.045$$

Se obtiene relación costo beneficio mayor a la unidad.

El análisis económico del proyecto basado en la relación costo beneficio indica que es viable, teniendo en cuenta los beneficios de tipo social que se prestan a la comunidad académica, investigativa y productiva del sector eléctrico.

5. Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se presentan las principales conclusiones, se destacan las más importantes contribuciones y se proponen trabajos futuros.

5.1 Conclusiones

A continuación, se presentan las principales conclusiones del trabajo realizado: las cuales surgen a partir de los objetivos específicos planteados al comienzo del documento, así como resultado del diseño de prácticas de laboratorio, que tienen como fin, promover nuevos espacios académicos que contribuyan al estudio de los desafíos modernos de la ingeniería eléctrica.

La respuesta activa de la demanda es un concepto en el que los consumidores de la electricidad asumen un papel participativo en los mercados de energía y en la prestación de servicios complementarios a los demás participantes de la red, en busca de atender las necesidades del sistema, mejorar su eficiencia y confiabilidad. Para este fin se han desarrollado diferentes servicios de demanda activa, como los propuestos en el proyecto europeo ADDRESS descritos en el presente trabajo.

El estudio e implementación de servicios complementarios prestados desde el lado de la demanda contribuyen a mejorar la confiabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos con presencia de generación de energía distribuida de tipo solar fotovoltaica.

El diseño presentado en el documento representa una oportunidad para la transformación de las prácticas pedagógicas en la formación de ingenieros electricistas de pregrado y posgrado con la implementación de nuevas e innovadoras estrategias que permiten realizar prácticas de laboratorio en temas de respuesta activa de la demanda.

Los costos asociados a la implementación del laboratorio experimental propuesto ascienden a los \$ 81.336.207 pesos, con una relación costo beneficio superior a la unidad en su primer año de desarrollo, análisis económico que indica que el proyecto es viable desde el punto de vista social.

Los componentes estudiados en el diseño del sistema experimental de respuesta activa de la demanda permiten desarrollar prácticas en temas transversales de la ingeniería eléctrica, como los son los sistemas de comunicación por la línea activa de potencia PLC y los sistemas de generación solar fotovoltaicos.

5.2 Trabajos futuros

A partir del diseño realizado en este trabajo de grado, se proponen diferentes trabajos futuros. A continuación, se exponen algunos, que potencialmente pueden impactar de forma positiva el campo investigativo y educativo de la ingeniería eléctrica.

Implementar el módulo experimental de respuesta activa de la demanda en las condiciones propias de un laboratorio para practicas académicas e investigativas, donde se tengan en cuenta el mayor número de variables, con estudios de caso que permitan ampliar el conocimiento a los investigadores, de cómo afectan los servicios de la demanda activa a las redes eléctricas de manera práctica.

Ampliar las características del diseño propuesto a otras aplicaciones que son de gran importancia en el desarrollo transversal de los sistemas de energía eléctrica como las tecnologías de comunicación e integración de energías distribuidas.

Diseñar para el sistema experimental de respuesta activa de la demanda propuesto, una interfaz gráfica de control de cargas que permita atender el servicio de regulación de tensión y control del flujo de potencia.

Fortalecer los lazos de la Universidad con actores interesados en estos temas de estudio como operadores de red, promotores de energía distribuida y consumidores, mediante programas de extensión, que permitan involucrar a la academia en proyectos de transformación país.

Fomentar en los planes de estudio afines a la ingeniería eléctrica cátedras que involucren prácticas de laboratorio, con el fin de abordar los nuevos desafíos de los sistemas eléctricos y la aplicación de regulaciones que surgen de la transformación del mercado energético.

Los trabajos propuestos son de normal estudio y desarrollo del grupo de investigación E3P, el cual propende por abordar las problemáticas asociadas a las políticas energéticas y las políticas atadas a la educación en ingeniería, con una mirada transdisciplinar desde tres líneas de investigación básicas: Mercados Energéticos, Regulación y Políticas Energéticas y Educación en Ingeniería; por lo que se recomienda a los lectores interesados acudir al grupo, para establecer los avances en dichas investigaciones.

5.3 Difusión académica

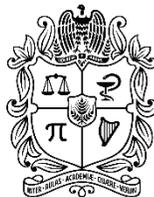
En marco del primer Congreso Nacional del Sector Eléctrico, el trabajo desarrollado fue presentado a la comunidad académica, con la ponencia titulada “Diseño de un módulo de laboratorio académico de gestión inteligente de la demanda”, en este evento se obtuvieron importantes comentarios y aportes que impulsaron la investigación.

Fue presentado el artículo titulado “Intelligent Demand Side Energy Management System deployment: G3 Narrow Band PLC network configuration and users interface for Photovoltaic Energy integration” al evento IEEE LATINCOM 2018 siendo seleccionado para participar en el taller LATINCOM WORKSHOP.

El presente trabajo de grado se vincula como producto del proyecto titulado “Implementación y puesta en marcha de un sistema de generación solar fotovoltaica y gestión inteligente de demanda” Código HERMES 39053 financiado por la Dirección de Investigación y Extensión, en la convocatoria nacional para el apoyo a proyectos de investigación y creación artística de la Universidad Nacional de Colombia 2017-2018

Anexos

Anexo A: Guía para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda eléctrica



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Grupo de investigación

Environmental energy and education policy - E3P

Objetivos:

- Orientar la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda.

Introducción:

Los cambios regulatorios, tecnológicos y sociales del país han cambiado la dinámica del sistema eléctrico colombiano, el cual se encuentra en constante transformación; por lo que surge plantear desde la academia soluciones.

El sistema experimental de respuesta activa de la demanda pretende incentivar la investigación e innovación académica, en busca de un sistema eléctrico eficiente, confiable e inteligente por medio de la contextualización, análisis y caracterización multidisciplinar de la demanda eléctrica del país.

El sistema experimental de respuesta activa de la demanda para desconexión de cargas es una herramienta tecnológica que combina un sistema comunicaciones, actuadores de control y una interfaz de maniobra, para permitir que gestión de consumo de electricidad de los usuarios, con el fin de prestar servicios complementarios a la red, por medio de un agregador en su interacción con el mercado puede tomar decisiones de control sobre sus

cargas, la herramienta supone una regulación en la que se incentiva la desconexión para temas de confiabilidad (control de frecuencia), traslado de picos de consumo y la generación de energía eléctrica no convencional tipo solar fotovoltaica.

El proyecto para la implementación del sistema propuesto se encuentra actualmente en etapa de definición, por el grupo de investigación Environmental Energy and Education Policy - E3P de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

El principal objetivo del proyecto es Estimular e implementar, desde la docencia y la investigación, un análisis complejo de la dinámica de la demanda con el fin de consolidar el criterio docente e investigativo como respuesta a la constante necesidad del empoderamiento y capacidad de análisis referido no solo al aspecto técnico, sino también, estimular un pensamiento sistémico sociedad-tecnología.

Componentes del sistema

El sistema experimental de respuesta a la demanda para desconexión de cargas se compone de cuatro partes principalmente, un software central, un sistema de comunicación, un sistema de control y una red eléctrica de uso final, en la siguiente figura se muestra el esquema del diseño experimental.

