



Proyecto final de Ingeniería Electrónica

Medidor inteligente de energía eléctrica

Autores: Bertonatti, Luciano (52313)
Gremes Cordero, Juan (53306)
Rovero, Agustín (49279)

Tutores: Nemirovsky, Nicolás
Orchessi, Walter
Pingitore, Ricardo
Ugarte, Alejandro

Fecha: 18/11/2020

Se agradece a los ingenieros Ricardo Pingitore y Nicolás Nemirovsky por su invaluable supervisión durante la realización de este proyecto. A la Biblioteca Dr. Amadeo J. Galli por la adquisición de material de consulta. Asimismo se agradece los aportes del Centro de Investigación y Desarrollo en Electrónica Industrial (CIDEI), y en particular a los ingenieros Pablo Cossutta y Juan Matus.

Por otro lado, un especial agradecimiento a nuestras familias y amigos por habernos apoyado en cada momento de este camino.

Por último quisiéramos mencionar una frase del escritor y científico estadounidense Isaac Asimov, que nos impulsó cada día a seguir adentrándonos en esta carrera que no deja de asombrarnos:

"La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la Ingeniería la que cambia el mundo."

1 Índice

1 Índice	2
2 Acrónimos y definiciones	5
3 Resumen	12
4 Introducción	13
4.1 Antecedentes	13
4.2 Contexto: Redes eléctricas inteligentes	14
5 Objetivos	16
5.1 Finalidad del proyecto	16
5.2 Problema a Resolver	16
5.3 Alcance	16
6 Definición de producto	18
6.1 Requerimientos	19
6.2 Diagrama funcional de interfaces	22
6.3 Especificaciones de diseño	23
6.3.1 Especificaciones funcionales	24
6.3.2 Especificaciones de interfaz	26
6.3.3 Especificaciones de performance	28
6.3.4 Especificaciones de implementación	30
6.3.5 Especificaciones de servicio (RAMS)	32
7 Plan de validación	33
7.1 Diseño de bancos de pruebas	33
7.1.1 BP-01: Pruebas iniciales	33
7.1.2 BP-02: Pruebas funcionales	35
7.1.3 BP-03: Pruebas de precisión	38
7.1.4 BP-04: Pruebas de interfaz mecánica	41
7.1.5 BP-05: Pruebas de performance	42
7.1.6 BP-06: Pruebas de estrés y seguridad	43
7.1.7 BP-07: Pruebas de dimensiones y peso	43
7.1.8 BP-08: Pruebas de compatibilidad electromagnética	44
7.1.9 BP-09: Pruebas de almacenamiento y transporte	44
7.1.10 BP-10: Pruebas de mantenimiento	45
7.2 Matriz de trazabilidad para validación	46
8 Análisis de factibilidad	49
8.1 Factibilidad tecnológica	49
8.1.1 Esquema modular	49
8.1.2 Propuesta de alternativas de arquitectura	50

8.1.3 Elección de arquitectura	52
8.1.4 Presupuesto de error	54
8.1.5 Análisis y elección de alternativas de tecnología	56
8.1.6 DFMEA	70
8.2 Factibilidad de tiempos	76
8.2.1 Planificación (PERT)	76
8.2.2 Programación (Gantt)	78
8.3 Factibilidad económica	80
8.3.1 Mercado	80
8.3.2 Costos	80
8.3.3 Proyecciones	85
8.4 Factibilidad legal y responsabilidad civil	90
9 Ingeniería de detalle	93
9.1 Hardware	93
9.1.1 Diagrama de bloques	93
9.1.2 Descripción detallada de cada bloque	94
9.2 Software	113
9.2.1 Medición y preprocesamiento	113
9.2.2 Módulo de Comunicación	116
9.2.3 Unidad central de procesamiento (CPU)	119
9.2.4 Funcionamiento general	122
10 Estudio de confiabilidad	125
11 Construcción del prototipo	131
11.1 Diseño de los circuitos impresos	131
11.2 Diferencias respecto al Producto Final	131
11.3 Diseño mecánico	134
11.4 Precauciones especiales de montaje	135
11.5 Software	138
12 Validación del prototipo	144
12.1 Validación del hardware	144
12.1.1 Plan y protocolos especiales de medición	144
12.1.2 Mediciones y Calibración	144
12.1.3 Resultados	148
13 Conclusiones	158
13.1 Objetivos Alcanzados	159
13.2 Recomendaciones para futuros diseños	159
14 Bibliografía	161
15 Anexos	163
15.1 Anexo A	163

15.2 Anexo B y C	167
15.3 Anexo D	167

2 Acrónimos y definiciones

Acrónimos

- **AES:** Advanced Encryption Standard (estándar de cifrado).
- **BB-PLC:** Broadband Power Line Communication (comunicación PLC de banda ancha).
- **CA:** Corriente Alterna.
- **CC:** Corriente Continua.
- **CENELEC:** En francés Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (organismo que especifica la banda de frecuencias utilizadas en Europa para comunicación PLC).
- **CIDEI:** Centro de Investigación y Desarrollo en Electrónica Industrial (centro perteneciente al ITBA).
- **CPU:** Central Processing Unit (unidad de procesamiento central).
- **DUT:** Device Under Test (dispositivo bajo prueba).
- **EE:** Energía Eléctrica.
- **EMR:** Electromechanical Relay (relé electromecánico).
- **FPGA:** Field Programmable Gate Array (matriz de compuertas lógicas programables).
- **FSK:** Frequency Shift Keying (modulación por desplazamiento de frecuencia).
- **GPIO:** General Purpose Input/Output (pins de entrada/salida de propósito general).
- **HAN:** Home Area Network (red de área hogareña).
- **HF:** High Frequency (alta frecuencia).
- **HV:** High Voltage (alta tensión).
- **I2C:** Inter Integrated Circuits (estándar de comunicación serie entre diferentes partes de un circuito).
- **ITBA:** Instituto Tecnológico de Buenos Aires.
- **LAN:** Local Area Network (red de área local).
- **LCD:** Liquid Crystal Display (monitor de cristal líquido).

- **LV:** Low Voltage (baja tensión).
- **MAC:** Media Access Control address (identificador único que posee cada interfaz de control de red) .
- **MEDINENPEL:** nombre del producto (MEDidor INteligente de ENergía y Potencia ELéctrica).
- **NAN:** Neighborhood Area Network (red de área vecina).
- **NB-PLC:** Narrow Band Power Line Communications (comunicación PLC de banda angosta).
- **OLED:** Organic Light-emitting Diode (diodo emisor de luz de capa de compuesto orgánica).
- **PEV:** Plug-in Electric Vehicle (vehículo eléctrico enchufable).
- **PHY:** Physical Layer (capa física del modelo ISO-OSI).
- **PLC:** Power Line Communication (protocolo de comunicación a través de la red eléctrica).
- **PRIME:** PowerLine Intelligent Metering Evolution (especificación para comunicación PLC).
- **RAMS:** reliability, availability, maintenance, security (confiabilidad, disponibilidad, mantenimiento, seguridad).
- **RIC:** Registradores e Interfaz de Comunicación.
- **RTC:** Real Time Clock (clock de tiempo real).
- **SAS:** Sociedad de Acciones Simplificada. Tipo de persona jurídica para la formación de una nueva empresa.
- **SG:** Smart Grid (red inteligente).
- **SM:** Smart Meter (medidor inteligente).
- **SoC:** System-On-Chip (sistema embebido).
- **SPI:** Serial Peripheral Interface (estándar de comunicación serie entre diferentes partes de un circuito).
- **SSR:** Solid State Relay (relé de estado sólido).
- **THD:** Total Harmonic Distortion (distorsión armónica total).
- **TCP/IP:** Transmission Control Protocol / Internet Protocol (símil al modelo ISO-OSI de referencia, en el cual se basa la comunicación en Internet).

- **TimeStamp:** Marca temporal que se le asigna a un dato particular.
- **TTL:** Transistor-transistor Logic (tecnología de construcción en electrónica digital).
- **μC:** Microcontrolador.
- **UART:** Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (hardware encargado de controlar las comunicaciones serie asíncronas entre diferentes partes de un circuito).
- **VAC:** volts de corriente alterna.
- **VDC:** volts de corriente continua.
- **VHF:** Very High Frequency (frecuencias por encima de HF).
- **WAN:** Wide Area Network (red de área amplia).
- **WiFi:** Wireless Fidelity (tecnología estándar de redes LAN y acceso a Internet).
- **WPA:** WiFi-Protected Access (estándar de encriptación de claves en redes WiFi).

Definiciones generales

- **Central o master:** En red PLC, nivel jerárquico superior y más próximo.
- **Core:** Unidad central del medidor donde se procesan los datos y se distribuyen mediante las diferentes interfaces de comunicación.
- **Tensión de fase:** Tensión entre vivo y neutro.
- **Tensión de línea:** Tensión entre fases.
- **Smart product:** Productos que integran tecnologías de información y comunicación, creando una representación digital de su entidad física y de sus parámetros.

Elementos funcionales

- **Circuito auxiliar:** Elementos y conexiones en el interior del medidor, destinados a conectarse a un dispositivo exterior.
- **Circuito de corriente:** Conexiones internas del medidor a través de donde circula la corriente del circuito al cual el medidor está conectado.
- **Circuito de tensión:** Conexiones internas del medidor que forman parte del elemento de medición y de la alimentación del medidor, alimentadas por la tensión del circuito al cual el medidor está conectado.
- **Dispositivo auxiliar:** Se encuentra ubicado dentro del medidor pero no forma parte de la unidad metrológica (por ej. módulos de comunicación).
- **Dispositivo indicador:** Comprende la conjunción de la memoria que almacena la información y del visor que la hace visible.

- **Elemento de medición:** Parte del medidor que produce una cantidad de impulsos de salida proporcional a la energía.
- **Forma de conexión:** Es la manera en que el medidor se conecta al circuito que se desea medir. Puede ser directa o indirecta (por ej. a través de un transformador).
- **Indicador de funcionamiento:** Dispositivo que da una señal visible de que el medidor está funcionando (puede ser un LED de luz visible).
- **Memoria:** Elemento que almacena las informaciones digitales.
- **Memoria no-volátil:** Dispositivo de almacenamiento que puede retener la información aún en caso de ausencia de alimentación.
- **Módulo de medición/Unidad metrológica:** Constituida por los sensores de tensión y de corriente y las etapas de procesamiento de señales, hasta la obtención de la unidad de energía básica.
- **Propiedades metrológicas:** Son los atributos o cualidades de la unidad metrológica para satisfacer los requisitos de exactitud o precisión de medición.
- **Sistema de conexión:** Es la distribución u orden de los bornes en la bornera.
- **Visor/Display:** Dispositivo que hace visible el o parte del contenido de la o las memorias (generalmente un display).

Elementos mecánicos

- **Base:** Parte trasera del medidor por el cual se monta el elemento de medición, incluyendo los bornes o bornera y la tapa. Puede incluirse también los laterales de la caja.
- **Borne de tierra de protección:** Borne conectado a las partes conductoras accesibles de un medidor por razones de seguridad.
- **Caja:** Comprende la base y la tapa.
- **Distancia en aire:** La menor distancia medida en aire entre dos partes conductoras.
- **Longitud de contorno:** La menor distancia medida sobre la superficie de aislación entre dos partes conductoras.
- **Medidor para uso exterior:** Medidor que puede usarse sin una protección suplementaria contra las influencias ambientales.
- **Medidor para uso interior:** Medidor que debe usarse con una protección suplementaria contra las influencias ambientales (por ej. interior de un edificio, caja).
- **Tapa:** Parte delantera de la caja del medidor, constituida enteramente por material tal que permita la observación del indicador de funcionamiento y la lectura del visor.

- **Tapa de bornera:** Tapa que cubre los bornes del medidor y los extremos de alambres o cables externos conectados a los bornes.
- **Zócalo:** Base con mordazas y con bornes para la conexión con el circuito de alimentación, para alojar los bornes de un medidor desmontable.

Tipos de aislación

- **Aislación básica:** Aplicada a las partes activas destinada a asegurar la protección principal contra los contactos eléctricos.
- **Aislación doble:** Comprende tanto a la básica como a la suplementaria.
- **Aislación suplementaria:** A fin de proporcionar protección contra los contactos eléctricos en caso de falla de la aislación básica (es independiente de ella).
- **Medidor con caja aislante de clase de protección I:** Medidor en el que la protección contra descargas eléctricas no depende solamente de la aislación básica, sino que incluye una medida adicional. Las partes conductoras accesibles están conectadas al conductor de tierra de protección del cableado fijo de la instalación, de forma tal que las partes conductoras accesibles no queden sometidas a tensión en caso de falla de la aislación básica.
- **Medidor con caja aislante de clase de protección II:** Medidor con caja de material aislante en el que la protección contra descargas eléctricas no depende solamente de la aislación básica, sino que incluye medidas de seguridad adicionales como la aislación doble. Dichas medidas no incluyen la puesta a tierra de protección y no dependen de las condiciones de instalación.
- **Parte conductora accesible:** Parte conductora que puede ser tocada con el dedo de prueba, cuando el medidor está instalado y listo para ser utilizado.

Términos relativos al medidor

- **Corriente base (I_b):** Valor de la corriente en función de la cual se fijan algunas características de un medidor para conexión directa.
- **Corriente máxima (I_{max}):** El mayor valor de la corriente para la cual se satisfacen los requisitos y especificaciones.
- **Corriente nominal (I_n):** Valor de la corriente en función de la cual se fijan algunas características de un medidor alimentado por transformadores.
- **Frecuencia nominal (F_n):** Valor de frecuencia en función del cual se fijan algunas características del medidor.
- **Incerteza porcentual:** Dado por la siguiente fórmula donde el subíndice *r* indica el valor real (valor del medidor patrón) y el subíndice *m* el valor medido: $100 \frac{x_r - x_m}{x_r}$.

- **Índice de clase:** Número que da los límites de la precisión absoluta de la lectura nominal del instrumento a fondo de escala. Por ejemplo, un voltímetro de clase 1 con 100 V de fondo de escala tendrá una precisión de 1 V, lo que representa un error distinto según el valor nominal medido (y razón por la que se debe medir siempre a fondo de escala). Las distintas clases se encuentran definidas en la norma ANSI C12.20.
- **Tensión nominal (Un):** Valor de tensión en función de la cual se fijan algunas características del medidor.

Magnitudes de influencia

- **Coefficiente medio de temperatura:** Relación entre la variación del error porcentual y el cambio de temperatura que produce dicha variación (por ej. ppm/°C).
- **Ensayo de tipo:** Procedimiento según el cual se realizan un conjunto de ensayos sobre el medidor para verificar que este tipo de medidor satisface todos los requisitos.
- **Estabilidad térmica:** Se alcanza la estabilidad térmica cuando la variación del error como consecuencia de los efectos térmicos, durante 20 minutos es menor que 0.1 veces el error máximo admisible para la medición considerada.
- **Factor de distorsión:** Relación entre el valor eficaz del contenido armónico sin contar la fundamental, y entre el valor eficaz contando la fundamental.
- **Gama de medición especificada:** Conjunto de valores de una magnitud medida, para el cual el error de un medidor debe mantenerse dentro de los límites especificados.
- **Gama de funcionamiento especificada:** Conjunto de valores de una sola magnitud de influencia, que forma parte de las condiciones de funcionamiento nominales.
- **Gama límite de funcionamiento:** Condiciones extremas que el medidor puede soportar en servicio sin daño ni degradación de sus características metrológicas, cuando a continuación, se lo utiliza en condiciones normales de funcionamiento.
- **Gama de almacenamiento y transporte:** Condiciones extremas que un medidor fuera de servicio puede soportar sin daño ni degradación de sus características metrológicas, cuando a continuación, se lo utiliza en condiciones normales de funcionamiento.
- **Magnitud de influencia:** Cualquier magnitud exterior al medidor que pueda afectar a su comportamiento o características funcionales.
- **Perturbaciones electromagnéticas:** Conducidas o radiadas que pueden afectar en forma funcional o metrológica el funcionamiento del medidor.

- **Posición normal de utilización:** Posición del medidor definida como la posición normal de servicio.
- **Temperatura de referencia:** Temperatura ambiente especificada para las condiciones de referencia.
- **Variación del error:** Diferencia entre los errores porcentuales del medidor cuando sólo una magnitud de influencia asume sucesivamente dos valores especificados, siendo uno de ellos el valor de referencia.

3 Resumen

El presente trabajo consiste en el desarrollo de un medidor de consumo eléctrico inteligente que combine las técnicas actuales de medición y sensado de tensión y corriente. El producto es diseñado de manera modular para obtener mediciones de consumo y/o generación en sistemas eléctricos monofásicos. Esto permite que sea escalable a sistemas trifásicos mediante el simple reemplazo de su módulo de medición. Por otro lado, el producto es diseñado incluyendo un módulo de comunicación para transmitir y recibir información, que puede ser reemplazado si se desea transmitir a través de diferentes medios (PLC, RF, Bluetooth, WiFi, etc).

Con el fin de obtener un diseño práctico, modular y escalable, sin la necesidad de rediseñar el producto entero para cada usuario posible, se examinan distintos enfoques y soluciones posibles combinando la tecnología actual de medición, procesamiento de datos y protocolos de comunicación;

Se describen los requerimientos y especificaciones a cumplir. En base a ellos se analizan los distintos tipos de factibilidad (económica, de tiempo, tecnológica y legal) para evaluar la viabilidad del proyecto. Más adelante se propone un prototipo de hardware y software determinado que pueda llegar a satisfacer los requerimientos y especificaciones ya definidos. Se procede al diseño y construcción del mismo con el propósito de realizar los ensayos y pruebas correspondientes para verificar que se cumpla con lo establecido. Se obtienen validaciones en todos los aspectos excepto en el de compatibilidad electromagnética, en donde no se realiza ningún test que valide las especificaciones debido al costo que ello representaría.

Se analiza la confiabilidad del producto final, concluyendo que podrá tener una vida útil de entre 10 a 15 años.

El análisis económico indica una tasa interna de retorno (TIR) en dólares estadounidenses (US\$) del 5%, por lo cual se considera al proyecto viable de acuerdo a las estimaciones de estabilidad socioeconómica del país de los autores.

Se concluye que el proceso de diseño realizado en el término de 5 años fue exitoso, con aprendizajes tecnológicos, académicos y personales.

4 Introducción

4.1 Antecedentes

En la actualidad se transita una época donde se pone énfasis en el creciente problema climático. Ocurren fenómenos como inundaciones, terremotos, sequías, incendios y huracanes cada vez con mayor frecuencia. Los datos científicos más recientes confirman que las temperaturas mundiales aumentaron más de medio grado centígrado en el transcurso del último siglo, y es probable que aumenten aún más rápido en las próximas décadas. El Panel Intergubernamental para el Cambio del Clima (IPCC) considera que hay más del 90% de probabilidad de que la mayor parte del calentamiento durante los últimos 50 años haya ocurrido debido a emisiones de gases invernadero causadas por los seres humanos. Debido al crecimiento demográfico mundial y al aumento en la expectativa de vida, esta huella de carbono se agrava. En consecuencia, los distintos estados se encuentran actualizando sus políticas medioambientales y tomando medidas más rigurosas al respecto.

La eficiencia en la manipulación de energía, y en particular para la red eléctrica, determina cuánta energía producida se traduce en energía útil para el usuario. En Argentina el 67% de la matriz energética proviene de la quema de combustibles fósiles. Por lo tanto, es necesario obtener una máxima eficiencia en la generación, transmisión y distribución de esta energía. Para calcularla se requiere medir la energía que le llega al usuario, ya sean residenciales, comerciales o industriales, cumpliendo con las tolerancias de error especificadas por las normas vigentes.

Los medidores que existen en el mercado argentino actual son variados y difieren en su tipo de construcción, porcentaje de error, interfaz con el usuario, protocolos de comunicación, entre otras características. La mayoría de los medidores actuales instalados en Argentina son electromecánicos, comúnmente llamados vatihorímetro o contador de consumo eléctrico. Normalmente están calibrados en unidades de facturación y funcionan por efecto inductivo. Utilizan bobinados de corriente y de tensión para crear corrientes parásitas que hacen girar un disco proporcionalmente a la potencia consumida por el circuito.

En ciertos países, como Alemania y Reino Unido, toman como medida preventiva lograr que la energía renovable tenga una mayor participación dentro de su matriz energética. Un claro ejemplo de esta medida es el actual desarrollo de *smart grids* o redes eléctricas inteligentes. Se las define como la integración dinámica de los desarrollos en ingeniería eléctrica y de los avances de las tecnologías de la información y comunicación (o TIC), dentro del negocio de la energía eléctrica (generación, transmisión, distribución y comercialización, incluyendo las energías alternativas). Esto permite que las áreas de coordinación de protecciones, de control, de instrumentación, de medición, de calidad y de administración de energía, sean todas concatenadas en un solo sistema de gestión con el objetivo de realizar un uso eficiente y racional de la energía.

4.2 Contexto: Redes eléctricas inteligentes

El medidor inteligente o *smart meter* es el componente principal en una red de distribución eléctrica inteligente o *smart grid*. Una smart grid es una red que incluye una variedad de medidas de operación y energía, como medidores y dispositivos inteligentes, recursos de energías renovables y recursos de eficiencia energética [1] [2]. El acondicionamiento de la energía y el control de la producción y distribución de electricidad son aspectos importantes de la red inteligente. Se definió como una red eléctrica con las siguientes características [3]:

1. Mayor uso de información digital y tecnología de control para mejorar la confiabilidad, seguridad y eficiencia de la red eléctrica.
2. Optimización dinámica de las operaciones y los recursos de la red, con total seguridad cibernética.
3. Despliegue e integración de recursos distribuidos y generación de energía, incluyendo recursos renovables.
4. Desarrollo e incorporación de respuesta a la demanda (*demand response*), recursos del lado de la demanda y recursos de eficiencia energética.
5. Implementación de tecnologías “inteligentes” (en tiempo real, automatizadas, tecnologías interactivas que optimizan el funcionamiento físico de los dispositivos de la red y dispositivos de consumo) para la medición, las comunicaciones relacionadas con las operaciones y el estado de la red y la automatización de la distribución.
6. Integración de dispositivos “inteligentes” y dispositivos de consumo.
7. Implementación e integración de tecnologías avanzadas de almacenamiento de electricidad y de *peak shaving*, incluidos vehículos eléctricos híbridos y eléctricos enchufables, y aire acondicionado de almacenamiento térmico.
8. Provisión a los consumidores de información oportuna y opciones de control.
9. Desarrollo de estándares para la comunicación e interoperabilidad de dispositivos y equipos conectados a la red eléctrica, incluida la infraestructura que sirve a la red.
10. Identificación y reducción de barreras irrazonables o innecesarias para la adopción de tecnologías, prácticas y servicios de redes inteligentes.

La instalación de medidores inteligentes es el primer paso para la creación de una red eléctrica inteligente. En efecto, dichos medidores pueden reemplazar modelos anteriores de medidores sin requerir cambios en la red eléctrica actual. Los smart meters obtienen métricas confiables sobre el consumo de los usuarios y sobre el estado de la red, y transmiten los datos casi en tiempo real hacia centrales concentradoras de información que se encuentran a kilómetros de distancia.

Para una transmisión de datos confiable y efectiva, se cuenta con una arquitectura estandarizada [4] de comunicaciones para una smart grid. La red de comunicaciones

típicamente se descompone en tres segmentos representativos, como puede verse en la figura 1. Estos segmentos son: *home area network* (HAN), *neighborhood area network* (NAN), y *wide area network* (WAN).

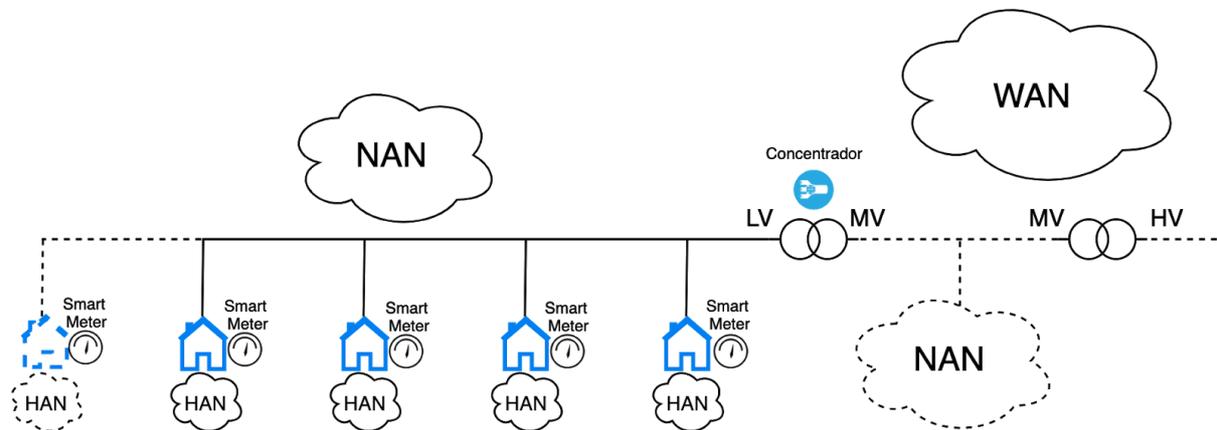


Figura 1: Diagrama de una red eléctrica inteligente - *Smart Grid*.

La HAN comprende una red que comunica dispositivos del consumidor en el área residencial con el smart meter, soportando funciones como el apagado y encendido de aires acondicionados o la carga y descarga de *plug-in electric vehicles*, o PEVs, además de proveer al usuario con información sobre el consumo de su hogar o comercio. En este nivel puede encontrarse también la *industrial area network*, o red de área industrial, que comprende funciones similares a la red de área de hogar pero con equipos industriales.

La red de vecindario (NAN) es responsable de mantener la comunicación entre los medidores inteligentes de casas, edificios, fábricas, etc. con las redes de comunicación de las empresas de suministro de energía. Un concentrador ubicado en transformadores primarios o secundarios se encarga de recibir la información de los distintos medidores que forman parte de su NAN, y envía estos datos a la empresa de suministro correspondiente. El número de medidores en una NAN varía entre cientos y miles, dependiendo de la topología de la red eléctrica.

Una WAN reúne datos de varias NANs y los transmite a las redes privadas de compañías de suministro. También permite comunicaciones de larga distancia entre diferentes puntos de recolección de datos, plantas de generación de energía, recursos energéticos distribuidos, estaciones, subestaciones, redes de transmisión y distribución, centros de control, etc.

Los tres segmentos que conforman la arquitectura de comunicaciones de una smart grid soportan comunicaciones bidireccionales, de manera que los datos generados por un dispositivo particular encontrado en una HAN puedan llegar a la red privada de la empresa de suministro y, asimismo, las instrucciones transmitidas por la empresa puedan llegar a los dispositivos de una HAN (siempre y cuando haya un convenio preestablecido entre la empresa proveedora y el consumidor). El presente proyecto se enfoca en el segmento NAN, buscando construir un medidor que se comunique bidireccionalmente con un concentrador a distancia.

5 Objetivos

5.1 Finalidad del proyecto

La ignorancia es, en gran medida, fuente de ineficiencia. El hecho de conocer cierta información sobre un tema, da el poder de tomar decisiones sobre el mismo. Ergo, el poder contar con información cuantitativa sobre el consumo energético, es poder tomar decisiones inteligentes que lleven a la eficiencia energética y proponer soluciones eficaces.

La eficiencia energética contempla tanto al consumidor como al distribuidor. La clave es implementar un sistema de precios por bandas horarias que permita penalizar el consumo energético durante las horas de consumo máximo. Esto incentiva a los consumidores a realizar tareas no esenciales fuera de dicho horario. Este comportamiento ayudaría a disminuir los problemas de sobrecarga de redes y transformadores, y a distribuir más equitativamente el consumo a lo largo del día. Por consiguiente, se logra un consumo más estable que el actual y se optimiza el aprovechamiento de la generación de EE de base.

Por otro lado, la distribuidora podrá contar con una extensa base de datos que le permitirá hacer un estudio confiable del consumo de EE. Este estudio puede ayudarle a prevenir o conocer robos de EE, emitir una facturación con mayor detalle, brindar información de fácil acceso a cada usuario, así como también almacenar y poder contar con los datos necesarios para futuros análisis particulares.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, el principal objetivo de este trabajo es crear un producto inteligente para la medición del consumo energético que contribuya a mejorar la eficiencia en el uso de la red eléctrica y crear consumidores informados.

5.2 Problema a Resolver

El enfoque de este proyecto se da en los siguientes aspectos fundamentales: precisión y modularización. Se cuenta con un plan de validación detallado con pruebas que corroboren la fiabilidad de las mediciones realizadas. La precisión de los datos medidos resultan de suma importancia puesto que la medición en sí es la funcionalidad principal del producto y dado que los valores medidos impactan directamente en las tarifas de consumo. Asimismo, la modularización es un requerimiento principal del producto que otorga un valor agregado al compararlo con las alternativas del mercado. Se enfatiza la posibilidad de reemplazar distintos módulos que conforman al producto.

