

Diseño de un equipo desagregador de carga NEU+ para la empresa Erco Energía SAS

Mónica Daniela Vargas Becerra

Facultad de Ingeniería Electrónica

Universidad Santo Tomás

Tunja, Colombia

2022

Diseño de un equipo desagregador de carga NEU+ para la empresa Erco Energía SAS

Mónica Daniela Vargas Becerra

Proyecto presentado como opción de grado para optar al título profesional de Ingeniera
Electrónica

Directores:

Ing. Arnold Fabian Wiesner Hernández, Ph. D.

Ing. Pablo Andrés Álvarez Camargo, M.Sc. (C)

Facultad de Ingeniería Electrónica

Universidad Santo Tomás

Tunja, Colombia

2022

Exoneración de responsabilidades

El autor asume toda la responsabilidad de las ideas y conceptos expresados en este documento con la intención de exonerar a la empresa Erco Energía SAS, la Universidad Santo Tomás seccional Tunja y a la Facultad de ingeniería Electrónica.

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del codirector

Firma del jurado

Firma del jurado

Dedicatoria

Este trabajo de grado es dedicado a Dios primeramente por darme la sabiduría, felicidad y armonía, también a mis padres por su apoyo, amor y dedicación brindada en el transcurso de mi vida y a mis hermanos por su amor incondicional.

Agradecimientos

Agradecer en primer lugar a Dios por su amor y sus innumerables bendiciones, así como la oportunidad de crecer espiritual y profesionalmente durante esta etapa de mi vida, agradecer también a mis padres por su apoyo, amor, compañía y sabiduría brindada durante cada etapa, de igual forma a mis hermanos por estar siempre presentes en los momentos difíciles y por ser un apoyo indispensable en mi vida.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Santo Tomas seccional Tunja, a toda la Facultad de Ingeniería Electrónica, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, sabiduría y apoyo.

Agradecimiento a la Empresa ERCO Energía SAS por permitirme desarrollar mi pasantía y a todas las personas que de alguna forma contribuyeron para que este proceso finalice con éxito.

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Justificación.....	2
3.	Planteamiento del problema	4
3.1	Formulación de preguntas	4
3.2	Definición del problema.....	4
3.3	Delimitación del problema	4
4.	Objetivos.....	5
4.1	Objetivo general	5
4.2	Objetivos específicos.....	5
5.	Marco referencial.....	6
5.1	Antecedentes	6
5.2	Marco teórico	8
6.	Diseño metodológico.....	15
7.	Resultados.....	17
7.1	Funcionamiento:.....	17
7.2	Etapas:	17
7.3	Rediseño.....	18
	Diseño PCB.....	28
7.4	Costos PCB	32
8.	Conclusiones.....	35
9.	Actividades complementarias.....	37
10.	Bibliografía.....	38

Lista de figuras

Fig. 1. Fases desarrollo de proyecto.....	15
Fig. 2. Diagrama a bloques del proceso de NILM.	17
Fig. 3. Diagrama de bloque etapas del equipo NEU+	18
Fig. 4. Esquemático MCP79410	20
Fig. 5. Esquemático MAX485.....	21
Fig. 6. Esquemático ZMPT101B.....	22
Fig. 7. Bornera TBP02R1-381-04BE.....	23
Fig. 8. Sensores de corriente SCT-013.....	24
Fig. 9. Esquemático ACS723	25
Fig. 10. Esquemático MCP3208	26
Fig. 11. Raspberry Pi Zero W	27
Fig. 12. Esquemático convertidor Buck LM2596	28
Fig. 13. Capa superior PCB.....	29
Fig. 14. Capa inferior PCB.....	30
Fig. 15. Capa superior PCB sin raspberry.....	31
Fig. 16. Diseño de la carcasa.....	32

Lista de tablas

Tabla 1. Implementación de dispositivos de DC.....	12
Tabla 2. Características MCP79410.....	19
Tabla 3. Características sensor de corriente SCT-013-030.	24
Tabla 4. Características sensor de corriente ACS723.	25
Tabla 5. Características Raspberry Pi Zero W.	27
Tabla 6. Características LM2596.	28
Tabla 7. Tabla de recursos de equipo y software.	32
Tabla 8. Tabla de costos de componentes de la PCB.....	34

Glosario

AMI: Infraestructura de medición avanzada

ADA: Automatización de distribución avanzada

VE: Movilidad eléctrica

NILM: Monitorización del consumo energético no intrusiva

ILM: Monitorización del consumo energético intrusiva

SM: Medidor inteligente

AC: Corriente alterna

DC: Corriente continua

V: Voltio unidad de medida del diferencial de potencial.

A: Amperio unidad de medida de la corriente.

ADC: Conversor analógico digital

SPI: Interfaz periférica serial

SSFV: Sistema solar fotovoltaico

GPRS: Servicio general de paquetes vía radio

UART: Transmisor-receptor asíncrono universal

SPI: Interfaz periférica serial

PCB: Placa de circuito impreso

ADC: Convertidor analógico – digital

IPC: Asociación de industrias electrónicas de conexión

Resumen

Actualmente un sistema de medición y supervisión del consumo de energía eléctrica de manera inteligente en entornos residenciales, comerciales e industriales traerá beneficios a las empresas que proporcionan el servicio de energía, con el fin de que puedan ofrecer una mejor supervisión del servicio que están ofreciendo, además podrán regular de una manera más eficiente la energía que se está proporcionando a los usuarios.

En este proyecto se presenta el rediseño del equipo desagregador de carga NEU+ para la empresa Erco Energía S.A.S, este equipo es un dispositivo de medición de energía eléctrica de alta resolución, el cual tomará mediciones de voltaje, corriente, potencia. Para esto utiliza sensores de voltaje y corriente, estos sensores suministran la información adquirida a un sistema de procesamiento para el que se utiliza una Raspberry Pi modelo Zero W, los datos se almacenan en una memoria microSD para luego enviar la información por medio de comunicación Wifi o ethernet, a una base de datos.

1. Introducción

Erco energía SAS es una empresa dedicada al desarrollo de productos y proyectos con energía renovable, quienes a su vez asumieron un reto con la creación de una nueva empresa dedicada al sector de comercialización energética, su objetivo es llevar energía a los hogares e industrias, a nivel nacional como internacional, entre los servicios que ofrecen se encuentra uno muy importante y a su vez innovador en Colombia, se trata de la medición inteligente de la energía a través de un medidor inteligente, este equipo entrega en tiempo real el consumo de energía y esta información se puede consultar a través de una plataforma donde se muestran unas graficas en detalle de la energía consumida diariamente, semanal o hasta mensualmente.

La medición y gestión inteligente de consumo de energía eléctrica en entornos residenciales y comerciales ayudaran a las empresas que suministran el servicio de energía para que tengan un mejor desempeño en la red de distribución a nivel nacional, una reducción de las interrupciones, además se puede gestionar el uso de la energía por parte del usuario, con el fin de regular la demanda de este servicio y se refleja en el costo de su factura.

Con el fin de profundizar un poco más en el consumo se da la necesidad de cuantificar la energía consumida por cada aparato electrónico, con el fin de que los usuarios identifiquen qué aparatos y a qué hora se está presentando mayor consumo de energía.

En este proyecto se observa el rediseño de un desagregador de carga, el equipo presentará en detalle el consumo de energía y será un dispositivo de medición de energía eléctrica de alta resolución, tomará mediciones de voltaje y corriente cada segundo, esto a través de sensores de voltaje y corriente que entregan la información a una raspberry, quien se encarga de enviar por medio de comunicación wifi o ethernet los datos a un servidor remoto, posteriormente se almacena en una base de datos la información.

2. Justificación

La monitorización no intrusiva de la carga (*Non-intrusive load monitoring* - NILM) o desagregación de la carga (DC) tiene como objetivo detectar estados en electrodomésticos o máquinas (encendido - apagado) y asignar cuánta potencia consume cada uno a partir de medidas de un solo punto de la instalación eléctrica. (Hart, 1992)

Los medidores inteligentes (*smart meters* - SM) son fundamentales en el proceso de DC y usualmente mide, directa o indirectamente, la potencia consumida.

La empresa Erco Energía SAS implementa y gestiona recursos distribuidos de energía como lo son energía solar, movilidad eléctrica y almacenamiento de energía, además a partir del año 2019 se convirtió en el primer comercializador de energía 100 % inteligente y digital a través de una empresa llamada NEU Energy (NEU, 2022) esta empresa brinda un servicio de energía eléctrica, que incluye la medición y visualización de consumo de energía eléctrica en tiempo real; Para poder brindar el servicio de manera automatizada es necesaria la implementación de un dispositivo de medición inteligente para adquirir los valores de consumo de energía, conjuntamente la empresa quiere brindar a sus clientes una información más detallada del consumo eléctrico de cada dispositivo que se encuentre en el lugar, por lo cual se instala un dispositivo conocido como desagregador de carga NEU+.

Este equipo actualmente está dado por la unión de dos equipos, una primera parte es un dispositivo de monitoreo, este fue diseñado para supervisar variables de generación de energía suministrada por los inversores los cuales reciben la energía generada por los paneles solares; El otro equipo cuenta con componentes importantes como lo son sensores de voltaje y corriente, los cuales son indispensables para la desagregación de carga, la unión de los dos equipos mencionados tienen la función de entregar en tiempo real variables de consumo de energía.

La importancia de entregar información de consumo en tiempo real a los usuarios es incentivar las decisiones inteligentes y conscientes sobre su consumo de energía y el promover hábitos de ahorro de energía con los que los usuarios se vean beneficiados.

A demás este servicio adicional que ofrece la empresa trae consigo un incremento en el valor del servicio, esto generando un mayor ingreso a la empresa, dado que el dispositivo tiene un costo adicional para los clientes, de igual forma el cliente se ve beneficiado económicamente ya que el equipo le permitirá conocer en detalle el consumo de cada electrodoméstico con la finalidad de que el usuario pueda tomar mejores decisiones respecto al consumo del mismo y que conlleve a un ahorro de energía y una disminución en el valor de la factura.

La implementación de este dispositivo también permitirá contribuir con el cuidado del medio ambiente puesto que los usuarios estarían supervisando la energía eléctrica consumida con el fin de administrarla de una manera más eficiente, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono.

3. Planteamiento del problema

3.1 Formulación de preguntas

- ¿De qué manera se podría optimizar el equipo que se está instalando a los diferentes clientes que están adquiriendo el servicio de energía eléctrica al proveedor de energía NEU y que beneficio traería la optimización de este?
- ¿Cómo se podría reducir el costo del equipo de forma que la empresa pueda economizar recursos?
- ¿Cuál es la importancia de que el equipo este compuesto de una única PCB y de qué manera se beneficiarían los técnicos en el momento de la instalación de dicho equipo?

3.2 Definición del problema

El consumo de energía eléctrica en el sector industrial y en el residencial aumenta continuamente por la demanda que se presenta, exceptuando el año 2020 el cual a raíz de la pandemia presento una reducción del 2 % (UPME, 2020), sin embargo, según la Unidad de planeación minero-energética UPME durante los años siguientes se va a tener un incremento de consumo energético, por tal razón se hace necesario observar el comportamiento del consumo que se está generando en las residencias e industria del país, en consecuencia, la empresa ERCO Energía se ve en la necesidad de buscar estrategias con las que pueda supervisar y prestar un servicio más eficiente e inteligente a sus clientes, con el fin de optimizar la energía y buscar estrategias que beneficien al consumidor con el ahorro de energía, como lo es el poder monitorizar en tiempo real el consumo que se está generando.

3.3 Delimitación del problema

Para este proyecto se tienen dos limitaciones que se presentan a continuación:

- Tiempo de ejecución del proyecto, el cual corresponde a las 960 horas que tendrá la duración de la pasantía en la empresa ERCO Energía S.A.S, este tiempo está establecido en el reglamento de opciones de grado de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, dado que para la empresa no es eficiente contratar a otra persona para que continúe con el desarrollo del proyecto, por lo tanto, se ha dimensionado para que el proyecto se desarrolle durante 6 meses porque requeriría más gastos y tiempo adicional la contratación de otra persona, el entrenamiento y no se justifica por la dimensión del proyecto.
- Presupuesto a invertir, debido a que, en el análisis financiero realizado anualmente en la empresa, decidieron destinar una cantidad presupuestal que se invertirá en el proyecto.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Rediseñar el equipo desagregador de carga NEU+ que permita la optimización de costos de producción para la empresa Erco Energía SAS.