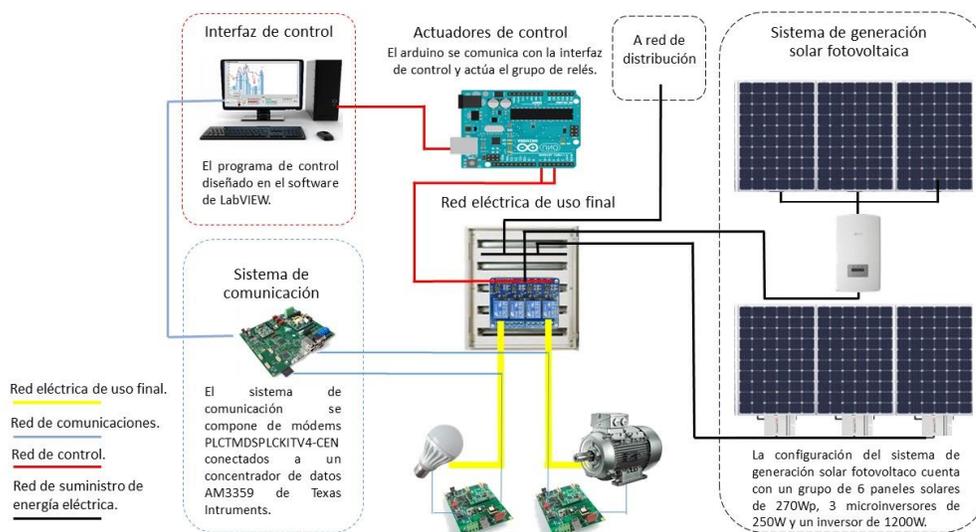


Figura A-1. Componentes del sistema experimental de respuesta a la demanda. Fuente: Elaboración propia.

El sistema funciona a partir de un programa en el software LabVIEW®, en el que se cargan diferentes programas, con ellos se simulan diferentes casos de estudio dependiendo de la regulación base y del tipo de regulación con el que se quiera practicar, la comunicación entre el programa y las cargas se realiza por medio de la línea activa de potencia (PLC),

la comunicación del control entre el programa de LabVIEW® y los relés se realiza por medio del procesador Arduino.

Se tienen dos programas de gestión de cargas, el escenario 1: Control de cargas para el control automático de la frecuencia; el escenario 2: Desplazamiento de picos de consumo para la integración de generación solar fotovoltaica.

Requerimientos mínimos de software

los requisitos mínimos de software deben ser consultados en el Anexo F, del presente documento.

Conexión de componentes

Antes de iniciar cualquier operación del sistema experimental debe ser verificada la correcta conexión de sus componentes, siguiendo los pasos que se describen a continuación:

1. Verifique que las protecciones del sistema se encuentran en posición normalmente abierta como se observa en la figura A-2.

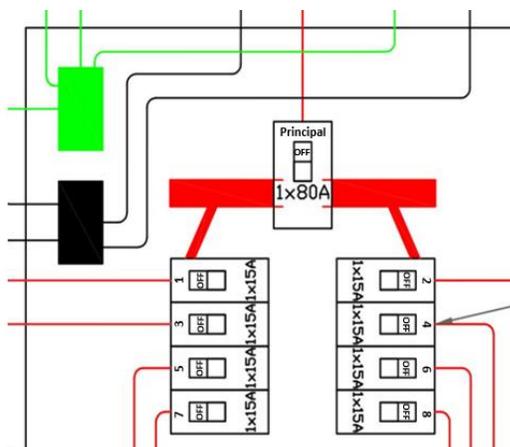


Figura A-2. Posición inicial de las protecciones del sistema. Fuente: Elaboración propia.

2. Verifique la conexión de los equipos de comunicación este conforme a las indicaciones del anexo D.
3. Verifique la conexión vía USB entre el Arduino y el computador.
4. Revise que las conexiones entre microcontrolador Arduino y los relés son acordes a las descritas en la figura A3.

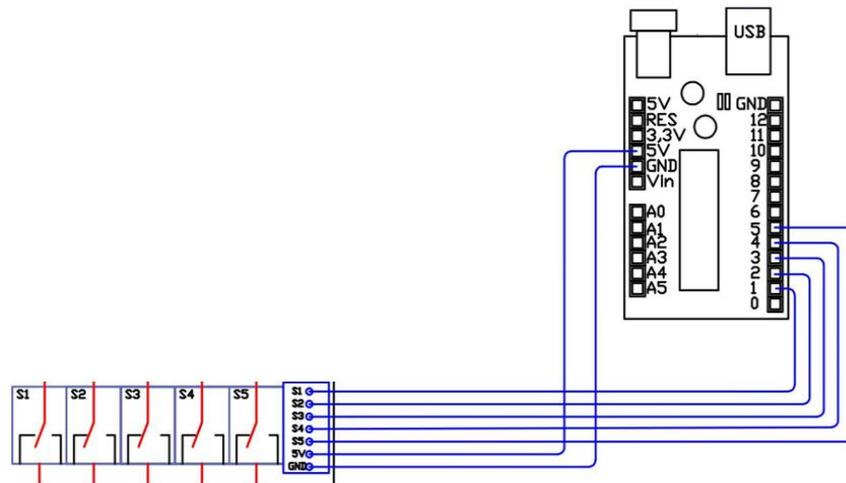


Figura A-3. Conexión Arduino para la operación del sistema de respuesta activa de la demanda. Fuente: Elaboración propia.

5. Verifique la conexión vía USB entre el concentrador de datos y el computador.
6. Accione las protecciones “principal”, 1, 2 y 3.

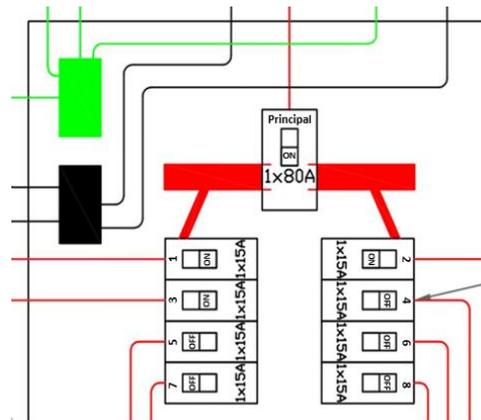


Figura A-4. Posición de las protecciones del sistema después de la revisión de la correcta conexión de los componentes. Fuente: Elaboración propia.

Después de seguir los pasos anteriores, el sistema está listo para la ejecución de los programas que contienen las interfaces de control de cargas.

Abrir el programa

Para abrir alguno de los programas de control debe ejecutar el archivo en formato “.vi” que le corresponda, se iniciara el instrumento virtual en dos ventanas, siga las instrucciones del punto “Operación del panel frontal” para correr el programa de control y operar la interfaz gráfica.

Diagrama de bloques del VI

Los instrumentos virtuales de LabVIEW® se componen de dos áreas de trabajo, el panel frontal y el diagrama de bloques que se convierte en la programación de sistema de control, En la figura A-5, se presenta espacio del diagrama de bloques para la programación:

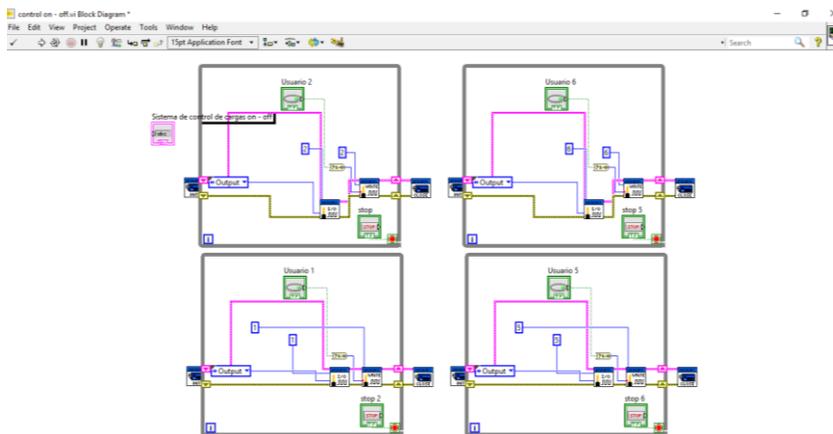


Figura A-5. Diagrama de bloques de LabVIEW®. Fuente: Elaboración propia.

Operación del panel frontal

Después de tener los componentes debidamente conectados se puede proceder con la ejecución del programa de control, pero antes de iniciar asegúrese de no tener energizadas que se van a controlar.

A continuación, se presentan los pasos para ejecutar cada uno de los programas de respuesta a la demanda cargados en el sistema experimental.

Para ejecutar el programa realice un clic en el botón run o run continuously  en la parte izquierda de la barra de tareas de LabVIEW®, inmediatamente la interfaz cambiara de apariencia, espere 5 segundos para que los relés tomen su posición inicial.