5.3 Alcance

Al día de la fecha, la mayoría de los medidores de energía en la Argentina son electromecánicos y no poseen ningún tipo de comunicación o interfaz hacia otro dispositivo. La posibilidad de tener una comunicación inteligente con una red u otro equipo electrónico desde o hacia el medidor, añade ventajas y facilidades. Por ejemplo, la distribuidora de energía podrá obtener información de los consumos de EE tal que le permita ofrecer

mejores servicios, prestaciones y/o optimizar sus decisiones al respecto. Podrá optar por implementar un sistema multi-tarifario para ciertos clientes, y hasta inclusive realizar un control remoto de cada medidor sin la necesidad de enviar al técnico correspondiente. Por otro lado, el consumidor podrá saber su actual consumo de manera sencilla y en tiempo real, pudiendo tomar decisiones económicas en relación al gasto, o incluso hacer un uso más eficiente de la EE.

Entonces se propone al smart meter como una solución a este problema. La idea es crear un medidor de energía modular monofásico, compacto y físicamente compatible con los actuales, tal que permita adaptarse a cualquier consumidor. Contará con un único módulo de procesamiento. El módulo encargado de realizar las mediciones se podrá elegir en base a las prestaciones necesarias (tensión y corriente máxima, tolerancias, etc.). Esto deja la posibilidad de futuras mejoras sólo con el diseño de un nuevo módulo de medición para ser conectado, sin tener que rediseñar el medidor completo.

Se busca minimizar el costo y el error de medición del producto. Se espera que el sistema tenga un grado de modularización para adaptarse a los distintos rangos de medición. Al mismo tiempo que sea de fácil instalación y mantenimiento, posea la menor cantidad de partes móviles y conste de una cierta autonomía frente a posibles cortes de energía.

En relación a la comunicación, deberá poder establecer una conexión con la distribuidora de energía. Dicha conexión deberá permitir transmitir las mediciones realizadas (no necesariamente en tiempo real: puede enviarse todos los datos del día en una sola transmisión) y la distribuidora debe poder efectuar un corte de energía al consumidor de manera remota en caso de ser necesario.

6 Definición de producto

El producto se define principalmente como un medidor modular inteligente del consumo eléctrico para sistemas monofásicos y consumidores domésticos. Asimismo el medidor cuenta con un módulo de medición que puede ser intercambiado y así asegurar la compatibilidad de medición de sistemas trifásicos y la escalabilidad de medición para consumos menores o mayores de energía. También cuenta con un módulo de comunicación reemplazable para intercambiar datos e instrucciones entre el medidor y un servidor concentrador ubicado en la misma NAN. El medidor puede recibir y ejecutar instrucciones de conexión/desconexión a la red eléctrica de un punto de consumo, de aumento/decremento del periodo de envío de datos hacia el concentrador, de habilitación del modo HST y de finalización del periodo de facturación.

El proyecto cuenta con dos tipos de clientes. El cliente directo es el CIDEI que exige los requerimientos necesarios para el proyecto y a la vez hace de intermediario entre este proyecto y el cliente indirecto, el distribuidor de energía eléctrica local EDES S.A.

Por pedido del CIDEI se realiza una investigación consultando medidores comerciales de las normas que deben cumplir en Argentina y en Europa. Luego se evalúan ambos tipos de normativas concluyendo que las normas locales son similares a las europeas. Además como nuestro cliente es local, se acuerda y se decide enfocarse en las normas IRAM argentinas.

Los siguientes requerimientos fueron provistos y aprobados por el CIDEI, con previas sugerencias, análisis y acuerdos entre las partes:

6.1 Requerimientos

ID	Descripción	Origen
REQ-01	El producto debe poder realizar mediciones en sistemas monofásicos.	Ciente
REQ-02	El producto debe hacer uso de un módulo reemplazable de medición. Los módulos de medición deben ser iguales en tamaño, forma y distribución de los conectores o contactos hacia el core y hacia los conectores externos (conectores hacia la red eléctrica).	Ciente
REQ-03	No debe poderse conectar de forma errónea el módulo de medición al core.	Ciente
REQ-04	El medidor debe tener alguna forma de configuración por hardware de manera tal que el sistema pueda identificar al menos 4 módulos de medición diferentes.	Ciente
REQ-05	El producto debe tener una compatibilidad física en relación a la sección o diámetro de los cables de la red eléctrica del ITBA.	Ciente
REQ-06	El producto debe cumplir con las siguientes normas: <ul style="list-style-type: none"> • IRAM 2420 - "Medidores estáticos de energía eléctrica activa para corriente alterna. Clases 1 y 2". En este caso, debe cumplir con las especificaciones de un medidor de clase 2. • IRAM 2444 - "Grados de protección mecánica proporcionada por las envolturas de equipos eléctricos". • IRAM 62742 - "Registadores e interfaz de comunicación (RIC) para ser conectados a medidores de energía eléctrica. Requisitos generales, ensayos y condiciones de ensayo". 	Ley Argentina Ciente
REQ-07	El producto debe tener un diseño físico tal que permita reemplazar uno a uno los medidores actuales.	Tácito
REQ-08	El medidor debe almacenar en su propia memoria todos los datos de medición hasta 48 hs previo a un corte de energía.	Ciente
REQ-09	El medidor debe poseer una autonomía de hasta 14 días seguidos, sin alimentación por corte de energía.	Ciente
REQ-10	Debe existir siempre la conexión a neutro, tanto para la medición monofásica (medición bifilar) como para la trifásica (medición tetrafilar).	Ley Argentina
REQ-11	Debe existir siempre el conductor de tierra para poder realizar la conexión de protección del medidor.	Ley Argentina
REQ-12	El producto debe tener una interfaz hacia un usuario físico, que muestre datos de medición y datos de interés para el usuario.	Ley Argentina
REQ-13	El usuario debe poder interactuar con la interfaz definida en el requerimiento REQ-12 .	Ciente

REQ-14	El producto debe poseer un visor/display y botones como interfaz entre el usuario y el medidor.	Cliente
REQ-15	La navegación a través del visor/display debe ser simple para un usuario no técnico.	Cliente
REQ-16	El medidor debe poseer luces indicadoras del funcionamiento de las interfaces de comunicación.	Ley Argentina
REQ-17	Las indicaciones y valores deben ser mostrados en un display que posea un área visible de al menos 60x10 mm y letras de al menos 4 mm de alto.	Cliente
REQ-18	Frente a un corte de energía, no se necesita que sean visibles las indicaciones ni los valores en el display.	Cliente
REQ-19	<p>El visor/display debe poder mostrar:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Potencia instantánea ● Energía activa ● Energía reactiva ● Energía aparente ● Factor de potencia ● Frecuencia de fase ● Tensión RMS ● Corriente RMS ● Tensión pico ● Corriente pico ● Tarifa en uso ● Fecha y hora. <p>Se debe indicar conjuntamente la unidad que corresponda a cada magnitud mostrada.</p>	Cliente
REQ-20	El visor/display debe poder mostrar todos los números desde el cero hasta el nueve. La expresión del número debe ser en forma decimal (base 10). También debe poder mostrar los caracteres correspondientes a las unidades de las magnitudes mostradas.	Ley Argentina
REQ-21	El producto debe tener un módulo reemplazable de comunicación para el intercambio bidireccional de datos e instrucciones con la NAN. Debe proveerse una lista de los servicios que puede brindar esta interfaz.	Cliente
REQ-22	La conexión/desconexión del usuario a la red eléctrica debe poder controlarse por medio de la interfaz definida en el requerimiento REQ-21 .	Cliente
REQ-23	No debe poderse conectar de forma errónea el módulo de comunicación al core.	Cliente
REQ-24	El producto contará con un módulo de comunicación vía PLC (<i>PowerLine Communications</i>). Las bandas de frecuencias de trabajo para la comunicación PLC deben ser CENELEC A o CENELEC B. En caso de módulo de medición trifásico, la comunicación se realizará por una sola fase.	<p>Cliente</p> <p>Ley internacional</p>
REQ-25	Los datos del medidor deben transferirse periódicamente a través del módulo de comunicación, con un periodo que puede ser configurado por el servidor concentrador.	Cliente

REQ-26	Los datos del medidor deben transferirse periódicamente desde el módulo de comunicación hacia el servidor concentrador, con un periodo mínimo de 5 segundos.	Cliente
REQ-27	El módulo de comunicación debe poder comunicarse con el servidor concentrador a una distancia de al menos 20 metros.	Cliente
REQ-28	El dispositivo debe poder medir el consumo o generación de energía eléctrica por parte del punto medido.	Cliente
REQ-29	El producto debe ser escalable para trabajar con sistemas trifásicos, mediante el reemplazo del módulo de medición.	Cliente
REQ-30	El producto debe poder realizar mediciones en modo <i>high-speed tracing (HST)</i> . En este modo el sistema transmite las muestras de las señales de tensión y corriente a través de la interfaz de comunicación. Dichas muestras otorgan la posibilidad de obtener las formas de onda de ambas señales.	Cliente
REQ-31	El producto debe reiniciar la tarifa a ser cobrada al punto de consumo en cada finalización del periodo de facturación.	Cliente
REQ-32	El producto debe obtener y transmitir suficientes muestras de tensión y corriente para el cálculo de la THD con al menos los primeros 50 armónicos. Estas muestras deben transmitirse por medio del módulo de comunicación instalado.	Cliente

Tabla 1: Requerimientos del producto.

6.2 Diagrama funcional de interfaces

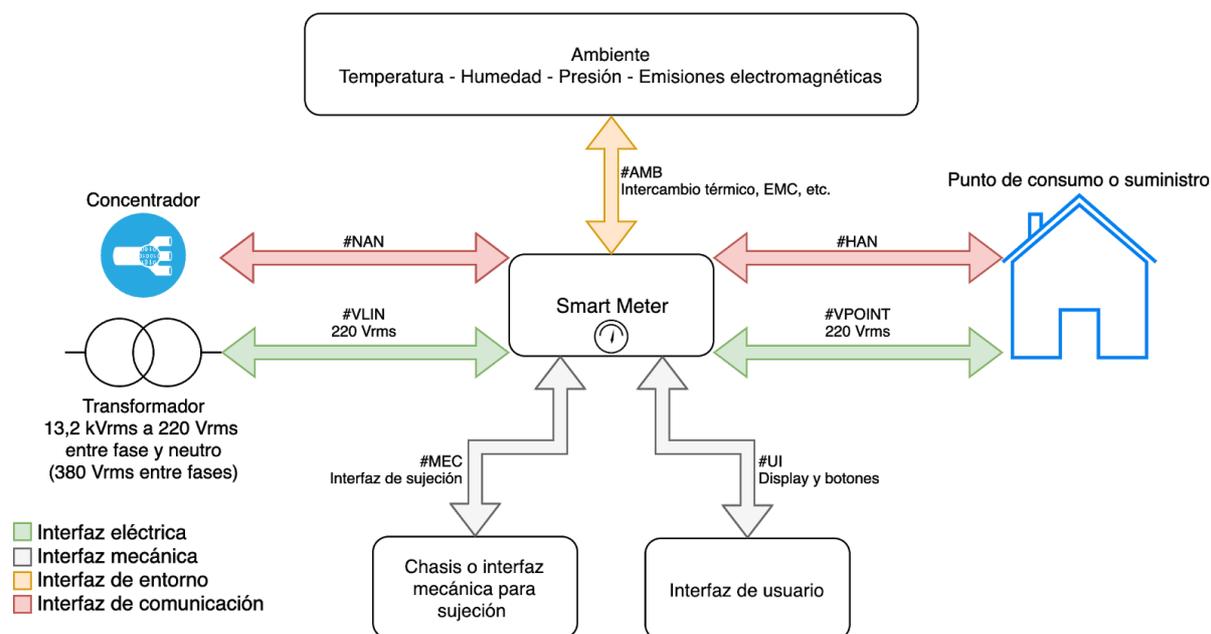


Figura 2: Diagrama funcional de interfaces del producto.

La figura 2 muestra un diagrama funcional con las distintas interfaces del producto. Contiene interfaces eléctricas para su alimentación y comunicación con la NAN y la HAN, interfaces mecánicas para interactuar con el usuario y sujetarse en su ubicación, y una interfaz natural de entorno.

La interfaz de ambiente AMB contempla los efectos que el producto tiene sobre el ambiente, como el intercambio térmico debido al calentamiento de componentes, emisiones electromagnéticas, entre otros.

La interfaz VLIN es la línea eléctrica que lleva al transformador primario o secundario, según la topología de la red eléctrica. La imagen muestra como ejemplo un transformador de mediana a baja tensión con tensiones estándar de Argentina. La interfaz VPOINT es la línea que llega al área residencial o industrial, que es el punto de consumo o suministro: donde se consume o se genera energía.

La interfaz de comunicación NAN conecta al smart meter con el concentrador normalmente ubicado junto al transformador secundario.

La interfaz de comunicación HAN conecta al smart meter con una red de comunicación domiciliar, compuesta por dispositivos ubicados dentro del punto de consumo.

Por otro lado, las interfaces mecánicas se encargan de la sujeción del smart meter en el lugar adecuado (MEC), es decir, en el lugar que la empresa de suministro de electricidad dispuso para la colocación de un medidor, y se encarga de proveer un medio de comunicación con el usuario final o usuario de mantenimiento del equipo (UI).

6.3 Especificaciones de diseño

En base a los requerimientos del producto y cumpliendo con la norma IRAM 2420 [18], que es parte del requerimiento [REQ-06](#), se define que el medidor es de conexión directa, para uso interior, de clase 2 (sección 2, Términos relativos al medidor) y con caja aislante de grado de protección I (sección 2, Tipos de aislación).

Según estas definiciones, siguiendo el marco de la norma IRAM 2420, se tiene que la tensión nominal (U_n) del medidor es de 220 Vrms y la corriente base (I_b) es de 30 Arms. Estos valores son utilizados en la misma norma para la obtención de otras especificaciones.

A continuación se presentan las especificaciones de diseño del producto. Cada especificación puede tener un origen directamente relacionado con un requerimiento del sistema o puede ser una especificación generada a partir del proceso de diseño. También se incluye la aplicabilidad de la especificación y la forma de validación de la misma, según la tabla 2. Las especificaciones aplican para la medición de consumo o generación eléctrica monofásica. En caso de escalar la medición a trifásica, referirse nuevamente a la norma IRAM 2420 para reevaluar los valores de estas especificaciones.

Aplicabilidad	Validación
DP: dispositivo, prototipo	I: inspección visual
IP: instalación, prototipo	D: documentación de diseño
DF: dispositivo, producto final	S: simulación
IF: instalación, producto final	T: test

Tabla 2: Leyenda de uso en especificaciones.

6.3.1 Especificaciones funcionales

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
FUN-DAT-01	El producto deberá mostrar al usuario los datos medidos a través de un display y actualizarlo periódicamente.	REQ-12 REQ-19	DP, DF, I, T
FUN-DAT-02	Al presionar el botón de la interfaz UI, el display debe cambiar de pantalla para mostrar las distintas métricas de consumo.	REQ-13 REQ-15 REQ-19	DP, DF, I, T
FUN-DAT-03	El producto debe contar con una memoria física, extraíble, no volátil que almacene datos de consumo energético hasta 48 hs previo a un corte de energía.	REQ-08	DP, DF, T
FUN-BAT-01	El producto debe contar con una fuente de alimentación externa a la red eléctrica, de manera que pueda permanecer energizado hasta 14 días luego de un corte de energía en la red eléctrica.	REQ-09	DF, T
FUN-CON-01	El producto debe utilizar la interfaz de su módulo de comunicación para enviar datos a la red NAN periódicamente, con un período mínimo de cinco segundos.	REQ-26	DP, DF, T
FUN-CON-02	El sistema, al recibir una orden de cambio de frecuencia de transferencia de datos enviada por el concentrador (NAN), deberá actualizar inmediatamente su frecuencia de envío de datos a la especificada en la orden.	REQ-25	DP, DF, T
FUN-CON-03	El sistema, al recibir una orden de desconexión enviada por el concentrador (NAN), deberá terminar inmediatamente el suministro de energía al punto de consumo donde se está midiendo.	REQ-22	DP, DF, T
FUN-CON-04	El sistema, al recibir una orden de conexión enviada por el concentrador (NAN), deberá conectar inmediatamente el suministro de energía al punto de consumo donde se está midiendo.	REQ-22	DP, DF, T
FUN-CON-05	El sistema, al recibir una orden de comienzo de <i>high-speed tracing</i> enviada por el concentrador (NAN), deberá inicializar el envío rápido de muestras de tensión y corriente de todas las fases conectadas al sistema, y mantener esta transferencia hasta que haya transcurrido el tiempo indicado en la misma orden.	REQ-30	DP, DF, T
FUN-CON-06	El sistema en estado de <i>high-speed tracing</i> debe enviar suficientes muestras de las señales de tensión y corriente para el cálculo de la THD de cada señal en el servidor concentrador, contemplando al menos 50 armónicos.	REQ-32	DP, DF, T
FUN-CON-07	El sistema, al recibir una orden de día de facturación, deberá reiniciar su contador de consumo energético.	REQ-31	DP, DF, I, T

FUN-CON-08	El sistema debe poder comunicarse con el servidor concentrador hasta una distancia máxima de 1 kilómetro en línea recta para comunicaciones por PLC. Otras distancias máximas serán pactadas entre las partes para módulos de comunicaciones a través de medios diferentes.	REQ-27	DF, T
FUN-CON-09	El módulo de comunicación del sistema debe conectarse automáticamente con el servidor concentrador para establecer la comunicación bidireccional.	REQ-21	DP, DF, T
FUN-MED-01	El sistema debe medir el consumo y la generación de energía eléctrica, restando del consumo todo lo que se genere y actualizando la tarifa a pagar.	REQ-28	DF, T
FUN-MED-02	El sistema, al encenderse con un módulo de medición trifásico conectado y mediante una actualización de software previa al encendido, tomará muestras de sus tres entradas de fase, almacenará datos de consumo de las tres fases y los mostrará a través de su display.	REQ-29	DF, I

Tabla 3: Especificaciones funcionales.

6.3.2 Especificaciones de interfaz

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT-VLIN-01	La gama de funcionamiento especificada de tensión admitida a la entrada del medidor en su configuración estándar monofásica es de 198 Vrms a 242 Vrms.	REQ-06	DP, IP, DF, IF, T
INT-VLIN-02	La corriente máxima que puede soportar el medidor manteniendo su funcionamiento normal y satisfaciendo las prescripciones de exactitud es de 36 Arms.	REQ-06	DF, IF, T
INT-VLIN-03	El producto debe funcionar con una frecuencia nominal de entrada de 50 Hz.	REQ-06	DP, IP, DF, IF, T
INT-VLIN-04	La gama límite de funcionamiento de tensión admitida a la entrada del medidor en su configuración estándar monofásica es de 0 Vrms a 253 Vrms.	REQ-06	DF, IF, T
INT-VLIN-05	El producto debe admitir compatibilidad de conexión con cables de hasta 7 mm ² de sección para uso doméstico (se estima corriente máxima de 42 Arms).	REQ-05	DF, IF, T
INT-VLIN-06	La gama de funcionamiento especificada para la tensión admitida entre cada entrada de fase del medidor y el neutro, en su configuración trifásica, es de 198 Vrms a 242 Vrms.	REQ-29	DF, IF
INT-VLIN-07	La gama límite de funcionamiento para la tensión admitida entre cada entrada de fase del medidor y el neutro, en su configuración trifásica, es de 0 Vrms a 253 Vrms.	REQ-29	DF, IF
INT-VLIN-08	El producto debe contar con ocho conectores: tres para las fases hacia la red eléctrica, tres para las fases hacia el punto de consumo o generación, uno para el neutro y uno para la conexión a tierra.	REQ-29	DF, IF
INT-VLIN-09	El sistema tomará muestras de una o tres fases según el módulo de medición conectado al mismo: una fase principal para un módulo monofásico y las tres fases para un módulo trifásico.	REQ-01 REQ-29	DF, IF

Tabla 4: Especificaciones de interfaz VLIN/VPOINT.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT-UI-01	<p>El sistema contará con luces indicadoras que el usuario pueda observar para determinar el estado de la comunicación entre el producto y el servidor concentrador. Las luces indicarán:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si el sistema está alimentado • Si el módulo de comunicación está alimentado • Si hay una conexión establecida entre el módulo de comunicación y el servidor concentrador. 	REQ-16	DP, DF, T

Tabla 5: Especificaciones de interfaz UI.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT-MEC-01	El equipo debe tener un grado de protección IP51. Esto indica que el equipo debe estar protegido contra polvo, aunque la penetración del polvo no es totalmente impedida en cantidad suficiente como para perjudicar el buen funcionamiento del mismo, y debe estar protegido contra las proyecciones de agua en todas las direcciones sobre la envoltura, sin provocar efectos nocivos.	REQ-06	DF, IF, T
INT-MEC-02	El aspecto del equipo y en especial la legibilidad de las inscripciones, del visor y del indicador de funcionamiento no deben alterarse o deteriorarse frente a la radiación solar.	REQ-06	DF, T, I
INT-MEC-03	La caja que contiene al producto debe estar construida y dispuesta de forma tal que cualquier deformación no permanente no impida el buen funcionamiento del medidor.	REQ-06	DF, I

Tabla 6: Especificaciones de interfaz MEC.

6.3.3 Especificaciones de performance

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
PER-ERR-01	<p>En su gama de funcionamiento especificada para todas las señales que intervienen en el sistema, el producto, cumpliendo que es de clase 2, debe tener el siguiente error porcentual:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para mediciones de energía: 2% • Para mediciones de potencia: 2% 	REQ-06	DF, DF, T
PER-DAT-01	El medidor no debe superar este error cuando vuelve a sus condiciones iniciales luego de sufrir una sobrecorriente de corta duración: 1.5%.	REQ-06	DF, T
PER-DAT-02	El medidor no debe superar este error por variaciones ocasionadas por el autocalentamiento: 1%.	REQ-06	DF, T
PER-DAT-03	<p>El medidor no debe superar los siguientes errores por variaciones de corriente (valor pico) en el rango especificado.</p> <p>Rango: $2 A \leq I < 4 A$, error: 2.5%.</p> <p>Rango: $4 A \leq I \leq 50 A$, error: 2%.</p>	REQ-06	DF, T
PER-DAT-04	La variación máxima del error porcentual para variaciones de tensión del 10% debe ser del 1%. El medidor no debe superar este error con cualquier valor de corriente equilibrada comprendida entre $2 A \leq I \leq 50 A$ (valores pico).	REQ-06	DF, T
PER-DAT-05	La variación máxima del error porcentual para variaciones de tensión comprendidas en los rangos [-10, -20]% y [10, 15]% debe ser del 3%. El medidor no debe superar este error con cualquier valor de corriente equilibrada comprendida entre $2 A \leq I \leq 50 A$ (valores pico).	REQ-06	DF, T
PER-DAT-06	La variación máxima del error porcentual para variaciones de tensión en el rango $<176V_{rms}$ debe estar comprendida en el rango [-100, 10]%. El medidor no debe superar este error con cualquier valor de corriente equilibrada comprendida entre $2 A \leq I \leq 50 A$ (valores pico).	REQ-06	DF, T
PER-DAT-07	La variación máxima del error porcentual para variaciones de frecuencia de $\pm 2\%$ debe ser de 0.8%. El medidor no debe superar este error para cualquier valor de corriente equilibrada comprendida entre $2 A \leq I \leq 50 A$ (valores pico).	REQ-06	DF, T
PER-DAT-08	La variación máxima del error porcentual por componentes armónicos en los circuitos de corriente y tensión debe ser del 1%. El medidor no debe superar este error para el valor de corriente equilibrada de 18 Arms.	REQ-06	DF, T
PER-DAT-09	La variación máxima del error porcentual por componente continua y armónicos pares dentro del circuito de corriente alterna debe ser del 6%. El medidor no debe superar este error para el valor de corriente	REQ-06	DF, T

	equilibrada de 25,4 Arms..		
PER-DAT-10	La variación máxima del error porcentual por componentes armónicos impares dentro del circuito de corriente alterna debe ser del 6%. La magnitud de influencia es la frecuencia. El medidor no debe superar este error para el valor de corriente equilibrada de 15 Arms.	REQ-06	DF, T
PER-DAT-11	La variación máxima del error porcentual por subarmónicas en los circuitos de corriente alterna debe ser del 6%. El medidor no debe superar este error para el valor de corriente equilibrada de 15 Arms.	REQ-06	DF, T
PER-DAT-12	La variación máxima del error porcentual de toda medición, por inducción magnética continua de origen externo de 0.5 mT debe ser del 3%. El medidor no debe superar este error para el valor de corriente equilibrada de 30 Arms.	REQ-06	DF, T
PER-DAT-13	La variación máxima del error porcentual por campos electromagnéticos HF debe ser del 3%. El medidor no debe superar este error para el valor de corriente equilibrada de 30 Arms.	REQ-06	DF, T
PER-DAT-14	Variación máxima del error porcentual por influencia de los accesorios debe ser del 1%. El medidor no debe superar este error para el valor de corriente equilibrada de 1.5 Arms.	REQ-06	DF, T
PER-DAT-15	La variación máxima del error porcentual por influencia de la temperatura debe ser del 0,1% / °K. El medidor no debe superar este error para cualquier valor de corriente equilibrada comprendida entre 3 Arms $\leq I \leq$ 36 Arms.	REQ-06	DF, T
PER-DAT-16	La variación máxima del indicador de consumo de energía para caídas de tensión o interrupciones breves debe ser de 0,022 kWh. Se define en base a la tensión nominal, la corriente máxima y el número de elementos de medición (2 en este caso, tensión y corriente).	REQ-06	DF, T

Tabla 7: Especificaciones de performance.

6.3.4 Especificaciones de implementación

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-OPE-01	La gama de funcionamiento especificada para la temperatura ambiente es [-10, 45] °C.	REQ-06	DF, T
IMP-OPE-02	La gama límite de funcionamiento para la temperatura ambiente es [-20, 55] °C.	REQ-06	DF, T
IMP-OPE-03	La máxima corriente que debe soportar el medidor sin sufrir daño ni degradación, durante medio ciclo a la frecuencia nominal es de 1500 A.	REQ-06	DF, T
IMP-OPE-04	La corriente de arranque máxima debe ser de 0,212 A pico.	REQ-06	IP, IF, T

Tabla 8: Especificaciones de operación.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-DIM-01	El peso neto del producto con todos sus módulos conectados debe ser menor a 5 Kg.	REQ-06	DP, DF, T
IMP-DIM-02	El producto no podrá superar las dimensiones de la caja polimérica convencional de un medidor electromecánico trifásico: 265 mm de ancho, 415 mm de alto, y 210 mm de profundidad.	REQ-07	DP, DF, I, T

Tabla 9: Especificaciones de dimensiones y peso.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-EMC-01	El medidor no debe producir ruido conducido o radiado que pudiera interferir con otros equipos.	REQ-06	DF, IF, T
IMP-EMC-02	Perturbaciones electromagnéticas conducidas o radiadas y las descargas electrostáticas no deben dañar ni afectar sustancialmente el funcionamiento.	REQ-06	DF, IF, T

Tabla 10: Especificaciones de compatibilidad electromagnética.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-MAT-01	Los bornes y los tornillos que fijan conductores eléctricos deben ser inoxidable.	REQ-06	DF, I

Tabla 11: Especificaciones de materiales.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-AYT-01	Los valores extremos de temperatura ambiente que el medidor debe soportar en condiciones de almacenamiento y/o transporte, sin daño ni degradación son: -25 °C de mínima y 70 °C de máxima.	REQ-06	DF, T

Tabla 12: Especificaciones de almacenamiento y transporte.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-POW-01	La pérdida máxima de potencia activa aceptada por el consumo de cada circuito de tensión que haya en el medidor, calculada como valor medio, es de 2 W.	REQ-06	DP, DF, T
IMP-POW-02	La pérdida máxima de potencia aparente aceptada por el consumo de cada circuito de tensión que haya en el medidor, calculada como valor medio, es de 10 VA.	REQ-06	DP, DF, T
IMP-POW-03	La potencia máxima aparente aceptada por el consumo de cada circuito de corriente que haya en el medidor, calculada como valor medio es de 2.5 VA.	REQ-06	DP, DF, T

Tabla 13: Especificaciones de consumo.

6.3.5 Especificaciones de servicio (RAMS)

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
RAMS-MAN-01	Las indicaciones externas que mínimamente debe contener el medidor son: nombre del fabricante o marca registrada, país y año de fabricación, número de serie, número de fases o hilos para el cual el medidor está diseñado, símbolo del índice de clase del medidor, tensión nominal, corriente base y corriente máxima, frecuencia nominal, esquema/indicación del conexionado, e indicar la tensión de alimentación (en caso de tener que colocarla en forma independiente).	REQ-06	DF, I, D
RAMS-MAN-02	La caja del medidor debe ser precintable, de manera que sus partes internas no puedan ser accesibles sin romper los precintos.	REQ-06	DF, I
RAMS-MAN-03	La tapa de la caja no debe poder retirarse sin la ayuda o uso de una herramienta, y debe permitir la correcta visualización del visor y la observación de los indicadores de funcionamiento.	REQ-06	DF, I, T

Tabla 14: Especificaciones de mantenibilidad.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
RAMS-SEG-01	El borne de tierra de protección debe estar conectado eléctricamente a todas las partes metálicas accesibles, debe ubicarse al costado derecho y lado inferior de la base del medidor, debe permitir la conexión de un conductor de al menos 4 mm ² de sección, y debe estar identificado con el símbolo de tierra.	REQ-06	DF, I
RAMS-SEG-02	La distancia en aire mínima, es decir, la menor distancia medida en aire entre dos partes conductoras, debe ser de 3 mm. Esto es debido a que la tensión nominal entre fases y tierra es menor a 300V.	REQ-06	DF, I
RAMS-SEG-03	La longitud de contorno mínima, es decir, la menor distancia medida sobre la superficie de aislación entre dos partes conductoras, debe ser de 3,2 mm. Esto es debido a que la tensión nominal entre fases y tierra es menor a 300 V.	REQ-06	DF, I
RAMS-SEG-04	Los circuitos eléctricos y la aislación no deben alcanzar una temperatura de 65 °C en la superficie externa del medidor.	REQ-06	DF, T

Tabla 15: Especificaciones de seguridad.