4.2 Objetivos específicos

- Identificar el funcionamiento del equipo desagregador de carga para analizar posibles modificaciones del equipo.
- Identificar las etapas del desagregador de carga y verificar si en el nuevo diseño son necesarias todas.
- Diseñar un nuevo PCB del equipo desagregador de carga.
- Analizar los costos del nuevo diseño del equipo con el fin de determinar si se optimizaron.

5. Marco referencial

En esta sección se encuentran conceptos importantes que permiten entender el desarrollo de este proyecto y algunos temas que son sustanciales porque se vinculan en la puesta en marcha del equipo, también se muestran algunos de los proyectos que se han realizado enfocados en la desagregación y los instrumentos de medición de la energía de manera inteligente, estos instrumentos han sido diseñados con elementos que actualmente están en el mercado.

5.1 Antecedentes

En este capítulo se presentan tres trabajos de grado realizados a nivel internacional, nacional y otro a nivel local de la USTA Colombia, relacionados con la desagregación de carga y los medidores inteligentes, estos temas mencionados se vinculan con el objetivo del presente proyecto; Es importante conocer como otras personas diseñaron los equipos y que parámetros tuvieron en cuenta en el momento de la elección de los componentes que utilizaron, esto permite tener una mejor orientación al definir criterios para el diseño del equipo.

Sistema domótico de desagregación energética no intrusivo (Esparza, 2018)

En este trabajo de maestría presentan un algoritmo de desagregación de carga y su implementación en un sistema domótico de monitoreo energético no intrusivo. Este desagregador utiliza un modelo dinámico basado en máquinas de estado finitos, el modelo es entrenado a partir de la transición de estados que permite detectar variaciones en la corriente eléctrica censada en una toma casera, que pudiera corresponder al encendido o apagado de un dispositivo eléctrico o variaciones en los estados del mismo dispositivo. Para este trabajo utilizan solo la detección de seis dispositivos cada uno con dos estados posibles. El entrenamiento del modelo cuenta con un ajuste iterativo, aproximado a partir lecturas proporcionadas u observaciones de las variaciones de corriente, en donde los estados asociados construyen nuevos modelos.

La implementación del desagregador se ejecuta en tiempo real en un procesador embebido de bajo costo utilizando bajas tasas de muestreo (por ejemplo, por segundo), el sistema domótico de monitoreo lo conformaron el sensor de corriente no invasivo SCT-013-030, un ADC y el microcontrolador ESP12-E, el cual es de bajo costo e incluye modulo wifi, lo que facilita el envío de la información a la base de datos.

Diseño y simulación de un medidor de energía eléctrica bajo el concepto de Redes Inteligentes (Smart Grids) (Martínez, 2020)

El diseño del medidor de energía eléctrica en este proyecto tiene como fundamento el entregar variables de consumo en tiempo real, variables como energía activa, potencia activa, voltaje en AC, corriente AC y factor de potencia. Este equipo se encarga de censar parámetros de corrientes, voltajes,

consumos de energía eléctrica y también envía estos datos censados hacia la nube, además tiene un sistema de alertas, específicamente trabajaron con 3 alertas:

- I) Detección de hurto de energía por tapa bornera abierta
- II) Límite de temperatura máxima
- III) Límite superado de consumo prepago.

Finalmente se comprueba el funcionamiento del dispositivo simulado, mediante la utilización de diferentes cargas resistivas.

En su diseño utilizaron como microcontrolador, un Arduino mega 2560, transformadores de voltaje y corriente, circuitos de control y protección, además para el envío de los datos a una aplicación utilizaron un módulo bluetooth.

Diseño e implementación de un medidor de energía trifásica para sistemas eléctricos no lineales (Sánchez, Carrillo, 2020)

En este proyecto hacen referencia al diseño e implementación de un medidor de energía trifásica para sistemas eléctricos no lineales implementando el estándar IEEE-1459, el cual es una definición estándar para la medición de energía en condiciones balanceadas, desbalanceadas sinusoidales y no sinusoidales. Los medidores actuales no implementan este estándar y fueron diseñados asumiendo que tanto el voltaje como la corriente son sinusoidales, por lo tanto no se contempló la existencia de cargas desbalanceadas y las perturbaciones que estas generan a la red eléctrica de 60Hz, para el diseño del medidor utilizaron una raspberry pi 4, un ADC y un dispositivo que realiza el análisis de las señales aplicando las ecuaciones del STD IEEE 1459 del 2010, este es el ADE7978, la información obtenida la visualizan de forma gráfica y numérica en una página web, en donde se pueden ver los valores de voltaje, corriente, potencia activa, potencia aparente, potencia reactiva y porcentaje de distorsión armónica en corriente y voltaje en cada fase.

El primer proyecto presentado permite entender la forma en que se puede desagregar la carga, allí se muestran las variaciones de la corriente presentados en los dos estados definidos para los electrodomésticos, es importante conocer como otras personas han trabajado el mismo tema, pero con ideas diferentes a las que se pretenden llegar con el presente proyecto; En el segundo proyecto se muestra el diseño de un medidor inteligente, este dispositivo es fundamental para obtener la desagregación, por lo que se necesita adquirir los valores de voltaje y corriente de los consumidos por los electrodomésticos, además se observó que criterios utilizaron para elegir los elementos que conformarían el medidor y el sistema de procesamiento con el que almacenan y envían la información adquirida.

El tercer proyecto permite entender como los medidores son diseñados en condiciones ideales donde las señales ingresadas son sinusoidales sin tener en consideración las variaciones que se pueden presentar dadas por las diferentes cargas.

5.2 Marco teórico

En Colombia el suministro de energía se viene desarrollando de una manera tradicional, en donde las empresas que comercializan este servicio no tienen una forma de controlar la producción de energía, ni la demanda que se presenta, por esta razón, se genera una pérdida de este recurso. Las redes inteligentes nacen como una necesidad y una solución a los principales problemas de la industria. (P, 2020)

Una red inteligente (smart grid - SG) puede entenderse como una red que integra tecnologías digitales con el propósito de hacer uso de la energía de una manera más eficiente, esta tecnología garantiza una comunicación bidireccional entre el usuario final y el operador de red y usa herramientas tecnológicas de software y hardware, para garantizar confiabilidad, eficacia, flexibilidad y seguridad de los sistemas eléctricos, también integran un sistema informático automatizado, para supervisar en línea tanto la producción de energía como la demanda.

En Colombia las SG se plantean con el funcionamiento de las siguientes 4 fases:

1. Medición avanzada inteligente (AMI).
2. Automatización de la red (ADA).
3. Implementación de recursos de energía distribuidas (DER) o energías renovables.
4. Movilidad eléctrica (VE). (P, 2020)

Para implementar una SG se necesita una infraestructura de medición avanzada (AMI), quien utiliza métodos que permiten medir, almacenar y analizar las variables para el uso de la energía, a su vez se relaciona con instrumentos como los medidores inteligentes de electricidad, gas, o agua. Esta clase de sistema permite tramitar y examinar a través de un análisis toda la información recopilada para tomar decisiones, para eso la infraestructura está compuesta de un hardware y software, equipos de comunicaciones, equipos de visualización que permiten a los usuarios y operadores de la red verificar su consumo. (CREG, 2018)

Medición y recolección de datos

Por medio de los equipos de medición inteligentes ubicados en cada usuario, se obtiene valores de energía, corriente, potencia, factor de potencia, fecha, hora, ubicación, carga de fases, etc. Estos datos de medición se almacenan y luego son enviados hacia la central donde son analizados. (Lu, Du, Guo, & Greitzer, 2014)

Transporte y almacenamiento de datos

Después de realizar la medición, se registra y almacena la información de consumo de energía, también se verifica el estado del suministro del servicio, se registra eventos y datos de parámetros eléctricos como corriente, voltaje y potencia, esta información del consumo eléctrico de los usuarios se envía hacia las bases de datos.

El recolector de datos cuenta con una alta capacidad de almacenamiento, recibe la información que fue enviada por los medidores inteligentes y luego la envía a través de la red de telecomunicaciones hasta la empresa de servicios, donde se encuentra ubicado el sistema de gestión. En la mayoría de los casos los medidores inteligentes se comunican con los concentradores de datos vía radio frecuencia o usando tecnología PLC (*Power Line Communication*). Estos concentradores de datos están ubicados en las subestaciones y/o transformadores de distribución de energía eléctrica. (Pedrasa, Valentino, Dumlao, & Pedrasa, 2015)

Gestión de datos

Una vez los datos se envían al concentrador de datos, el cual recepta la información de varios medidores inteligentes enlazados a su red, enviará estos datos a una base de información de un grupo de concentradores, este equipo puede considerarse como un servidor por su capacidad y características. Esta base de datos pertenece a la empresa que presta el servicio de energía eléctrica. Es decir que, por medio de la infraestructura de telecomunicaciones, se transmiten los datos de los concentradores hasta la empresa comercializadora del servicio. Los sistemas de gestión reciben esta información a través de un Software llamado Sistema de Información Comercial (SIC), en el cual se controlan los datos receptados, así automatizando el proceso de toma de lecturas, facturación remota y control de corte-reconexión del servicio remotamente.

Las empresas que prestan este servicio utilizan la información obtenida para el control de la demanda y registros del consumo eléctrico, generación de facturas para el usuario, seguimiento con estadísticas de consumo y control de la calidad de la energía, entre varios aspectos que posee AMI. (Pedrasa, Valentino, Dumlao, & Pedrasa, 2015)

Para los usuarios y proveedores de la energía es indispensable conocer el consumo que se está generando, este consumo es la cantidad de energía utilizada por el usuario en el domicilio durante un plazo de tiempo determinado llamado período de facturación, este período puede variar entre los 27 y 33 días. Las empresas eléctricas son las encargadas de este servicio mediante la asignación de un valor monetario al kW/h que es el que determina la cantidad de dinero que tendrá que pagar el usuario final. (Tarifaluzhora, 2021) En Colombia existe un

organismo gubernamental (CREG) que se encarga de regular los servicios públicos de energía eléctrica y gas, además de regular el valor que se le asigna al kW/h definido por las empresas prestadores del servicio.

Algunas empresas comercializadoras de energía buscan el fomentar el buen uso de este recurso con el fin de que los usuarios den un uso responsable, controlado y monitorizado de su consumo, de esta forma el valor del servicio podría disminuir con las buenas prácticas que se implementen (BELIEVE.EARTH, 2018), por esta razón existe un área de estudio y desarrollo denominada desagregación de carga o monitorización no intrusiva o intrusiva de la carga; Su objetivo es determinar el porcentaje de consumo perteneciente a cada aparato conectado a una fuente de energía, ya que se ha convertido en un asunto con relativa importancia dado el aumento de aparatos electrónicos utilizados por las personas, además para los usuarios es importante conocer el consumo de los electrodomésticos que están teniendo incrementos por algunos lapsos de tiempo en los cuales puede que no se le esté dando uso y poder determinar en qué horas del día se están presentando dichos incrementos en el consumo. En la actualidad existen dos líneas de estudio de la desagregación de carga, estas son:

1. La monitorización del consumo energético intrusiva (ILM): Esta monitorización del consumo energético se lleva a cabo midiendo el consumo de cada electrodoméstico de manera individual, es decir, cada electrodoméstico lleva asociado un medidor. (González, 2018)
2. La monitorización del consumo energético no intrusiva (NILM): Trata de medir el consumo energético de una residencia usando un medidor inteligente (Smart meter), la mayoría de las veces se encuentra ubicado en la acometida de la residencia. Esta técnica consiste en obtener una separación del consumo de cada electrodoméstico a partir del consumo global de la casa. (González, 2018)

2.1. Clasificación de los sistemas de monitorización del consumo energético no intrusiva

Los sistemas de monitoreo no intrusivo de carga se pueden clasificar de acuerdo con dos criterios principales. Uno de ellos está relacionado con el nivel de intrusión en la instalación eléctrica, el otro con la dependencia o no de la detección de un evento.