Solo después que se establezca la comunicación entre el Arduino el programa en el LabVIEW® proceda a energizar, para que establecer visualmente que existe dicha comunicación los leds TX y RX del Arduino deben estar encendidos, como se observa en la figura A-6.

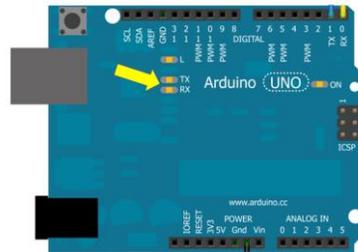


Figura A-5. Leds encendidos en Arduino para la ejecución del programa. Fuente: Elaboración propia.

A partir de este momento las cargas podrán ser controladas desde la interfaz gráfica de LabVIEW®, el sistema experimental de respuesta a la demanda diseñado tiene dos programas de control directo de cargas, Control de cargas para el control automático de la frecuencia y Desplazamiento de picos de consumo para el aplanamiento de la curva de demanda y la integración de generación distribuida.

Interfaz gráfica escenario 1: Control de cargas para el control automático de la frecuencia

En la figura A-6 se presenta el panel frontal de la estrategia de control, su ejecución se produce haciendo clic en el icono run continuamente .

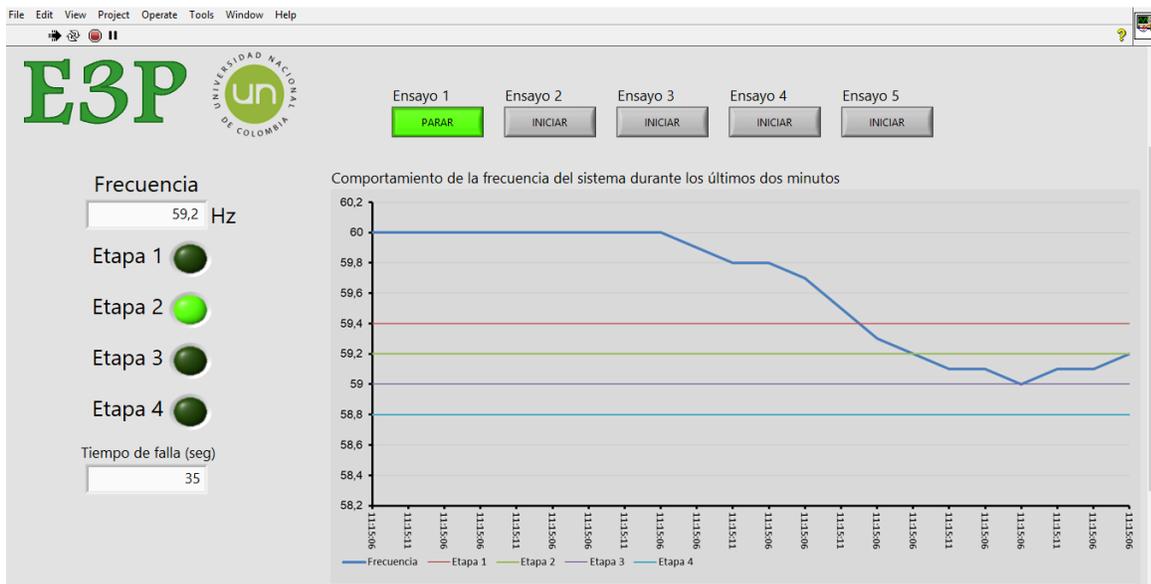
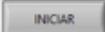
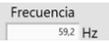


Figura A-6. Interfaz de control automático de frecuencia.

El programa de control cuenta con 5 ensayos diferentes, para iniciar cada uno de los ensayos debe presionarse el doto "INICIAR"  correspondiente a cada prueba.

Al iniciar la práctica de laboratorio, la interfaz toma registros de la frecuencia, indica la etapa de desconexión de cargas realizada para el controlar la frecuencia, el tiempo de falla desde que el sistema entro en desconexión de cargas y genera una gráfica de la frecuencia en el tiempo.

En la figura A-6 se presenta la interfaz del sistema de control en ejecución del primer ensayo de la práctica, en el display “frecuencia”  se muestra la frecuencia actual del sistema, los pilotos virtuales cuando están encendidos  indican que la etapa esta activa, la gráfica muestra el comportamiento de la frecuencia durante los últimos dos minutos.

Para salir del sistema siga los siguientes pasos:

1. Termine el ensayo oprimiendo el botón “Parar” .
2. Realice un corte de energía al sistema eléctrico desde la protección principal.
3. De clic en el botón “abort execution”  que se encuentra en la parte izquierda de la barra de tareas del LabVIEW®.
4. Cierre el programa

Interfaz gráfica escenario 2: Desplazamiento de picos de consumo para el aplanamiento de la curva de demanda y la integración de generación distribuida.

El software de control cuenta con una interfaz amigable que permite una operatividad fluida y segura. En la interfaz se observan tres gráficas. La gráfica principal, ubicada en la mitad superior, muestra una región resaltada en azul con líneas verticales que representa la energía eléctrica consumida por el usuario; una línea roja que muestra los cambios en el punto máximo de consumo permitido por el operador del sistema de gestión; y una línea celeste que muestra el umbral mínimo de consumo requerido por el operador del sistema de gestión. Los cambios en los umbrales máximos y mínimos de consumo de energía eléctrica son realizados desde la misma interfaz del sistema aumentando o disminuyendo las barras horizontales que se encuentran debajo de esta gráfica; además, cuenta con dos alarmas que le indican al operador que se han superado los niveles de consumo requeridos (los dos círculos ubicados bajo esta gráfica), un cuadro de medición que muestra el valor de corriente que está consumiendo el usuario (el cuadro ubicado a la derecha bajo la gráfica principal), además la interfaz cuenta con botones de inicio, pausa y aborto de la gestión energética del usuario (ubicados bajo la gráfica, “Iniciar”, “Parar” y “Salir”) como se observa en la gráfica A-7.

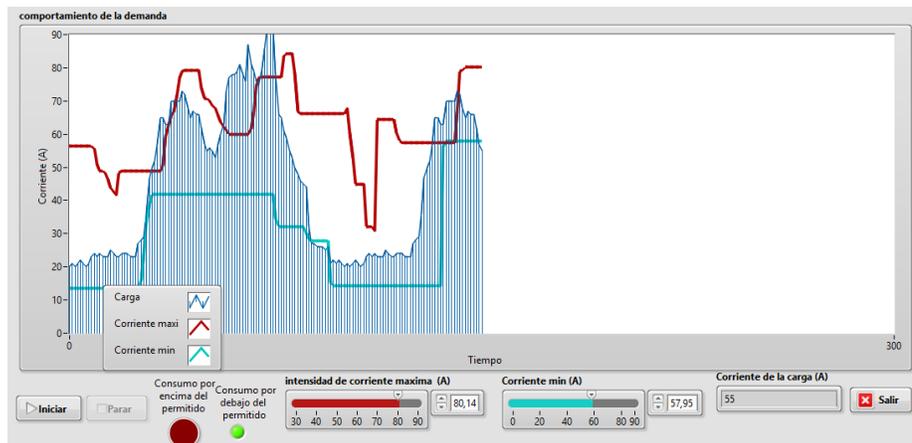


Figura A-7. Gráfica principal y botones de la interfaz para el desplazamiento de picos de consumo. Fuente: Elaboración propia.

En la parte inferior de la interfaz se muestran dos gráficas, estas muestran el comportamiento de generación variable asociada al sistema, en este caso el usuario tiene instalados 6 paneles solares fotovoltaicos de 270 Wp, y en las gráficas se muestra la curva de generación de energía eléctrica (izquierda) y la potencia consumida por el usuario de este recurso energético (mitad inferior derecha).