7 Plan de validación

7.1 Diseño de bancos de pruebas

En esta sección se describen los bancos de pruebas necesarios para realizar las validaciones del producto final. Se presentan diagramas de bloques que contienen las interfaces del DUT (*device under test* o dispositivo a prueba), instrumentos y componentes que forman parte de cada prueba. Junto a cada banco de pruebas se explica brevemente cada prueba a ser ejecutada. Se expone un código de identificación, condiciones, procedimiento, y resultados esperados para cada prueba.

Para los bancos de pruebas que requieren un concentrador, el concentrador y el DUT deben tener el mismo módulo de comunicación instalado, de manera que puedan comunicarse a través de él, por la interfaz NAN. El concentrador debe contar con un dispositivo de visualización de datos para monitorear los mensajes transmitidos desde y hacia el DUT.

En el caso de utilizar un módulo de comunicación por PLC, el concentrador deberá conectarse a la misma fase del medidor.

En caso de que los resultados esperados de una prueba consistan en cotas o límites para alguna medición numérica, las cotas se definen según las especificaciones del producto y el error de los instrumentos de medición empleados:

- Cota inferior (prueba) = cota inferior (especificación) + error instrumento
- Cota superior (prueba) = cota superior (especificación) - error instrumento

7.1.1 BP-01: Pruebas iniciales

Este banco de pruebas es utilizado para ejecutar pruebas básicas de funcionamiento. Requiere la conexión del DUT y del servidor concentrador a una fuente de alimentación. Ningún instrumento de medición es necesario.

La alimentación del DUT consiste en la conexión de su interfaz VLIN a la red eléctrica de 220 Vrms y 50 Hz por medio de un tomacorriente capaz de proveer hasta 50 A pico de corriente (36 Arms).

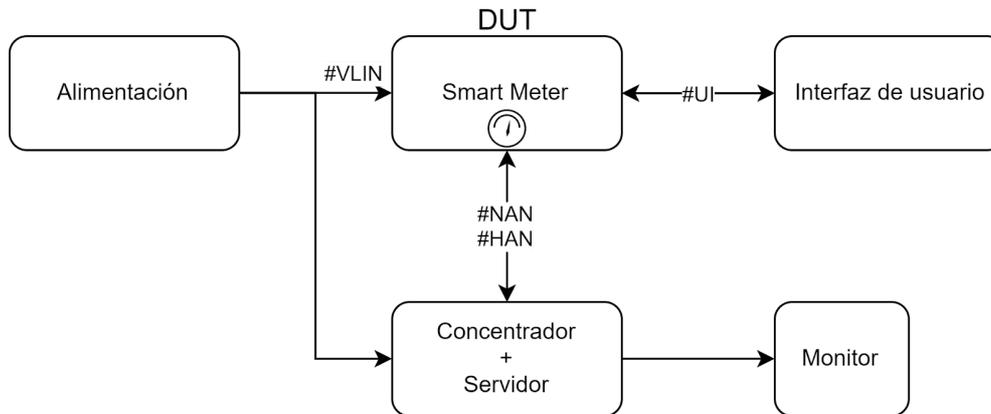


Figura 3: Banco de pruebas BP-01.

ID Aplicabilidad	Precondiciones	Procedimiento	Resultado esperado
T-INIT-01 Prototipo / Final	-	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar el DUT a la alimentación. 2. Observar la interfaz de usuario esperando obtener el resultado esperado. 	Las luces indicadoras de la interfaz de usuario indican que el sistema y el módulo de comunicación se encuentran alimentados. El display del DUT se enciende y muestra que no hay consumo.
T-INIT-02 Prototipo / Final	T-INIT-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Luego de verificar que el DUT se encuentra energizado, conectar el concentrador a su alimentación para energizarlo. 2. Monitorear mensajes enviados y recibidos por el concentrador. 	Al energizarse ambos dispositivos comienza el establecimiento de la conexión entre ambos (<i>handshake</i>). Al establecerse la conexión, el DUT envía periódicamente datos de consumo al concentrador. Como no hay carga, no hay consumo.
T-INIT-03 Final	-	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar el DUT a la red eléctrica del ITBA, utilizando conectores como los definidos en la especificación INT-VLIN-05. 	El DUT puede conectarse exitosamente y el mismo es energizado.

Tabla 16: Tests iniciales.

7.1.2 BP-02: Pruebas funcionales

Este banco de pruebas es utilizado para ejecutar pruebas funcionales. Requiere la conexión del DUT y del servidor concentrador a una fuente de alimentación. Un interruptor debe ser conectado entre la alimentación y el DUT para poder cortar y restablecer la conexión eléctrica. Se coloca una carga de 100Ω 500 W en la interfaz VPOINT para consumir energía. Ningún instrumento de medición es necesario para estas pruebas.

La alimentación del DUT consiste en la conexión de su interfaz VLIN a la red eléctrica de 220 Vrms y 50 Hz por medio de un tomacorriente capaz de proveer hasta 3 Arms (la carga usa 2.2 Arms).

El bloque de almacenamiento se refiere a la memoria extraíble y no volátil del DUT.

Dado que en estas pruebas sólo se valida el funcionamiento y no la precisión del medidor, la carga consiste de un sólo tipo de elemento de consumo. Por simplicidad, se usa una llave DPDT para invertir el sentido de circulación de la corriente de fase a fin de emular una generación de energía.

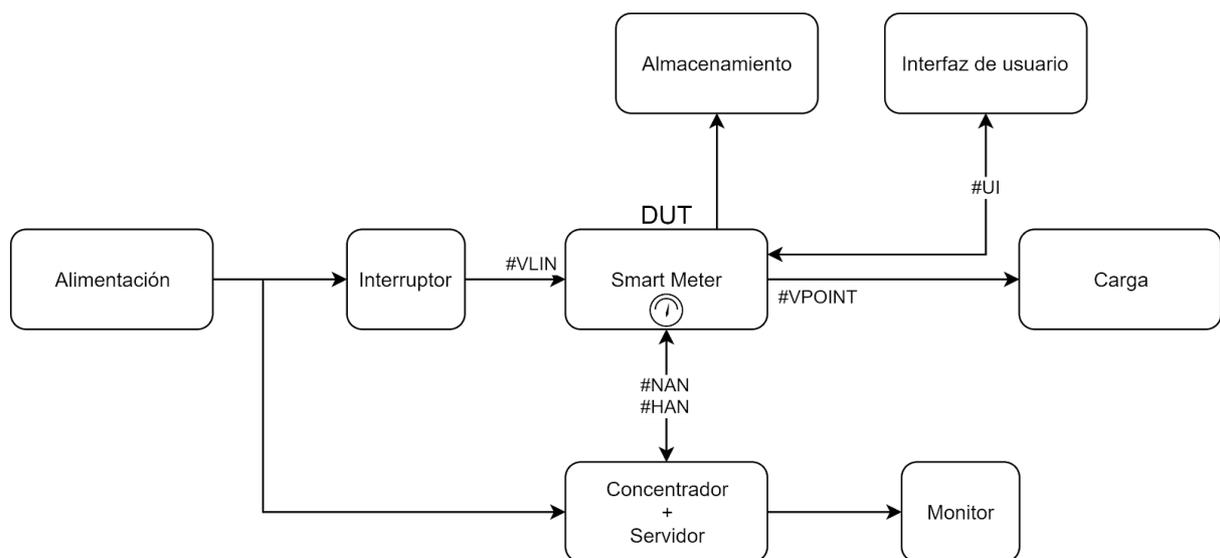


Figura 4: Banco de pruebas BP-02.

ID Aplicabilidad	Precondiciones	Procedimiento	Resultado esperado
T-FUN-01 Prototipo / Final	T-INIT-02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Habilitar la alimentación del DUT y conectar la carga de consumo. 2. Observar el display del DUT, en la pantalla de consumo energético. Observar la actualización del reloj y de los datos en el display. 3. Monitorear los datos recibidos por el concentrador y su horario de recepción. 	Los datos de consumo de energía son actualizados periódicamente en el display del DUT a la frecuencia de actualización. Los mismos datos pueden observarse en los mensajes recibidos por el concentrador, los cuales también se actualizan con la frecuencia default de transferencia.
T-FUN-02 Prototipo / Final	T-INIT-02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Presionar varias veces el botón de la interfaz UI del DUT. 	Distintas pantallas son mostradas en el display, con diferentes mediciones según REQ-19 .
T-FUN-03 Final	T-INIT-02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desde el concentrador, enviar una instrucción de cambio de periodo de transferencia de datos hacia el DUT, especificando un periodo diferente a la actual. 2. Medir el periodo con el que llegan datos al concentrador observando los horarios de recepción de los datos. 3. Esperar unos minutos. 4. Desde el concentrador, enviar otra instrucción de cambio de periodo de transferencia de datos hacia el DUT, especificando una frecuencia diferente. 5. Medir la frecuencia con la que llegan datos al concentrador. 	Al recibir las instrucciones, el DUT actualiza su tasa de transmisión de datos. Al monitorear los datos recibidos en el concentrador, se ve el cambio de periodo.
T-FUN-04 Prototipo / Final	T-INIT-02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desde el concentrador, enviar una instrucción de desconexión hacia el DUT. 	El contactor del DUT se abre, cortando el suministro de energía al banco de cargas. El DUT continua energizado. El display del DUT muestra que el contactor se encuentra abierto. El concentrador continúa recibiendo datos, los cuales muestran que no hay consumo.
T-FUN-05 Prototipo / Final	T-FUN-04	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ejecutar la prueba T-FUN-04 2. Desde el concentrador, enviar una instrucción de conexión hacia el DUT. 	El contactor del DUT se cierra, devolviendo el suministro de energía al banco de pruebas. El DUT continúa energizado. El consumo de energía mostrado en el display del DUT es actualizado periódicamente. El concentrador continúa recibiendo datos de mediciones.
T-FUN-06	T-INIT-02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desde el concentrador enviar una instrucción de comienzo de 	El DUT comienza a enviar datos de la forma de onda de la red eléctrica. El

Prototipo / Final		<p><i>high-speed tracing</i> hacia el DUT, indicando un tiempo de duración de 5 segundos.</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Observar los datos recibidos por el concentrador y el timestamp de cada dato. 	concentrador recibe suficientes muestras para calcular la THD de corriente y tensión con al menos 50 armónicos. Al pasar el tiempo indicado de HST, el DUT vuelve a su frecuencia de transferencia de datos anterior y termina el <i>high-speed tracing</i> .
T-FUN-07 Final	T-FUN-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desde el concentrador enviar una instrucción de día de facturación hacia el DUT. 	El DUT reinicia el contador de consumo energético a 0. Continúa transmitiendo datos hacia el concentrador con la misma frecuencia.
T-FUN-08 Prototipo / Final	T-FUN-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Esperar unos minutos para que el display actualice la cantidad de energía consumida. 2. Cortar la alimentación del smart meter con el interruptor. 3. Remover la memoria no volátil del sistema para analizar su contenido. 	El DUT ya no se encuentra energizado externamente. La memoria contiene datos de medición del tiempo en el que el sistema estuvo energizado.
T-FUN-09 Final	T-FUN-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cerrar el interruptor del banco de pruebas para que el DUT se encuentre energizado externamente. 2. Observar las mediciones de consumo. 3. Una vez cargada la batería, abrir el interruptor del banco de pruebas y dejar alimentado al medidor únicamente con su batería. 	El sistema debe continuar energizado por su batería interna durante al menos 14 días. El sistema no tiene nuevas mediciones, puesto que no hay energía en la red. Los datos permanecen almacenados en la memoria del sistema.
T-FUN-10 Final	T-FUN-09	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar la prueba T-FUN-09. 2. Volver a cerrar el interruptor. 	El sistema debe continuar energizado por la red eléctrica. Continúa recibiendo nuevas mediciones de consumo. Se comunica con el concentrador y la NAN normalmente.
T-FUN-11 Final	T-INIT-02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Colocar el servidor concentrador a la distancia límite de alcance de comunicación: 1 kilómetro para comunicación por PLC. 2. Observar los datos recibidos por el concentrador. 3. Enviar instrucciones desde el concentrador hacia el DUT y observar que el DUT se comporte de acuerdo a esas instrucciones. 	El servidor concentrador continúa recibiendo datos. El DUT recibe instrucciones correctamente.
T-FUN-12 Prototipo / Final	T-FUN-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar el circuito generador de energía como carga, cerrar el interruptor para energizar al DUT. 2. Esperar unos minutos para que el display actualice la cantidad de energía generada. 3. Observar los datos mostrados en el display del DUT y recibidos por el concentrador. 	El display muestra un valor negativo de energía consumida. La tarifa a pagar también es negativa. Los datos almacenados en la memoria interna y los enviados al concentrador son correspondientes a la generación de energía.

T-FUN-13 Prototipo / Final	T-FUN-12	<ol style="list-style-type: none"> 1. Esperar unos minutos para que el display actualice la cantidad de energía generada. 2. Conectar la carga de consumo en paralelo con el circuito generador de energía como carga del DUT. 3. Esperar unos minutos. 4. Desconectar circuito generador de energía. 5. Observar el display del DUT y los datos recibidos por el concentrador. 	El sistema muestra, almacena, y transmite valores de acuerdo a la generación y consumo de energía. Al finalizar la prueba, los valores negativos de consumo (por la generación de energía) deben pasar a ser positivos a medida que se consume energía. Los datos almacenados y transmitidos muestran la transición de generación a consumo.
--------------------------------------	----------	--	--

Tabla 17: Tests funcionales.

7.1.3 BP-03: Pruebas de precisión

Este banco de pruebas es utilizado para ejecutar pruebas que validen el error porcentual de las mediciones realizadas por el producto. Requiere la conexión del DUT, del servidor concentrador, y de los instrumentos de medición a una fuente de alimentación.

La alimentación del DUT consiste en la conexión de su interfaz VLIN a una red eléctrica monofásica de 220 Vrms, 50 Hz y debe poder proveer hasta 50 A pico de corriente (36 Arms).

La fase debe conectarse a un variac que permita una variación de la tensión entre 198 Vrms a 242 Vrms, siguiendo la especificación INT-VLIN-01. Inicialmente, el variac será posicionado para obtener 242 Vrms.

El amperímetro o instrumento similar es utilizado para medir el consumo de corriente del DUT al ser energizado. Debe ser un amperímetro de un error relativo de 1% para medir correctamente la corriente según la especificación IMP-OPE-04.

El vatímetro o instrumento similar es utilizado para medir el consumo del DUT sin carga conectada. Debe ser un vatímetro de un error relativo de 1% en W y VA según las especificaciones IMP-POW-01 e IMP-POW-02.

El producto debe contener inicialmente un módulo de medición monofásico (default). La interfaz de usuario será utilizada para observar las mediciones realizadas por el DUT.

Un osciloscopio es utilizado para observar la interfaz VPOINT del DUT y contrastar con lo observado en el servidor concentrador cuando el producto se encuentre en modo HST. La escala horizontal del mismo debe ajustarse para monitorear al menos tres ciclos de la señal de salida, es decir, al menos 60 ms. La escala vertical deberá ser ajustada inicialmente para observar 242 Vrms.

Un analizador de espectro o instrumento similar será utilizado para observar los armónicos y la THD en la interfaz VPOINT del DUT, para contrastar con los valores de THD obtenidos en el servidor concentrador cuando el producto se encuentre en modo HST. La escala horizontal deberá mostrar los primeros 50 armónicos, es decir, deberá mostrar de 50 Hz a 2,5 kHz. La escala vertical deberá configurarse para observar los valores de los 50 armónicos.

Un medidor o vatímetro patrón será conectado a las señales de tensión y corriente de la misma manera que el DUT, para contrastar las mediciones de energía y potencia. El instrumento patrón deberá tener un error menor o igual al 0.5%, obteniendo un TUR (*test uncertainty ratio*, o razón de incertidumbre de prueba) de al menos 4 ($2\% / 0.5\% = 4$).

Deberá cumplirse la siguiente condición para las mediciones con patrón:

$$\frac{X - X_{\text{patrón}}}{X_{\text{patrón}}} \leq 2\%$$

donde X es una medición de energía o potencia realizada por el DUT, y $X_{\text{patrón}}$ es una medición de energía o potencia realizada por el medidor patrón.

Las cargas utilizadas por las pruebas de precisión son las siguientes:

- Carga A: lámpara incandescente de 75 W (carga resistiva).
- Carga B: circuito generador de energía de 2 kW.
- Carga C: motor de inducción monofásico 1.5 HP (carga inductiva).
- Carga D: circuito RC: 10 Ω 300 W, 100 μF 250 VAC 50/60 Hz (carga capacitiva).
- Carga E: banco de carga de al menos 8 kW (o resistor de 6.11 Ω 8 kW).

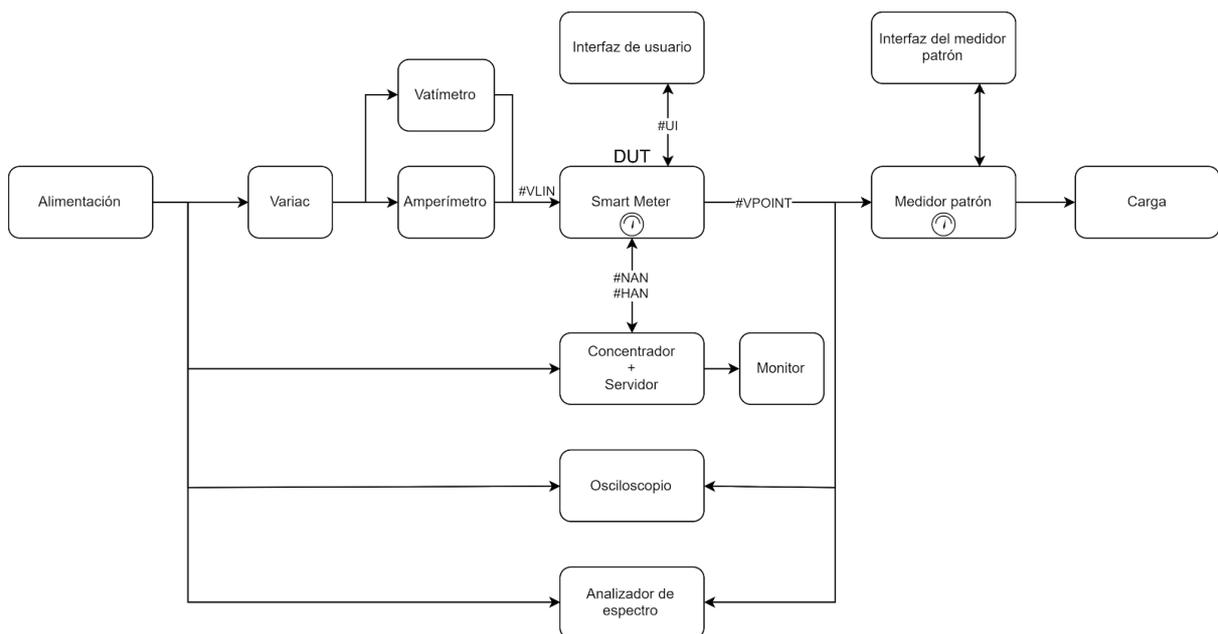


Figura 5: Banco de pruebas BP-03.

ID Aplicabilidad	Precondiciones	Procedimiento	Resultado esperado
T-OPE-03 Prototipo / Final	T-INIT-02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Configurar el banco de pruebas sin carga. 2. Conectar el DUT. 	La corriente de arranque es menor o igual a la mencionada en la especificación IMP-OPE-04 .
T-VLIN-01 Prototipo / Final	T-INIT-02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la carga A. 2. Variar la tensión de entrada al DUT utilizando el variac. Variar entre 198 Vrms y 242 Vrms, en pasos de 10 Vrms. 3. Observar el display del DUT y los mensajes enviados al concentrador. Contrastar con los valores del medidor patrón. 	El sistema sigue operando con normalidad en las distintas tensiones de entrada. El error de medición de energía y potencia es menor al 2%.
T-VLIN-02 Final	T-VLIN-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Variar la tensión de entrada entre 0 Vrms y 253 Vrms, en pasos de 10 Vrms. 	El sistema no presenta ningún daño ni degradación en las tensiones extremas. Funciona con normalidad en las tensiones nominales.
T-VLIN-03 Final	T-VLIN-02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la carga E. 2. Obtener una corriente de 36 Arms. 	El medidor mantiene su funcionamiento normal aún con la corriente de 36 Arms.
T-ERR-01 Prototipo / Final	T-VLIN-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la carga A. 2. Observar las mediciones del DUT y del servidor concentrador, y contrastar con el medidor patrón. 	El error de medición de energía y potencia es menor al 2%.
T-ERR-02 Prototipo / Final	T-ERR-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Repetir el test T-ERR-01 con la carga B. 	El error de medición de energía y potencia es menor al 2%.
T-ERR-03 Prototipo / Final	T-ERR-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Repetir el test T-ERR-01 con la carga C. 	El error de medición de energía y potencia es menor al 2%. El factor de potencia muestra un sistema inductivo.
T-ERR-04 Prototipo / Final	T-ERR-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Repetir el test T-ERR-01 con la carga D. 	El error de medición de energía y potencia es menor al 2%. El factor de potencia muestra un sistema capacitivo.
T-ERR-05 Prototipo / Final	T-ERR-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la carga A. 2. Habilitar el modo <i>high-speed tracing</i> (HST) enviando la instrucción correspondiente desde el concentrador. 3. Observar los datos recibidos por el servidor concentrador. Obtener el valor de la THD y contrastar con el analizador de 	El error de medición de energía y potencia es menor al 2%.

		espectro.	
T-POW-01 Prototipo / Final	T-INIT-02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desconectar el módulo de comunicación, la carga, y todos los instrumentos de medición, excepto el vatímetro a la entrada del DUT. 2. Medir el consumo del DUT observando el vatímetro. 	El sistema consume menos de 2 W de potencia activa, y menos de 10 VA de potencia aparente.

Tabla 18: Tests de precisión.

7.1.4 BP-04: Pruebas de interfaz mecánica

Este banco de pruebas es utilizado para pruebas de la interfaz mecánica. Su configuración está contenida en la norma IRAM 2420.

ID	Precondiciones	Procedimiento	Resultado esperado
T-MEC-01 Final	-	Ensayo 5.2.5, página 31 de la norma IRAM 2420.	El producto cumple con el grado de protección IP51.
T-MEC-02 Final	-	Ensayo 5.3.4, página 32 de la norma IRAM 2420.	El aspecto del equipo no varía frente a la exposición a radiación solar.

Tabla 19: Tests de interfaz MEC.

7.1.5 BP-05: Pruebas de performance

Este banco de pruebas es utilizado para pruebas de performance. Su configuración está contenida en la norma IRAM 2420.

ID Aplicabilidad	Precondiciones	Procedimiento	Resultado esperado
T-PER-01 Final	T-ERR-01	Ensayo 5.4.3, página 33 de la norma IRAM 2420.	El producto se comporta con un error menor al 1,5% tras un sobrepico de corriente de corta duración.
T-PER-02 Final	T-ERR-01	Ensayo 5.4.4, página 34 de la norma IRAM 2420.	El producto se comporta con un error menor al 1% tras el autocalentamiento de sus componentes.
T-PER-03 Final	T-ERR-01	Ensayo 5.6.1, página 39 de la norma IRAM 2420.	El error porcentual del producto se mantiene en el rango indicado ante las variaciones dadas en el ensayo.
T-PER-04 Final	T-ERR-01	Ensayo 5.6.2, página 41 de la norma IRAM 2420.	El error porcentual del producto se mantiene en el rango indicado ante las variaciones dadas en el ensayo.
T-PER-05 Final	T-ERR-01	Ensayo 5.5.3, página 38 de la norma IRAM 2420.	El error porcentual del producto se mantiene en el rango indicado ante las variaciones dadas en el ensayo.
T-PER-06 Final	T-ERR-01	Ensayo 5.6.1 de norma IRAM 2420.	El error porcentual del producto se mantiene en el rango indicado ante las variaciones dadas en el ensayo.
T-PER-07 Final	T-ERR-01	Ensayo 5.6.1 de norma IRAM 2420.	El error porcentual del producto se mantiene en el rango indicado ante las variaciones dadas en el ensayo.
T-PER-08 Final	T-ERR-01	Ensayo 5.4.2.1, página 33 de la norma IRAM 2420.	El error porcentual del producto se mantiene en el rango indicado ante las variaciones dadas en el ensayo.

Tabla 20: Tests de performance.

7.1.6 BP-06: Pruebas de estrés y seguridad

Este banco de pruebas es utilizado para realizar pruebas de estrés y seguridad sobre el sistema. Particularmente estos tests evalúan el comportamiento del sistema bajo distintos rangos de temperatura ambiente. La configuración del banco de pruebas se encuentra detallada en la norma IRAM 2420.

ID	Precondiciones	Procedimiento	Resultado esperado
T-OPE-01 Final	T-INIT-02	Ensayos 5.3, página 32 de la norma IRAM 2420.	El sistema opera normalmente en el rango de temperatura ambiente aplicado en el ensayo.
T-OPE-02 Final	T-INIT-02	Ensayo 5.4.3, página 33 de la norma IRAM 2420.	El sistema no sufre daño ni degradación al aplicarse las condiciones del ensayo.
T-SEG-01 Final	T-INIT-02	Ensayo 5.4.5, página 34 de la norma IRAM 2420.	El medidor no supera una temperatura superficial de 65 °C.

Tabla 21: Tests de estrés.

7.1.7 BP-07: Pruebas de dimensiones y peso

Este banco de pruebas es utilizado para las pruebas que miden las dimensiones y el peso del producto. Se deberá colocar el DUT sin alimentación.

Se utilizará una cinta métrica de 1 mm de precisión. Puede utilizarse un instrumento con mayor precisión, pero no es necesario según la especificación IMP-DIM-02.

Se deberá utilizar una balanza digital cuya superficie tenga el tamaño suficiente para que el equipo pueda apoyarse sobre ella. Ésta deberá estar calibrada y deberá tener una precisión de 1 g o mejor.

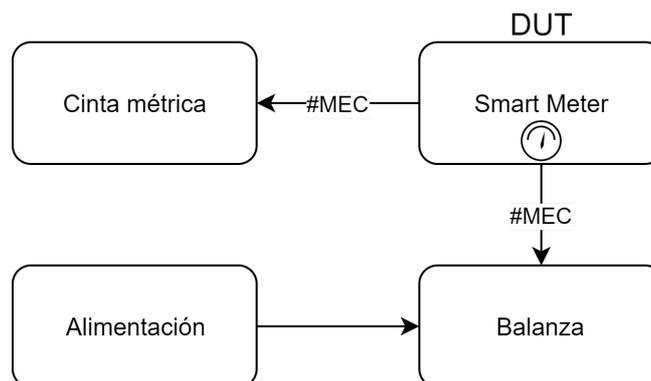


Figura 6: Banco de pruebas BP-07.

ID Aplicabilidad	Precondiciones	Procedimiento	Resultado esperado
T-DIM-01 Final	-	<ol style="list-style-type: none"> 1. Encender la balanza y esperar a que se inicialice. 2. Colocar el DUT sobre la balanza y esperar a que esta muestre el valor final del peso. 	El producto pesa menos de 4999 gramos.
T-DIM-02 Final	-	<ol style="list-style-type: none"> 1. Colocar la cinta métrica junto a cada arista de la caja del medidor. 2. Tomar mediciones del alto, ancho, y profundidad del producto. 	El producto tiene menos de 264 mm de ancho, 414 mm de alto, y 209 mm de profundidad.

Tabla 22: Tests de dimensiones y peso.

7.1.8 BP-08: Pruebas de compatibilidad electromagnética

Este banco de pruebas es utilizado para realizar pruebas de EMC. La configuración del banco de pruebas se encuentra detallada en la norma IRAM 2420.

ID Aplicabilidad	Precondiciones	Procedimiento	Resultado esperado
T-EMC-01 Final	T-ERR-01	Ensayo 5.5, página 37 de la norma IRAM 2420.	El sistema opera normalmente en las condiciones del ensayo.

Tabla 23: Tests de EMC.

7.1.9 BP-09: Pruebas de almacenamiento y transporte

Este banco de pruebas es utilizado para realizar pruebas de almacenamiento y transporte. La configuración del banco de pruebas se encuentra detallada en la norma IRAM 2420.