De acuerdo con el nivel de intrusión, los sistemas de monitoreo no intrusivo de carga se clasifican de la siguiente manera: (Hart, 1992)

- Configuración manual (MS-NILM): Requiere un período de intrusión para configurar el sistema. Durante este período se realizan mediciones sobre cada carga para observar y establecer las características de cada una de ellas.

- Configuración automática (AS-NILM): Se construye por sí solo mientras va midiendo la carga total, utilizando información a priori de las características de las posibles cargas de la instalación.

En el monitoreo de cargas, un evento se define como un cambio en el nivel de consumo de potencia que se encuentra asociado a una transición del estado de operación de una o varias cargas. De acuerdo con el uso o no de estos eventos en el proceso de identificación de cargas existen dos tipos de sistemas: (Y. Wong, 2013)

1. Basados en eventos (event-based): Realizan un seguimiento de las transiciones de estado de cada dispositivo, así detectan cada evento a través de un algoritmo de identificación que se aplica a la curva general de consumo. Las características registradas alrededor del punto donde ocurre un evento son posteriormente clasificadas de acuerdo con un conjunto de reglas empleando métodos de aprendizaje automático.
2. No basados en eventos (non-event-based): Estos no emplean detección de eventos antes de la clasificación. Por el contrario, intentan separar directamente todas las cargas que conforman la señal de consumo general empleando técnicas como modelos de variables latentes y separación ciega de fuentes.

Algunos de los dispositivos que realizan el proceso antes mencionado han sido desarrollados a nivel internacional por países como Estados Unidos, Bélgica, Japón, Canadá, Francia y Argentina donde se han diseñado dispositivos que permiten la desagregación de carga, algunos de estos son presentados en la Tabla 1:

Empresa	Locación	Fecha	Entrada	Descripción
Grid4C	Texas, EU	2015	Medidores inteligentes	Provee desagregadores de carga a partir de un analizador centralizado
Smapee	Kortrijl, Belgica	2014	CT, Khz	Desagregador en tiempo real, IOTT. Control de dispositivos
ENERBITS	Argentina	2015	CT, Khz	Desagregador en tiempo real, consulta históricos y alarmas. Control de dispositivos
Neurio	Vancouver, Canada	2013	2 CT, mide V,I y potencia activa a 1 Hz	Detección de dispositivos >400 W. Notificaciones en tiempo real.
Wattseeker	Nice, Francia		Medidores propios CT	Desagregación de hasta 12 dispositivos precisión 98%, para empresas
Enetics SPEED	Nueva York, EU	1996	2 CT, para alta frecuencia V I	Detección de dispositivos, bajo altas frecuencias
Informetics	Japón y UK	2013	Alta frecuencia	Desagregadores cerca de tiempo real.

Tabla 1. Implementación de dispositivos de DC.

Fuente: Esparza (2018).

Los dispositivos presentados manejan un conocimiento previo del consumo de energía promedio en residencias similares, de esta forma correlacionan el uso de la energía y el tiempo de uso, como característica principal en cada residencia.

En la desagregación de carga es importante la adquisición de datos, con el fin de identificar la detección de flancos en la potencia activa y la extracción de características a partir de las curvas de tensión, corriente consumida y la identificación de electrodomésticos.

A nivel nacional se han planteado y desarrollado algunos proyectos relacionados al tema mencionado, entre los que se encuentra un trabajo de grado de maestría en la Universidad del Norte y otro realizado en unión de dos universidades, Unidades Tecnológicas de Santander y Universidad Industrial de Santander.

- Monitorización no intrusiva de carga para caracterización de consumos en redes eléctricas inteligentes (Racines, 2014)

En este trabajo se muestra el desarrollo de un árbol de decisión para la clasificación de cargas en un sistema de monitoreo de cargas no-invasivo (NILM) implementado en una

computadora de tarjeta sencilla tipo Raspberry Pi 3. El árbol de decisión emplea el valor de energía total de una señal de potencia de los equipos, el cual es generado empleando una transformada discreta de wavelet y el teorema de Parseval. Los datos de consumo de potencia de diferentes tipos de equipos fueron obtenidos de una base de datos de acceso público para aplicaciones NILM.

- Análisis discriminante no intrusivo de cargas basado sobre datos de calidad de energía (Jiménez, Cortes, Duarte, Petit, Carrillo, 2020)

En este trabajo la identificación de carga la aborda como una tarea de clasificación aprovechando la información de calidad de energía. Por lo que proponen analizar las discriminantes de las características de calidad de la energía, lo que requiere procesos de diseño y ajuste más simples que las técnicas tradicionales. Por lo que implementan clasificadores basados en análisis discriminante lineal y cuadrático para medidas de laboratorio con notable desempeño.

Electrodomésticos:

Los electrodomésticos que componen la señal agregada con su consumo de potencia pueden ser clasificados. Una clasificación usualmente utilizada consiste en cuatro grupos: (F, C, & E, 2020)

- Siempre encendidos (router)
- ON/OFF (calefón)
- Máquina de estado finita (FSM) (lavadora)
- Continuamente variable (taladro)

Medidores inteligentes (Smart Meters - SM):

Para que se pueda llevar a cabo el proceso de desagregación de carga se necesita un medidor inteligente debido a que las señales de consumo de energía deben ser adquirida por un dispositivo que cumpla con las condiciones necesarias para esto; Los SM son dispositivos electrónicos que registran información de consumo de energía eléctrica, niveles de voltaje, corriente, factor de potencia, entre otros. Al mismo tiempo muestran la información al consumidor para una mayor claridad del comportamiento de su consumo de energía eléctrica y también envían la información a las empresas prestadoras de este servicio o ESP (Empresas de Servicios Públicos), con el fin de monitorear el sistema y poder generar la facturación a sus clientes.

Estos medidores inteligentes generalmente registran la energía en un determinado tiempo e informan regularmente a intervalos cortos durante el día. (Sinopoli, 2010) A diferencia de los

medidores convencionales los cuales solo miden el consumo total, sin proporcionar alguna información adicional de los momentos o lapsos de tiempo en los que se presentó el mayor consumo durante el día.

Los medidores inteligentes también ofrecen otros beneficios importantes para los clientes o usuarios, entre los que están:

a) el fin de las facturas estimadas o promediadas, que son una fuente importante de quejas entre muchos clientes (CREG, 2021), puesto que ahora la medición se haría en tiempo real y en empresas como NEU ya no es necesario la factura en un formato físico, si no que se implementa el servicio de pago digital a través de la plataforma o aplicación, ya que fueron diseñadas para la visualización del consumo energético en tiempo real.

b) una herramienta para ayudar a los consumidores a administrar mejor su consumo de energía, reduciendo costos en sus facturas, puesto que el precio de la electricidad generalmente alcanza su punto máximo en ciertos momentos predecibles del día y según la temporada y con esto los usuarios pueden ajustar sus hábitos de consumo para ser más receptivos a los precios del mercado y se podría retrasar la construcción de generación adicional o al menos la compra de energía de fuentes de mayor precio, controlando así el aumento constante y rápido de los precios de la electricidad, (SIC, 2016)

c) otra ventaja de los medidores inteligentes que beneficia tanto a los clientes como a las empresas de servicios públicos es la capacidad de monitoreo que proporcionan para todo el sistema eléctrico. Como una parte de AMI las empresas de servicios públicos pueden usar los datos en tiempo real de las mediciones de medidores inteligentes relacionadas con la corriente, el voltaje y el factor de potencia para detectar las interrupciones del sistema rápidamente, lo que permite una acción correctiva inmediata para minimizar el impacto del cliente, como en los “apagones”. (SIC, 2016)

Los conceptos mencionados en este capítulo permiten entender como las redes inteligentes permitirían una mejor administración de la energía eléctrica tanto para las comercializadoras como para las plantas generadoras, es importante entender el cómo llega la energía a las viviendas y los dispositivos encargados de supervisar que cantidad de energía está entregando la red y que cantidad está siendo consumida, con el fin de comprender el concepto de DC para conocer qué beneficios traería la implementación de un dispositivo que sea capaz de entregar en detalle el consumo por separado de cada electrodomésticos que está consumiendo energía.

6. Diseño metodológico

El planteamiento de este proyecto surge de la necesidad presentada con el equipo desagregador de carga NEU+ en la empresa Erco Energía SAS, en el que se busca la optimización del equipo en mención para poder brindar un mejor servicio por parte de la empresa a sus clientes, en la Fig. 1 se puede observar un diagrama en el que se observa las diferentes etapas de desarrollo del proyecto.

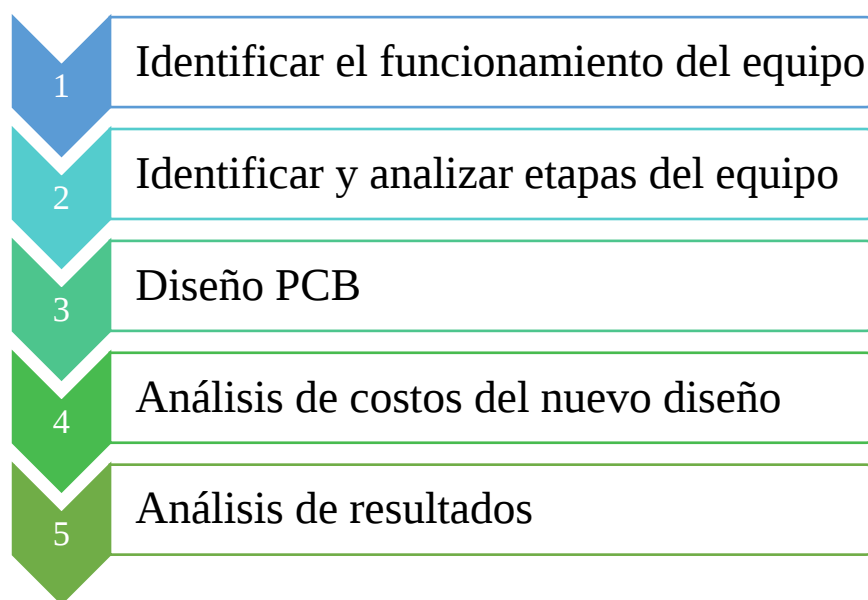


Fig. 1. Fases desarrollo de proyecto.

Fuente: Autor

- El desarrollo de la primera fase se realiza a través de un análisis teórico del equipo, es fundamental conocer su funcionamiento, además de identificar las tareas que son necesarias optimizar.
- En la segunda fase se identifican las etapas de los dos equipos que conforman el dispositivo final, con el propósito de analizar su comportamiento y verificar que etapas del proceso pueden ser innecesarias en el nuevo diseño.
- En la tercera fase se efectúa el nuevo diseño del equipo con los componentes que se seleccionaron, además se verifica el diseño en 3D con el fin de identificar las medidas de longitud, altitud y profundidad para el posterior diseño de la carcasa en la que se va a integrar el equipo.
- En la cuarta fase se evalúa el costo del equipo con los cambios realizados en cuanto a componentes y tamaño del nuevo equipo, con el fin de determinar si se optimizaron como se planteó anteriormente.

- En la última etapa se realiza un análisis de resultados que se obtiene de la ejecución y desarrollo del proyecto, para evaluar si se cumplieron los objetivos propuestos y determinar si se presentaron dificultades en el desarrollo de estos.

7. Resultados

En este capítulo se recopila el análisis metodológico, donde se muestra el funcionamiento del equipo, las diferentes etapas que lo comprenden y se definen cuáles son necesarias en el diseño del nuevo dispositivo, luego se mostrará el diseño final del PCB y para finalizar se realiza un análisis de costos con el fin de determinar si se optimizaron.