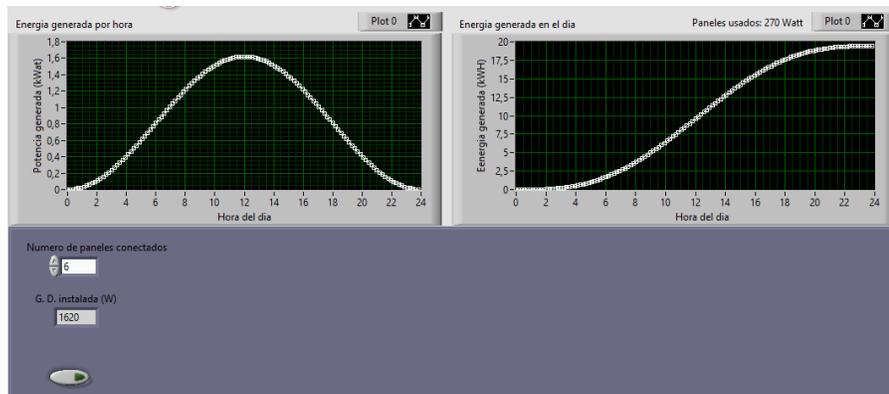


Figura A-8. Gráficas y botones de control del sistema de generación solar fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.

En la parte inferior de la de la interfaz, se encuentran dos botones, desde el primero (“Numero de paneles conectados”) el operador del sistema puede controlar la generación solar fotovoltaica del usuario gestionado energéticamente, gracias a la comunicación con los nodos de servicio PLC conectados a los microinversores instalados a los paneles solares. El botón gris con verde ubicado al final de la interfaz tiene la capacidad de desconectar el sistema de generación de energía eléctrica del usuario.

Salir del sistema siga los siguientes pasos:

1. Realice un corte de energía al sistema eléctrico al que se ejecutó el control de cargas.
2. De clic en el botón “Salir”  que se encuentra en la parte inferior derecha de la gráfica principal.
3. Cierre el programa

Anexo B: Guía práctica de laboratorio, control automático de frecuencia con respuesta activa de la demanda



Environmental Energy and
Education Policy

E3P
www.e3p.manizales.unal.edu.co

Guía práctica de laboratorio, control automático de frecuencia con respuesta activa de la demanda.

I. Objetivos.

- Controlar de forma automática un conjunto de cargas como respuesta a la frecuencia del sistema eléctrico.
- Analizar pruebas de control de cargas para el control automático de la frecuencia.

II. Temas de consulta.

- ¿Qué es la respuesta activa de la demanda y por qué es conveniente?
- Investigue en que consiste el control de frecuencia y que métodos son utilizados en la actualidad para ejercer dicho control.
- Consultar la sección 3.2 Caso de estudio y la sección 4.1.1 Estrategias de control del documento “Diseño de un Sistema de Respuesta Activa de la Demanda Experimental a Partir de Generación Solar Fotovoltaica y Control de Demanda Eléctrica”.
- Leer el anexo A: Guía para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda eléctrica.

III. Equipos a utilizar.

- Módulo de experimental de respuesta activa de la demanda.
- Analizador de red.

IV. Fundamentos teóricos.

Control de potencia activa para el control automático de la frecuencia:

El control de potencia activa se usa para proporcionar servicios de desconexión de cargas solicitados por los operadores del sistema de transmisión y distribución, destinados a restaurar las condiciones operativas de frecuencia y su control automático, este control de potencia garantiza que la operación del sistema se mantenga en condiciones normales ante contingencias respecto al balance de la potencia entre la carga y la generación (Framework, 2013). Cuando el operador del sistema de transmisión como medida de emergencia realiza una desconexión aleatoria de cargas (o circuitos), esta se configura una contramedida de emergencia que no se considera un servicio de demanda activa (P. Eyrolles; R. Belhomme; C. Brown; R. Gonzalez; I. Delgado; G. Valtorta; A. De Simone; S. Sartore; D. Abi Ghanem; J. Burgers; P. Kropman; D. Ectors, 2013).

El servicio de control de potencia activa para el control automático de la frecuencia; es utilizado por los operadores de los sistemas de transmisión y distribución para mantener la frecuencia en niveles apropiados, se necesitan reservas de energía activa o cargas desconectables para satisfacer aumentos no planificados en la demanda o pérdidas repentinas de generación. En sistemas eléctricos pasivos este servicio es proporcionado por centrales de generación, posiblemente por centrales hidroeléctricas que tienen capacidad de almacenar su recurso de generación, pero este servicio también puede ser proporcionado por la gestión de las cargas.

La limitación de cargas para el control de la frecuencia se utiliza como acción automática para restablecer los márgenes de control adecuados, es decir, cuando los generadores trabajan cerca del límite superior o inferior de sus capacidades de regulación. El control de frecuencia está bajo la responsabilidad de los operadores del sistema de transmisión, sin embargo, con el desarrollo de la generación distribuida en redes de distribución y la evolución hacia redes de distribución con participación de la demanda, los operadores del sistema de distribución pueden solicitar este tipo de servicio.

V. Procedimiento.

1. Realizar las conexiones de protección general de la mesa de trabajo.
2. Abrir la interfaz de control en el software como se indica en el Anexo A.
3. Inicie la interfaz de control dando clic en el botón RUN  .
4. Realice las cinco pruebas de la interfaz de control.
5. Tomar los datos de cada ensayo y consignarlos en la siguiente tabla:

Ensayo	Tiempo de falla (en segundos)	Tiempo de desconexión en etapa 1	Tiempo de desconexión en etapa 2	Tiempo de desconexión en etapa 3	Tiempo de desconexión en etapa 4	Tiempo de desconexión en etapa 5
1						
2						
3						
4						
5						

Tabla B-1. Tabla de toma de resultados de ensayos de control de cargas para el control de la frecuencia. Fuente: Elaboración propia.

6. Salga de la interfaz y apague el módulo de laboratorio.

VI. Cuestionario.

El informe de laboratorio debe contener respuesta al siguiente cuestionario:

1. ¿Qué diferencias encontró en cada uno de los ensayos realizados?
2. Realice un análisis del peor resultado de los cinco ensayos realizados en términos de tiempo y etapas de desconexión activadas.
3. Realice un análisis sobre lo siguiente:

El control de la frecuencia se puede realizar con desconexión aleatoria de circuitos o con servicios de demanda activa (demanda desconectable).

Según su percepción ¿Cuál acción le considera más conveniente y por qué?

Anexo C: Guía práctica de laboratorio, control de demanda para el desplazamiento de picos de consumo



Environmental Energy and
Education Policy

E3P
www.e3p.manizales.unal.edu.co

Guía práctica de laboratorio, control de demanda para el desplazamiento de picos de consumo (aplanamiento de la curva de demanda e integración de generación distribuida).

I. Objetivos.

- Operar el sistema de gestión inteligente de cargas para el desplazamiento de picos de consumo a zonas horarias de generación de energía solar fotovoltaica.

II. Temas de consulta.

- ¿Qué es la respuesta activa de la demanda y por qué es conveniente?
- ¿Qué es el aplanamiento de la curva de demanda? y ¿cuáles son sus efectos y beneficios?
- Consultar la sección 4.1.3 Caracterización del sistema de generación solar fotovoltaico del documento “Diseño de un Sistema de Respuesta Activa de la Demanda Experimental a Partir de Generación Solar Fotovoltaica y Control de Demanda Eléctrica”.
- Consultar la sección 3.2 Caso de estudio y la sección 4.1.1 Estrategias de control del documento “Diseño de un Sistema de Respuesta Activa de la Demanda Experimental a Partir de Generación Solar Fotovoltaica y Control de Demanda Eléctrica”.
- Leer el anexo A: Guía para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda eléctrica.

III. Equipos a utilizar.

- Módulo de experimental de respuesta activa de la demanda.
- Analizador de red.

IV. Fundamentos teóricos.

Los operadores de los sistemas de distribución y transmisión necesitan algún tipo de reducción de cargas en áreas determinadas de la red para favorecer su confiabilidad o trasladar consumos de energía a franjas horarias que mejoren la eficiencia del sistema; la demanda activa provee servicios de gestión inteligente de la carga.