ID Aplicabilidad	Precondiciones	Procedimiento	Resultado esperado
T-AYT-01 Final	T-ERR-01	Ensayo 5.3, página 32 de la norma IRAM 2420.	El sistema opera normalmente luego de someterse a las condiciones del ensayo.

Tabla 24: Tests de almacenamiento y transporte.

7.1.10 BP-10: Pruebas de mantenimiento

Este banco de pruebas es utilizado para realizar pruebas de mantenimiento. El DUT debe encontrarse instalado en un punto de consumo.

ID Aplicabilidad	Precondiciones	Procedimiento	Resultado esperado
T-MAN-01 Final	-	<ol style="list-style-type: none"><li data-bbox="639 544 1066 645">1. El dispositivo debe estar ubicado en su caja contenedora, y cerrado como si estuviera instalado en el punto de medición de consumo.<li data-bbox="639 674 1094 725">2. Intentar retirar la tapa de la caja, sin dañar ni deteriorar la misma o el dispositivo.	La tapa sólo puede retirarse con el uso de una herramienta especial, particularmente diseñada para este fin.

Tabla 25: Tests de mantenimiento.

7.2 Matriz de trazabilidad para validación

Origen	REQ ID <i>Descripción corta</i>	ESP ID	TEST ID	BP ID
Cliente	REQ-21 <i>Establecimiento de comunicación</i>	FUN-CON-09	T-INIT-02	BP-01
	REQ-12 <i>Interfaz UI</i>	FUN-DAT-01	T-FUN-01	BP-02
	REQ-19 <i>Datos de medición</i>			
	REQ-26 <i>Transmisión periódica de datos</i>	FUN-CON-01		
	REQ-13 <i>Interacción con UI</i>	FUN-DAT-02	T-FUN-02	
	REQ-15 <i>Navegación simple de UI</i>			
	REQ-19 <i>Datos de medición</i>			
	REQ-25 <i>Frecuencia de transmisión de datos configurable</i>	FUN-CON-02	T-FUN-03	
	REQ-22 <i>Conexión / Desconexión de suministro</i>	FUN-CON-03	T-FUN-04	
		FUN-CON-04	T-FUN-05	
REQ-27 <i>Distancia de comunicación</i>	FUN-CON-08	T-FUN-11		
REQ-05 <i>Tamaño de cables</i>	INT-VLIN-05	T-INIT-03	BP-01	
REQ-08 <i>Memoria no volátil</i>	FUN-DAT-03	T-FUN-08	BP-02	
REQ-09	FUN-BAT-01	T-FUN-09		

	<i>Batería interna</i>		T-FUN-10	
	REQ-28 <i>Medición de generación y consumo</i>	FUN-MED-01	T-FUN-12 T-FUN-13	
Cliente	REQ-30 <i>High-speed Tracing</i> REQ-32 <i>Cálculo de THD</i>	FUN-CON-05 FUN-CON-06	T-FUN-06	
	REQ-31 <i>Facturación</i>	FUN-CON-07	T-FUN-07	
Ley Argentina	REQ-16 <i>Indicadores de funcionamiento</i>	INT-UI-01	T-INIT-01	BP-01
	REQ-06 <i>Normas</i>	INT-VLIN-01 INT-VLIN-03	T-VLIN-01	BP-03
		INT-VLIN-04 INT-VLIN-09	T-VLIN-02	
		INT-VLIN-02	T-VLIN-03	
		INT-MEC-01	T-MEC-01	BP-04
		INT-MEC-02	T-MEC-02	
	PER-ERR-01	T-ERR-01 T-ERR-02 T-ERR-03 T-ERR-04 T-ERR-05	BP-03	
	PER-DAT-01	T-PER-01	BP-05	
	PER-DAT-02	T-PER-02		
	PER-DAT-03 PER-DAT-04	T-PER-03		

		PER-DAT-05 PER-DAT-06 PER-DAT-07 PER-DAT-08 PER-DAT-09		
		PER-DAT-10 PER-DAT-11 PER-DAT-12	T-PER-04	
		PER-DAT-13	T-PER-05	
		PER-DAT-14	T-PER-06	
		PER-DAT-15	T-PER-07	
		PER-DAT-16	T-PER-08	
		IMP-OPE-04	T-OPE-03	BP-03
		IMP-OPE-01 IMP-OPE-02	T-OPE-01	BP-06
		IMP-OPE-03	T-OPE-02	
		IMP-DIM-01	T-DIM-01	BP-07
		IMP-DIM-02	T-DIM-02	
		IMP-EMC-01 IMP-EMC-02	T-EMC-01	BP-08
		IMP-POW-01 IMP-POW-02	T-POW-01	BP-03
		RAMS-SEG-04	T-SEG-01	BP-06
		RAMS-MAN-03	T-MAN-01	BP-10
		IMP-AYT-01	T-AYT-01	BP-09

Tabla 26: Matriz de trazabilidad para validación.

8 Análisis de factibilidad

Esta sección presenta distintos tipos de análisis que buscan determinar la factibilidad de la realización del proyecto. Se concentra en las opciones tecnológicas para implementar las prestaciones deseadas del producto, el tiempo necesario para la realización del proyecto, los aspectos económicos a tener en cuenta para obtener el mayor beneficio, y el marco legal en el cual debe contenerse el proyecto.

8.1 Factibilidad tecnológica

8.1.1 Esquema modular

Siguiendo los requerimientos y especificaciones del producto, y considerando los bancos de pruebas necesarios para la validación del mismo, se diseñó un esquema modular con los elementos fundamentales.

En la figura 7 se presentan los módulos funcionales que componen al medidor inteligente junto con las interfaces anteriormente definidas para el mismo (sección [6.2](#)).

El módulo de alimentación toma los 220 VAC de la red eléctrica y los convierte en las tensiones DC necesarias para alimentar a todos los componentes del sistema. Los módulos de medición de corriente y tensión obtienen muestras de la red eléctrica y las envían al centro de control. A través de la misma red eléctrica se transmite información modulada utilizando PLC (módulo de comunicación por default). Esta información puede contener datos que el smart meter transmite o instrucciones enviadas desde el concentrador de la NAN hacia el medidor.

El centro de control se encarga de coordinar el funcionamiento de todos los módulos. Se ocupa de procesar las muestras de tensión y corriente para obtener valores característicos de la red, envía datos y procesa instrucciones recibidas, almacena los datos que no han sido transmitidos aún, indica si debe cortarse o continuar el suministro de energía al consumidor, y controla la interfaz de usuario.

El almacenamiento de datos es la memoria del sistema, el interruptor residencia-red corta el suministro de energía en caso de solicitarse, y la interfaz de usuario muestra información sobre el consumo a través de un display.

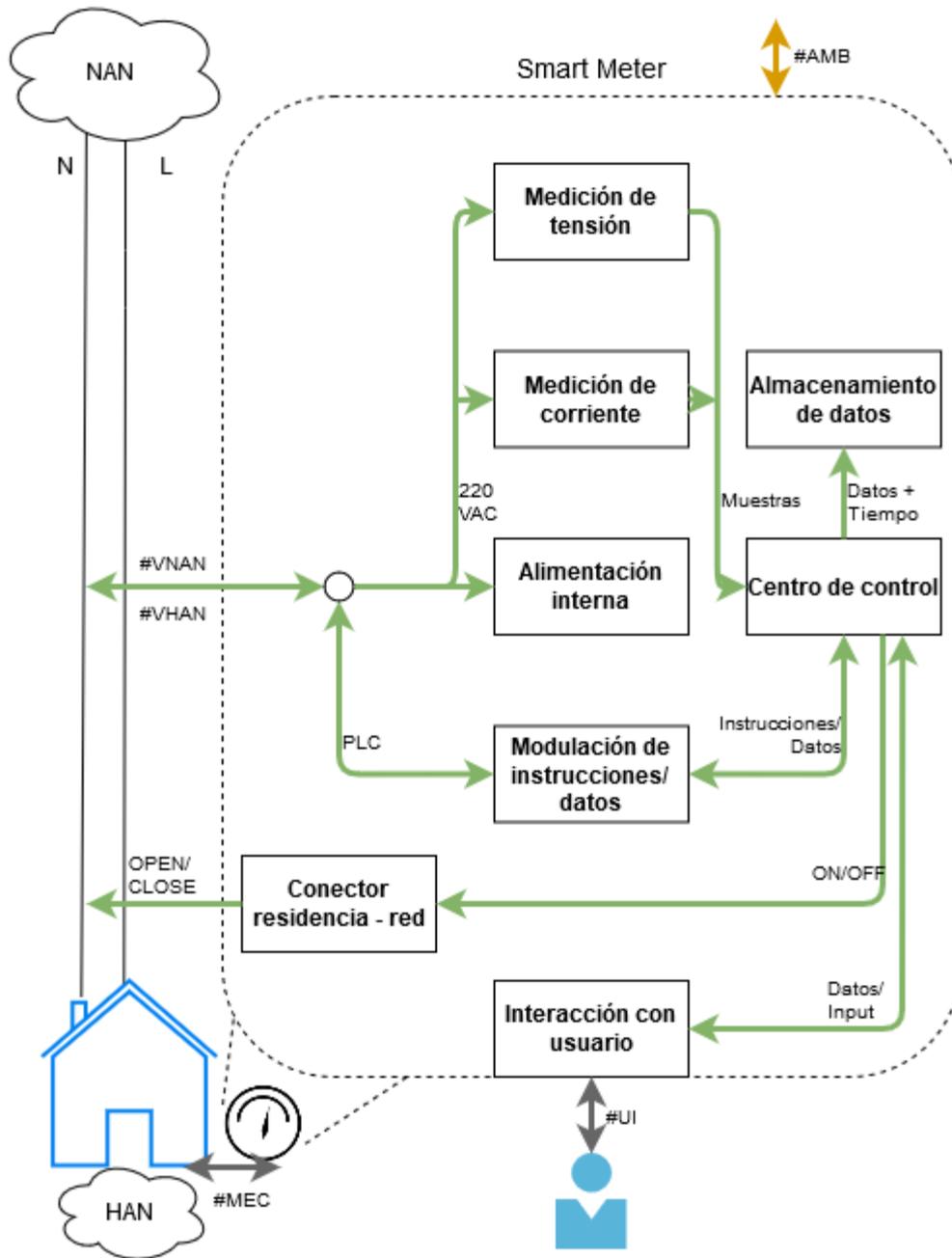


Figura 7: Esquema modular del producto.

8.1.2 Propuesta de alternativas de arquitectura

En base a los módulos definidos para el sistema deseado (figura 7), se pensaron distintas alternativas de arquitectura para el diseño del producto. Se tuvo en consideración que los módulos finales del sistema deben ser fácilmente reemplazables, los costos, señales internas involucradas, tensión y corriente necesaria, etc. La siguiente tabla contiene las alternativas consideradas.

Módulo	Alternativas
Modulación de la señal de instrucciones y datos.	<ul style="list-style-type: none"> • Solo modem PLC: el módulo de comunicación contaría con comunicación con la NAN, y no con la HAN. Implica una mayor facilidad para el desarrollo del módulo, pero no habría comunicación con el interior del punto de consumo. • Modem PLC para comunicación con NAN y módulo WiFi para comunicación con HAN. Implica un módulo más grande, aumenta el peso y el consumo del producto. Proveería datos al interior del punto de consumo.
Medición de tensión y corriente.	<ul style="list-style-type: none"> • Módulos separados para tensión y corriente: puede reemplazarse la medición de tensión y corriente de manera independiente. Implica el desarrollo de placas separadas, por lo que aumentaría el costo, y requeriría un espacio mayor dentro del producto tanto para los módulos en sí como para sus conectores. • Medición de tensión y corriente en el mismo módulo. Implica el desarrollo de una sola placa y una posible reducción del espacio dentro del producto. Limita las combinaciones de tensión y corriente a ser medidas. • Preprocesamiento de muestras en el mismo módulo de medición: algún controlador dentro del mismo módulo de medición toma las muestras, las procesa y agrupa para su transmisión a la CPU. Implica un módulo de medición más grande, un aumento del costo, pero reduce la capacidad de procesamiento del módulo central significativamente. • Módulo sin preprocesamiento: el módulo de medición solo toma las muestras en bruto de tensión y corriente, y las envía a otro módulo de procesamiento. Implica menor peso y costo, y la necesidad de un módulo central de mayor capacidad de procesamiento. • Un módulo sirve para una sola fase, y se requieren tres para un medidor trifásico: se necesita un módulo por fase para trabajar en el modo trifásico. Cada módulo sería idéntico. Implica la reutilización de diseños de placa para los distintos módulos de medición, una mayor complejidad en la detección de módulos y del procesado de cargas trifásicos. • El sistema es compatible con módulos de una fase y tres fases (tres fases son medidas en un módulo): para el modo trifásico, se conecta un solo módulo que contiene entradas para las tres fases. Implica una mayor facilidad para la detección de módulos de medición y la necesidad de diseños diferentes para distinta cantidad de fases. Permite medir tensión entre fases más fácilmente. • Incluir reloj para tener el tiempo de las mediciones: tener un reloj en el módulo de medición para tener mediciones con su tiempo exacto, o tenerlo en otro módulo de procesamiento. Implica paquetes de datos de mayor tamaño lo que se traduce en una frecuencia de transmisión más alta o paquetes más distanciados temporalmente.
Alimentación interna	<ul style="list-style-type: none"> • Conversión de 220 VAC a todas las tensiones que los demás módulos necesiten. Esto agrega más componentes a este módulo pero permite que haya menos conversiones redundantes en otros módulos. • Conversión de 220 VAC a una tensión DC. Los demás módulos se encargan de convertir esta tensión continua a la que necesiten: habrían menos componentes en el módulo de alimentación, se agregarían componentes a los demás módulos, y podría haber redundancia de conversión de tensión entre módulos, pero cada módulo tendría más libertad en la decisión de su alimentación. Permite usar convertidores/reguladores de menor corriente (más económicos). Se requiere especial cuidado en la interconexión entre módulos.
Centro de control	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar todo el procesamiento de mediciones en este módulo. Implica una mayor capacidad de procesamiento en este módulo, y una capacidad reducida en los módulos de medición. • Realizar solo parte del procesamiento de mediciones (preprocesamiento en otro

	<p>módulo). Implica una menor capacidad de procesamiento del módulo central, lo que reduciría el costo, pero un aumento en la capacidad de los módulos de medición.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incluir reloj para tener el tiempo de las mediciones. Implica que las muestras tomarían el tiempo del centro de control, que es diferente al tiempo en el que las muestras fueron tomadas.
Interruptor residencia-red	<ul style="list-style-type: none"> • Un interruptor por módulo de medición. Aumenta el costo, tamaño y peso de cada módulo de medición pero está optimizado para la tensión y corriente del módulo al que pertenece. • Un solo interruptor en un módulo separado. Implica agregar un módulo sólo para el interruptor. Es reemplazable e independiente del resto de los módulos. De contemplar las tensiones y corrientes de todos los módulos de medición.
Almacenamiento de datos	<ul style="list-style-type: none"> • Memoria en un módulo independiente. Implica la posibilidad de extraer la memoria con mayor facilidad, pero ocupa más espacio dentro del producto. • Memoria junto con centro de control. Reduce el uso del espacio y elimina la posibilidad de extraer la memoria físicamente. Los datos deberían leerse por algún medio de comunicación, sin extraer la memoria.

Tabla 27: Alternativas de arquitectura del producto.

8.1.3 Elección de arquitectura

Para la elección de la arquitectura del producto se optó por la reducción en la cantidad de módulos y componentes, la sencillez de interconexión de módulos, y su fácil reemplazo.

La figura 8 enseña un diagrama de bloques funcionales conteniendo los módulos principales elegidos para la arquitectura del smart meter. Las flechas que conectan los módulos definen los enlaces de comunicación entre ellos. También se muestra la conexión del medidor con la línea eléctrica y su comunicación con la NAN y la HAN. La siguiente lista menciona los criterios seguidos para las elecciones realizadas (los valores en paréntesis refieren al nuevo nombre resultante de haber hecho la elección mostrados en la figura 8):

- Modulación de la señal de instrucciones y datos (módulo de comunicación): se opta por realizar sólo la comunicación NAN por ser la de mayor importancia y permitir tener los datos en un servidor que a su vez permita acceder a ellos remotamente por los usuarios y reemplazar la funcionalidad de la comunicación HAN, que de hacerse localmente en el medidor, requeriría de hardware y software especialmente diseñado para ello.
- Medición de tensión y corriente (medición y preprocesamiento): para este módulo se elige usar un único circuito de medición de tensión y corriente, ya sea monofásica o trifásica, ya que esto facilita el diseño y se cree que no es algo que requiera demasiado cambio o reparación como para justificar hacer circuitos separados: los medidores se elijen una vez de acuerdo al consumo del usuario y, salvo casos particulares, permanecen inalterados. El preprocesado brinda una reducción considerable de la potencia de cómputo necesaria en la CPU y se puede usar hardware programable capaz de realizar múltiples tareas en paralelo y a muy alta velocidad, ideal para tomar muestras simultáneas de tensión y corriente, por lo que también se elige implementarlo. En cuanto al reloj, el tiempo entre muestra y

muestra, o incluso entre paquetes de datos, es insignificante ante los cambios que puedan darse en la tensión o corriente y menos aún en la energía o potencia (no se espera medir la incidencia de un rayo sobre la red eléctrica) por lo que no se justifica agregarlo a este módulo. A lo sumo se le puede poner un timestamp a cada paquete de datos, cosa que puede hacer fácilmente la CPU que los recibe.

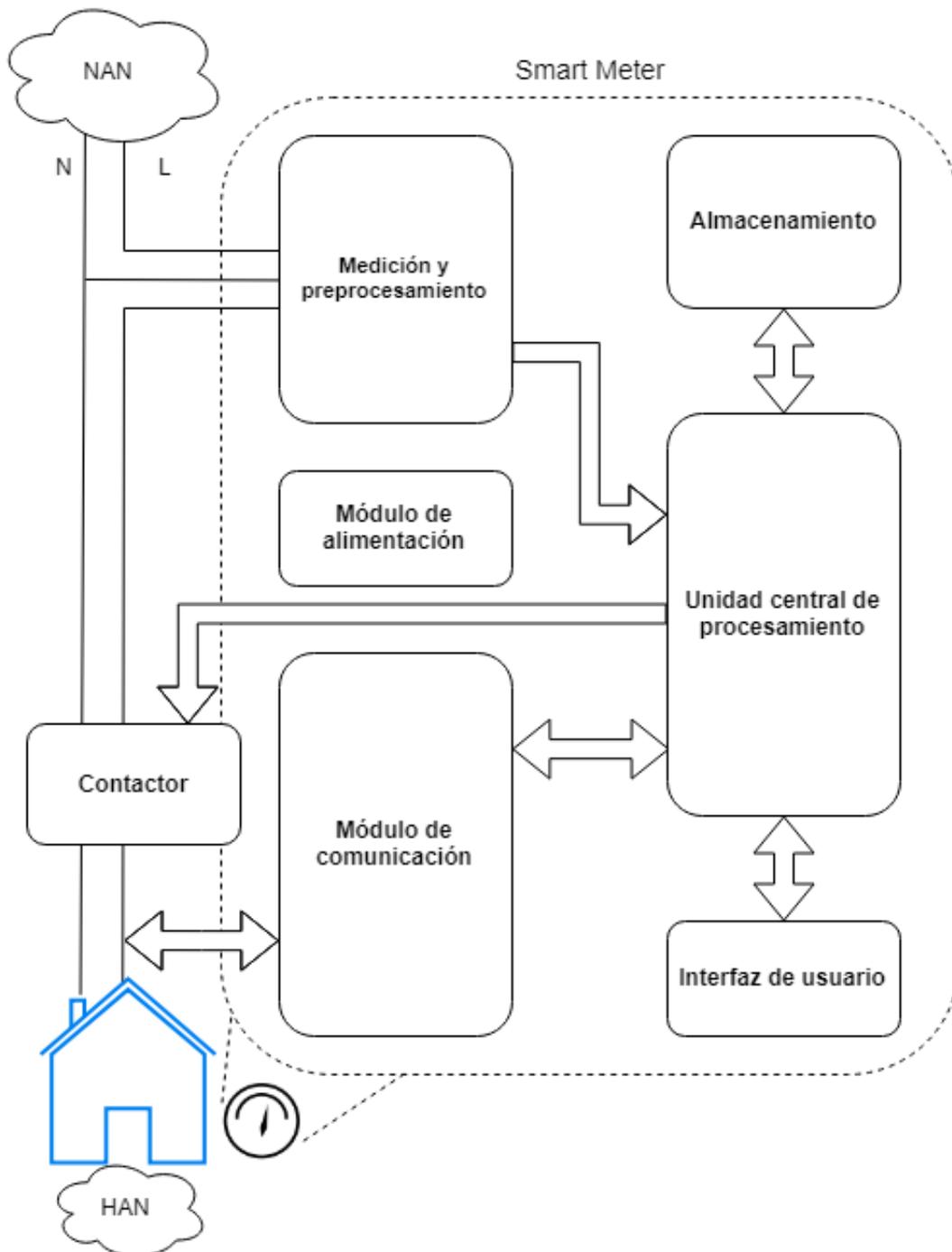


Figura 8: Diagrama de arquitectura del producto final.

- Alimentación interna (módulo de alimentación): se opta usar la segunda opción, teniendo un único convertidor de 220 Vrms a una tensión DC y que luego cada módulo regule la tensión según sus necesidades (según tensión y corriente). Esto

permite simplificar la transmisión de energía dentro del medidor al tener un solo par de cables que van a todos los demás módulos (o una gran pista si se usa un PCB). También reduce los costos ya que los reguladores de mucha corriente suelen ser más costosos o requieren una corriente de funcionamiento mayor.

- Centro de control (unidad central de procesamiento): es dependiente de la arquitectura elegida para el módulo de medición ya que incorporar o no el preprocesado tiene grandes implicancias en la elección de la CPU que debe realizar todos los cálculos restantes. Al incorporar el preprocesado, se pueden elegir CPUs menos potentes y más económicas. La CPU puede contar con RTC incorporado para facilitar su uso.
- Interruptor residencia-red (contactor): ante las posibles condiciones de uso y lo elegido para el módulo de medición y preprocesamiento, poner un interruptor por módulo o un único interruptor, resultan ser lo mismo, pues se mida monofásica o trifásica, el módulo de medición es uno solo. Ergo, la arquitectura se reduce a decidir dónde se incorpora el interruptor. Se opina que tener un módulo independiente para el interruptor posibilita a cambiarlo más fácilmente así como facilitar el cableado. Sea un interruptor monofásico o trifásico, debe tener una llave por fase y una para el neutro.
- Almacenamiento de datos (almacenamiento): tener la posibilidad de extraer la memoria del medidor representa una gran ventaja ante una rotura o mal funcionamiento y brinda la opción de poder ver y/o recuperar datos. También permite guardar (y recuperar) datos de diagnóstico que permitan ver cuándo y por qué se dió la ruptura o mal funcionamiento. Es imperante agregar la seguridad necesaria (tanto física como digital) para que la memoria sea extraída y leída sólo por personal autorizado. Permite usar un pendrive común a fin de ser leído sin mayor dificultad y teniendo una amplia variedad de tamaños, capacidades y precios.

8.1.4 Presupuesto de error

Para los componentes empleados para realizar la medición se debe tener en cuenta las especificaciones de error que no deberán superarse, según lo especifiquen las normas. Pero dado que la incerteza especificada es para las magnitudes finales, es decir, las magnitudes una vez digitalizadas y con todos los cálculos que estas requieran para obtenerlas, se deberá tener en cuenta todas las incertezas involucradas.

Debe tenerse en cuenta que errores debido a redondeo y/o truncado no se tendrán en cuenta ya que se considera que están muy por debajo de los valores usados y los datos de simple y doble precisión (float y double) tienen la suficiente resolución para los fines en este trabajo. No es nuestro objetivo desarrollar un nuevo sistema numérico o tipo de datos para microcontroladores.

Puesto que todas las magnitudes parten de la medición de la tensión y la corriente y que estas están divididas circuitalmente en varias etapas, se debe proveer un valor estimado de la repartición de la incerteza para cada etapa a fin de cumplir con el requerimiento de

obtener un instrumento de clase 2 y proveer un punto de partida para elegir los elementos que componen cada etapa.

De esta manera, y suponiendo incertezas aditivas a fin de simplificar la estimación, la incerteza total se puede dividir en varias partes. Primero y principal está el ruido de cuantización inherente al hecho de digitalizar las muestras tomadas para poder procesarlas y enviarlas. Este ruido puede ser reducido aumentando la cantidad de bits de los ADC: un caso genérico con una señal de 5V y un ADC de 10 bits dan como resultado una potencia de ruido de cuantización de casi 2 uW ($P = Q^2/12$, con $Q = 5/2^{10}$) o alrededor de 1.41 mVrms, lo que a su vez equivale a un error relativo de 0.028 %.

Otro elemento siempre presente es el ruido electromagnético, del cual es muy difícil obtener una cota, ya que el medidor puede encontrarse en ambientes muy variados y frente a fuentes electromagnéticas de diferente naturaleza, como ser un motor, un contactor o transmisores de radio frecuencia. De cualquier manera, este ruido se puede disminuir empleando un blindaje adecuado y filtros digitales (los analógicos no permiten reducir este ruido ya que éste se encuentra presente tanto en su entrada como su salida).

El tercer elemento que agrega incerteza es el filtro anti alias analógico, que además de filtrar la porción del espectro superior al doble de la frecuencia de interés (cumpliendo Nyquist con filtro ideal) permite incorporar las ganancias y offsets necesarios para adaptar las tensiones y corrientes a valores adecuados a los componentes electrónicos usados, los cuales deberán ser elegidos cuidadosamente a fin de mantener esta incerteza baja.

Un elemento que sólo pertenece a la medición de corriente es el transductor de corriente a tensión que es necesario ya que los ADC suelen medir tensión (los hay de corriente, pero son menos comunes y más costosos). Este elemento es uno de los más críticos, ya que alta precisión y exactitud implican altos costos, más aún si la corriente a medir es elevada (decenas de amperios).

Por último, se encuentra el elemento de validación o de contrastación usado para comparar los resultados obtenidos. Este instrumento debe ser de mayor precisión que la precisión buscada a fin de poder proveer un valor de referencia. Para el caso, se empleará el Fluke 435 disponible en el CIDEI el cual presenta una incerteza de 0.1 % (o menor) para las magnitudes de interés.

En la siguiente tabla se muestran los valores elegidos para los distintos elementos a tener en cuenta a la hora de calcular la incerteza, expresados en incerteza porcentual. La suma de todos los valores es de 1.92%.

	Sensor	FAA	Cuantización	Ruido EM	Validación
Corriente	0.5	0.1	0.01	0.5	0.1
Tensión	-	0.1	0.01	0.5	0.1

Tabla 28: Valores elegidos para presupuesto de error según magnitud medida y etapa en la medición..

8.1.5 Análisis y elección de alternativas de tecnología

Contactor

Los relés o contactores se dividen en dos categorías: los electromecánicos (EMR: electromecanic relay) y los de estado sólido (SSR: solid state relay). Los primeros consisten en un electroimán que mueve físicamente los contactos metálicos para hacer la conmutación. Los segundos consisten en circuitos integrados semiconductores que conmutan la corriente electrónicamente.

Lo importante para hacer la elección por uno u otro radica en el modo de operación (si es normal abierto o normal cerrado), el consumo y el costo. Otro factor importante es el modo de falla: mientras que los EMR fallan a su modo de operación, los SSR tienden a fallar a circuito cerrado, lo que representa una desventaja ya que al hacer cortocircuito corren riesgo de explosión. Por su parte los EMR de alta corriente no son comunes en una configuración normal cerrado debido a que ante una falla el equipo que se alimenta a través de él quedaría encendido (y esto suele no ser algo deseable) ni en una configuración bipolar (los contactores de altas corrientes suelen ser para uso industrial, donde se usa trifásica).

La vida útil de ambas clases de contactores viene dada en cantidad de conmutaciones posibles, seguramente debido a que los EMR son anteriores y se medía el número de conmutaciones necesarias para que los contactos se rompieran o gastaran. En números redondos, un EMR tiene una vida útil de un millón de conmutaciones mientras que los de estado sólido tienen 100 veces eso [17]. De cualquier manera, se supone que el consumidor quiere tener energía en su hogar o industria por lo que el contactor se conmutará sólo algunas veces en la vida útil del medidor. Otras ventajas de los SSR que pierden importancia por lo mencionado anteriormente es su mayor velocidad de conmutación (que es entre 10 y 15 veces más veloz) y el hecho de que son silenciosos al no contar con partes móviles.

En cuanto a las ventajas de los SSR que sí son de importancia, se encuentra en primer lugar, su bajo consumo de operación: mientras los EMR necesitan alrededor de 200 mA, los SSR sólo requieren 20 (varía según la tecnología, características propias del contactor, fabricante, etc); en segundo lugar, la posibilidad de agregar funcionalidades adicionales como por ejemplo la conmutación en cruce por cero (que puede no ser de suma importancia dada la baja tasa de conmutación esperada, pero que puede ser ventajoso a la hora de energizar o desenergizar grande equipos industriales); y en tercer lugar, su menor tamaño (aunque suelen requerir un disipador). Su principal desventaja es su costo: mientras que un EMR de 40 Arms monofásico está alrededor de 50 dólares (dependiendo de diversos factores como si viene sellado, la tensión y corriente máxima, entre otros), los SSR para la misma corriente cuestan por encima de los 100 dólares (ver tabla 29).