7.1 Funcionamiento:

El dispositivo cuenta con un sistema de medición de la energía consumida por los usuarios, esta medición se realiza por medio de unos sensores de voltaje y corriente y son registradas cada minuto, posteriormente son enviadas al sistema de procesamiento que lo comprende una raspberry, la cual se encargada de enviar la información a la base de datos por medio de comunicación wifi o GPRS.

Luego de tener los datos se realiza el proceso de separación de las cargas, para esto se utiliza un modelo de aprendizaje automático a partir del conjunto de datos que se obtuvo de las mediciones, también se realiza el entrenamiento necesario para el modelo, un ejemplo de esto se presenta en la Fig. 2.

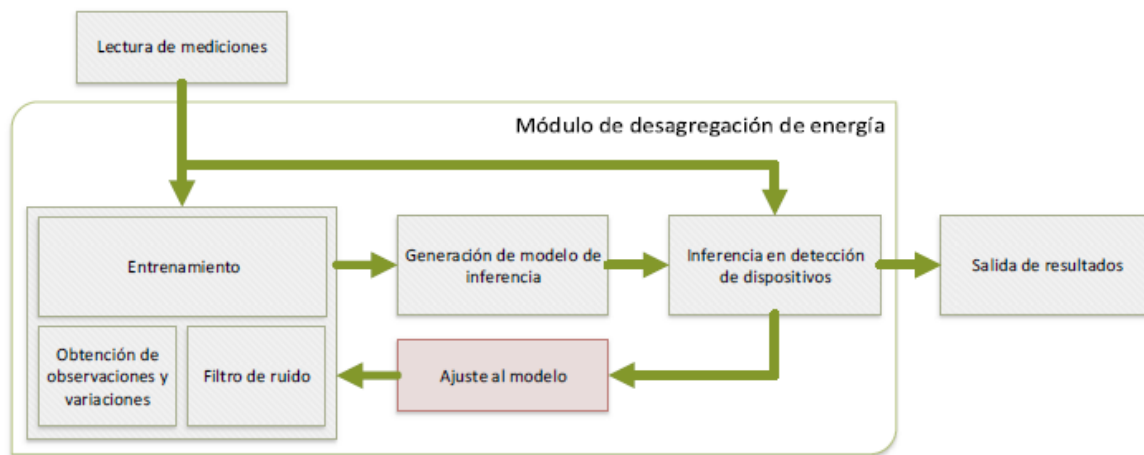


Fig. 2. Diagrama a bloques del proceso de NILM.

Fuente: (Martínez, 2018)

7.2 Etapas:

En esta sección se identifican las principales etapas que integraban el equipo, como ya se había mencionado anteriormente en el cap. 2 el equipo estaba compuesto por la unión de dos equipos diferentes, los cuales se vinculaban por medio de comunicación serial sincrónica con la interfaz periférica serial o mejor conocida como SPI, en la Fig. 3 se puede observar un esquema de las etapas.

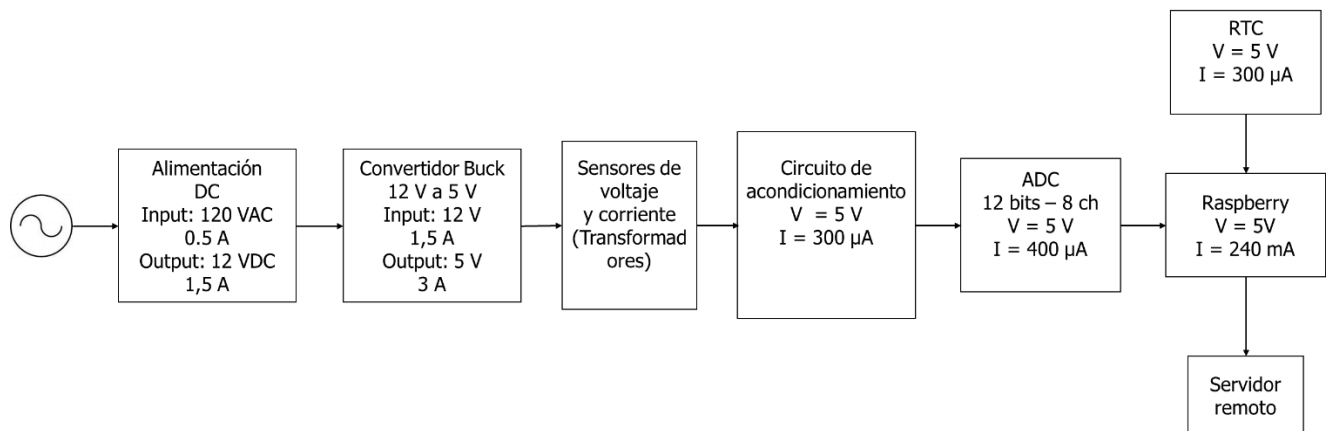


Fig. 3. Diagrama de bloques etapas del equipo NEU+

Fuente: Autor

La primer etapa es la alimentación con voltaje DC, este voltaje es tomado de un adaptador 12 V que se energiza a través de la red eléctrica con un voltaje de alimentación de 120 V y admite una corriente de 0,5 A máximo, posteriormente se reduce el voltaje por medio de dos convertidores DC – DC tipo Buck, el primero reduce el voltaje de 12 V a 5 V y el segundo reduce el voltaje de 5 V a 3,3 V, luego viene la etapa de medición, las señales de voltaje se adquieren a través de un módulo de transformación referencia ZMPT101 quien tiene un rango de medición entre 10 VAC y 278 VAC; Las señales de corriente se adquieren por medio de dos sensores, el primero para un rango de medición entre 0 y 100A y para esto se utiliza un transformador de corriente SCT013 y el segundo para una corriente superior a los 100A para la cual se agrega un transformador de corriente cuya relación secundaria es de 5A, posteriormente se ingresa esa señal a un sensor de corriente quien aísla la señal de entrada debido a que es una señal AC, luego estas señales son acondicionadas con unos amplificadores operacionales que se alimenta con 5V y tiene un consumo de corriente pequeño el cual es de 0,3 mA; Después las señales pasan a un convertidor analógico-digital, para que puedan ser admitidas por el sistema de control, el ADC tiene 8 canales de entrada y tiene una resolución de 12 bits, dada la cantidad de señales que se obtienen de los sensores antes mencionados; El dispositivo además cuenta con un reloj en tiempo real (RTC) para mantener la hora y fecha actualizado en caso de que el sistema presente un corto de energía, adicional a este reloj le agregaron un batería de respaldo, luego el sistema de procesamiento envía la información a través de wifi, ethernet o GPRS a un servidor remoto.

7.3 Rediseño

La idea principal del rediseño se basa en la unión de lo que se encontraba en dos equipos diferentes integrarlo en uno solo, adicionalmente aprovechar este proceso para reducir el tamaño y que la

distribución de los componentes sea la más adecuada y si es posible optimizar los costos, es decir que este nuevo equipo sea más económico en comparación a los dos anteriores.

Para el rediseño del equipo se tuvieron en cuenta la mayoría de las etapas mostradas en la Fig. 3 luego de analizar el funcionamiento de cada una, ya que sus funciones principales se realizan con cada etapa antes mencionada, luego se realizó la elección de componentes considerando parámetros como voltaje de alimentación, corriente, frecuencia y disponibilidad de los componentes dado que algunas referencias no estaban disponibles.

Reloj en tiempo real (RTC)

El reloj de tiempo real permite mantener la hora del sistema actualizada ante posibles cortes de energía o pérdida de internet. Gracias a este reloj se asegura que los registros almacenados van a estar relacionados permanentemente con la hora exacta de su lectura, para luego garantizar un correcto procesamiento de estos con el fin de entregar información fiable a los usuarios del comportamiento de consumo de energía eléctrica. Esta labor se realiza haciendo uso del circuito integrado MCP79410, este circuito integrado se eligió ya que incluye un circuito de conmutación de batería para energía de respaldo, con este se puede agregar una pila de litio a 3.3 V y tener la energía para el circuito de ser necesaria, también es importante que se configura a través del protocolo de comunicación serial I2C el cual es un protocolo que viene integrado en el sistema de procesamiento que se eligió para el dispositivo, por otra parte este componente tiene un bajo precio y se encontraba disponible en comparación con el RTC DS3231, en la Fig. 4 se observa el esquemático donde se encuentran los componentes necesarios para el correcto funcionamiento del RTC, y en la Tabla 2 se encuentran algunas características del circuito integrado.

Módulo	Voltaje de alimentación	Corriente	Protocolo de comunicación
MCP79410	1.8V a 5.5V	400 μ A	I2C

Tabla 2. Características MCP79410.

Fuente: Autor

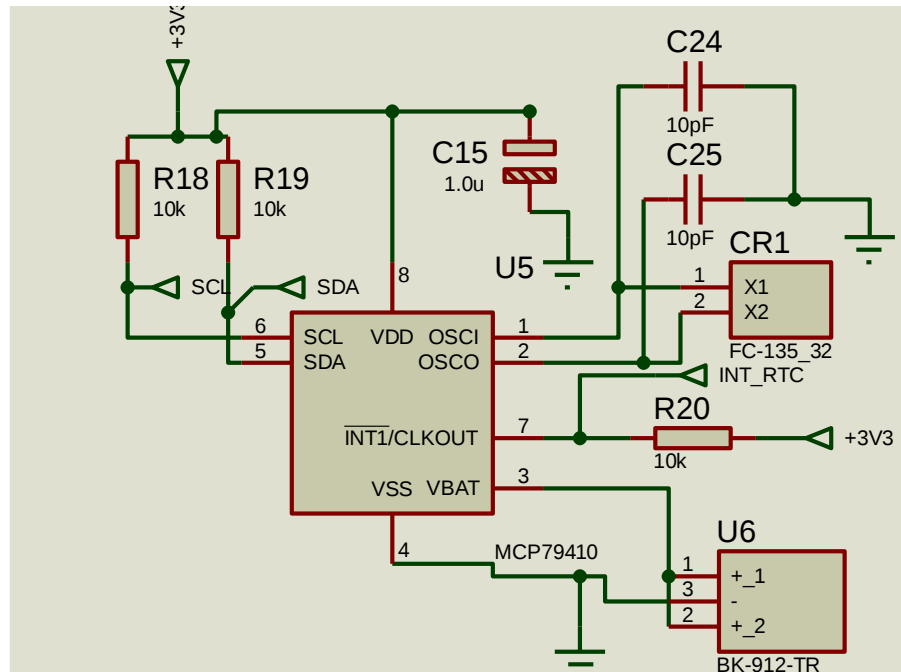


Fig. 4. Esquemático MCP79410

Fuente: Autor

Conversor serie a RS485

El estándar TIA/EIA-485 (RS485) refiere a una interfaz de comunicación que opera sobre líneas diferenciales capaces de comunicarse hasta con 32 dispositivos, también se puede establecer comunicación de hasta 1200 metros y lograr velocidades en el orden de los cientos de kilobits por segundo en largas distancias, es una gran ventaja en caso de necesitar conectar dispositivos que se encuentre en un rango de distancia como el mencionado.

Para la comunicación RS485 se hace uso del transceptor MAX485, este componente consume 2,5 mW y tiene una velocidad de transmisión de 2,5 Mb/s; Con el cual se logra tener una conversión de protocolos entre UART y RS-485, esto permite al equipo contar con comunicación de tipo industrial, un bus RS485 tiene dos conductores denominados A y B, para la conexión de estos se suele utilizar un cable de par trenzado, el esquema de conexión implementado se encuentra en la Fig. 5.