V. Procedimiento.

1. Realizar las conexiones de protección general de la mesa de trabajo.
2. Abrir la interfaz de control en el software como se indica en el Anexo A.
3. Inicie la interfaz de control dando clic en el botón "Iniciar" .
4. Opere los umbrales máximos y mínimos con el sistema de generación desconectado usando el botón virtual destinado para este fin, tome registro del comportamiento de la demanda.
5. Detenga el sistema usando el botón "Parar" .
6. Inicie el sistema activando dos unidades de generación solar fotovoltaica y tome registro del comportamiento de la demanda.
7. Inicie de nuevo la interfaz, esta vez activando los seis paneles del sistema de generación solar fotovoltaico. Tome el registro del comportamiento de la demanda.
8. Salga de la interfaz haciendo clic en el botón "Salir"  que se encuentra en la parte inferior derecha de la gráfica principal.

VI. Cuestionario.

1. Realice un informe de laboratorio que responda al siguiente cuestionario:
 - ¿Cómo fue el comportamiento de la demanda en los ensayos realizados?
 - ¿Cómo impactó la generación solar fotovoltaica en el comportamiento de la demanda?
 - ¿Este escenario solo es válido si se cuenta con cargas de desconexión voluntaria?

2. Después de las 10:00 p.m. consulte la gráfica y los datos de la demanda de energía eléctrica del país en tiempo real, colgados en el portal de XM, ingresando en la dirección web <https://www.xm.com.co/Paginas/Consumo/demanda-en-tiempo-real.aspx> e identifique lo siguiente:
 - Las franjas horarias pico y valle de consumo de energía eléctrica del día (use la vista tipo grafica).
 - Identifique los desfases por arriba y por abajo entre la demanda en tiempo real y la pronosticada (puede realizar el cálculo con los datos de la visualización tipo tabla).
 - ¿Cómo puede contribuir la participación activa de la demanda en la reducción de estos desfases?

En la figura C-1 se presenta la página web donde podrá encontrar la demanda en tiempo real del país, este apoyo tecnológico se usa para comparar el consumo de energía eléctrica que tiene el país con el pronóstico de demanda.

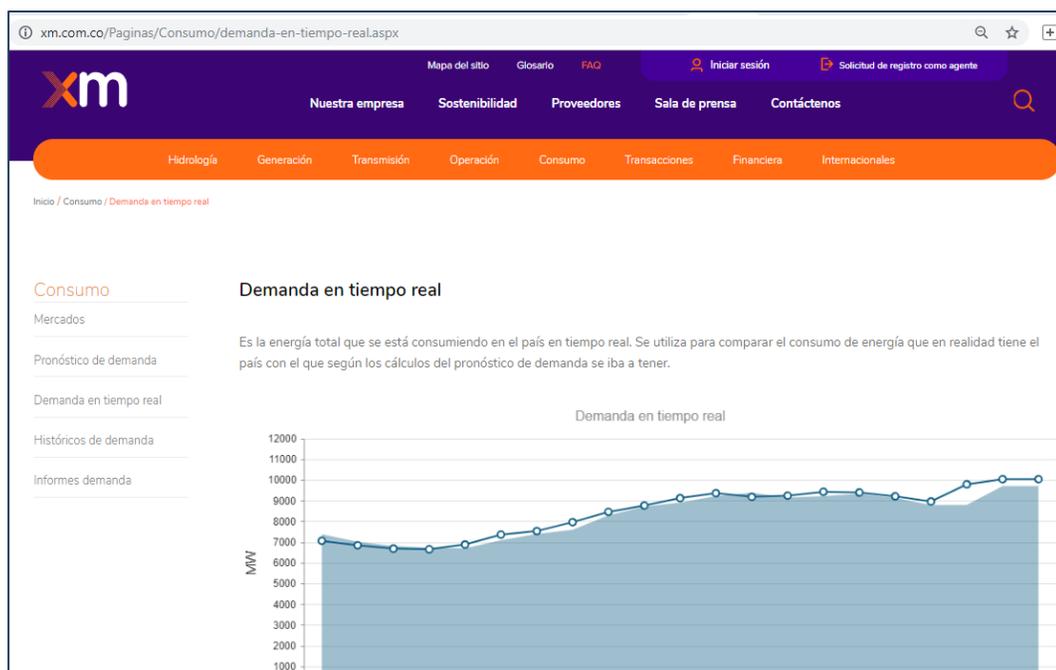


Figura C-1 Pagina web de demanda en tiempo real. Fuente: XM.

3. Proponga en formato artículo IEEE, un sistema de respuesta a la demanda de tipo industrial, para esto utilice el Software HOMER, el cual cuenta con un módulo de respuesta a la demanda.

La propuesta debe contener los conceptos mínimos que se exponen a continuación:

- Generación y almacenamiento distribuidos.
- Limitación de demanda.
- Aumentos de carga para autoconsumo.
- Determinación de tiempos de uso.

Visite el siguiente link, el cual lo dirigirá a la página web que se observa en la figura C-2 allí obtendrá información detallada sobre el módulo de respuesta a la demanda del software HOMER:

<https://microgridnews.com/demand-response-programs-create-new-value-for-distributed-generation/>

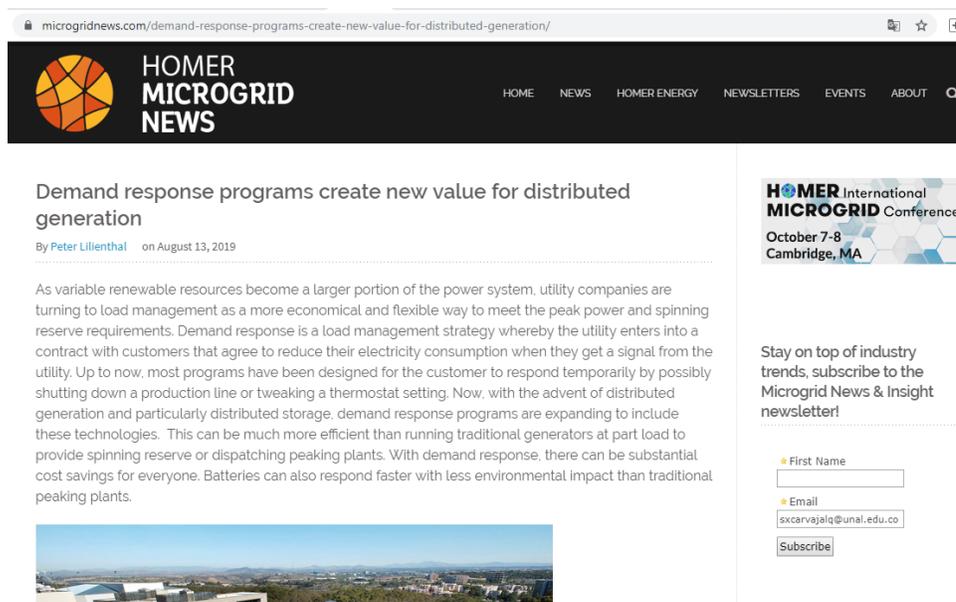
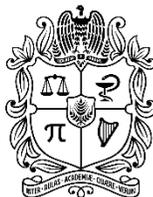


Figura C-2 Pagina web MICROGRIDNEWS. Fuente: HOMER.

Homer es una herramienta que permite el modelado de Microrredes con recursos energéticos distribuidos aplicable a todos los sectores, desde la energía en pequeñas comunidades hasta grandes instalaciones conectadas a la red, el software incluye herramientas que permiten obtener resultados conjuntos tanto para la ingeniería y la economía, de manera que los resultados buscan el óptimo técnico-económico de diferentes alternativas y dimensiones simuladas; cuenta con una versión de prueba de 21 en el siguiente link:

http://homerenergy.com/HOMER_pro.html

Anexo D: Guía de operación del sistema de comunicación PLC con kits TMSPLCKITV4-CEN



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Grupo de investigación

Environmental energy and education policy - E3P

Objetivo:

- Establecer un manual paso a paso para la conexión y puesta en marcha de los kits PLC TMDS V4.

La presente guía consta de dos partes, en la primera se muestra el modo de conexión seguro de los módems a la red eléctrica y a la interfaz de comunicación de computador a computador; en la segunda se especifica el manejo del software para la transmisión de textos y archivos.