Según el requerimiento [INT-VLIN-02](#), algunas de las posibilidades para contactores de 36 Arms (o 50 Apico) se muestran en la siguiente tabla. Se prefirieron los contactores EMR sobre los SSR ya que muchas de las ventajas de estos últimos dejan de ser tales si no se conmutan repetidamente y por ende su costo no se justifica. También se dió preferencia a

los EMR con bobinado de corriente continua ya que el circuito de control resulta levemente más sencillo y seguro. Todos los contactores elegidos vienen en configuración normal abierta.

Componente	Tensión máxima (VCA)	Corriente máxima (AC-1) [Arms]	Tensión bobinado	Configuración Comentario	Precio unitario (US\$)	Marca
GDP403S220V	277	40	220 VAC	EMR 3PST-NO	41.0	Carlo Gavazzi Inc.
CRT-2510	660	40	24 VDC	EMR 3PST-NO	25.00	SICA
22.42.0.024.4310	400	40	24 VDC/VAC	EMR 4PST-NO	60.59	Finder Relays, Inc
GDP402S24V GDP402S480V	277	40	24 a 480 VAC	EMR DPST-NO	27.00	Carlo Gavazzi Inc.
RGC1A23A40KGE	230	40	24 a 190 VDC o 20 a 275 VAC	SSR SPST-NO	101.00	Carlo Gavazzi Inc.

Tabla 29: Alternativas de contactores (los valores de corriente son AC-1).

Ha de tenerse en cuenta la categoría de utilización normado por el estándar IEC 60947-1, que clasifica los contactores según el tipo de carga que pueden manejar. Para cargas de corriente alterna esto significa básicamente que coseno phi puede tener la carga utilizada con dicho contactor. Dado que los contactos están caracterizados para una determinada corriente máxima, para menores coseno phi eso implica una menor potencia máxima. Puesto que se apunta a un medidor de energía para el hogar o pequeños comercios, se supone que el coseno phi se encuentra cerca de la unidad y que, por ende, la categoría de utilización será de AC-1 y AC-2 o, a lo sumo, AC-3 (motores presentes en heladeras o aires acondicionados pueden caer en esta categoría).

Al considerar los factores de disponibilidad local (fabricación nacional), costo (el menor de la tabla anterior) y funcionalidad deseada (bobina de corriente continua), se opta por usar el CRT-2510 de SICA.

Medición y preprocesamiento

Adaptación de la tensión

Medir una tensión de mayor magnitud que la tensión máxima soportada por los sistemas de adquisición y procesamiento requiere que la medición deba llevarse a cabo a través de un divisor de tensión. El más común es el divisor resistivo, pero se pueden usar capacitivos o

inductivos, aprovechando el hecho de que la tensión medida es alterna. Otra forma es a través de un transformador reductor de tensión.

Los divisores capacitivos e inductivos no disipan potencia (idealmente), pero se debe tener en cuenta que tienen un comportamiento distinto según sea la frecuencia (actúan como filtro pasivo). Esto introduce un desfase en la tensión y puede dificultar los cálculos.

El divisor resistivo, por su parte, tiene un comportamiento prácticamente constante en el rango de frecuencias de entrada aunque requiere especial cuidado con el autocalentamiento, debiendo minimizarlo cuanto sea posible. Se puede reducir usando valores elevados de resistencia, teniendo en cuenta que con la misma también aumenta el ruido térmico. De cualquier manera, representa la opción más pequeña (tanto los transformadores como los capacitores de alta tensión son voluminosos en comparación con un resistor de montaje superficial), más económica y menos susceptible a interferencias electromagnéticas.

Los transformadores tienen la ventaja de proveer aislación galvánica, simplificando el circuito de alimentación del sistema de adquisición, pero pueden tener comportamientos no lineales, como la saturación, que si bien, en principio es una característica indeseable, se puede usar como medida de protección contra sobretensiones, evitando daños a componentes más caros o complicados de reemplazar.

Medición de la tensión

La medición de tensión es la más simple de las mediciones eléctricas. Se lleva a cabo midiendo el potencial eléctrico del punto de interés respecto a tierra (modo común) o entre los bornes del elemento que se quiere conocer la tensión aplicada (modo diferencial, elimina el nodo común). Este último, elimina parte del ruido, dado que el mismo se encuentra presente en ambos bornes del elemento medido.

La medición en sí se da cuando se obtiene un número representativo de la magnitud medida a través de un convertidor analógico-digital, y cuya precisión viene dada por la cantidad de bits del mismo. Los errores introducidos por los ADC involucran la cuantización, alinealidad, offset y error de ganancia propios del proceso de conversión que luego deberán ser calibrados (salvo el de cuantización que es inherente al proceso de cuantización). La potencia de ruido puede ser reducida luego de la medición mediante procesos digitales como el oversampling, la decimación y los filtros boxcar.

Adaptación de la corriente

Dado que medir corriente directamente es más complicado que medir tensión, se usan transductores de corriente a tensión o de corriente a corriente con una resistencia en serie y luego se mide la tensión como se describió anteriormente.

El primer transductor es el transformador de corriente que reduce las altas corrientes a valores apropiados aprovechando el hecho de que la señal a medir es sinusoidal. Es un dispositivo relativamente simple, pues consiste en hacer un bobinado alrededor del cable cuya corriente se quiere medir. Requiere obligatoriamente de una resistencia de shunt para

convertir la corriente de salida en una tensión. Tiene la ventaja de que no se requiere cortar el camino de la corriente y provee aislación galvánica.

El segundo transductor es un sensor por efecto Hall. Viene integrado y preparado para distintos rangos de corriente, tanto continua como alterna, puede ser a lazo abierto o cerrado y puede tener salida en tensión, en corriente o incluso ya digitalizada. Los sensores con salida en corriente parecen poseer mejores cualidades de desempeño: mayor precisión y linealidad, menor offset, etc. Esta característica se nota aún más para transductores a lazo cerrado. En la tabla 30 se muestran algunos ejemplos comerciales de sensores de efecto Hall incluido el finalmente elegido, el S25P050D15X de Tamura (ver Diseño Propuesto más adelante).

La tercera opción es usar directamente una resistencia de shunt. Suelen ser dispositivos voluminosos dado que para convertir, dígame 100 A en 5 V, se requiere que pueda disipar 500 W, además de no proveer aislación galvánica alguna. También son costosos, dado que se fabrican con metales especiales que brindan elevadas resistencias.

Componente	Alimentación (V)	Consumo (mA)	Corriente máxima (A)	Linealidad (%)	Precisión (%)	Tiempo de respuesta (μ s)	Características	Precio unitario (US\$) ¹	Marca
LA 150-P	$\pm 12 \sim 15$	85	150	± 0.1	$\pm 0,5$	0.5	Salida en corriente con aislación galvánica	29.92	LEM
LA 150-TP	$\pm 12 \sim 15$	10	150	± 1	$\pm 0,5$	0.5	Salida en corriente sin aislación galvánica	31.35	LEM
S25P050D15X	$\pm 12 \sim 15$	16	50	$\pm 0,15$	$\pm 0,5$	1	Salida en corriente con aislación galvánica	20.65	Tamura
CSNE151-104	± 15	10	56	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	1	Salida en corriente sin aislación galvánica	15.23	Honeywell Sensing and Productivity Solutions

Tabla 30: Alternativas de sensores de corriente por efecto Hall.

Preprocesamiento

El preprocesado consiste en la transformación de los datos brutos en nuevos datos que sean de interés. El principal objetivo del preprocesado es la reducción del volumen de los datos, pero siguen siendo datos brutos que todavía requieren algún grado de procesado, como ser su “normalización” al pasar de un valor en binario extraído de los ADCs al valor real que representa (valor decimal, en la escala correcta, con determinada cantidad de decimales significativos).

¹ Los precios fueron extraídos de la página de Digi-Key el día 25 de noviembre de 2016: <http://www.digikey.com/productsearch/es/sensors-transducers/current-transducers/1966573?FV=fff4001e%2Cfff801ed&mnonly=0&newproducts=0&ColumnSort=0&page=1&stock=0&pbfree=0&rohs=0&quantity=0&ptm=0&fid=0&pageSize=500>

El hecho de que los datos se mantengan en notación binaria permite el uso de hardware programable, como son las FPGAs o CPLDs, que son dispositivos muy flexibles y hoy en día brindan velocidades de procesamiento relativamente altas. Tienen la ventaja de que al tratarse de hardware, puede realizar tareas en paralelo, lo que también representa una desventaja a la hora de controlar su funcionamiento (por ejemplo cuando dos partes del hardware requieren acceso a una misma posición de memoria). Dado que se pueden programar en lenguajes de descripción de hardware (como Verilog o HDL y sus variantes), la implementación se puede llevar a cabo en cualquier FPGA o CPLD sea del fabricante que sea: Verilog y HDL (en particular VHDL) son estándares para programación de dispositivos programables.

A la hora de elegir posibles modelos se debe tener en cuenta principalmente el número de pines accesibles desde el exterior, la frecuencia máxima de operación y el número de compuertas o LUTs (Look Up Table), las cuales son la base de todo diseño en hardware programable junto con los flip-flops y registros. Otros elementos deseables son los multiplicadores, que permiten realizar multiplicaciones en un ciclo de clock (o pocos) que de otra manera requerirían muchos ciclos (generalmente n para datos binarios de n bits); módulos de comunicaciones (como SPI, I2C, CANbus, RS232, etc); memorias y ADCs.

El mayor inconveniente a la hora de buscar opciones es que hay relativamente pocos modelos pequeños y baratos de FPGAs, siendo lo “común” un dispositivo de 100 pines de entrada/salida con velocidades de procesamiento vertiginosas que pueden costar unos US\$100 (Intel y Xilinx caen en esta categoría). En lo que es FPGAs pequeñas sólo una marca destaca, Lattice Semiconductor Corporation, con integrados de alrededor de 50 pines, prestaciones aceptables y precios que no superan los US\$10. La siguiente marca es Microsemi Corporation con dispositivos similares pero con precios que van desde US\$15 a US\$60. La diferencia principal entre estos modelos “económicos” y el resto puede radicar, no sólo en el integrado en sí, sino en toda la infraestructura alrededor del mismo, es decir, el software, la ayuda que puedan brindar, las “librerías de componentes” que el software ofrece ya programados, la posibilidad de combinar lenguajes de descripción de hardware con programación gráfica, optimizaciones de diseño, etc.

Se opta entonces por usar un modelo de Lattice, en particular el modelo más completo de la serie ICE40 Ultra Plus (ICE40UP5K) con 5280 LUTs, 39 pines de entrada/salida (más que suficiente para implementar varios protocolos seriales), 8 multiplicadores, dos SPI y dos I2C en hardware, entre otros.

Diseño Propuesto

Para el diseño del módulo de medición y preprocesado se eligió usar una etapa de adaptación con un divisor resistivo para la tensión, por su muy bajo costo y tamaño, mientras que para la corriente se optó por un sensor de efecto hall S25P050D15X con su correspondiente resistencia de shunt y un buffer para no cargar la salida del sensor. Se eligió este sensor por ofrecer una relación prestaciones/precio alta en comparación con los otros sensores, además de cumplir con el presupuesto de error (luego de la calibración de las alinealidades y el cero). Se consideró importante el hecho de que ofrece aislación

galvánica y no se necesite cortar el circuito a medir para introducir el sensor (la corriente no circula por el sensor por ser de efecto hall).

Luego sigue una etapa de filtrado, idéntica para tensión y corriente, seguido por los ADCs y cuyas salidas van a la FPGA para su procesamiento.

Módulo de alimentación

La alimentación principal de todo el sistema debe poder proveer las tensiones que se requieran dentro del medidor, la que luego será reducida, adaptada y/o regulada en cada módulo según este lo requiera.

La alimentación se puede implementar mediante muchas topologías o tecnologías. Las alternativas pueden combinar un transformador reductor conectado a la red eléctrica, un rectificador y un regulador (lineal o conmutado), en principio, en cualquier orden con tal de que la entrada sea tensión alterna y la salida tensión continua. Se debe tener en cuenta que la alimentación del medidor debe estar conectada de tal manera que ante el corte de energía forzado (se abre el contactor), el medidor siga funcionando. La conexión de la alimentación también determina si el medidor mide o no su propio consumo.

Dado que el objetivo es construir un medidor de energía y no una fuente, se opta por comprar un módulo de alimentación prefabricado capaz de alimentarse directamente de la red eléctrica, que provea las tensiones necesarias y la potencia suficiente para el correcto funcionamiento del medidor además de cumplir con los requerimientos de la tabla 31. Debe contar con un BMS (Battery Management System) o cargador de baterías adecuado a fin de administrar correctamente la carga de la batería (requerimiento [REQ-09](#)).

Se emplea el convertidor ECL15UT02-P de XP Power por ser el de menor precio (US\$ 39,14) con la potencia de salida más que suficiente para el medidor en conjunto con la batería Ultrafire 26650² de 3.7 V y 6000 mAh (US\$ 4,94³) y su cargador BQ24165 de Texas Instruments. El convertidor brinda 2 A en la salida de 5 V y 200 mA para las salidas de 12 y -12 V, un total de 14,8 W. El cargador permite administrar la corriente de carga de la batería (la cual se carga con 1800 mA máximos) a través de una interfaz simple de 5 pines. La salida del cargador se regula a 3.3 V. Los consumos estimados se muestran en la siguiente tabla.

² <https://www.ultrafire.com/26650-dimensions-a94>

³ https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-689474944-pila-bateria-recargable-ultrafire-26650-37v-7200mah-26650-_JM?quantity=1#position=4&type=item&tracking_id=1f193882-cdf8-4625-9fdd-3fe15974c5ed (3 de mayo de 2020)

	+12 VDC [mA]	-12 VDC [mA]	+5 VDC [mA]
Sensor	66	66	0
PLC	100	0	0
Contactador	120	120	0
CPU	0	0	100
FPGA	0	0	50
Batería	0	0	1800 (max)
Display	0	0	30
SD	0	0	200
Otros	0	0	50

Tabla 31: Consumos estimados de corriente en mA según módulo y fuente de alimentación.

La energía necesaria de la batería viene dada por el requerimiento [REQ-09](#) y el consumo máximo del sistema en condiciones de corte de luz general, cuando el sistema permanece encendido pero en modo de bajo consumo ya que no hay necesidad de hacer mediciones. En bajo consumo se estima una corriente de algunos mA o decenas de mA. Los 14 días del requerimiento se traducen en 336 horas, lo que equivale a una energía de 3360 mAh si se supone un consumo constante de 10 mA. Las baterías con dicha capacidad energética se encuentran fácilmente en el mercado y a un precio muy accesible. Se opta por usar una batería del doble de energía ya que la diferencia en el costo es despreciable y brinda un mayor margen.

Módulo de comunicación

Siguiendo las especificaciones deseadas del producto, se analizaron las alternativas de tecnología para la implementación de un módulo de comunicación PLC.

Powerline Communication

Existen dos clases principales de tecnologías PLC [5]: BB-PLC (*broadband* PLC, o de banda ancha) y NB-PLC (*narrowband* PLC, o de banda angosta). La primera opera en las bandas HF/VHF (1.8-250 MHz) y tiene velocidades de transferencia entre los Mbps y varios cientos de Mbps. Sin embargo, tiene un alcance corto de hasta decenas de metros, por lo cual normalmente se utiliza para redes de internet LAN. Por otro lado, la tecnología PLC de banda angosta opera en las bandas VLF/LF/MF (5-500 kHz aproximadamente), con velocidades de transferencia de pocos kbps (LDR, o *low data rate*) hasta más de 500 kbps (HDR, o *high data rate*).

Dados los requerimientos de tasa de transferencia de datos y alcance (se necesita enviar datos a distancias de cientos de metros), solo se tuvieron en cuenta tecnologías pertenecientes a la clase HDR NB-PLC para el módulo de comunicación. Dentro de esta clase encontramos dos protocolos de comunicación principales utilizados comúnmente en smart grids: G3-PLC y PRIME. Ambos protocolos forman parte del ITU [6] [7], definen la

estructura de sus paquetes de datos hasta la capa tres del modelo ISO-OSI, y son implementados por millones de dispositivos mundialmente.

Las diferencias principales de estos protocolos son el procedimiento de codificación de los datos y el uso del concepto de DPSK: en el dominio de la frecuencia para PRIME y en el dominio del tiempo para G3-PLC. El protocolo de comunicación PRIME muestra un rendimiento levemente peor al de G3-PLC frente al ruido [9] pero provee implementaciones más sencillas y económicas para una red eléctrica inteligente [10].

También suelen encontrarse componentes PLC de protocolos independientes, es decir, componentes que implementan un protocolo de comunicación propio de la empresa fabricante, y estos suelen ser más fácil de utilizar contemplando el tiempo requerido para su aprendizaje e implementación.

Componente	Fabricante	Máxima tasa de bits (Kbps)	Precio (US\$)	Protocolo PLC	Banda PLC	Modulación PLC	Documentación
CY8CPLC10	Cypress	2.4	7,15	Independiente	CENELEC, FCC	FSK	Buena
CY8CPLC20	Cypress	2.4	9,48	Independiente	CENELEC, FCC	FSK	Buena
ST7538Q	STMicroelectronics	4.8	5,28	Independiente	CENELEC	BFSK half-duplex	Buena
ST7540	STMicroelectronics	4.8	4,65	Independiente	CENELEC	BFSK half-duplex	Muy Buena
ST7580	STMicroelectronics	28.8	5,95	Independiente, define hasta capa Data Link	CENELEC A, B, D	B-FSK, B-PSK, Q-PSK, 8-PSK	Excelente
ST7590	STMicroelectronics	128.6	6,65	PRIME PHY, MAC + DLL independiente	CENELEC A	OFDM con BPSK, QDPSK, 8DPSK	Buena
ATPL230A	Atmel / Microchip	128.6	3,87	PRIME	CENELEC A, FCC, ARIB	OFDM	Excelente
ATSAM4CP16B	Atmel / Microchip	128.6	7,73	PRIME	CENELEC A, FCC, ARIB	OFDM	Muy Buena
ATPL250A	Atmel / Microchip	128.6	4,21	G3-PLC	CENELEC A, FCC, ARIB	OFDM	Buena
ATSAM4CP16C	Atmel / Microchip	128.6	7,92	G3-PLC	CENELEC A, FCC, ARIB	OFDM	Muy Buena
MAX2992	Maxim Integrated	300	7,37	G3-PLC	CENELEC A/B/C/D, FCC, ARIB	OFDM	Buena

Tabla 32: Alternativas de tecnología PLC.

La tabla 32 presenta las alternativas contempladas para la modulación y demodulación PLC. Se consideraron distintos *transceivers* y SoC con protocolos de comunicación estándar para su control externo, como UART, USART, SPI o I2C. Los criterios utilizados para la decisión final del módulo a utilizar fueron: la máxima tasa de bits, el precio, el protocolo PLC (compatibilidad, uso en el mercado, sencillez de implementación y escalabilidad), banda PLC (se evaluó la posibilidad de utilizar el producto en distintas regiones, donde se utilizan diferentes bandas de frecuencias), modulación PLC, calidad de documentación, y otras observaciones sobre prestaciones y complejidad del componente.

Se decidió utilizar el circuito integrado ATPL230A de Atmel/Microchip como componente principal del módulo de comunicación. Este transceptor opera a una tasa máxima de 128.6 Kbps (la mayor entre las alternativas evaluadas) y tiene un precio considerablemente bajo (4 US\$). Trabaja con modulación OFDM, la cual otorga un mejor rendimiento frente al ruido en la banda de frecuencia utilizada [8]. Si bien el protocolo de comunicación que utiliza, PRIME, muestra un rendimiento levemente peor al de G3-PLC frente al ruido [9], se optó por las implementaciones más sencillas y económicas que PRIME provee [10]. El módulo puede comunicarse con un microprocesador externo utilizando el protocolo SPI, el cual es implementado por una gran variedad de microprocesadores. La excelente documentación y el soporte eficiente de la empresa fabricante dieron un apoyo invaluable para el diseño y desarrollo de este módulo.

Almacenamiento

Debido a los requerimientos [REQ-08](#) y [REQ-19](#), se estimó que el módulo de almacenamiento interno del medidor debería contar con varios gigabytes de memoria (considerando un dato de 1 KB por segundo durante 14 días se necesitan alrededor de 1.2 GB de espacio). Asimismo, dado el requerimiento [REQ-09](#) y la necesidad de que no haya pérdida de datos, la memoria usada deberá ser no volátil.

Dentro de la gama de memorias no volátiles, se tiene que las memorias escribibles de utilidad son las de tipo EEPROM y Flash, pero estas últimas son las que tienen la mejor relación precio/facilidad de uso y se consiguen en formato SD o microSD con las capacidades más variadas y muy superiores a las necesarias. Incluso existen librerías en C/C++ para implementar sistemas de archivos en ellas para que luego se puedan leer desde cualquier computadora.

Por su parte las EEPROM proporcionan escritura y borrado byte a byte lo que las vuelve lentas a la hora de escribir grandes volúmenes de datos y relativamente grandes en comparación ya que se pueden acceder a todos los bytes por separado.

Debido a la necesidad de una memoria compacta, de fácil uso y que pueda extraerse del medidor para realizar pruebas sobre los datos y diagnósticos al medidor, y debido a la necesidad de lecturas y escrituras rápidas de datos, las memorias flash, en formato SD o microSD, resultan las adecuadas.

Se elige la tecnología SD ya que presenta las siguientes características favorables para el proyecto:

- Memoria de alta densidad y diseño compacto.
- Extraíble y de fácil transporte.
- Uso simple y generalizado, habitual para personas no técnicas.
- Compatibilidad con la mayoría de los dispositivos electrónicos.
- Las tarjetas de distinta capacidad tienen las mismas dimensiones.
- Disponibilidad en el mercado local.
- Existen módulos Arduino-compatible con librerías ya desarrolladas y documentación abundante.

Se opta por usar el modelo SD sobre microSD ya que, si bien son más grandes, el espacio lo permite y admiten el uso de microSD mediante un adaptador. Estas tarjetas funcionan con protocolo SPI, haciéndolas muy versátiles. Por ende, el módulo de almacenamiento consistiría en un simple conector para memorias SD junto con la alimentación requerida.

Unidad central de procesamiento

La unidad central de procesamiento se encarga principalmente de ordenar el tráfico de datos y de comunicarse con los diferentes módulos del medidor orquestando su operación. Por ello, se busca una central de procesamiento que pueda trabajar con varias vías de comunicación con protocolos comunes como SPI e I2C.

La tarea de este módulo es recibir los datos de medición, terminar su procesado, empaquetarlos y despacharlos al módulo de comunicación para ser transmitidos hacia la NAN. A la vez estará encargado de operar en base a las instrucciones que reciba del usuario al usar la interfaz de usuario, y modificar el display y los LEDs acorde a ellas (UI). Por último, se encarga de procesar instrucciones recibidas desde la NAN a través del sistema de comunicación. El formato de los distintos paquetes de datos de comunicación es desarrollado en el apartado [Ingeniería de detalle](#).

Teniendo en cuenta lo mencionado, la característica más importante de la unidad central es contar con cantidad de periféricos de comunicación para poder interactuar con los distintos módulos y no tanto su capacidad de procesamiento por lo que un microcontrolador de 8 bits es suficiente. Lo que si es necesario es poder contar con una velocidad relativamente alta para poder transmitir una gran cantidad de datos con fluidez.

Hoy en día la mejor opción para implementar una unidad central de procesamiento es un microcontrolador ya que permiten una rápida puesta en marcha frente a, por ejemplo, una FPGA. Existen muchas posibilidades a la hora de elegir, y si bien, el mercado argentino es reducido, aún son bastantes las opciones: Microchip con su línea PIC ofrece muchas arquitecturas (tanto de 8, 16 y 32 bits) operando hasta frecuencias de 250 MHz aproximadamente, Atmel con AT y ATmega (ahora adquirido por Microchip) y Motorola con los conocidos MC68HC ofrecen alternativas sencillas de programar (sus arquitecturas son fáciles de entender, en parte debido a la excelente documentación que disponen) y algunos microcontroladores de ST e Intel (siendo estos últimos bastante difíciles de programar).

Debido a la naturaleza modular del proyecto, la unidad central de procesamiento no tiene por qué estar limitada a un único microcontrolador siempre y cuando se garantice el

cumplimiento de las interfaces de comunicación interna (comunicación con los demás módulos del medidor).

Se proponen las siguientes opciones:

- ATmega2560 de Atmel, con la cual ya se tiene experiencia. Es un microcontrolador de 8 bits que tiene gran cantidad de material bibliográfico y librerías para los distintos periféricos y las salidas y la alimentación son de 5 V, pero solo permite frecuencias de clock de hasta 16 MHz, lo cual puede ser algo escaso considerando el volumen de datos a transmitir. Cuenta con once puertos (la mayoría de 8 bits) un SPI, un I2C y un RTC con fuente separada de clock.
- SAM3X también de Atmel, con rasgos favorables como su frecuencia de operación de 80 MHz, su arquitectura de 32 bits, interrupciones en cada pin GPIO, pero la alimentación es de 3,3 V y su documentación es de muy baja calidad, dificultando su programación. En cuanto a periféricos, cuenta con 2 I2C y hasta 6 SPI, junto con un RTC y un SMC (Static Memory Controller) que se puede usar para controlar un display LCD.
- STM32F103C8T6 de ST es un microcontrolador con una frecuencia máxima de operación de hasta 72 MHz y una arquitectura de 32 bits. Cuenta con documentación libre disponible en relación a diversas aplicaciones y su funcionamiento por tener placas de desarrollo Arduino-compatibles. Su mayor ventaja es que cuenta con dos SPI y dos I2C conveniente a la hora de manejar muchos módulos diferentes. Cuenta también con un RTC y multiplicación y división por hardware en un solo ciclo. Tiene la desventaja de tener una alimentación y salidas de 3.3 V aunque tiene pines que son 5 V tolerantes (entrada). Sus librerías son escasas pero crecientes.

	Frecuencia de operación [MHz]	Arquitectura [bits]	Tensión de operación [V]	Documentación disponible	¿Periféricos necesarios?	¿Experiencia previa de uso?
ATmega2560	16	8	5	muy buena	si	si
SAM3X	80	32	3.3	regular	si	no
STM32F103C8T6	72	32	3.3/5	muy buena	si	si

Tabla 33: Alternativas de Microcontroladores.

Por poseer un precio intermedio con la mejor relación prestación/facilidad de programación, disponibilidad en el mercado local y considerando que se tiene experiencia previa en su uso, se decide que la mejor opción entre las analizadas es el microcontrolador de ST. Además la documentación disponible relacionada es suficiente contemplando las aplicaciones para este proyecto.

Interfaz de usuario

Display

Para el display de la interfaz de usuario, se consideraron alternativas de tamaños tales que los datos mostrados puedan ser legibles según el requerimiento [REQ-17](#). Nuevamente, se consideran opciones compatibles con Arduino por su bajo costo y gran cantidad de material bibliográfico además de contar con librerías disponibles para su uso. También se consideró la disponibilidad de los displays en el mercado local.

Dado el carácter alfanumérico de la información que se debe mostrar, no es necesario usar grandes displays ni displays con altas resoluciones y ya que el display se encuentra estático y generalmente en lugares oscuros se necesita que cuente con backlight. Estas dos cosas hace que se descartan los tecnologías como TFT-LCD o E-Paper (también conocido como E-Ink) [19] ya que brindan pantallas de gran resolución y tamaños aptos para gráficos (a un costo mayor) y, en caso de E-Paper, no brindan backlight. La gran ventaja de E-Paper es que sólo requiere alimentación cuando se modifica la imagen mostrada, pero son muchos más costosos (un TFT de 400 x 300 pixels está aproximadamente AR\$800 en el mercado local mientras que un E-Paper de la misma resolución ronda en los AR\$4800).

Por su parte, los displays OLED (organic LED) ofrecen un mayor contraste, menor espesor de display (menor peso y volumen), mayor resolución, menor vida útil y menor consumo [11], salvo la última, todas características que carecen de importancia para el objetivo planteado.

	Resolución	Consumo	Contraste	Vida útil	Respuesta	Costo
LCD	Bajo	Bajo (backlight)	Medio	Larga	Lenta	Bajo
OLED	Medio	Medio - alto (variable según contenido)	Alto	Corta	Muy rápida	Medio - alto
TFT	Alto	Alto	Medio	Media	Rápida	Medio
E-Paper	Alto	Bajo (refresh)	Muy alto	Corta	Media	Alto

Tabla 34: Alternativas de displays.

Por ende, de las tres grandes tecnologías de displays, se opta por usar LCDs, en particular por el modelo JHD1214M1 que cuenta con 2 líneas cada una de 16 caracteres alfanuméricos, opera con tensiones de hasta 7 V, se controla vía protocolo I2C y se consigue muy fácilmente en Argentina. Además cuenta con librerías para su operación.