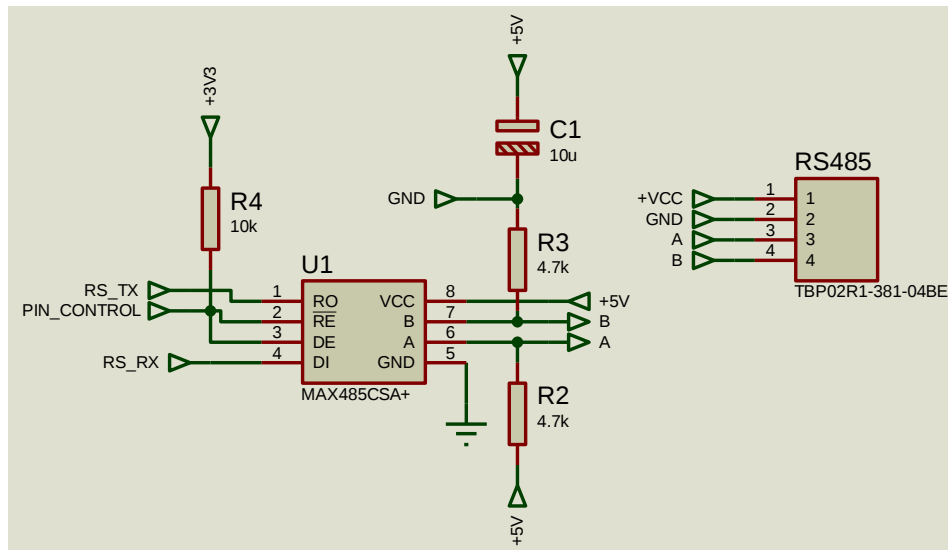


Fig. 5. Esquemático MAX485

Fuente: Autor

Medición de voltaje

La medición de voltaje se realiza a través del transformador de voltaje ZMPT101B del fabricante Godream Fordream Co. Limited (GlobalSources.com, 2021) el cual aísla el voltaje AC de entrada y lo transforma a una amplitud de 5V. Este circuito puede medir voltajes entre 10V AC y 250V AC.

Entre sus principales características están la función de aislamiento galvánico para que sea de mayor seguridad su uso. En el lado primario del transformador se conecta el voltaje alterno que se desea medir y en el lado secundario del transformador se encuentra un divisor de tensión y un circuito de acondicionamiento mediante un amplificador operacional (LM358) para agregar un desplazamiento (offset) a la salida analógica, el circuito implementado para este módulo se puede observar en la Fig. 6.

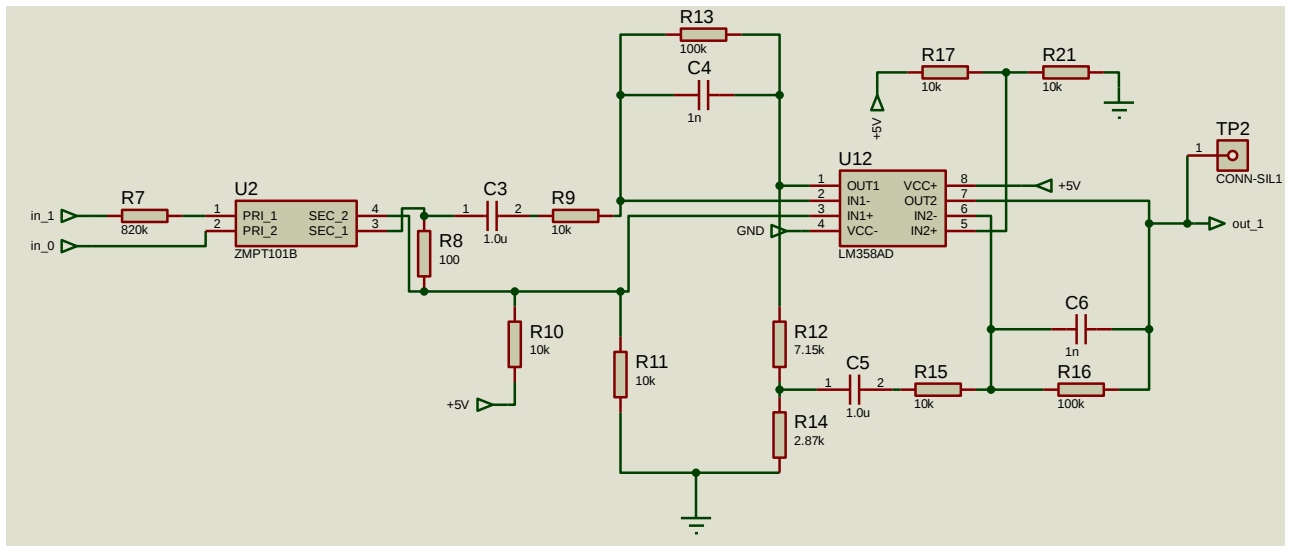


Fig. 6. Esquemático ZMPT101B.

Fuente: Autor

Las señales de voltaje se conectan mediante una bornera enchufable TBP02P1-381 de cuatro posiciones (Fig. 7). Esta bornera se eligió porque el voltaje que permite máximo es de 300 V y corriente máximo 8 A, al mismo tiempo se adapta fácilmente a la carcasa que se diseñó para el dispositivo y es de bajo precio, en la bornera se conectan:

- Voltaje de la fase 1
- Voltaje de la fase 2
- Voltaje de la fase 3
- Neutro

El voltaje que se produce entre la fase 1 y el neutro, la fase 2 y el neutro y la fase 3 y el neutro, luego se conduce hacia el circuito ZMPT101B y su salida se dirige a un canal del convertidor analógico-digital, el cual a través de comunicación SPI, entrega a la Raspberry Pi Zero W los valores medidos de voltaje.



Fig. 7. Bornera TBP02R1-381-04BE.

Fuente: (CUI Devices, 2019)

Medición de corriente

Para la medición de corriente se utiliza un selector de dos posiciones para elegir el sistema de medición de corriente de acuerdo con los rangos de medición, debido a que el sistema tiene que ser diseñado para poder ser instalado tanto en el sector residencial como industrial, estos rangos se dividen de la siguiente forma:

Entre 0 y 100 A

Se utiliza un sensor de corriente de la serie SCT-013, estos sensores trabajan como transformadores, la corriente que circula por el cable y que se va a medir procede como el devanado primario (1 espira) e internamente tiene un devanado secundario que dependiendo del modelo pueden tener hasta más de 2000 espiras, adicionalmente pueden tener una resistencia de carga en la salida, de esta forma en lugar de corriente se trabaja con una salida voltaje (naylampmechatronics, 2016).

La salida que este sensor entrega es una señal alterna, cuyo valor no está dentro del rango aceptado por el ADC (0 a 5 V) por este motivo es necesario implementar un circuito de acondicionamiento; Algunas de las características de este sensor de corriente se pueden observar en la Tabla 3, donde se especifica el valor de corriente de entrada admisible, el rango de temperatura en el que puede operar correctamente.

Una de las razones por las que se eligió este sensor es porque no es necesario cortar el cable en el que se va a medir ya que este sensor al igual que una pinza amperimétrica tiene el núcleo partido y funciona al igual que un transformador como ya se mencionó, obteniendo el flujo magnético que genera la corriente al pasar por el conductor, el primario del transformador es la corriente que circula por el cable conductor, mediante la inducción electromagnética se obtiene una intensidad proporcional a la del primario del transformador en la bobina del secundario, conectada al sistema de medición. (Vazquez, 2019) Obteniendo así la intensidad de corriente, en la Fig. 8 se observa el sensor.



Fig. 8. Sensores de corriente SCT-013

Fuente: (naylampmechatronics, 2016)

Sensor de corriente	Corriente de entrada	Voltaje de salida	Resistencia	Temperatura de operación
SCT-013-030	0 – 30 A	1 V	62 Ω	-25°C ~ 70°C

Tabla 3. Características sensor de corriente SCT-013-030.

Fuente: Autor

Mayor 100 A

Este rango de medición se utiliza para sistemas eléctricos que se diseñaron para conducir corrientes superiores a 100A. Para esto se requieren transformadores de corriente cuya relación secundaria es de 5A (por ejemplo, 500A/5A) y se conectan al sistema de medición como se muestra en la Fig. 9, allí también se puede observar el condensador que se encuentra entre el pin de voltaje salida y tierra el cual es para filtrar la señal.

El dispositivo consta de un circuito de sensor Hall lineal, preciso y de baja compensación con una ruta de conducción de cobre ubicada cerca de la superficie de la matriz. La corriente aplicada que fluye a través de esta ruta de conducción de cobre genera un campo magnético que es detectado por el Hall IC integrado y convertido en un voltaje proporcional (Shawn, 2020). La ventaja de usar un sensor de efecto Hall, concretamente es que el circuito que se detecta y el circuito que lee el sensor están aislados eléctricamente, algunas características que tiene este sensor se encuentran en la Tabla 4.

Este sensor se eligió dada la relación beneficio costo ya que es un sensor que cumple con los requerimientos necesarios para la medición de la corriente en el rango que se necesita.

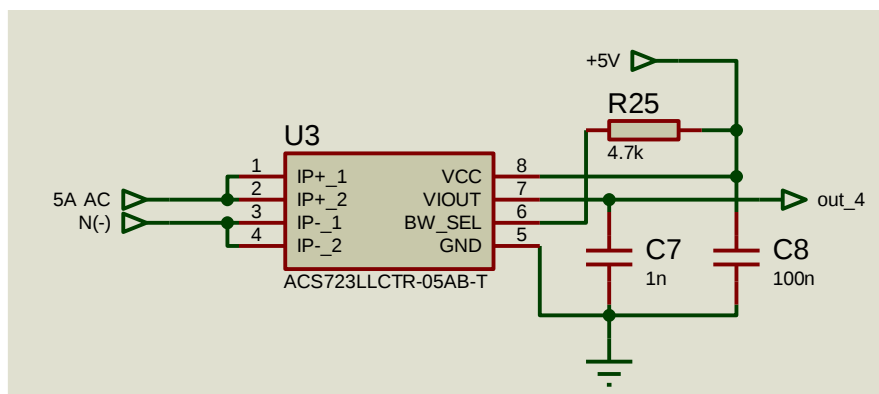


Fig. 9. Esquemático ACS723

Fuente: Autor

Sensor de corriente	Voltaje de alimentación	Sensibilidad	Frecuencia
ACS723	5 V	400 mV/A	800 kHz

Tabla 4. Características sensor de corriente ACS723.

Fuente: Autor

Conversor analógico digital (ADC) MCP3208

El sistema de procesamiento que se utilizara tiene entradas únicamente digitales, por esta razón se hace necesario el uso de un convertidor analógico-digital, el MCP3208 fue el ADC seleccionado ya que tiene un alto rendimiento y bajo consumo de energía en comparación con otros ADC, su consumo en corriente es de 400 μ A y se alimenta con 5V, además cuenta con 8 canales y 12 bits, lo cual es bastante importante debido al número de entradas necesarias que se tienen por la cantidad de sensores utilizados, otra característica importante es la interfaz de comunicación SPI que posee, por medio de esta se realiza el envío de la información al sistema de procesamiento, en la Fig. 10 se puede observar el esquemático con sus respectivas entradas y salidas del ADC.

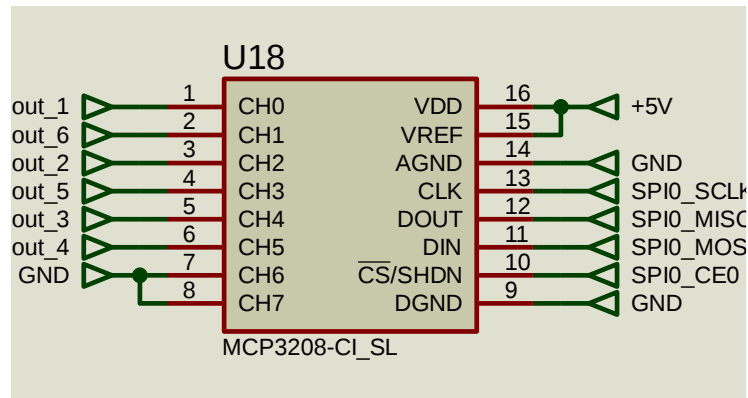


Fig. 10. Esquemático MCP3208

Fuente: Autor

Raspberry Pi Zero W

El sistema de procesamiento del que se ha hecho mención está integrado por la Raspberry Pi Zero W que se puede observar en la Fig. 11, esta es una computadora personal en una placa de circuito de tamaño pequeño y va a ser la encargada de recibir la información que entreguen los sensores a través del ADC por medio de comunicación SPI, posteriormente los datos se almacenan en una memoria microSD, la cual contiene el sistema operativo de la placa, luego se envían estos datos a un servidor remoto, con el fin de ser almacenados en una base de datos para su posterior visualización en la plataforma.