1. Conexión del equipo.

La conexión del equipo se realiza en tres puntos principales, dos conexiones a la línea activa de potencia (una fuente de potencia y comunicación) y una conexión USB, cabe precisar que el modem PLC cuenta variedad de puertos, para su configuración y carga de desarrollos. En la figura D-1 se muestra el kit TMSPLCKITV4-CEN.

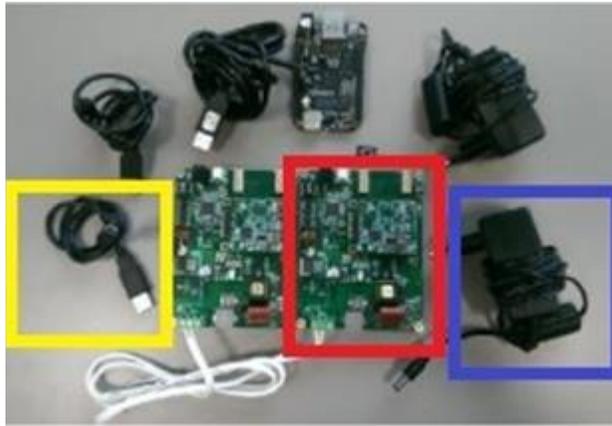


Figura D-3 Kit de comunicación TMDSPCKITV4. Fuente: Texas Instruments.

Los elementos del kit, usados para la comunicación de por la línea activa de potencia son los siguientes:

- Módem PLC (en el recuadro rojo).
- Fuente de alimentación de 15 V (en el recuadro azul).
- En el recuadro amarillo se puede observar el cable USB.

En la figura D-2, se indican los componentes que se deben configurar en la placa de conexión del modem PLC.

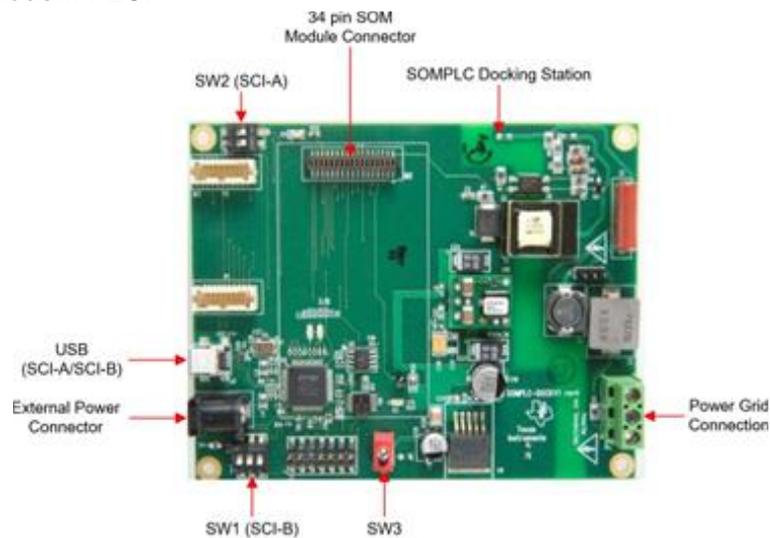


Figura D-4. Módem PLC. Fuente: Texas Instruments.

los pasos necesarios para realizar las conexiones físicas del módem se describen a continuación:

- Conecte la fuente de alimentación de 15 V al puerto “External Power Connector”.

- Asegúrese de que SW1 y SW2 estén en las posiciones indicadas en figura D-3.

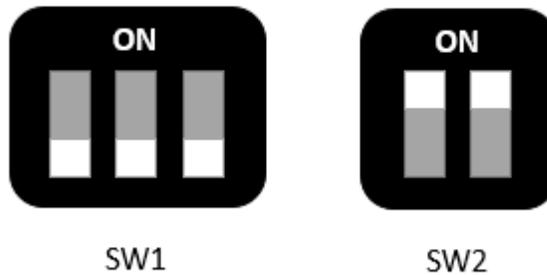


Figura D-5. SW1/SW2. Fuente: Elaboración propia.

- El módulo SOM que se muestra en la figura D-4 debe acoplarse al conector “34 pin SOM Module Connector”.



Figura D-4. Módulo SOM. Fuente: Texas Instruments.

- Acople el módulo a la red eléctrica mediante el cable blanco conectado usando el puerto “Power Grid Connection”.
- Conecte el módulo al computador usando el cable USB.
- Una vez conectada la alimentación de 15 V, el módulo se enciende con el interruptor SW3.

2. Transmisión de archivos y texto

Para realizar la transmisión de mensajes y archivos se utiliza el software Zero Configuration GUI de Texas Instruments, el cual puede ser descargado desde la página web (<http://www.ti.com/lit/zip/sprcad0>).

Después de realizar la instalación del software, debe activarse en la ubicación: C:\Texas Instruments\G3_SDK_Package_V7_5_1_10\XDS100 Drivers. En esta carpeta se encuentran los siguientes archivos: DPInst32 y DPInst64, se debe instalar uno u otro dependiendo de si su sistema operativo del computador es de 32 o 64 bits.

Para conocer las características del equipo se debe usar el buscador de Windows, escribir DXDIAG y ejecute el comando.

Una vez conectado el módem, este se enciende y deben verificarse los drivers del puerto serial. Para esto hay que ir a Panel de control → Hardware y sonido → Dispositivos e impresoras → Puertos COM. En caso de que los drivers no estén instalados, hacerlo utilizando el asistente de Windows.

Una vez terminada la preparación de hardware y software se ejecuta el Zero Configuration GUI desde el icono que se muestra en la figura D-5, ubicado en el escritorio del equipo.



Figura D-5. Icono Zero Configuration GUI. Fuente: Texas Instruments.

2.1 Preparación de drivers y Zero Configuration GUI

La figura D-6, muestra la interfaz principal de Zero Configuration GUI, mediante el cual se realizará la transmisión de mensajes y archivos.

En la parte superior izquierda se encuentran los siguientes menús desplegables:

- Mode: permite cambiar entre el Zero Configuration GUI y el Intermediate GUI.
- Serial Port Connection: muestra el puerto serial al que está conectado el módem PLC.
- System Setup: opciones de configuración del sistema.

Debajo de estos se encuentran las herramientas de transmisión de mensajes y archivos.

En la parte derecha se encuentran las siguientes pestañas:

- System Info: muestra la información general del PLC.
- PHY Parameters: muestra los parámetros de transmisión y recepción de la capa física y permite cambiar el tipo de modulación de esta.
- PHY test: permite realizar una prueba de comunicación entre dos PLC's usando paquetes PHY.
- Statistics: muestra la información concerniente a la transferencia de texto y archivos.
- Log: muestra la información de los paquetes transmitidos y recibidos.

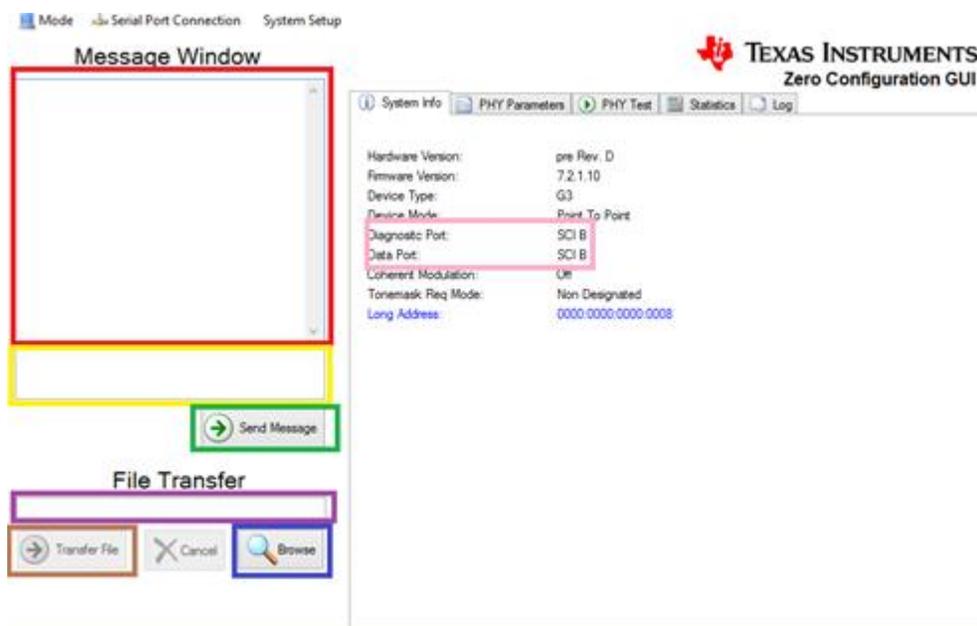


Figura D-6. Zero Configuration GUI. Fuente: Texas Instruments.