Botones

Los botones vienen en los formatos y tamaños más variados junto con otras características como estar iluminados y venir especificados para algún grado de protección IP. Los hay también anti-vándalos para aplicaciones que requieran un mayor grado de seguridad. Estas características son importantes ya que los botones se encuentran en el exterior para poder ser accesibles al operario y deben poder tolerar el ambiente que los rodea, pero también

aumentan el costo. Como mínimo deberán cumplir con IP51 (según [REQ-06](#)), que cuente con iluminación propia sería deseable para uso nocturno pero no necesario (además de aumentar el consumo). Los interruptores capacitivos ofrecen una buena alternativa ya que no tienen partes móviles, prolongando drásticamente su vida útil, y pueden estar completamente sellados, lo que los hace ideales para equipos de uso exterior. Su desventaja es que sólo funcionan si tienen contacto con una superficie conductora.

En cuanto a las características eléctricas, no se necesita mucho ya que se usan como interruptores de información con tensiones de hasta 5 V, lo que implica una corriente del orden de los cientos de mA o menos. Por último, el antibouncing (o antirrebote) es otro factor importante a la hora de usar botones y puede hacerse tanto por hardware como por software.

Debido a la cantidad de mediciones a ser mostradas por el display de la interfaz de usuario, se descartó el uso de un botón por pantalla y en cambio se usan dos botones para navegar por ellas, uno para la pantalla anterior y otro para la siguiente.

Los botones serán implementados con pulsadores tipo SPST-NO [\[16\]](#) con grado de protección IP51 o mayor y con construcción anti-vándalo, junto con un antirrebote implementado por hardware ya que es más sencillo de implementar. En la tabla 35 se muestran algunas de las muchas posibilidades y se opta por usar los últimos (MCS - 16 - NO00A12 - Z0NCZ0NCWF - 00000000 - P0000 - S) de la empresa Schurter Inc. ya que no vienen iluminados, son relativamente pequeños (por tener una corriente máxima mucho más reducida que el resto) y su costo se considera adecuado: la terminación y el encapsulado juegan un papel importante en el costo del botón pero se consideran importantes para que el medidor sea duradero.

Modelo	Características	Precio Unitario ⁴	Marca
PV0H240SS-341	48 V - 2 A IP65 Iluminado SPST-NO Anti-vándalo Encapsulado metálico	11.01	E-Switch
PR14EC1000-136/ACC-F03-1	125 V - 16 A IP54 Iluminado DPST-NO Sin Anti-vándalo Encapsulado plástico	2.67	E-Switch
PV5S24016	36 V - 2 A IP65 No iluminado SPST-NO Anti-vándalo Encapsulado plástico	4.54	E-Switch
MCS - 16 - NO00A12 - Z0NCZ0NCWF - 00000000 - P0000 - S	48 V - 125 mA IP67 SPST-NO No iluminado Anti-vándalo Encapsulado metálico	5.35	Schurter Inc.

Tabla 35: Alternativas de botones.

Luces indicadoras

Como luces indicadoras se decide utilizar LEDs. Estos ofrecen un bajo costo, se consiguen fácilmente, tienen un bajo consumo y vienen en colores y formas variados, incluyendo LEDs de montaje superficial que pueden verse desde varios metros de distancia. Se debe tener en cuenta que cumplan con el requerimiento [REQ-17](#). No requieren mayores prestaciones ya que se encuentran a resguardo del medio ambiente dentro de la caja del medidor. Se usan LEDs comunes redondos de 5 mm de diámetro.

Se optó por la utilización de los siguientes LEDs indicadores de funcionamiento del medidor:

- ON: LED de color verde que indica si el medidor se encuentra encendido.
- GRID: LED de color amarillo que indica si el medidor se encuentra conectado/alimentado a/desde la red eléctrica.
- RX/TX: LED rojo que indica transmisión/recepción de datos a través del módulo de comunicaciones.

⁴ Precios obtenidos de DigiKey el día 5 de noviembre de 2019.

8.1.6 DFMEA

Se realizaron tres instancias de un análisis modal de fallos y efectos. Estas instancias se desarrollaron a lo largo del proyecto, comenzando con un enfoque abstracto de las interfaces del sistema y culminando con una mirada más detallada de los componentes que lo componen.

Se tomó un umbral de acción de 35, es decir que cualquier modo de falla que presente un valor RPN mayor a 35 requerirá tomar una acción para reducir su riesgo.

Design FMEA							Resultados de acción						
Componente y función/ Requerimientos	Modo de la falla	Efectos de la falla	Severidad	Causas potenciales/ Mecanismos de falla	Ocurrencia	Controles actuales - Prevención	Controles actuales - Detección	Detección RPN	Acción tomada	Severidad	Ocurrencia	Detección	RPN
Interfaz UI.	El display cambia a una pantalla errónea al presionar los botones.	El usuario no puede leer todos los datos directamente del medidor.	7	Rebotes al presionar los botones.	8	Botones SMD, no anti-rebotes.	El display muestra la falla al cambiar erróneamente de vista.	2 112	Utilización de botones anti-rebotes.	7	2	2	28
Interfaz UI.	No se enciende la luz de falla de comunicación.	El usuario no percibe que el sistema no puede comunicarse con el concentrador.	7	LED defectuoso.	-	5	Un solo LED que se enciende en caso de fallas.	3 105	Prueba de todos los LEDs del sistema.	7	5	1	35
Interfaz VPOINT.	El punto de consumo no recibe energía.	El usuario en el punto de consumo no puede energizar su hogar/área industrial.	4	Cables dañados.	-	2	El punto de consumo actuaría como detector al no recibir energía.	3 24					
Interfaz NAN.	El módulo de comunicación PLC no se comunica con el concentrador después de un corte de luz.	El concentrador no recibe datos de consumo y el medidor no recibe instrucciones.	7	Mala configuración del módulo PLC que no permite la reconexión con el concentrador.	-	4	La detección depende del concentrador conectado a la red NAN para recibir datos.	5 140	Programación del módulo PLC que sea tolerante a fallas y gestione la reconexión a la red PLC en caso de falla.	7	1	5	35
Interfaz VLIN.	El equipo no se enciende.	No se puede utilizar el equipo.	8	Cables dañados.	-	2	Display no se enciende, LEDs no se encienden.	3 48	Prueba de conductividad previa a la instalación del equipo.	8	2	1	16
Interfaz MEC.	Los sujetadores del equipo están rotos.	No se puede instalar el medidor.	8	Transporte inadecuado.	-	5	Se detecta a simple vista.	1 40	Packaging adecuado para el transporte del producto. Concientización del personal de transporte.	8	2	1	16
Interfaz MEC.	Módulos del sistema están sueltos.	Medidor inutilizable.	8	Transporte inadecuado.	-	5	Se detecta al abrir el medidor o al moverlo.	2 80	Packaging adecuado para el transporte del producto. Concientización del personal de transporte.	8	2	2	32
Interfaz AMB.	El usuario recibe un choque eléctrico.	Electrocución del usuario.	10	Falla en las aislaciones del sistema.	-	4	Aislación de los cables.	1 40	Aislación reforzada alrededor de las entradas y salidas del equipo (línea	10	1	1	10

								eléctrica).				
Interfaz AMB.	El usuario recibe un choque eléctrico.	Electrocución del usuario.	1 0	Modificación del equipo por parte del usuario.	5	-	Se detecta a simple vista.	1 50	Caja cerrada que solo puede abrirse mediante una herramienta especial.	1 0	1 1	10
El sistema puede reconocer diferentes tipos de módulos de medición (REQ-04).	Mediciones inexactas.	Mal funcionamiento del sistema, datos erróneos presentados al usuario.	7	Uso de un módulo de medición no compatible.	2	Interfaz de conector polarizado.	Se detecta por datos erróneos en el display, datos erróneos enviados al concentrador.	5 70	Documentación: se especifican los módulos compatibles con el equipo en el manual de usuario.	7	1 5	35
El sistema puede reconocer diferentes tipos de módulos de medición (REQ-04).	Mediciones inexactas.	Mal funcionamiento del sistema, datos erróneos presentados al usuario.	7	Identificación errónea del módulo de medición por parte del módulo central de procesamiento.	2	-	Se detecta por datos erróneos en el display, datos erróneos enviados al concentrador.	6 84	Prueba del módulo de medición para obtener su identificación.	7	2 1	14

Tabla 36: Primer DFMEA, 1 de Julio de 2017.

Design FMEA							Resultados de acción						
Componente y función/ Requerimientos	Modo de la falla	Efectos de la falla	Severidad	Causas potenciales/ Mecanismos de falla	Ocurrencia	Controles actuales - Prevención	Controles actuales - Detección	RPN	Acción Tomada	Severidad	Ocurrencia	Detección	RPN
Módulo de medición.	El sistema no recibe datos del módulo de medición.	El usuario percibe datos erróneos de consumo de energía.	7	Mala adaptación de impedancias en la línea de transmisión de datos.	2	-	Se detecta por datos erróneos en el display, datos erróneos enviados al concentrador.	5 70	Corrección de impedancias de terminación.	7	1	5	35
Módulo de medición.	El sistema no recibe datos del módulo de medición.	El usuario percibe datos erróneos de consumo de energía.	8	Falso contacto en pines de conexión del módulo de medición con la unidad central de procesamiento.	3	-	Se detecta por datos erróneos en el display, datos erróneos enviados al concentrador.	3 48	Uso de pines polarizados o de fácil y buena conexión. Programar un estado de error para mostrar en el display cuando no se reciben datos módulo de medición.	8	1	3	24
Módulo de alimentación.	El equipo se quema.	No se puede utilizar el equipo.	10	Cables de salida de la alimentación invertidos.	6	-	-	2 120	Conectores polarizados para que no puedan conectarse los cables de alimentación de ninguna manera equivocada. Diodos en antiparalelo en la entrada de alimentación de cada módulo para protegerlo.	10	1	2	20
Contactador.	Contactador se abre/cierra cuando no debe.	El punto de consumo recibe/no recibe energía inadecuadamente.	7	Corriente insuficiente proveida por el módulo de alimentación.	3	-	Se detecta a simple vista al tener energía intermitentemente.	2 42	Elección adecuada de la fuente de alimentación.	7	1	2	14
Contactador.	Contactador se abre/cierra cuando no debe.	El punto de consumo recibe/no recibe energía inadecuadamente.	7	Usuario manipula pines del contactador para abrirlo/cerrarlo.	2	-	-	5 70	Protección física para evitar que los usuarios tengan acceso al contactador de manera directa.	7	1	5	35
Almacenamiento.	Datos no son almacenados en el módulo de almacenamiento.	No se han guardado datos de medición de consumo.	3	Memoria llena.	2	-	Solo puede detectarse leyendo la memoria.	6 36	Programación de sistema de archivos que notifique errores de escritura.	3	2	2	12

Almacenamiento.	Datos no son almacenados en el módulo de almacenamiento.	No se han guardado datos de medición de consumo.	3	Memoria defectuosa.	1	-	Solo puede detectarse leyendo la memoria.	6	18					
Interfaz UI.	Los datos mostrados en el display no cambian al presionar botones.	El usuario no puede leer todos los datos directamente del medidor.	5	Rebotes al presionar los botones.	7	-	Se detecta a simple vista al oprimir los botones y ver que la pantalla no se actualiza.	2	70	Uso de botones antirebote conectados a la unidad central de procesamiento.	5	1	2	10
Interfaz NAN.	El módulo de comunicación PLC no se comunica con el concentrador.	El concentrador no recibe datos de consumo y el medidor no recibe instrucciones.	7	Transformador de aislación de banda de frecuencias muy angosta no permite la transmisión efectiva de datos.	3	-	La detectabilidad depende del concentrador, el cual no recibiría datos.	8	168	Cambio de transformador de aislación de banda ancha. LEDs que indiquen la transmisión y recepción de datos en el módulo PLC.	7	1	8	56

Tabla 37: Segundo DFMEA, 3 de Marzo de 2018.

Design FMEA								Resultados de acción					
Componente y función/ Requerimientos	Modo de la falla	Efectos de la falla	Severidad	Causas potenciales/ Mecanismos de falla	Ocurrencia	Controles actuales - Prevención	Controles actuales - Detección	Detección RPN	Acción tomada	Severidad	Ocurrencia	Detección	RPN
Interfaz NAN.	El módulo de comunicación PLC no se comunica con el concentrador.	El concentrador no recibe datos de consumo y el medidor no recibe instrucciones.	7	Transformador de aislación de banda de frecuencias muy angosta no permite la transmisión efectiva de datos.	1	Transf. de aislación de banda ancha.	La detectabilidad depende del concentrador, el cual no recibiría datos.	8 56	LEDs que indiquen la transmisión y recepción de datos en el módulo PLC.	7	1	4	28
Transformador de aislación del módulo de comunicación PLC.	El equipo no envía datos por PLC.	El concentrador no recibe datos de consumo del medidor.	6	Cortocircuito con cable suelto de otro módulo.	3	Aislación del transformador.	-	5 90	Mejorar aislación del transformador. Cables provenientes del exterior aislados.	6	1	5	30
Resistencia del sensor de corriente.	Mediciones de 0 A de corriente.	El usuario percibe datos erróneos de consumo de energía.	7	Sobrecalentamiento del componente.	3	Limitación en alimentación del módulo.	-	4 84	Correcto dimensionamiento del resistor.	7	1	4	28
Filtros anti-alias del módulo de medición.	Datos incorrectos obtenidos por el módulo de medición.	Mala medición de consumo percibida por el usuario.	7	No corresponde la ganancia de los filtros con la tensión y corriente que debe medir el módulo con este ID.	3	Calibración de la medición.	-	2 42	Rediseñar filtros para cada módulo de medición diferente.	7	2	2	28
Instalación y gabinete.	Al medidor le da el sol directamente, o está en un ambiente de temperaturas extremas.	El medidor se sobrecalienta/sobre enfría y falla al salir de las condiciones de operación para las cuales fue diseñado.	8	El medidor fue instalado en exteriores, incorrectamente.	3	-	-	2 48	Gabinete de IP adecuado. Aclaración del modo de instalación (para uso en interiores) en el manual y en el gabinete del producto. Medidor de temperatura.	8	2	2	32

Tabla 38: Tercer DFMEA, 24 de octubre de 2018.

8.2 Factibilidad de tiempos

8.2.1 Planificación (PERT)

Se realizó un análisis primario de las distintas tareas que debían ser completadas para la planificación y evaluación del proyecto. Se estimaron los tiempos de inicio y finalización de las tareas para obtener el tiempo total del desarrollo del proyecto. Este primer análisis estimaba la finalización del proyecto en dos años. Sin embargo, la estimación de tiempos no contempló diversos factores que afectarían considerablemente la realización de la mayoría de las tareas. Por ello, al término del primer año se dio lugar a una nueva programación del proyecto que contemplaría todos los factores ignorados anteriormente.

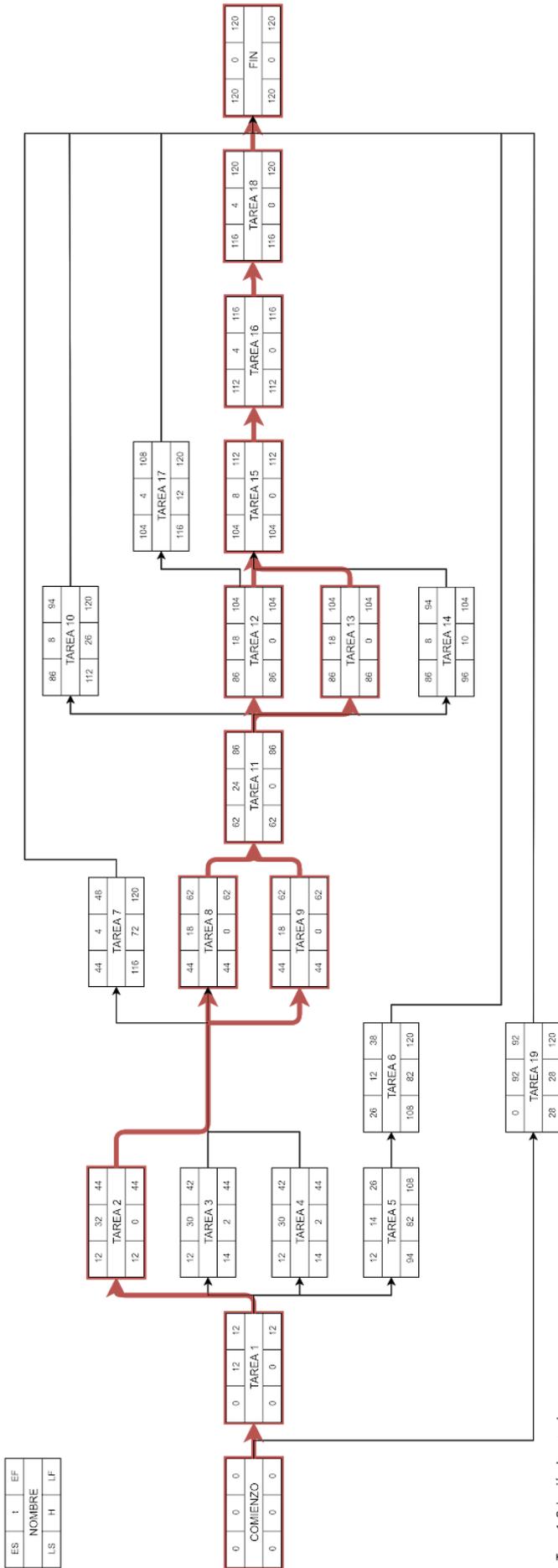
En primer lugar, se tuvo en cuenta que la investigación de los temas a ser tratados en el proyecto, como smart grids y PLC, duraría varias semanas. Los requerimientos del producto cambiarían a medida que el equipo de desarrollo y las partes interesadas aprendieran más sobre estos temas. Consecuentemente, la definición de requerimientos y especificaciones sería también una tarea de larga duración.

El cambio en los requerimientos llevaría a una prolongación del análisis de factibilidad tecnológica, pues nuevas opciones deberían ser evaluadas, y de la definición de arquitectura, pues distintas tecnologías podrían interactuar de forma diferente entre los módulos.

Finalmente se contemplaron los tiempos reducidos del equipo de desarrollo. Al no trabajar únicamente en el proyecto, por otros trabajos de tiempo completo o por materias cursadas en la universidad, cada tarea fue prolongada al menos un par de semanas para una mejor estimación.

El siguiente diagramas de PERT presenta las tareas a realizar para el desarrollo del proyecto. En cada nodo se especifica la duración esperada de la actividad (t), el tiempo de inicio más temprano (ES: *earliest start*), el tiempo de término más temprano (EF: *earliest finish*), el tiempo de inicio más tardío (LS: *latest start*), el tiempo de término más tardío (LF: *latest finish*), y la holgura de la actividad (H). Los tiempos se estimaron en semanas. Se muestran los caminos críticos remarcados en rojo.

Como puede observarse en el nodo final, se estimó que el proyecto de diseño del smart meter llevaría alrededor de 120 semanas en completarse óptimamente.



- Tarea 1: Selección de proyecto
- Tarea 2: Investigación del tema
- Tarea 3: Definición de requerimientos del cliente
- Tarea 4: Definición de especificaciones
- Tarea 5: Factibilidad legal
- Tarea 6: Investigación y análisis de normas técnicas
- Tarea 7: Definición del plan de validación
- Tarea 8: Definición de la arquitectura del producto
- Tarea 9: Factibilidad tecnológica
- Tarea 10: Factibilidad económica
- Tarea 11: Diseño de hardware
- Tarea 12: Diseño de software
- Tarea 13: Construcción de módulos del prototipo
- Tarea 14: Pruebas de integración
- Tarea 15: Ensamblado del prototipo
- Tarea 16: Validación del prototipo
- Tarea 17: Estudios de confiabilidad
- Tarea 18: Análisis de resultados
- Tarea 19: Documentación técnica

8.2.2 Programación (Gantt)

En base al diagrama de PERT de la sección anterior, el siguiente diagrama de Gantt muestra la programación final del proyecto. Se incluye la época actual en la que el proyecto fue desarrollado. También se tuvo en cuenta los periodos de vacaciones de los primeros años. En el último año, las vacaciones se redujeron ya que se previó una mayor disponibilidad para la integración de módulos, construcción del prototipo y validación.

La pandemia del virus COVID-19 demoró significativamente el proceso de validación del prototipo. El tiempo total de planificación y ejecución del proyecto de diseño llevó un total de 5 años.

Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre											
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Tarea 1 - 12 S																																																							
Tarea 2 - 32 S																																																							
Tarea 3 - 30 S																																																							
Tarea 4 - 30 S																																																							
Tarea 5 - 14 S																																																							

Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre																			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Tarea 3 cont. - 30 S																																																															
Tarea 4 cont. - 30 S																																																															
Tarea 6 - 12 S																																																															
Tarea 7 - 4 S																																																															
Tarea 8 - 18 S																																																															
Tarea 9 - 18 S																																																															
Tarea 19 cont.																																																															

Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre																							
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Tarea 10 - 8 S																																																																			
Tarea 11 - 24 S																																																																			
Tarea 12 - 18 S																																																																			
Tarea 13 - 18 S																																																																			
Tarea 19 cont.																																																																			

Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre																							
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Tarea 12 cont. - 18 S																																																																			
Tarea 13 cont. - 18 S																																																																			
Tarea 14 - 8 S																																																																			
Tarea 15 - 6 S																																																																			
Tarea 16 - 4 S																																																																			
Tarea 17 - 4 S																																																																			
Tarea 18 - 4 S																																																																			
Tarea 19 cont.																																																																			

- Tarea 1: Selección de proyecto
- Tarea 2: Investigación del tema
- Tarea 3: Definición de requerimientos del cliente
- Tarea 4: Definición de especificaciones
- Tarea 5: Factibilidad legal
- Tarea 6: Investigación y análisis de normas técnicas
- Tarea 7: Definición del plan de validación
- Tarea 8: Definición de la arquitectura del producto
- Tarea 9: Factibilidad tecnológica
- Tarea 10: Factibilidad económica
- Tarea 11: Diseño de hardware
- Tarea 12: Diseño de software
- Tarea 13: Construcción de módulos del prototipo
- Tarea 14: Pruebas de integración
- Tarea 15: Ensamblado del prototipo
- Tarea 16: Validación del prototipo
- Tarea 17: Estudios de confiabilidad
- Tarea 18: Análisis de resultados
- Tarea 19: Documentación técnica

8.3 Factibilidad económica

Esta sección detalla el análisis de factibilidad económica del proyecto. Se toma en cuenta el mercado, los costos estimados del proyecto, y proyecciones de demanda del producto para estimar el flujo de fondos y así evaluar la realización del proyecto.

8.3.1 Mercado

Se investigó sobre el estado actual del mercado argentino de medición inteligente de energía eléctrica para evaluar la introducción del nuevo producto. Se observó que la mayoría de las empresas distribuidoras de energía se encuentran realizando pruebas piloto o instalaciones de pequeñas cantidades (miles o decenas de miles) de medidores inteligentes [20] [21], lo que muestra un creciente interés en la creación de redes inteligentes.

Debido a que la incorporación de medidores inteligentes en la Argentina es relativamente reciente, todavía no se cuenta con un análisis detallado del beneficio que los mismos han otorgado al país. Sin embargo, se pudo analizar el impacto de los medidores en el mercado europeo, el cual cuenta con una larga trayectoria en el área de energía inteligente.

Un estudio actual llevado a cabo por la compañía Edesur junto con el Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE) realiza una evaluación comparativa de la implantación de los contadores inteligentes en Europa [22]. En el mismo se observa en primera instancia el beneficio energético otorgado por la instalación de medidores inteligentes: un ahorro de energía promedio del 3%. Se observa un costo promedio por punto de medición de US\$ 52 (variando los promedios por país entre US\$ 87 y US\$ 862) y un beneficio total por cliente en promedio de US\$ 348 (variando los promedios por país entre US\$ 21 y US\$ 735). Estos valores han impulsado a empresas distribuidoras a invertir en pruebas de concepto de redes inteligentes alrededor del mundo, y se utilizaron como base para la estimación de costos del producto y su posible ubicación en el mercado.

Sumado a la situación actual del mercado de energía inteligente, se han hecho numerosos estudios [23] que estiman la instalación de más de mil millones de medidores inteligentes en el mundo para el año 2024, llevando el mercado de medidores inteligentes a valer alrededor de US\$12 mil millones. Consecuentemente, este mercado demuestra ser una inversión prometedora para fabricantes de medidores y empresas distribuidoras de energía.

8.3.2 Costos

Supuestos

Para los costos de fabricación y envío de PCBs, se considera un único monto de envío para todas las placas de los diferentes módulos. Entonces el envío se licúa en el precio individual de cada placa. Además cada placa vale menos al comprarse en gran cantidad.

También se consideran los precios de ensamblado para todos los módulos en conjunto, logrando un menor costo individual.

Se consideran los precios por cantidad de los componentes a soldar, ya que el producto se concibe en órdenes de producción por cantidad, reduciendo así el costo de manufacturación.

Se contemplaron dos opciones para el desarrollo del proyecto. Se analizó la factibilidad económica de ambas opciones para determinar el mejor camino:

- La primera opción contempla importar los componentes del producto y tercerizar la fabricación de los PCBs en el exterior. Luego el soldado y ensamblado serían realizados localmente por personal contratado. Esta opción proporciona un mejor control en el armado del producto, mejorando el tiempo de detección y corrección de fallas en la producción. Se requiere una inversión inicial considerable para herramientas, un espacio grande para trabajar y trabajadores capacitados.
- La segunda opción evalúa tercerizar el soldado de todos los componentes y contratar personal calificado únicamente para realizar las pruebas de los módulos (testeos), el ensamble de los módulos para formar del medidor y realizar las pruebas del sistema completo. En esta opción se utilizan menos las herramientas, por lo cual se amortizan en un tiempo mayor. Hay un menor gasto en estaño, que es un material costoso, y hay un menor gasto en la cinta desoldante en comparación con la primera opción.

Se optó por la segunda opción de tercerizar el soldado de todos los componentes ya que se estimó una rentabilidad mayor para la misma. Entonces se estimó que al comenzar el proyecto se contará con pocos trabajadores y espacio limitado. Se fija una jornada laboral de 8 horas al día, y se considera 12 personas para el ensamble de los módulos del producto, 4 para el diseño y validación, y 2 para ventas y temas administrativos. Se calcula un total de 2880 horas laborales por mes.

Funcionalidad	Cantidad
Ensamble	12
Diseño y Testeo	4
Compras/Ventas/Admin.	2
Total Personal	18

Tabla 39: Supuestos de personal.

Tipo de Jornada	Cantidad
Jornada mes (dia/mes)	20
Jornada dia (hs/dia)	8
Total Individual (hs/mes)	160
Total del Personal (hs/mes)	2.880

Tabla 40: Supuestos de jornada laboral.

Con el personal indicado, se estima que podrían ensamblarse 1,5 medidores por hora-empleado. Es decir, podrían ensamblarse 144 medidores en una jornada laboral y

hasta 2.880 medidores en un mes con la cantidad de trabajadores dedicados al ensamble del producto.

1,5	medidor / hora. empleado
144	medidor / día
2.880	medidor / mes

Tabla 41: Máxima capacidad de producción estimada.

Costos iniciales

Se consideró una inversión inicial para la obtención del equipamiento necesario de trabajo manual y administrativo según la cantidad estimada de trabajadores. El costo total inicial se presenta en la siguiente tabla.

Herramienta	Costo Unitario (US\$)	Cantidad	Costo Total (US\$)
Pinza Aislada	9	12	112
Alicata Aislado	9	12	108
Set Destornilladores Aislados	26	12	312
Desoldador/cinta desoldante	82	12	981
Gafas y guantes de seguridad	11	12	136
Multímetro	37	16	586
Estación de soldado	120	12	1.440
Osciloscopio	455	4	1.818
Computación/Sistemas	800	6	4.800
Mesa de trabajo	80	18	1.431
TOTAL IIBM			11.722

Tabla 42: Inversión inicial de bienes muebles.

También se consideró una inversión inicial de servicios legales, particularmente para la formación de una Sociedad por Acciones Simplificada (SAS) y para el registro de marca y patente. Se detalla más información al respecto en la sección [Factibilidad legal y responsabilidad civil](#).

Tipo de Servicio	Costo Total (US\$)
Constitución de SAS	56
Registro de marca	105
TOTAL COSTOS INICIALES LEGALES	161

Tabla 43: Inversión inicial de servicios legales.

Costos de renovación de equipo

Adicionalmente, se evaluó la renovación del equipamiento inicial con el paso del tiempo. Se categorizaron las herramientas según su uso y ciclo de vida en renovaciones trianuales y decenales. Para simplificar la evaluación del proyecto, se prorratan los costos mensualmente según estas categorizaciones, como se muestra en la tabla siguiente.

	Herramienta	Costo (US\$/mes)
Renovación trianual	Pinza Aislada	3
	Alicate Aislado	3
	Set Destornilladores Aislados	9
	Desoldador/cinta desoldante	27
	Gafas y guantes de seguridad	4
	Multímetro	16
Renovación decenal	Estación de soldado	12
	Osciloscopio	15
	Computación/Sistemas	40
	Mesa de trabajo	12
	TOTAL COSTO DE BIENES MUEBLES	141

Tabla 44: Costos de bienes muebles.