Esta placa en comparación con algún microcontrolador como Arduino o PIC, tiene características que son bastante beneficiosas en proyectos como el presente, se pueden resaltar algunas como por ejemplo el adaptador Wifi y bluetooth que ya vienen integrados, además tiene las mismas funciones de un mini ordenador al cual se puede ingresar remotamente a través de un escritorio remoto de VNC donde se permite hacer modificaciones desde cualquier lugar y dispositivo que tenga acceso a VNC, otra ventaja de la Raspberry Pi Zero W en comparación a las Raspberry de otras referencias es el tamaño, este es mucho menor en comparación a otras referencias como la Raspberry Pi 4 o Raspberry Pi 3, también es de menor costo. Otra característica importante es que tiene entradas para comunicación serial, UART, SPI y I2C, también tiene un puerto mini HDMI y dos puertos micro USB, que pueden ser usados en caso de ser necesario, otro beneficio es la capacidad de almacenamiento de la memoria RAM la cual es de 512 MB y tiene una CPU de 1 GHz con lo que se puede tener velocidades considerables para los requerimientos necesarios en este proyecto.

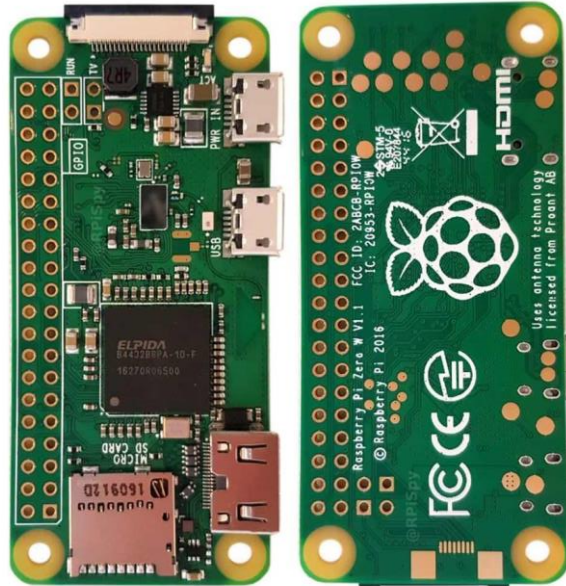


Fig. 11. Raspberry Pi Zero W
Fuente: (Online, É. T, 2019).

Modelo	CPU	Memoria RAM	Conectividad inalámbrica	Pines de conexión	Puertos	Voltaje de alimentación
Raspberry Pi Zero W	1 GHz	512MB	Wireless LAN 802.11 b/g Bluetooth 4.1	40	Mini HDMI Micro USB	5V

Tabla 5. Características Raspberry Pi Zero W.

Fuente: Autor

Alimentación

Para la alimentación de la placa se utiliza un adaptador que entrega 12V y 1,5A, la potencia consumida por el equipo es de 156mW, luego ese voltaje se reduce a 5V a través de un convertidor DC-DC tipo Buck, para el cual se utilizó el convertidor LM2596, ya que el porcentaje de eficiencia es de 92% y comparado con otros como el convertidor MP1584 que tiene un porcentaje más bajo de 85% y una corriente de salida igual pero que necesita un disipador de calor, esto implicaría un espacio más grande en la PCB para este componente y un gasto adicional para la compra del disipador. Además el LM2596 tiene un bajo voltaje de rizado (ripple) con respecto a la salida, otra característica importante es el bajo costo que tiene en el mercado y la disponibilidad del producto, en la Tabla 6 se muestran las

características del regulador y en la Fig. 12 se observa el esquema que según el fabricante es necesario para su correcto funcionamiento y luego se dimensionan los componentes de acuerdo a las especificaciones dadas en la hoja de datos (ON Semiconductor, 2008), entre los componentes que se encuentran en el esquema están, condensadores de acople y de filtrado, un diodo rectificador de barrera schottky el cual proporciona una conmutación rápida ya que la frecuencia de conmutación esta alrededor de los 150 kHz y esto permite una respuesta rápida.

Regulador	Voltaje de entrada	Voltaje de salida	Corriente de salida máx.	Eficiencia de conversión	Frecuencia	Ripple
LM2596	4.5 V a 40 V	1.23V a 37V	3A	92%	150 kHz	30 mV

Tabla 6. Características LM2596.

Fuente: Autor

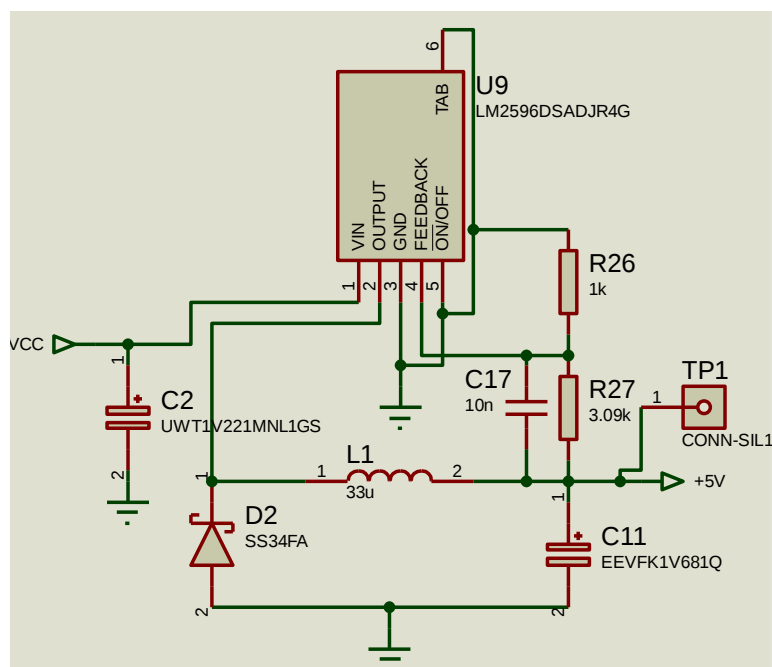


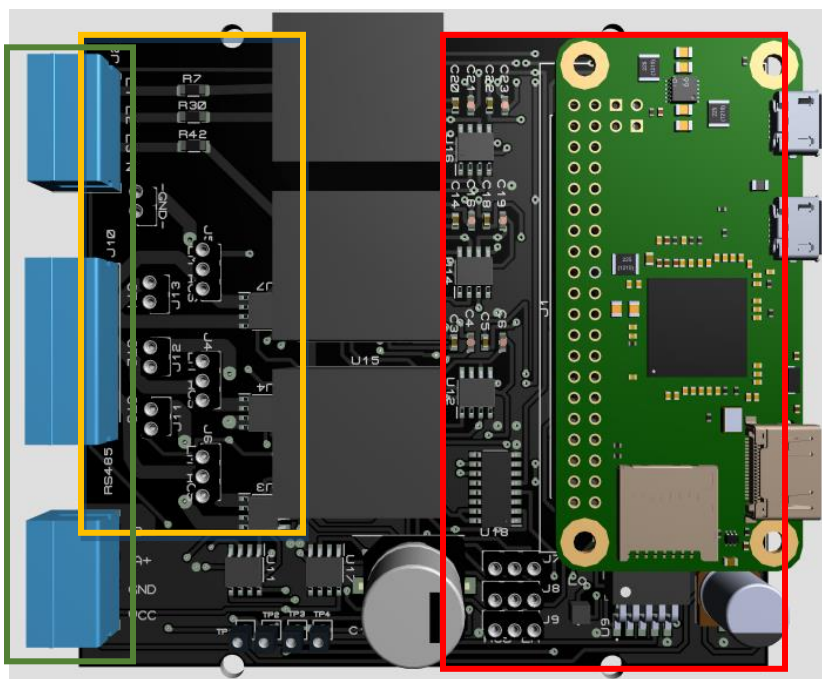
Fig. 12. Esquemático convertidor Buck LM2596

Fuente: Autor

Diseño PCB

Una vez finalizada la selección de los componentes, en el software proteus se realiza el diseño de la PCB, se decide utilizar dos capas con el fin de distribuir los componentes de una conforma adecuada y

Durante el diseño de la placa se tuvieron en cuenta las recomendaciones que entrega la empresa encargada de la fabricación de la PCB, algunas de estas fueron, tamaño de los orificios, pistas y vías, distancia mínima y máxima de separación de los componentes, tanto para la etapa de control como para la de potencia, esto basado en la norma IPC 2221B la cual define los requerimientos para el diseño de las PCB.



Fuente: Autor

29

y la interferencia electromagnética (EMI). Además ayuda a disipar el aumento de temperatura en caso de que se presente, otro gran beneficio es que las señales de retorno se ejecutarán en el plano de tierra con lo que seguirán sus pistas de señal correspondientes lo más cerca posible, esto disminuye el área de bucle del circuito que contienen sus señales eléctricas, cuando la distancia entre un punto de la señal y su retorno es lo más pequeña posible también se reduce la posibilidad de que se presenten interferencias como las ya mencionadas.

En la Fig. 13 se observa la posición de las borneras a un extremo de la PCB (sección que se encuentra señalada de color verde) se ubicó de esta forma con el fin de facilitar su conexión y según la norma IPC 2221 capítulo 3.5.5.1 los conectores deben colocarse para facilitar el acoplamiento rápido y debe ser uniforme y consistente (Norma IPC2221, 2019). Deben utilizarse conectores similares o de geometría similar. de la misma forma se ubicó la raspberry al otro extremo en caso de ser necesario usar los puertos micro USB que contiene.

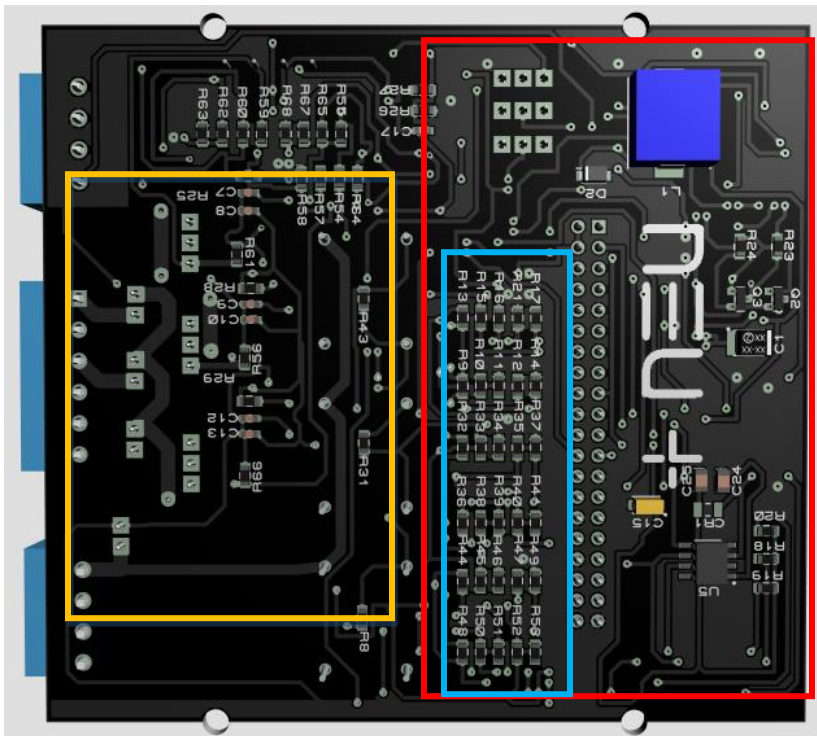


Fig. 14. Capa inferior PCB.

Fuente: Autor

En la Fig. 14 se puede observar una sección donde se encuentra un conjunto de resistencias (sección de color azul), estas se ubicaron en este lugar para facilitar su unión con sus respectivos puntos de conexión y la mayoría de estas pertenecen a los circuitos de acople de las señales de voltaje y corriente que se obtienen de los sensores por lo tanto estas no podían quedar ubicadas en la sección de potencia.