En el recuadro rosa se encuentra la interfaz serial mediante la que se está comunicando el módem PLC con el PC. Esta interfaz puede ser SCI-A o SCI-B. Se usará SCI-A, si en Diagnostic port y Data port (figura D-6) aparece SCI-B, presionar CTRL-A, esto hará que aparezca SCI-A remarcado en azul.

2.2 Transmisión de un mensaje

Para transmitir un mensaje, este debe escribirse en el recuadro amarillo (figura D-6). Una vez escrito, se presiona Send Message (recuadro verde) para enviarlo. Los mensajes enviados y recibidos pueden verse en Message Window (recuadro rojo)

2.3 Transmisión de archivos

Para transmitir un archivo, este debe buscarse primero presionando el botón browser (recuadro azul) de la figura D-6. Una vez seleccionado el archivo que se desea enviar, su ruta aparecerá en File Transfer (recuadro morado), se envía presionando Transfer File (recuadro café).

Anexo E: Guía práctica de laboratorio de comunicación por la línea de potencia (Power Line Communication PLC)



Environmental Energy and
Education Policy

E3P
www.e3p.manizales.unal.edu.co

Guía práctica de laboratorio de comunicación por la línea de potencia PLC.

I. Objetivos.

- Comunicar módulos PLC.
- Analizar el comportamiento de la comunicación PLC en sistemas eléctricos ante diferentes cargas (ruido y capacidad).

II. Temas de consulta.

Para desarrollar la presente guía de laboratorio es necesaria la lectura de la guía para la operación del Kit PLC TMDSPLCKITV4-CEN y la consulta de los siguientes temas:

- Investigar ¿Qué es PLC?
- Describir las principales ventajas y desventajas de la tecnología de comunicación PLC.
- Consultar la sección 4.1.2 Caracterización del sistema de comunicación PLC del documento “Diseño de un Sistema de Respuesta Activa de la Demanda Experimental a Partir de Generación Solar Fotovoltaica y Control de Demanda Eléctrica”.
- Leer el anexo D: Guía de operación del sistema de comunicación PLC con kits TMDSPLCKITV4-CEN

III. Equipos a utilizar.

- Kit de comunicación TMDSPLCKITV4 (4).

- Módulo de experimental de respuesta activa de la demanda.
- Analizador de red.
- Motor de inducción trifásico.
- Resistencia de potencia 3kW.
- Multímetro (2).
- Vatímetro monofásico (2).
- conectores (30).
- Alicates (1).

IV. Procedimiento.

1. Realizar las conexiones de protección general de la mesa de trabajo.
2. Instalación de puntos de medida con se describe en el documento Anexo D.
3. Conexión y arranque del motor.
4. Instalar los módulos de comunicación PLC en salidas eléctricas de un mismo circuito.
5. Iniciar el programa Zero configuración GUI.
6. Enviar información por la línea eléctrica sin la presencia de carga, como se indica en la tabla E-1.
7. Tomar datos de la página PHY test del programa Zero configuration GUI, completando la tabla E-1.

Dato enviado	Reporting Interval (tiempo de envió) (ms)	Average received signal strength (Intensidad de la señal)	Average signal to noise ratio (Relación señal/ruido)	Total number of bits (Total de bis recibidos)
Texto de 200 caracteres.				
Texto de 1000 caracteres.				
Archivo tipo .JPG entre 1 y 2 Mb.				
Archivo .MP3 entre 4 y 6 Mb.				

Tabla E-1. Tabla de toma de resultados de datos enviados por la red eléctrica sin presencia de carga. Fuente: Elaboración propia.

8. Enviar los mismos archivos del paso anterior con una carga lineal resistiva de 3kW en funcionamiento, para completar la Tabla E-2.

Dato enviado	Reporting Interval (tiempo de envió) (ms)	Average received signal strength (Intensidad de la señal)	Average signal to noise ratio (Relación señal/ruido)	Total number of bits (Total de bis recibidos)
Texto de 200 caracteres.				
Texto de 1000 caracteres.				
Archivo tipo .JPG entre 1 y 2 Mb.				
Archivo .MP3 entre 4 y 6 Mb.				

Tabla E-2. Tabla de toma de resultados de datos enviados por la red eléctrica con presencia de cargas resistivas. Fuente: Elaboración propia.

9. Realizar el envío de información con presencia de carga inductiva en la red; utilizar el motor de inducción Siemens 15HP 4 polos como carga.

Dato enviado	Reporting Interval (Tiempo de envió) (ms)	Average received signal strength (Intensidad de la señal)	Average signal to noise ratio (Relación señal/ruido)	Total number of bits (Total de bis recibidos)
Texto de 200 caracteres.				
Texto de 1000 caracteres.				
Archivo tipo .JPG entre 1 y 2 Mb.				
Archivo .MP3 entre 4 y 6 Mb.				

Tabla E-3. Tabla de toma de resultados de datos enviados por la red eléctrica con presencia de cargas inductivas. Fuente: Elaboración propia.

V. Cuestionario.

El informe de laboratorio debe contener respuesta al siguiente cuestionario:

1. ¿Cómo se comporta la velocidad de envío de los diferentes datos de los tres ensayos realizados?
2. Realice un cuadro comparativo de la intensidad de la señal en los tres ensayos realizados.
3. ¿En qué ensayo se obtiene una mejor relación señal/ruido?
4. ¿En qué ensayo se obtuvo una mejor recepción bits?
5. Realice un análisis sobre el uso de la comunicación PLC en cada uno de los ensayos.

Anexo F: Requisitos mínimos de software para la operación del sistema experimental de respuesta activa de la demanda

El sistema experimental de respuesta a la demanda de energía eléctrica requiere de las condiciones mínimas de software descritas en la tabla F-1, para la ejecución y edición de desarrollos:

Componente	Requisitos de software para la ejecución de programas	Requisitos de software para desarrollo de programas de control
Procesador	Pentium 4 o posterior, inteli5 (64 bits) o Pentium 4M / Celerion 866 (32 bits) o posterior.	Pentium 4 o posterior, inteli5 (64 bits) o posterior.
RAM	256 MB	1 GB
Resolución de pantalla	1024 x 768 pixeles	1025 x 768 pixeles
Sistema operativo	Windows 10/8. 1/7 Service pack 1 (64 bits) con Microsoft NET Framework.	Windows 10 actualización 8. 1; Service pack 1 (64 bits) con Microsoft NET Framework 4.6.2.
Espacio de disco duro	5 GB de espacio en disco.	5 GB de espacio en disco (Incluye controladores predeterminados del DVD de controladores para dispositivos National Instruments).

Tabla F-1. Especificaciones de software requeridas. Fuente: Elaboración Propia.

Los siguientes componentes de software son indispensables para el funcionamiento del sistema experimental de respuesta activa de la demanda, por lo que se presenta una breve información sobre cada uno de ellos y la forma de adquisición gratuita para actividades académicas.