Costos de producción

En esta subsección se estiman los costos de fabricación del producto en base al precio de los componentes principales que lo conforman.

Se tomaron los precios unitarios más elevados de cada componente electrónico para obtener el caso más costoso. Así se obtuvieron los precios estimados de cada módulo del producto, incluyendo el precio de manufactura, ensamblaje, soldado y envío.

Se consideró que algunas placas podrían presentar fallas en su ensamblado y soldado, por lo que se requeriría cierta cantidad de estaño para volver a soldar sus partes. Para obtener el peor caso, se estimó un uso máximo de 50 gramos de estaño para realizar todas las soldaduras de un producto defectuoso. Se estimó que hasta un 10% de las placas podría presentar fallas, por lo que se prorratea la cantidad de estaño a 5 gramos por unidad de producto, dando un precio de US\$0,4 que se redondea a US\$1 para obtener el peor caso con números enteros.

La siguiente tabla muestra el costo total de materia prima directa (MPD) para la fabricación de un medidor.

Tipo de Módulo	Costo Unitario (US\$)
Módulo de medición y preprocesamiento	71
Módulo de comunicación default	29
Unidad central de procesamiento	18
Interfaz de usuario	22
Módulo de alimentación	38
Almacenamiento	9
Contactador	25
Estaño	1
Caja del medidor	7
TOTAL COSTO MPD	219

Tabla 45: Costo de materia prima directa (MPD) para la fabricación de un medidor.

El análisis completo del costo de materia prima directa puede verse en el [anexo A](#).

Otros costos que se prorratean a cada unidad de producto fabricado son el transporte y embalaje. Se tomó un precio promedio de flete de US\$340 para transporte dentro de la provincia de Buenos Aires para una capacidad estimada de 33 metros cuadrados y 30 toneladas. Tomando la medida máxima del producto, según la especificación [IMP-DIM-02](#), agregando unos centímetros de grosor para su embalaje, se obtiene un estimado de 0,04 metros cuadrados por producto, con lo cual podría transportarse un promedio de 825 medidores por camión en el flete. Esto se resuelve en un promedio de US\$0,41 por medidor para transporte, redondeado a US\$1 por simplicidad. Por otro lado, se tomó un valor estándar de US\$1 para el embalaje simple de cada medidor.

Tipo de Servicio	Costo Unitario (US\$)
Transporte	1
Embalaje	1
TOTAL COSTO LOGÍSTICA	2

Tabla 46: Costo de logística por producto.

Otros costos

Se estimaron los costos administrativos en base al personal con el que se espera contar al comenzar el proyecto. Se consideró que el lugar de trabajo sería en Capital Federal, Buenos Aires. Para el tamaño, se consideró un mínimo de 3 metros cuadrados por trabajador y un espacio adicional para almacenar el stock a medida que es producido y el stock remanente en caso que la demanda sea menor a la producción. Como se ve en los apartados siguientes, al evaluar la demanda y producción proyectadas, el stock remanente máximo será de alrededor de 13 mil unidades. Considerando un taller de 5 metros de altura promedio, y contemplando que cada medidor ocuparía un máximo de 0,024 m³, se requerirían aproximadamente 65 m² para almacenar estos medidores.

También se estimó el costo para publicidad, utilizando Google AdWords con exposición promedio, y el costo de mantenimiento de una *landing page* donde se presentaría la información de contacto de la empresa para ventas.

Tipo de Servicio	Costo (US\$/mes)
Alquiler (aprox 130m2, expensas y demás)	1.000
Electricidad	80
Gas	20
Varios (papeles, impresiones, elementos de oficina)	50
Telefonía + Internet	60
Publicidad	200
Mantenimiento landing page	13
TOTAL COSTO ADMINISTRATIVO	1.423

Tabla 47: Costo administrativo mensual.

También se estimaron los salarios mensuales de los trabajadores para obtener el costo total de mano de obra directa mensual.

Tipo de Costo	Valor (US\$/mes)
Sueldo Individual Bruto (US\$)	900
Total Sueldo Individual (con aportes)	1.350
TOTAL COSTO MOD	24.300

Tabla 48: Costo de mano de obra directa.

8.3.3 Proyecciones

Demanda proyectada

La venta de medidores eléctricos suele realizarse mediante contratos con empresas distribuidoras de energía. Como se señala en secciones anteriores, es común que la distribuidora primero realice una prueba piloto de instalación de smart meters en puntos de consumo de sus usuarios. Estas pruebas se realizan en una cantidad promedio del 0,12 % de los usuarios de la distribuidora [21] [24].

Si la prueba resulta exitosa, se hacen órdenes de compra de mayores cantidades, para despliegues en lotes cada vez más grandes. Se da un despliegue paulatino, normalmente semestral, de mayores cantidades hasta llegar a la totalidad de los usuarios de la empresa en la zona donde se desea establecer una red eléctrica inteligente. Suele proyectarse un despliegue de 3 millones de medidores al cabo de 3 años [24], pero este plazo puede extenderse un 50 o hasta 100 % por diversos temas logísticos y legales, llevando la instalación de tal cantidad a tomar 4,5 a 6 años en total.

Para la evaluación del proyecto se consideró el mercado de la provincia de Buenos Aires ya que sería el más grande y próximo a la ubicación de trabajo. Según un informe del sector eléctrico [25], esta zona cuenta con un total de alrededor de 7 millones de usuarios residenciales de las distribuidoras y cooperativas más grandes. Se asume que la mayoría de los usuarios de las distribuidoras Edenor y Edesur ya estarán en planes para instalaciones de otros medidores inteligentes [20] [26], por lo que se consideran los 2 millones de usuarios restantes. De estos usuarios, se considera la contratación por parte de la distribuidora EDES S.A., la cual cuenta con 165,000 usuarios, para la instalación de

medidores inteligentes. Esto provee la menor demanda de producto que se puede satisfacer con la capacidad de producción planteada inicialmente.

Se estima que podrá firmarse un contrato para una prueba de concepto del 0,1 % de los usuarios, es decir, 165 usuarios, en el primer semestre. Considerando una prueba exitosa, se estima una renovación semestral de contrato para la instalación de medidores. Se evaluó una renovación de contrato que fijara una demanda exponencial similar a la observada en el mercado, pero se rechazó esta propuesta dado que se requeriría una producción a la máxima capacidad desde el comienzo del proyecto y sería necesario almacenar grandes cantidades de producto. Dado que se almacenan en el área de trabajo, se incrementa el costo de alquiler al tener que considerar un taller más grande.

Por lo tanto, se espera un contrato de prueba piloto de un año de duración, con menores cantidades demandadas, seguido de una demanda de medidores constante cada semestre, obteniendo una demanda acumulada lineal hasta llegar al total de los usuarios en un plazo total de 6 años. El siguiente gráfico enseña la demanda de producto proyectada semestralmente.

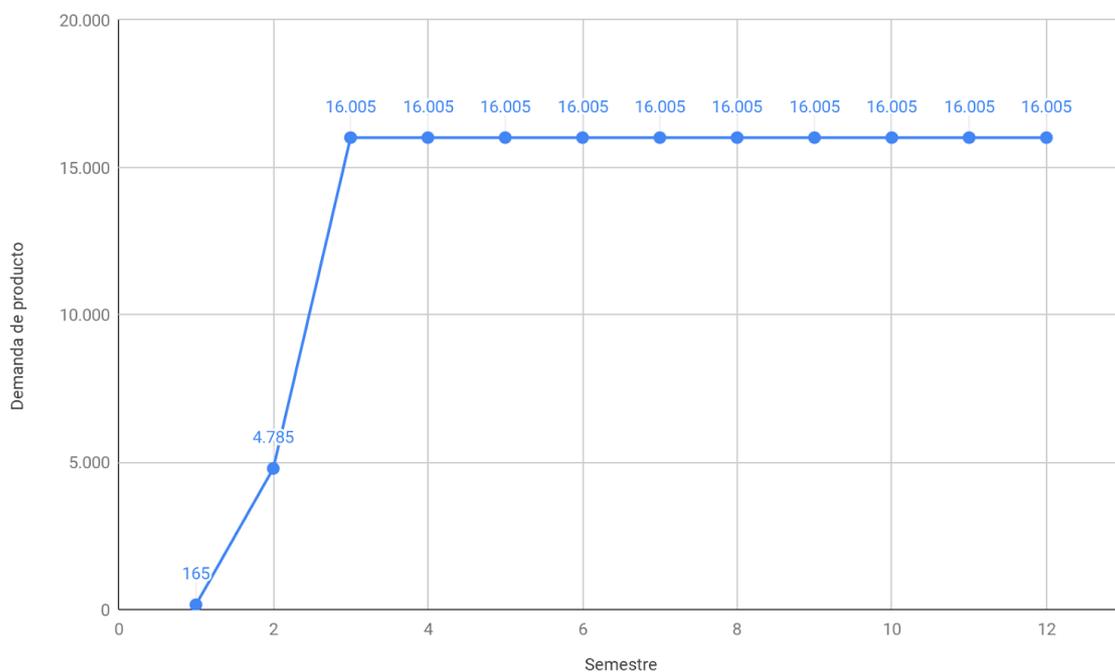


Figura 9: Demanda de producto proyectada semestralmente (EDES).

Producción

Se contempla que al inicio del proyecto hay un periodo de preparación del personal, por lo cual se estima una eficiencia inicial del 25 % durante el primer semestre y del 75 % en los tres semestres posteriores. Estas eficiencias son el resultado de una investigación previa consultando empresas conocidas, las cuales comparan día a día la cantidad de tareas completadas por cada operario. Entonces se discriminan y se comparan las cantidades de tareas completadas por una persona experimentada y por un operario sin preparación

previa durante cuatro semestres seguidos. Se asume que este efecto aplicará a todo operario desde el comienzo del proyecto para el ensamble del medidor por la falta de experiencia relacionada. El resto del tiempo se contempla una eficiencia máxima del 90 % teniendo en cuenta fallas e inconvenientes que podrían demorar la producción.

Se analizó la demanda acumulada y la producción de medidores para satisfacer dicha demanda y a la vez reducir la cantidad de stock a almacenar en el taller de producción. En el último semestre, la producción es reducida para entregar todo el stock almacenado. En el siguiente gráfico se trazan las curvas de demanda acumulada y producción acumulada:

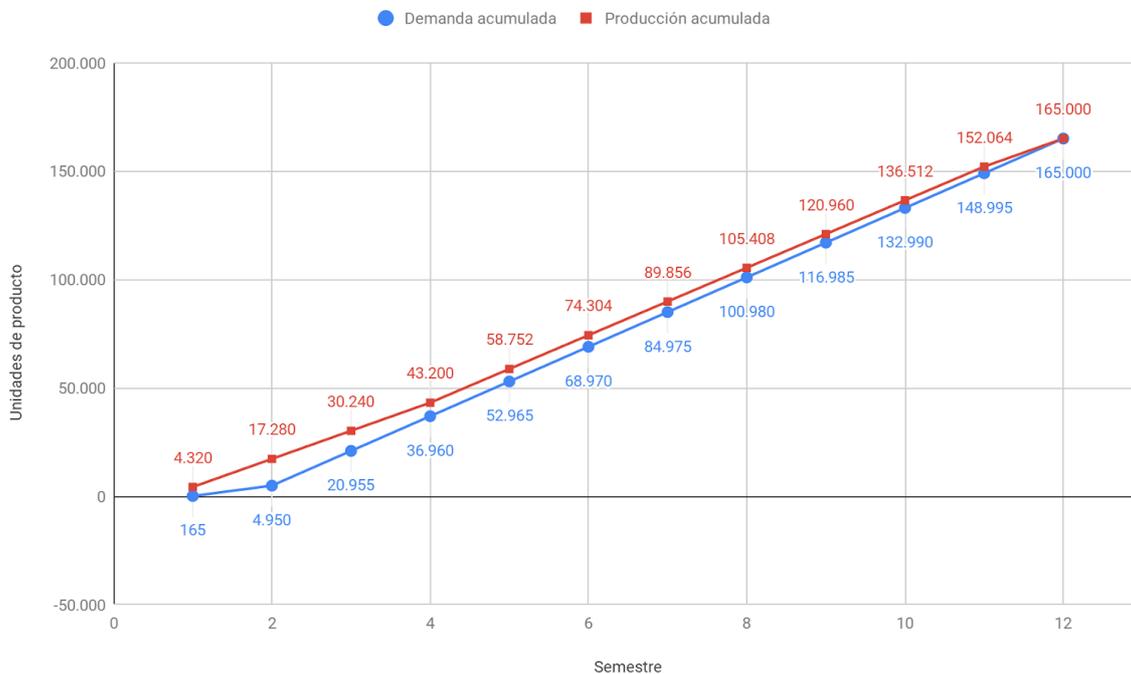


Figura 10: Demanda acumulada y producción acumulada semestralmente.

Precio de venta

En base a los estudios de mercado realizados, se estimó un margen de ganancia del 55 %. Considerando también el impuesto al valor agregado (IVA) del 21 % y el costo de materia prima directa, se propone un precio de venta unitario de US\$411.

Flujo de fondos

La siguiente tabla presenta el flujo de fondos del proyecto, desde la inversión inicial de bienes muebles hasta la producción y entrega total de los medidores al cabo de 12 semestres. Se toma una alícuota de 35 % para el impuesto a las ganancias y una alícuota de 5 % para el impuesto a ingresos brutos, según el código fiscal de la provincia de Buenos Aires para el periodo 2020 [27] considerando que la empresa a cargo del proyecto corresponda al código de actividad 279000 (fabricación de equipos eléctricos). Todos los valores se encuentran en dólares estadounidenses (US\$).

Semestre	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ingresos por ventas	0	67.872	1.968.291	6.583.593	6.583.593	6.583.593	6.583.593	6.583.593	6.583.593	6.583.593	6.583.593	6.583.593	6.583.593
Costo MPD	0	947.489	2.842.466	2.842.466	2.842.466	3.410.959	3.410.959	3.410.959	3.410.959	3.410.959	3.410.959	3.410.959	2.837.202
Costo logística	0	330	9.570	32.010	32.010	32.010	32.010	32.010	32.010	32.010	32.010	32.010	32.010
Costos administrativos	0	8.538	8.538	8.538	8.538	8.538	8.538	8.538	8.538	8.538	8.538	8.538	8.538
Costos de bienes muebles y servicios legales	11.883	847	847	847	847	847	847	847	847	847	847	847	847
Costo MOD	0	145.800	145.800	145.800	145.800	145.800	145.800	145.800	145.800	145.800	145.800	145.800	145.800
EBITDA	-11.883	-1.035.131	-1.038.930	3.553.933	3.553.933	2.985.440	2.985.440	2.985.440	2.985.440	2.985.440	2.985.440	2.985.440	3.559.197
IVA	0	14.253	413.341	1.382.555	1.382.555	1.382.555	1.382.555	1.382.555	1.382.555	1.382.555	1.382.555	1.382.555	1.382.555
Impuesto ganancias	0	0	0	1.243.876	1.243.876	1.044.904	1.044.904	1.044.904	1.044.904	1.044.904	1.044.904	1.044.904	1.245.719
Impuesto a ingresos brutos	0	3.394	98.415	329.180	329.180	329.180	329.180	329.180	329.180	329.180	329.180	329.180	329.180
Resultado neto	-11.883	-1.052.778	-1.550.685	598.322	598.322	228.802	228.802	228.802	228.802	228.802	228.802	228.802	601.744

Tabla 49: Flujo de fondos semestral.

Puede apreciarse que en los primeros semestres se cuenta con grandes flujos negativos. Por lo tanto, si el proyecto se llevase a cabo por una empresa recientemente constituida y no se contara con ahorros previos, sería necesaria cierta financiación que cubra los costos iniciales. Por ello se analizan las alternativas de financiamiento disponibles para empresas pequeñas constituidas recientemente en Argentina.

Financiamiento

Para afrontar los flujos negativos de los primeros semestres, se analiza la obtención de financiamiento proveniente de diferentes fuentes en una etapa previa al comienzo del proyecto. Se busca otorgar *equity* de la empresa a ser formada para llevar a cabo este proyecto a cambio de financiación que permita su comienzo. Se contemplan las siguientes fuentes:

- Competencias y premios de emprendedorismo: estos eventos dan visibilidad y acercan a posibles inversores, socios, alianzas y clientes. Ejemplos: Seedstars World, Get In The Ring, NAVES, MAYMA, POTENCIATE.
- Programa de apoyo a la competitividad (PAC): programa de financiación del gobierno argentino para obtener un aporte no reintegrable (ANR) de alrededor de US\$ 14 mil.
- Aceleradoras y *corporate venture capital*: participando en aceleradoras de startups, se accede a un ecosistema emprendedor que aumenta las probabilidades de conseguir financiamiento semilla por parte de diversos inversores a cambio de *equity* de la empresa a ser formada para la realización de este proyecto. El financiamiento otorgado puede variar hasta cerca de US\$ 2 millones. Ejemplos: NXTP Labs, Embarca, Globant Ventures, Incutex, Wayra, entre otras.

- Fondo aceleración: en caso de conseguir financiamiento por parte de una aceleradora, se pueden conseguir más fondos con este programa del gobierno argentino: hasta US\$ 50 mil.

VAN

En base al flujo de fondos expuesto anteriormente, se calculó el valor actual neto para obtener un valor que sugiere la viabilidad económica del proyecto. Se tomó una tasa anual de descuento del 1,5 %, o 0,75 % semestral.

VAN = US\$ 640.399

Dado un valor positivo, se concluye que el proyecto generará beneficios.

TIR

Se calculó la tasa interna de retorno utilizando los valores del mismo flujo de fondos, dando el siguiente resultado.

TIR = 5 %

Dada una tasa mayor a la que puede conseguirse en inversiones comunes de plazo fijo en dólares estadounidenses, se confirma la viabilidad del proyecto.

8.4 Factibilidad legal y responsabilidad civil

En esta sección se analiza la viabilidad legal del proyecto. Por un lado, se tienen en cuenta las licencias y patentes de los elementos a utilizar durante la construcción del prototipo, evaluados en la sección [Ingeniería de detalle](#). Por otro lado, las validaciones y certificaciones que debe cumplir el producto terminado, definidos por las especificaciones y requerimientos. En particular el proyecto busca cumplir con las normas IRAM 2444, 2420 y 62742. Como el producto manipula corriente y a la vez está conectado a la red de distribución eléctrica, debe satisfacer la norma de seguridad más restrictiva de entre las que se indican en las normas IRAM. Además debe tenerse en cuenta en qué condiciones será utilizado, sin representar un riesgo para el usuario u otra persona cercana. Es necesario entonces evaluar el grado de protección proporcionado por las envolturas de equipos eléctricos, y de las cajas de material aislante para medidores de energía eléctrica.

Respecto al hardware, se analiza que para los productos comprados a terceros no exista ningún tipo de impedimento legal o Copyright para su uso. Respecto al software se emplean programas y aplicaciones de uso libre y gratuito. Algunos ejemplos son: como desarrollador de esquemáticos circuitales y PCBs se usa KiCad [\[15\]](#), para programación se usan los entornos Arduino, Microsoft Visual Studio, Lattice Radiant y el editor de texto Sublime Text.

Respecto a la creación de una persona jurídica para el emprendimiento se analizan condiciones, requerimientos, costos y limitaciones. Debido a la sencillez y ventajas que presenta, se opta por crear una Sociedad por Acciones Simplificada (SAS). Algunas de sus principales ventajas que presenta frente a otro tipo de sociedades son:

- **Sencillez y Rapidez:** La inscripción puede realizarse hasta en 24 horas.
- **Costo de Creación:** Al día de la fecha es de AR \$4430. Se contempla en la factibilidad económica del proyecto.
- **Capital inicial:** El equivalente a dos salarios mínimos, vitales y móviles; a diferencia de la sociedad anónima (SA) donde se exige la suscripción mínima de AR \$100.000. Está autorizada la integración de un aumento de capital inferior al 50% del mismo sin necesidad de publicar edictos ni registración. Se faculta a realizar aportes irrevocables por 24 meses.
- **Control:** En cuanto a la documentación, libros y contabilidad de las SAS, la sociedad no presentará sus estados contables ante la IGJ y la AFIP determinará el contenido y forma de presentación de los estados contables a través de aplicativos o sistemas informáticos o electrónicos. Las SAS deberán llevar registros digitales obligatorios: Libro de Actas; Libro de Registro de Acciones; Libro Diario y Libro de Inventario y Balances.
- **Socios:** A diferencia de las SRL o las SA, que requieren por lo menos dos socios para constituirse, las SAS pueden ser unipersonales, es decir, estar en manos de un único emprendedor con la designación de un suplente, salvo que se haya propuesto un síndico. Su duración puede ser indeterminada y la fijará el estatuto social. Tampoco tienen un número máximo de integrantes, como sí ocurre en las SRL, donde se aceptan hasta 50 asociados.
- **Acciones:** Pueden constituirse por instrumento público o privado y su capital puede dividirse en acciones de distintas clases (ordinarias, preferidas o escriturales), lo que

no ocurre en las SRL. Los accionistas de una SAS limitan su responsabilidad a la integración de las acciones que suscriban o adquieran, posibilitando una separación del capital personal.

- **Facturación:** La AFIP le otorga factura tipo A automáticamente, al momento de la constitución, no ocurriendo lo mismo con otro tipo de sociedades.
- **Objeto social:** El objeto social podrá ser plural y deberá enunciar en forma clara y precisa las actividades principales que constituyen el mismo. Esto permite flexibilidad en la categoría de las actividades económicas para elegir la menor carga impositiva de ingresos brutos relacionada.
- **Importación/exportación:** Responde a las mismas reglas que cualquier tipo societario.

RUBROS	S.A.S.	S.R.L.	S.A.	
Estatuto o Contrato Constitutivo	Estatuto modelo	Sí, diseñado por IGJ.	No hay modelo	
	Naturaleza Jurídica	Contrato adhesión y de consumo del estatuto modelo	Contrato consensual	
	Estatuto adecuado al emprendimiento empresarial	Plena autonomía de la voluntad para redactar cláusulas	Debe adecuarse a los requisitos del tipo regulado en la LGS, de lo contrario queda encuadrado en la Sección IV (LGS)	
	Plazo inscripción	24 horas		
	Forma de constitución	- Instrumento público - Instrumento privado con firma certificada digitalmente. - InsEstatuto modelo con firma certificada digitalmente.	- Instrumento público - Instrumento privado con firma certificada.	- Instrumento público
Accionistas y socios	Cantidad	Una o varias personas.	2 a 50 personas.	Al menos 2 personas.
	Responsabilidad	- Por la integración de las acciones o cuotas que suscriban o adquieran, respectivamente. - Por la integración de aportes del resto de socios, en forma solidaria e ilimitada.		Limitada a la integración de las acciones que suscriban o adquieran.
	Capital social	Dividido en acciones, no podrá ser inferior a 2 salarios mínimos (ahora \$21.400).	2 a 50 personas.	Al menos 2 personas.

Tabla 50: Comparación entre sociedades comerciales.

Se busca firmar un contrato de compraventa de duración de al menos 6 años con el cliente EDESA contemplando la capacidad de producción inicial y posterior del proyecto, definiendo las fechas de pago, responsabilidad por daños, reparaciones y reposiciones. Se intenta incluir cláusulas que indiquen que la moneda de operación sea US\$ (tipo de cambio oficial

del Banco Nación Argentino) para evitar ajustes de precios por inflación y facilitar su uso para el pago de las importaciones.

Finalmente se aclara que se va a registrar a nivel local la marca y el logo creados para este proyecto, así como también la patente del desarrollo del medidor. Todos los trámites involucran al Instituto Nacional de Propiedad Intelectual (INPI) y los costos asociados serán tenidos en cuenta en la factibilidad económica. Los aranceles vigentes al día de redactar este informe se pueden ver en el Anexo D.

9 Ingeniería de detalle

9.1 Hardware

9.1.1 Diagrama de bloques

La figura 11 enseña un diagrama detallado de los bloques que conforman el hardware del producto, conteniendo las alternativas de tecnología seleccionadas para los mismos. También se muestra la conexión entre módulos y los protocolos de comunicación implementados.

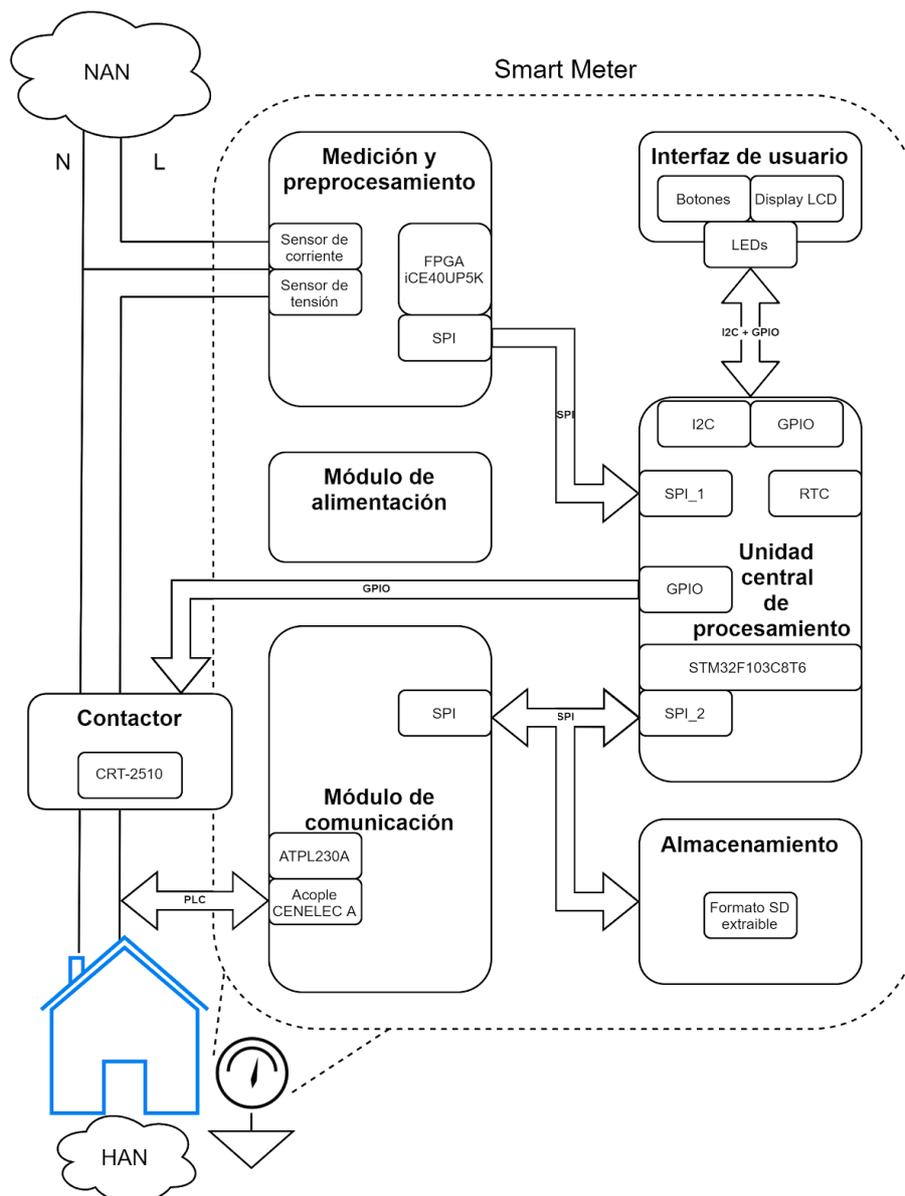


Figura 11: Diagrama de bloques del hardware del producto.

9.1.2 Descripción detallada de cada bloque

Contactor

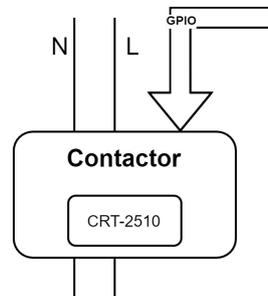


Figura 12: Detalles del contactor.

El módulo del contactor consiste, redundantemente, en el contactor y su circuito de control o driver. El contactor empleado es el CRT-2510 de SICA con bobina de 24 VDC. Este contactor actúa como interruptor conectando y desconectando cada una de las fases y el neutro del suministro de energía con el punto de consumo (área residencial o industrial).