En la Fig. 15 se observa el espacio correspondiente a la raspberry, en este lugar se agregó una regleta de conexión hembra de 40 pines con el fin de que se la raspberry no quedara ensamblada directamente a la placa, sino por el contrario tuviera la opción de ser retirada de la PCB y en este espacio se ubicaron algunos componentes los cuales también se beneficiaron de esta posición ya que necesitan aberturas en la carcasa, uno de estos es un interruptor (sección señala de color azul), este se agregó para encender un led de color verde, otro fue el sujetador de batería tipo botón (sección señalada de color amarillo), se añadió con el fin de sujetar la batería que va a tener de respaldo el RTC.

Los otros componentes que se encuentran en esta sección se ubicaron ahí con el fin de distribuir mejor el espacio que quedaba disponible y facilitando las rutas de conexión para que fueran lo más cortas posible.

La dimensión final de la placa fue de 93 mm de ancho y 85 mm de largo.

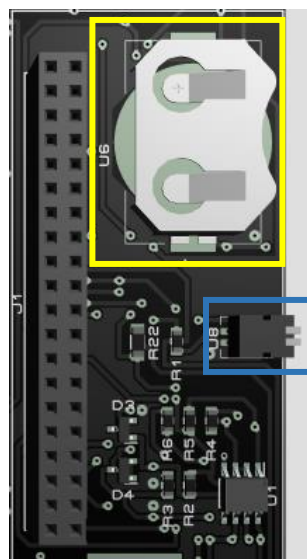


Fig. 15. Capa superior PCB sin raspberry.

Fuente: Autor

En el software de dibujo en 3D AutoCAD se diseñó la carcasa para el equipo, de los parámetros que se tuvieron presentes para su diseño fue la longitud que tendría el margen superior e inferior el cual fue de 1.5mm ya que esa es la dimensión de los tornillos que se eligieron para ajustar la PCB con la carcasa, esto con el fin de que ningún camino atravesara este espacio, además se tuvieron presentes las dimensiones de los conectores elegidos para que los agujeros que se realizaron para estos, tuvieran la medida exacta, en la Fig. 16 se observa el diseño de la carcasa en el software mencionado, especificando sus dimensiones.

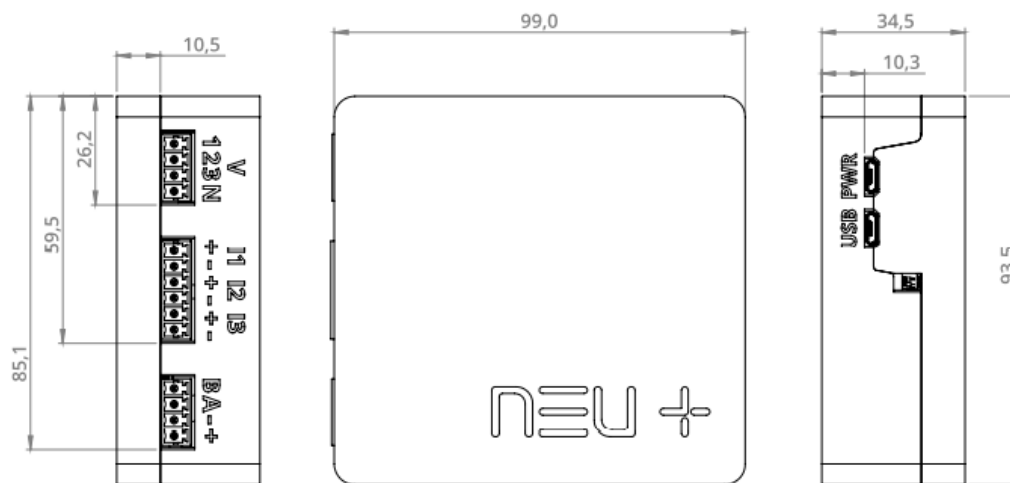


Fig. 16. Diseño de la carcasa.

7.4 Costos PCB

En la Tabla 7 se muestra una estimación en costos de los recursos necesarios para el diseño de la PCB, tanto de la licencia de software como del equipo de cómputo que se utilizó, discriminada para los 6 meses que se invirtió en el desarrollo de la pasantía.

RECURSO	COSTO (COP)	VIDA ÚTIL	COSTO PARA EL PROYECTO
Computador portátil	\$ 1.500.000	10 años	\$ 75.000
Licencia de software de simulación PROTEUS	\$ 3.175.000	1 año	\$ 1.587.500,00

Tabla 7. Tabla de recursos de equipo y software.

Fuente: Autor

En la Tabla 8 se muestra una recopilación de los componentes elegidos en el rediseño del dispositivo y se encuentra discriminado por valor unitario y valor total de cada uno de los componentes implementados, además del costo de ensamble y carcasa.

Entre los parámetros que se tuvieron en cuenta para elegir la raspberry pi zero w fue gracias al costo que en su momento tenía, esto debido a que costaba alrededor de los noventa mil pesos y se tenían diferentes parámetros como los que ya se mencionaron anteriormente en comparación con otros modelos de raspberry que costaba tres y hasta cuatro veces el valor de la raspberry seleccionada, a su vez tiene características favorables en comparación con algunos microcontroladores que se encuentran

en el mercado y aun menor precio, pero sin incluir modulo wifi o bluetooth y ninguno tenía la opción de acceso remoto.

Como se disminuyó el tamaño de la PCB en comparación al anterior diseño, el valor de la impresión de la PCB disminuyó, de la misma forma el valor de la carcasa dado el nuevo tamaño y el hecho de que en este diseño se necesita una sola.

ITEM	CANTIDAD DEL COMPONENTE EN LA PCB	DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE	VALOR UNITARIO (COP)	VALOR TOTAL (COP)
1	1	RES 120 OHM 1% 1/4W 0805	\$ 388,71	\$ 388,71
2	2	RES 4.7K OHM 1% 1/4W 0805	\$ 738,54	\$ 1.477,08
3	3	RES 10K OHM 1% 1/4W 0805	\$ 1.166,13	\$ 1.166,13
4	3	RES SMD 820K OHM 1% 1/2W 1206	\$ 1.438,22	\$ 4.314,66
5	3	RES 100 OHM 1% 1/4W 0805	\$ 388,71	\$ 1.166,13
6	29	RES 10K OHM 1% 1/4W 0805	\$ 388,71	\$ 11.272,59
7	3	RES 7.15K OHM 1% 1/4W 0805	\$ 388,71	\$ 1.166,13
8	6	RES 100 KOHM 1% 1/4W 0805	\$ 388,71	\$ 2.332,26
9	3	RES 2.87K OHM 1% 1/4W 0805	\$ 388,71	\$ 1.166,13
10	1	RES 20 OHM 1% 1/2W 1206	\$ 388,71	\$ 388,71
11	3	RES 4.7K OHM 1% 1/4W 0805	\$ 738,54	\$ 2.215,62
12	4	RES 1K OHM 1% 1/4W 0805	\$ 388,71	\$ 1.554,84
13	1	RES 3.09K OHM 1% 1/4W 0805	\$ 388,71	\$ 388,71
14	3	RES 34.8K OHM 1% 1/4W 0805	\$ 388,71	\$ 1.166,13
15	3	RES 12K OHM 1% 1/4W 0805	\$ 738,54	\$ 2.215,62
16	1	10u CAPMP3528X210	\$ 2.021,28	\$ 2.021,28
17	1	UWT1V221MNL1GS CAPAE830X1080N	\$ 776,01	\$ 776,01
18	6	C0603C105K4RACAUTO	\$ 544,19	\$ 3.265,14
19	6	1n 0603_CAP	\$ 388,71	\$ 2.332,26
20	3	1n 0603_CAP	\$ 338,71	\$ 1.016,13
21	3	100n 0603_CAP	\$ 338,71	\$ 1.016,13
22	1	EEVFK1V681Q CAPAE1350X1400N	\$ 4.858,84	\$ 4.858,84
23	1	1.0u CAPMP3216X180	\$ 3.187,40	\$ 3.187,40
24	1	10nF CAPC1608x87	\$ 583,06	\$ 583,06
25	2	SMD AUTO C0G, CERAMIC, 10 PF, 10	\$ 583,06	\$ 1.166,12
26	1	SS34FA SODFL3618X143N	\$ 2.021,28	\$ 2.021,28
27	2	SM712-TP	\$ 206,40	\$ 412,80
28	2	2N7002 SOT23	\$ 1.477,09	\$ 2.954,18
29	1	MAX485CSA+ SOIC127P600X175-8N	\$ 5.237,31	\$ 15.237,31
30	3	ZMPT101B	\$ 11.305,00	\$ 33.915,00
31	3	ACS723LLCTR-05AB-T	\$ 14.336,33	\$ 43.008,99
32	1	IC RTC CLK/CALENDAR I2C 8-SOIC	\$ 3.692,72	\$ 3.692,72
33	1	BK-912-TR	\$ 1.982,41	\$ 1.982,41
34	1	CHP-021TA	\$ 7.074,47	\$ 7.074,47
35	1	LM2596DSADJR4G	\$ 11.039,28	\$ 11.039,28
36	5	LM358AD SOIC127P600X175-8N	\$ 2.270,28	\$ 11.351,40
37	1	MCP3208-CL_SL SOIC127P600X175-16N	\$ 12.403,44	\$ 12.403,44
38	1	PRT-14275	\$ 5.558,51	\$ 5.558,51
39	1	RASPBERRY PI ZERO W sin header	\$ 90.864,00	\$ 90.864,00
40	2	TBP02P1-381-04BE	\$ 5.208,67	\$ 10.417,34
41	1	CR2032	\$ 1.360,47	\$ 1.360,47
42	1	TJ0631530000G	\$ 7.385,43	\$ 7.385,43
43	1	2222 RHDR40W64P254_2X20_5130X500X865P	\$ 5.830,61	\$ 5.830,61
44	1	OQ0632510000G	\$ 3.459,49	\$ 3.459,49
45	6	PREC003SFAN-RC	\$ 388,71	\$ 2.332,26
46	2	TBP02R1-381-04BE	\$ 3.187,40	\$ 6.374,80
47	4	CONN HEADER VERT 2POS 2.54MM	\$ 272,09	\$ 1.088,36
48	1	XLAMP XBD GREEN 528NM	\$ 4.975,45	\$ 4.975,45
49	1	33u INDPM110100X400N	\$ 6.491,41	\$ 6.491,41
50	1	CRYSTAL 32.7680KHZ 7PF SMD	\$ 2.565,47	\$ 2.565,47
51	1	ADAPTADOR 12 V	\$ 7.021,00	\$ 7.021,00
52	1	PCB	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00
53	1	CARCASA	\$ 25.000,00	\$ 25.000,00
TOTAL				\$ 408.419,70

Tabla 8. Tabla de costos de componentes de la PCB.