LabVIEW

LabVIEW® 2017 es un software de instrumentación virtual diseñado por Nacional Instruments, en el siguiente link se descarga de forma gratuita:

<http://www.ni.com/download/labview-development-system-2017/6698/en/>

Idioma: inglés

Línea de Producto: LabVIEW®

Versión: 2017

Fecha de lanzamiento: 05-23-2017

Tipo de software: Software de aplicación

En la figura F-1, se observa la página desde la cual se descarga el software, en la parte izquierda de la pantalla debe especificarse el sistema operativo instalado en el computador, la versión de LabVIEW® que desea descargarse y el idioma; en la parte derecha de la pantalla aparece el botón que ejecuta la descarga.

The screenshot shows the LabVIEW download page. At the top, there is a navigation bar with the URL www.ni.com/es-co/support/downloads/software-products/download.labview.html#305508. Below the navigation bar, the LabVIEW logo is displayed on the left, followed by the text "LabVIEW es un software de ingeniería de sistemas que requiere pruebas, medidas y control con acceso rápido a hardware e información de datos." and a link "+ Mostrar Más".

The main content area is titled "DESCARGAS" and contains several selection options:

- SO Soportado:** A dropdown menu set to "Windows". A link "Ver Archivo ReadMe" is visible next to it.
- Versión:** A dropdown menu set to "2019".
- Valor de Bits de la Aplicación:** A dropdown menu set to "32 bits".
- Ediciones Incluidas:** Radio buttons for "Base, Completo, Profesional" (selected) and "Runtime".
- Idioma:** A dropdown menu set to "Inglés".

On the right side, there is a box titled "LabVIEW 2019 and Drivers" containing the following information:

- Release Date:** 15/05/19
- Included Versions:** 2019
- Links: "> SO Soportado", "> Idioma", "> Checksum"
- DESCARGAR** button
- File Size:** 3.64 MB

Figura F-1. Página de descarga LabVIEW®. Fuente: National Instruments.

Arduino IDE

IDE es el editor de placas Arduino, en el siguiente link puede descargarse de forma gratuita el software, incluidas todas las bibliotecas contribuidas y soporte para las nuevas placas Arduino.

<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>

En la figura F-2, se presenta el ambiente web desde el cual se realiza la descarga del software Arduino IDE, en la parte derecha de la pantalla puede descargarse la versión del programa requerida para el sistema operativo disponible.



Figura F-2. Página de descarga Arduino. Fuente: www.arduino.cc.

Para que el Arduino pueda comunicarse con el programa elaborado en LabVIEW® debe ser programado desde el software Arduino IDE con el siguiente.

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <Servo.h>
#include "LabVIEWInterface.h"
void setup ()
{
  syncLV();
}
/
void loop()
{
  checkForCommand();
  if(acqMode==1)
  {
    sampleContinuously();
  }
}}
```

Zero Configuration GUI

El software es desarrollado por Texas Instruments, el cual puede ser descargado desde el siguiente link automáticamente <http://www.ti.com/lit/zip/sprcad0>.

Bibliografía

- A. Rezaee Jordehi. (2019). Optimisation of demand response in electric power systems, a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Retrieved
- Anuradha, A. (2019). Active Adaptive Control. Retrieved from <http://aaclab.mit.edu/smart-grid.php>
- Araque, J. B., & General, D. (2010). ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD. EL RETO EUROPEO DEL LOGRO DE LOS OBJETIVOS DEL 2020. Retrieved from <http://www.minetad.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/377/127.pdf>
- Arteconi, A., Dieter, P., & Bruninx, Kenneth. (2016). Active demand response with electric heating systems: Impact of market penetration. *Applied Energy*, 177, 636–648. Retrieved from <https://pdf.sciencedirectassets.com/271429/1-s2.0-S0306261916X0013X/1-s2.0-S0306261916307516/main.pdf?X-Amz->
- Bailey, K. (2015). Customer Load Active System Services Second Tier LCN Fund Project Closedown Report, (September), 39. Retrieved from https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2015/11/class_closedown_report_master_0.pdf
- Barbon, G., Margolis, M., Palumbo, F., Raimondi, F., & Weldin, N. (2016). Taking Arduino to the Internet of Things: The ASIP programming model. *Computer Communications*, 89–90, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.03.016>
- Cañon de Antonio, Y. (2016). Estudio de la factibilidad técnica de la implementación de PLC (Power Line Communication) en la red de distribución eléctrica de Bogotá. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/54473/>
- Cappers, P., Goldman, C., & Kathan, D. (2010). Demand Response in U.S. Electricity Markets: Empirical Evidence. *ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY*.
- Cardona, C. (2005). Evaluación económica, 41, 76–87.

- CEER. (2018). Distribution Systems Working Group Flexibility Use at Distribution Level A CEER Conclusions Paper. *Systems, Distribution Group, Working*.
- Community, E., & Programme, S. F. (2013). *active demand*.
- EEA. (2017). Configuración del futuro de la energía en Europa: limpia, inteligente y renovable. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/downloads/6637cc41d71a43159f07c162c1150a73/1511176696/configuracion-del-futuro-de-la.pdf>
- Eid, C., Koliou, E., Valles, M., Reneses, J., & Hakvoort, R. (2016). Time-based pricing and electricity demand response: Existing barriers and next steps. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2016.04.001>
- Faruqui, A., & Malko, J. R. (1983). The residential demand for electricity by time-of-use: A survey of twelve experiments with peak load pricing. *Energy*, 8(10), 781–795. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(83\)90052-X](https://doi.org/10.1016/0360-5442(83)90052-X)
- Faruqui, A., & Sergici, S. (2010). Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of 15 experiments. *Journal of Regulatory Economics*, 38(2), 193–225. <https://doi.org/10.1007/s11149-010-9127-y>
- Framework, S. (2013). Deliverable 1.1 ADDRESS technical and commercial conceptual architectures.
- from(Arduino). (2016). “Arduino Uno” Revision 3.
- ICONTEC. NTC - ISO 5001 (2011).
- Lin, C. (2018). Distributed optimal residential demand response considering operational constraints of unbalanced distribution networks. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12, 1970–1979. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1366>
- Mo, H., & Sansavini, G. (2018). Real-time coordination of distributed energy resources for frequency control in microgrids with unreliable communication. *Electrical Power and Energy Systems*, 96(May 2017), 86–105. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.029>
- Montoya, Y., Ramirez, J., & Perez, T. (2015). Smart Grid. *Revista Científica Electrónica Facultad de Ciencias E Ingenierías Ingeniero Al Día.*, 107.
- Ofgem. (2019). Demand Side Working Group | Ofgem. Retrieved July 7, 2019, from <https://www.ofgem.gov.uk/electricity/wholesale-market/forums-seminars-and-working-groups/demand-side-working-group>
- P. Eyrolles; R. Belhomme; C. Brown; R. Gonzalez; I. Delgado; G. Valtorta; A. De Simone; S. Sartore; D. Abi Ghanem; J. Burgers; P. Kropman; D. Ectors.

- (2013). Deliverable 6.1 Description of test location and detailed test program for (limited) prototype field test, simulations and hybrid tests.
- Siano, P. (2014). Demand response and smart grids — A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 461–478.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.022>
- Somma, M. Di, Graditi, G., Heydarian-forushani, E., Sha, M., & Siano, P. (2017). Stochastic optimal scheduling of distributed energy resources with renewables considering economic and environmental aspects Stochastic optimal scheduling of distributed energy resources with renewables considering economic and environmental aspects. *Renewable Energy*, 116(October), 272–287. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.074>
- Tarish, H., Sees, O. H., & Elmenreich, W. (2016). A review of residential demand response of smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 166–178. Retrieved from <https://pdf.sciencedirectassets.com/271969/1-s2.0-S1364032116X00032/1-s2.0-S1364032116000447/main.pdf?X-Amz->
- Valencia López, D. (2016). *Programas de Gestión de Demanda Energética en el Sector Industrial. Aplicación de la Analítica para su Diseño e Implementación*. Unal. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/54435/3/1053803850.2016.pdf%0Ahttp://www.bdigital.unal.edu.co/54435/>
- Vallés Mercedes. (2017). *EFFICIENT IMPLEMENTATION AND POTENTIAL BENEFITS OF DEMAND RESPONSE IN ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORKS*. Retrieved from <https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/20478/1/TD00274.pdf>