Fuente: Autor

8. Conclusiones

- Analizando el equipo se determinó que cumple con la funcionalidad que se espera, aunque su valor y su dimensión podrían ser optimizadas, lo cual forma parte de lo que se desarrolló en este proyecto, esto beneficiaría a las personas que se encargan de la configuración y puesta en marcha del equipo, ya que no tendrían que encargarse de unir las dos partes que conformaban al equipo y el tiempo de calibración y configuración sería menor.
- Se verificaron las etapas del diseño anterior y se determinó que cada una es necesaria, debido a que el sistema de monitorización de voltaje y corriente requiere de cada una de ellas para finalizar su objetivo correctamente, como se explica en el capítulo 7.2 el paso a paso de cada una, se identifica que sin una etapa no se puede llegar a la siguiente, por ejemplo se necesita la etapa de acondicionamiento ya que las señales de voltaje y corriente no podrían ingresar al ADC porque le causarían un daño, y sin el ADC las señales no serían admitidas por la raspberry debido a que solo tiene entradas digitales y las señales adquiridas por los sensores son analógicas.
- Dentro del análisis de las etapas se pudo evidenciar que no era necesario el convertidor DC-DC tipo Buck, este disminuía el voltaje de 5 V a 3,3 V, ya que el sistema de procesamiento que se utiliza en este diseño el cual es la raspberry pi zero w, mencionada en el capítulo 7.3, cuenta con un pin de salida de voltaje de este nivel. Con este se suministró el voltaje requerido por algunos componentes los cuales estaban solicitando un nivel de voltaje como el mencionado anteriormente. Asimismo, analizando los medios de comunicación por los cuales se iba a enviar la información a la base de datos, se decidió utilizar la comunicación vía wifi y ethernet, por este motivo se eliminó la comunicación GPRS que tenía a través de un modem Quectel LTE EC21-E, debido a que el valor del modem sufrió un incremento muy alto y se determinó que las opciones que ya se mencionaran eran óptimas y de menor costo.
- En el diseño de la PCB, capítulo 7.3 se especificaron parámetros que se consideraron, como la separación de la parte de potencia con el fin de prevenir el ruido que le puede ocasionar a la parte de control; El diseño se realizó en el programa de simulación proteus, quien a su vez tiene la opción de mostrar el dibujo en 3D de la PCB en sus diferentes capas como se puede observar en la Fig. 13 y Fig. 14, obteniendo así una observación más detallada, así se definió la ubicación de algunos componentes por su tamaño y la conexión de los puertos con cables exteriores, en especial a los que se les tenía que realizar orificios en la carcasa para su conexión, por ejemplo los conectores de alimentación y los puertos de la raspberry (Fig. 16).

- El objetivo de disminución de costos no se cumplió en cuanto al valor de los componentes, debido a que los componentes electrónicos a nivel mundial tuvieron un incremento bastante elevado, en consecuencia a que la fabricación de estos se vio afectada por las restricciones sanitarias que se presentaron por el covid-19, las empresas que se dedican a la fabricación de estos chips tuvieron que detener su producción durante un tiempo, esto provoco que la demanda de estos chips se represara un tiempo y con ello se presentó el incremento de su costo, a raíz de esto el valor del equipo tuvo un incremento ya que los componentes seleccionados sufrieron un incremento por las razones antes mencionadas.

Pero en cuanto al valor de impresión de PCB y el valor de carcasa si se disminuyo ya que el tamaño del anterior equipo era de 73 mm de ancho y 140 mm de largo y el nuevo es de 93 mm de ancho y 85 mm de largo por lo tanto el valor de la impresión es menor para el nuevo dispositivo de igual forma para la carcasa.

- El rediseño del equipo se cumplió a cabalidad con el fin de que la empresa Erco Energía pueda ofrecer un mejor servicio a sus clientes, aunque los costos de producción no tuvieron una disminución debido a lo que ya se expresó anteriormente, sin embargo, con este nuevo diseño se ven beneficiadas las personas encargadas de la configuración y puesta en marcha de los equipos ya que con este nuevo equipo se disminuye el tiempo de ensamble de la PCB y la carcasa.

9. Actividades complementarias

En este capítulo se mencionarán algunas de las actividades adicionales que se desarrollaron en el transcurso de la pasantía en la empresa Erco Energía S.A.S.

- Se realizó la documentación técnica de los procesos desarrollados de hardware y firmware.

Esto se realizó debido a que el equipo de monitoreo de los SSFV tenía dos versiones, por lo tanto, era importante tener un documento técnico del funcionamiento de cada uno de estos, además los técnicos encargados de la instalación de estos equipos necesitaban un manual de instalación para realizar de forma correcta dependiendo del lugar.

- Apoyo en el desarrollo de hardware y firmware.

Debido a las necesidades que se fueron presentando en algunos proyectos fue necesario implementar varias actualizaciones en el firmware del equipo de monitoreo, los inversores que son los equipos a los que en la mayoría de los casos se conecta este dispositivo tienen diferentes estados de operación, esto aún no se había especificado, por lo que fue necesario detallar cada estado en el que se podría encontrar el inversor, para esto se realizó la consulta de esta información en el mapa modbus de cada inversor utilizado, con el fin de identificar los posibles estados en los que puede estar y poder monitorizarlos.

- Configuración y despliegue de equipos de monitoreo de SSFV.

Los equipos de monitoreo de SSFV se configuran dependiendo del número de inversores a los cuales vaya a monitorizar, también dependiendo de la marca del inversor y de la potencia de este, debido a que el mapa modbus que tiene cada uno de los inversores varía dependiendo las características antes mencionadas, cabe aclarar que el sistema de monitoreo se comunica con los inversores a través del protocolo de comunicación modbus RS485.

- Supervisión y diagnóstico de redes de monitoreo.

Después de instalados los equipos de monitoreo se necesita una supervisión constante de estos, con el fin de velar por el correcto funcionamiento del ecosistema de monitoreo y mantener comunicación sobre posibles problemas encontrados, además de realizar el acompañamiento durante el proceso de instalación de los equipos tanto de monitoreo como de las estaciones meteorológicas o medidores inteligentes, según sea el caso, con el fin de verificar la óptima comunicación de los equipos con el sistema de monitorización.

10. Bibliografía

- [1] González, D. (2018). Desagregación del consumo energético en un hogar inteligente: estado del arte y aplicación a datos reales [Máster en Técnicas Estadísticas, Universidad de Santiago de Compostela]. Repositorio institucional de la Universidad de Santiago de Compostela. http://eio.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto_1571.pdf
- [2] Bhattacharjee, S., Kumar, A., and RoyChowdhury, J. Clasificación de electrodomésticos mediante desagregación energética en hogares inteligentes.
- [3] Kelly, J. Desagregación de datos de energía de medidores inteligentes domésticos. Tesis doctoral, Universidad de Londres, 2017.
- [4] Donato, Carugati, Funes, Ureña, P. I. M. J. (2020, marzo). Desagregación no intrusiva de consumos eléctricos en redes eléctricas inteligentes | Editores. <https://www.editores-srl.com.ar/>. https://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/351/lic_unmdp_desagregacion_no_intrusiva_de_consumos_electricos_en_redes_electricas_inteligentes
- [5] Metering and smart metering international. 2017. “85m smart meters to be installed annually by 2025.”, en <http://www.metering.com/regional-news/africa-middle-east/85msmart-meters....> Acceso 10 de diciembre de 2018.
- [6] Uribe-Pérez, Hernández, De La Vega, Angulo, “State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids,” en Applied Sciences, vol. 6, pp. 1–24, Feb. 2016.
- [7] Infraestructura de Medición Avanzada GM. (s/f). Gov.co. <https://www.minenergia.gov.co/infraestructura-de-medicion-avanzada>
- [8] Alcalá Orzáez, Non-Intrusive Load Monitoring techniques for Activity of Daily Living recognition, tesis doctoral, Universidad de Alcalá, España, 2016
- [9] Hart, G. W., 1992. Nonintrusive appliance load monitoring. Proceedings of the IEEE 80 (12), 1870–1891
- [10] Weis, O. (2020, febrero 10). Protocolos de comunicación serie. Tipos y características. Serial-port-monitor.org. <https://www.serial-port-monitor.org/es/articles/serial-communication/types-of-serial-protocols/>
- [11] Comisión de regulación de energía y gas [CREG]. Decreto 348 de 2014. 13 de mayo de 2014(Colombia).
- [12] Comisión de regulación de energía y gas [CREG]. Ley 1715 de 2014. 13 de mayo de 2014(Colombia).

- [13] P. (2020, 26 mayo). SMART GRID COLOMBIA VISIÓN 2030: LA RUTA DE TRANSICIÓN. PrimeStone. <https://primestone.com/smart-grid-colombia-vision-2030-la-ruta-de-transicion-hacia-la-eficiencia-energetica/>
- [14] Antonio, L., Rubio, S., Huertas, A. B., Mojica, P., Cuéllar, G. S., Medina, C., Sebastián, J., Camacho, C., Rodríguez González, N., Sánchez Ochoa, D. E., Darío, R., & Rodríguez, C. (s/f). Gov.co. Recuperado el 3 de enero de 2022, de https://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/pdf/medicion_energia.pdf
- [15] J. Sinopoli, de mart Building Systems for Architects, Owners, and Builders, 2010, pp. PP. 65-65.
- [16] Esparza Martínez, P. V. (2018). Sistema domótico de desagregación energética no intrusivo [Tesis de maestría, Centro de Investigación e Innovación en Tecnologías de la Información y Comunicación]. <http://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1027/313>
- [17] E. S.A, «enel.com,» ENEL S.A, 2018. [En línea]. Available: <https://www.enel.com.co/es/medicion-inteligente.html>. [Último acceso: 17 abril 2020].
- [18] CEN, «Communication systems for meters Part 1: Data exchange, » CENCENELEC, Vols. %1 de %2 Standard EN 13757-1, 2015.
- [19] C. F. R. -. B. A. C. -. E. F. Caicedo, «Una propuesta de modelos de datos y protocolos de intercambio de información estandarizados aplicables a sistemas de medida centralizada,» Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 16, n° 30, pp. 149-167, 2017.
- [20] J. R. W. M. J. F. R. R. Céspedes, «Methodology for defining the functionality of advanced measurement infrastructure in Colombia, » IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Quito, vol. 1, n° 1, p. 6, 2017.
- [21] A. P. S. M. B. V. M. V. G. Vilas, «Implementation of metering practices in smart grid, » International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM), Chennai, vol. 1, n° 1, p. 4, 2015.
- [22] Marchesoni F, Mariño C, Masquil E. (2020). Monitoreo no intrusivo de cargas eléctricas (NILM) [Tesis de pregrado, Universidad de la República]. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/24187>

- [23] Transformador de voltaje AC - ZMPT101B. (2016). Naylamp Mechatronics - Perú.
<https://naylampmechatronics.com/sensores-corriente-voltaje/393-transformador-de-voltaje-ac-zmpt101b.html>
- [24] Perú, M. N.-. (2017). Tutorial sensor de corriente AC no invasivo SCT-013. Naylamp Mechatronics - Perú. https://naylampmechatronics.com/blog/51_tutorial-sensor-de-corriente-ac-no-invasivo-sct-013.html
- [25] S. (2020, 15 febrero). ACS712 Current Sensor: Features, How it works, Arduino Guide. Latest Open Tech From Seeed. <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/02/15/acs712-current-sensor-features-how-it-works-arduino-guide/>
- [26] Online, É. T. (2019). Raspberry Pi Zero W - Wifi Y Bluetooth | Éxito - Compra Online en Colombia | exito.com. ÉXITO Tienda Online. <https://www.exito.com/raspberry-pi-zero-w-wifi-y-bluetooth-100134365-mp/p>
- [27] CUI Devices TBP02R1-381-04BE. (2019b). Digi-key.
<https://www.digikey.com/es/products/detail/cui-devices/TBP02R1-381-04BE/10238459>
- [28] Kyle Christopher L. Melchor, Christopher D. Obniala, Jhoanna Rhodette I. Pedrasa, "Implementation of a routing protocol for smart grid's low-power and lossy network", Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA) 2015 IEEE, pp. 1-7, 2015.
- [29] N. Lu, P. Du, X. Guo and F. L. Greitzer, "Smart meter data analysis," PES T&D 2012, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/TDC.2012.6281612.
- [30] Selectra. (3 de marzo de 2020). Consumo Eléctrico. Recuperado el 5 de agosto de 2020, de <https://tarifaluzhora.es/info/calcular-consumo-electrico-casa>
- [31] (S/f). Gov.co. Recuperado el 7 de marzo de 2022, de <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/Proyecciones-de-demanda.aspx>
- [32] Y. Jimenez, J. Cortes, C. Duarte, J. Petit y G. Carrillo, "Análisis discriminante no intrusivo de cargas basado en datos de calidad de energía", Taller IEEE de 2019 sobre electrónica de potencia y aplicaciones de calidad de energía (PEPQA), 2019, págs. 1-5, doi: 10.1109/PEPQA.2019.8851568.
- [33] (S/f). Studocu.com. Recuperado el 12 de abril de 2022, de <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-de-las-fuerzas-armadas-de-ecuador/disenoelectronico/normas-ipc-2221/10503044>