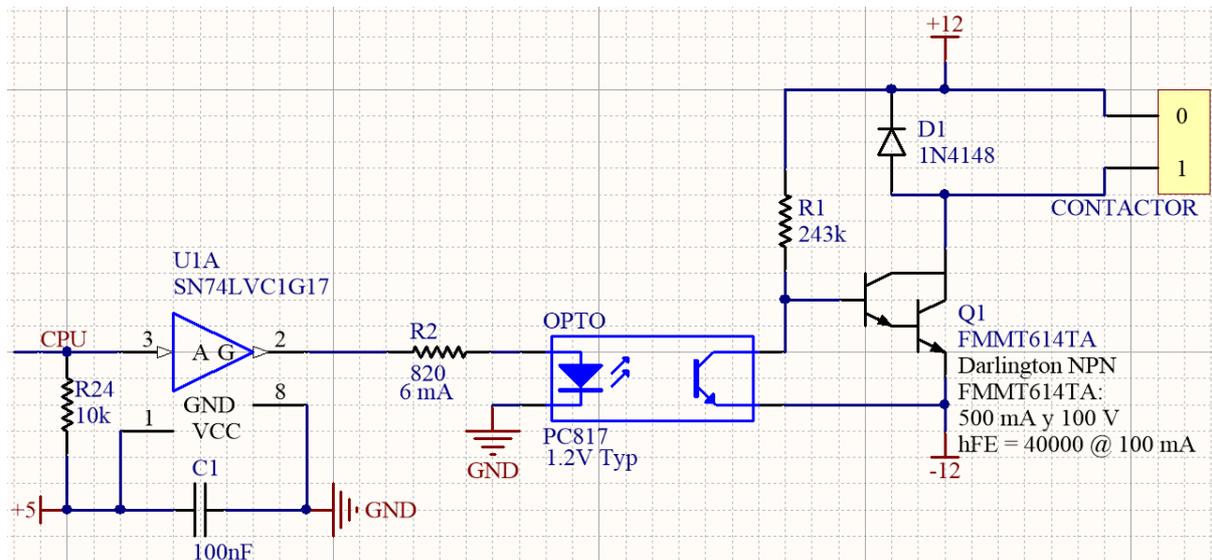


Figura 13: Diagrama esquemático del driver para el contactor.

El driver consiste en una primera etapa de buffer implementado por un buffer schmitt trigger no inversor SN74LVC1G17 capaz de entregar hasta 32 mA y que acepta entradas de 3.3 V y 5 V permitiendo independizarse de la tensión de salida de la CPU y del hecho de que no todos los microcontroladores pueden proveer la corriente necesaria para hacer funcionar el optoacoplador. El resistor de pull-up en la entrada (R24) es para garantizar que durante el encendido el contactor permanezca abierto (desconectado). Seguido, se encuentra la etapa de aislación, conformada por un optoacoplador PC817 y necesaria ya que el contactor opera con 24 VDC y la alimentación es de +12/-12 V. Por último, la etapa de potencia, que provee la tensión y corriente necesaria para el funcionamiento del contactor. Esta está implementada con un transistor Darlington NPN (FM614TA) capaz de entregar hasta 500 mA. La resistencia R1 provee la corriente de base y garantiza la operación en saturación del

transistor dada su ganancia. Se incorpora un diodo en antiparalelo para descargar la bobina del contactor cuando este se abre. En la figura 13 se muestra el esquemático correspondiente.

Medición y preprocesamiento

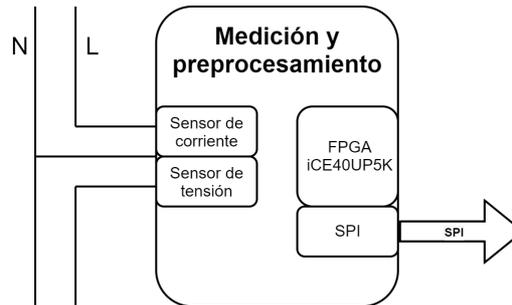


Figura 14: Detalles de medición y preprocesamiento.

Siguiendo el esquema estándar de medición, el circuito empleado consiste en varias etapas cada una con un propósito específico: adaptación, filtrado, digitalización y aislación. Los datos de salida luego van a la FPGA para su preprocesado como se muestra en la figura 15.

En el circuito propuesto se emplearon los ADCs ADC121S101 de 12 bits con salida SPI de Texas Instruments junto con algunos amplificadores operacionales y componentes elegidos y descriptos anteriormente.

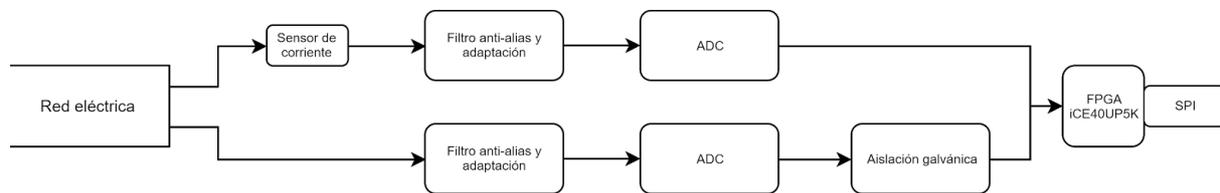


Figura 15: Esquema de hardware de medición y preprocesamiento.

En la primera etapa se adaptan y filtran las señales de interés empleando dos circuitos independientes de sensado, uno para la tensión y otro para la corriente (figuras 17 y 20). Ambos consisten en una celda Sallen-Key pasabajos de segundo orden en configuración sumador, de manera tal de poder agregar el offset necesario para pasar de las señales bipolares de entrada a las unipolares que manejan los ADC, además de agregar las ganancias necesarias para adaptar los valores máximos. El circuito de medición de tensión agrega un resistor adicional para poder ajustar la ganancia y el offset de manera independiente mientras que el circuito de corriente no requiere este resistor por tener la resistencia de shunt que determina la ganancia, necesaria para convertir la corriente de salida del sensor a una tensión. Se agrega una etapa de buffer después de la resistencia de shunt y antes del filtro para que este último no cargue al sensor.

Alimentación

El circuito de medición de tensión es alimentado por un convertidor DC/DC NKE1209 que luego es regulado a 5 V y a la vez ofrece aislación galvánica. La aislación es necesaria ya

que el circuito de medición de tensión se conecta directamente a la red eléctrica y evita que se formen lazos de corriente, los cuales pueden generar interferencias, sobre todo si son de mucha corriente. Cabe destacar que para el caso del módulo de medición n-fásico, dicha aislación hace posible medir la tensión entre fases.

El circuito de medición de corriente se alimenta con 3.3 V. No requiere aislación ya que el sensor de corriente intrínsecamente la provee al no estar conectado eléctricamente a la red.

Medición de Tensión

Si bien el circuito de medición de tensión tendría que estar alimentado con 3.3 V, se aumenta su alimentación a 5 V para disminuir la incerteza relativa que representa el ruido electromagnético. Esto es posible gracias a que el circuito de medición de tensión está aislado a través de la alimentación y requiere el uso de un aislador digital (ISO7631), el cual permite tener una entrada de 5 V y una salida de 3.3 V.

En la figura 16 se muestra el esquemático del filtro adaptador para la medición de tensión donde R_{av} y R_{1v} constituyen la parte sumadora del circuito y R_{bv} es el resistor agregado para proveer una variable más e independizar la ganancia de la etapa de su offset.

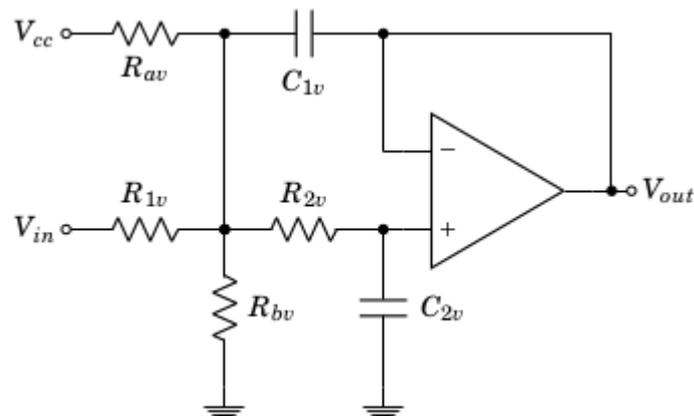


Figura 16: Diagrama esquemático de la celda Sallen-Key empleada para medir tensión.

Para determinar el valor de los componentes de los filtros, ha de tenerse en cuenta las dos ganancias (de señal y de offset) y la frecuencia de corte necesaria (f_c). Para el circuito medidor de tensión que se muestra en la figura 16, que se alimenta de 5 VDC (V_{cc}), el offset agregado debe ser de 2.5 VDC (V_{medio}) mientras que la entrada máxima debe reducirse a los 2.5 VAC (V_{pout}) para emplear todo el rango de 0 a 5 V de la entrada del ADC. Considerando que la tensión RMS de fase en Argentina es de 220 V +10%/-20%, se tiene que la tensión pico máxima de entrada será de 342 VAC, aproximadamente. Tomando un margen para corregir posibles desvíos (tanto internos como externos al medidor), se elige el valor máximo de entrada de 350 VAC (V_{pin}). Con estos valores y en base a los cálculos realizados en el Anexo B se obtiene que $A = 1$, $B = 139$, $a = 69/70$ y $b = 69$. Esto sugiere usar un valor de R_{bv} múltiplo de 7 para facilitar la síntesis del resto de las resistencias. Se elige de 7 k Ω , quedando $R_{av} = 6.9$ k Ω y $R_{1v} = 483$ k Ω , todas fácilmente

sintetizables con resistores de 6.8 k Ω y 0.2 k Ω , 6.8 k Ω y 0.1 k Ω , y 470 k Ω y 13 k Ω , respectivamente.

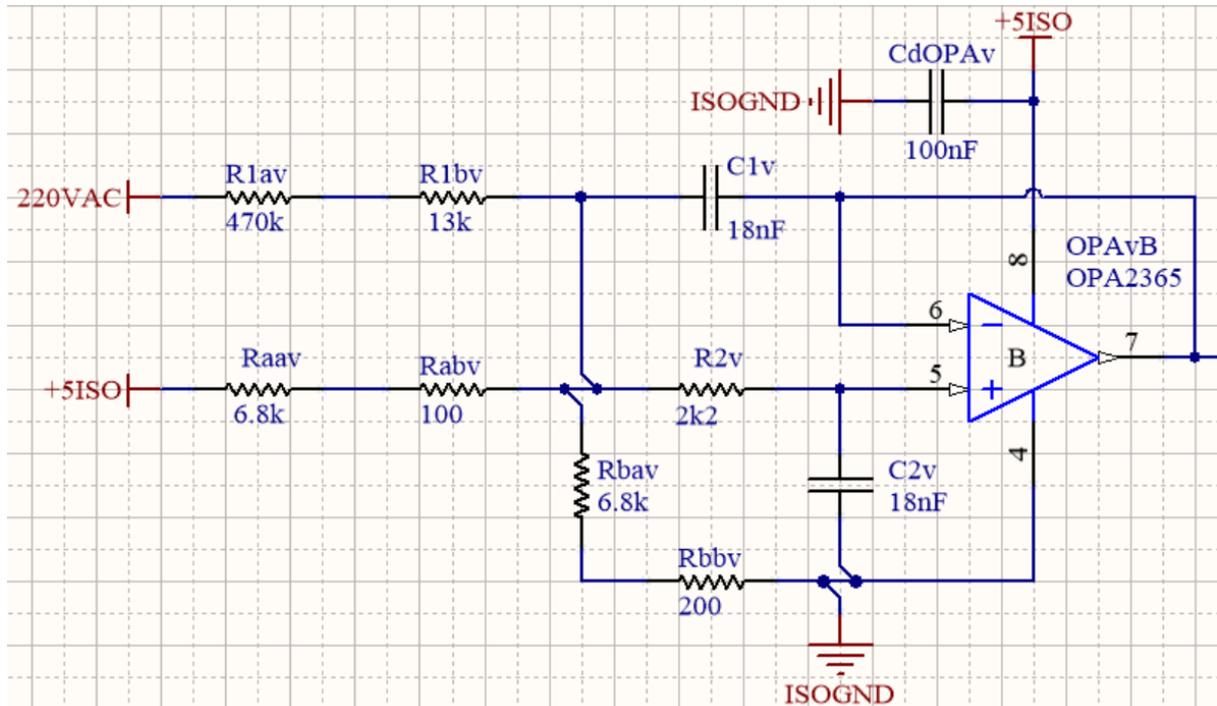


Figura 17: Diagrama esquemático del medidor de tensión - parte 1.

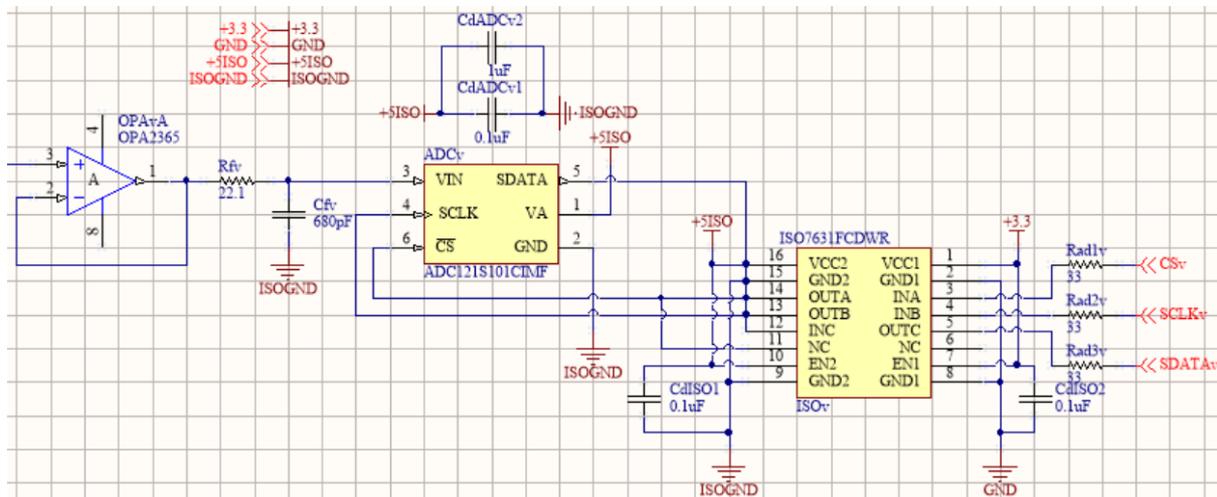


Figura 18: Diagrama esquemático del medidor de tensión - parte 2.

Los valores de los componentes para determinar la frecuencia de corte son relativamente arbitrarios. Si se tiene en cuenta que esta última debe ser cercana a 2500 Hz para dejar pasar los primeros 50 armónicos y poder calcular el THD con ellos, que los componentes elegidos deben asegurar que la frecuencia de corte se mantenga por encima de la mencionada y que el factor de amortiguamiento sea superior a 0.707 (sin sobrepico) para cualquier valor posible de los componentes teniendo en cuenta su tolerancia y que se busca usar un mismo valor de componente repetidas veces (en el circuito de tensión y en el de

corriente), se opta por $R_{2v} = 2.2 \text{ k}\Omega$, $C_{1v} = 18 \text{ nF}$ y $C_{2v} = 18 \text{ nF}$. Esto determina una frecuencia de corte de 3209 Hz y un factor de amortiguamiento de 1,02.

Para ver el análisis matemático completo de la celda Sallen-Key empleada para la medición de tensión, referirse al Anexo B. En las figuras 17 y 18 se muestran los esquemáticos finales implementados.

Luego del filtro viene un buffer y un RC. El RC, conformado por un resistor de 22.1 Ω y un capacitor de 680 pF, está para limitar la corriente y proveer un camino de baja impedancia para la carga del capacitor de hold interno al ADC, cuya capacidad ronda los 30 pF. El buffer separa el filtro del ADC además de permitir un ruteado más sencillo del circuito impreso.

Por último, está el aislador digital ISO7631 que permite transmitir los datos del ADC a la FPGA manteniendo la aislación galvánica provista por la alimentación. Además hace las veces de level shifter, ya que requiere dos fuentes de alimentación a fin de mantener la aislación, por lo que su salida de es 3.3 V, igual a la alimentación de la FPGA.

Medición de Corriente

El circuito de medición de corriente empieza con un resistor de sensado (R_s , dividida en R_{sa} y R_{sb} , ver figura 20) que determina parte de la ganancia del mismo. Luego sigue un buffer que necesariamente debe estar alimentado con una fuente partida ya que la tensión sobre el resistor de sensado es bipolar y permite que el filtro no cargue al sensor. Seguido viene la celda Sallen-Key configurada como sumador que agrega su propia ganancia y un offset (figura 19). Finalmente se incorpora un buffer y un RC igual que en el circuito de medición de tensión. En las figuras 20, 21 y 22 se muestran los esquemáticos de las distintas partes que componen este circuito.

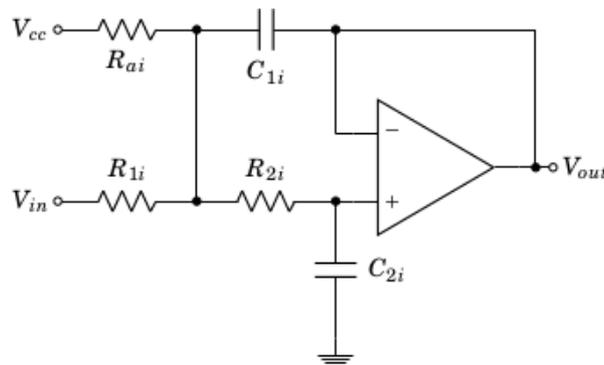


Figura 19: Diagrama esquemático de la celda Sallen-Key empleada para medir tensión.

Dado que la alimentación del circuito medidor de corriente es de 3.3 V, el offset necesario es de 1.65 V (V_{offset}). Esto se logra eligiendo R_{ai} y R_{1i} iguales y arbitrariamente de 10 k Ω . Esto implica, además, que el filtro tendrá una ganancia de 0.5, por lo que el resistor de sensado deberá compensar esto. Puesto que el sensor es de 50 A y reduce por 1000, tendrá una salida de 50 mA, que, en base a lo anterior, deberá generar una tensión de 3.3 V sobre el resistor de sensado. Esto determina que la resistencia requerida es de 66 Ω . Este

valor no existe comercialmente pero se puede sintetizar a partir de dos resistores de 33 Ω en serie.

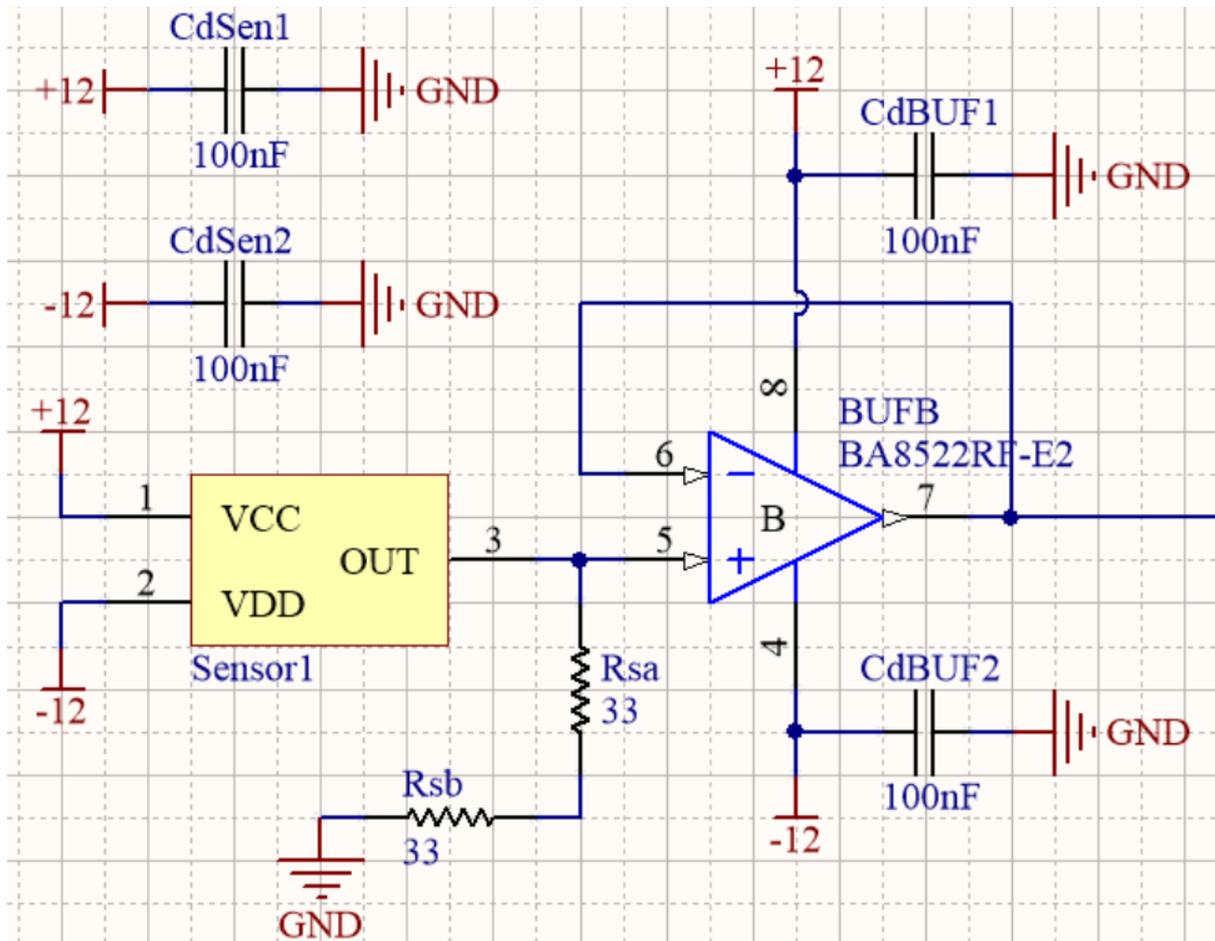


Figura 20: Diagrama esquemático del medidor de corriente - parte 1.

Para la determinación de las características espectrales de la celda, se emplean los cálculos del Anexo C junto al hecho de querer reutilizar valores de componentes. Por ello se eligen $R_{2i} = 15 \text{ k}\Omega$, $C_{1i} = 82 \text{ nF}$ y $C_{2i} = 18 \text{ nF}$ para lograr una frecuencia de corte de 3005 Hz con un factor de amortiguamiento de 1.08.

La parte de preprocesado se lleva a cabo una vez digitalizadas las muestras, las cuales llegan a la FPGA vía dos canales SPI, uno para cada ADC. Dentro de la FPGA los datos pasan a través de un filtro boxcar de 16 muestras lo que agrega 4 bits efectivos a los 12 provenientes de los ADC, luego se quita el offset agregado por los circuitos de sensado y calcula, por periodo, los valores máximo, mínimo y RMS para la tensión y la corriente, el periodo en número de muestras, y la potencia media. También se almacenan alguna de las muestras para el posterior envío y cálculo THD en el servidor.

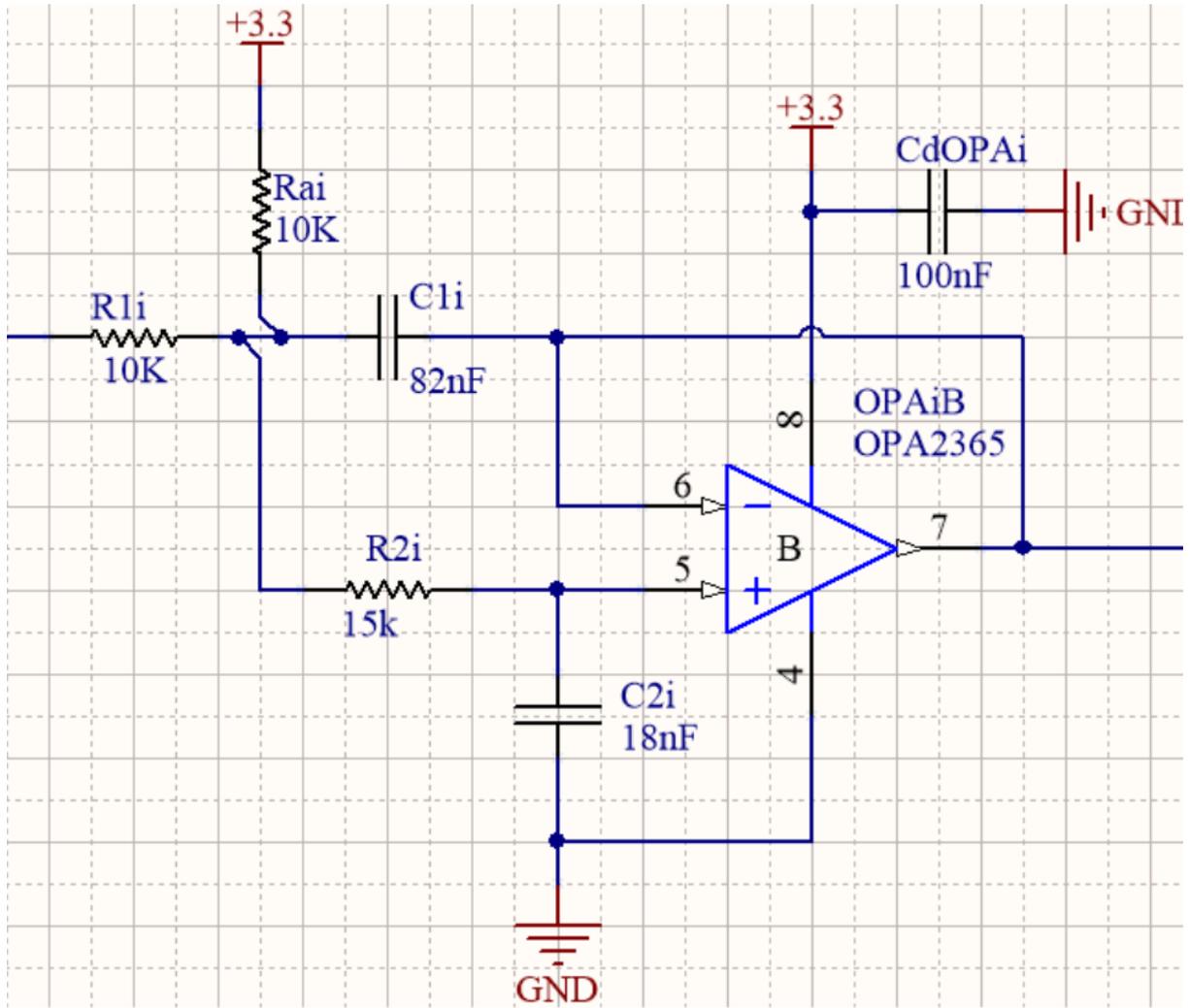


Figura 21: Diagrama esquemático del medidor de corriente - parte 2.

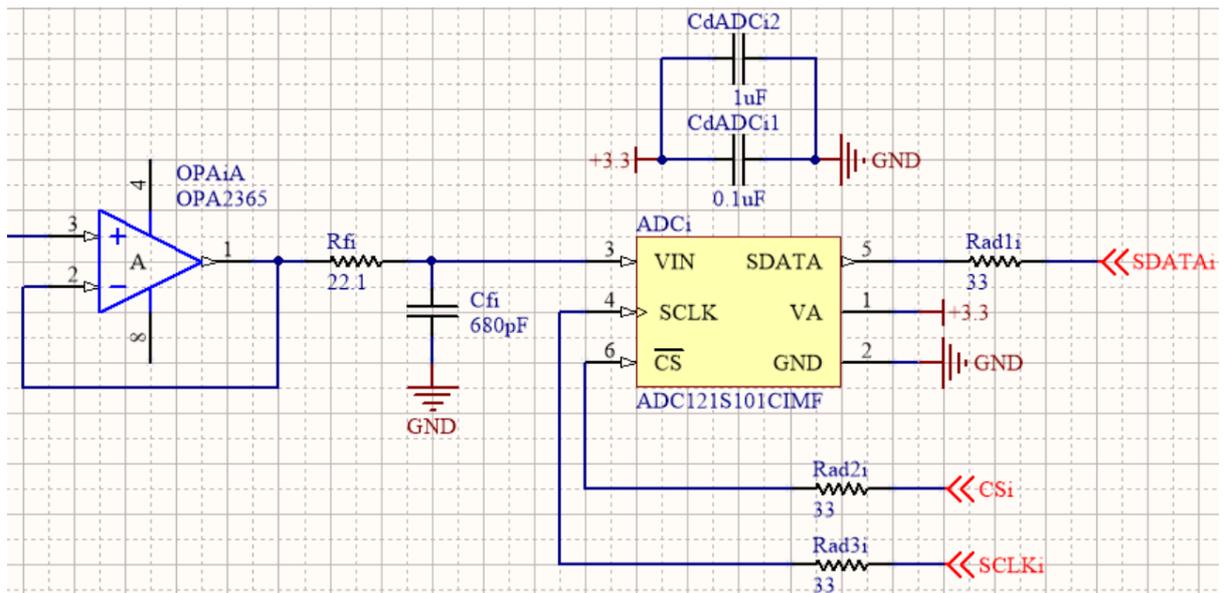


Figura 22: Diagrama esquemático del medidor de corriente - parte 3.

Incerteza en la Medición

Siguiendo los lineamientos planteados en el estándar ISO/IEC GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement), cuando se realizan mediciones, no puede hablarse de “error” ya que según su definición, incluye al “valor verdadero” de mensurando, cosa que no se conoce (y razón por la cual se quiere medir). Se habla, pues, de “incerteza” o “incertidumbre” y se caracteriza por un intervalo llamado “intervalo de confianza” en donde el valor real puede caer con cierta probabilidad. Un intervalo de confianza mayor aumenta la probabilidad de que dicho valor caiga en él, pero aumenta la incerteza.

El resultado de la medición será el valor marcado por el instrumento (o la media de ellos si se realizaran distintas muestras) junto con la incerteza, que viene dada por el instrumento o se mide con el desvío estándar (o múltiplos de él, dando lugar al “intervalo de confianza expandido”). Es común usar 3 desvíos estándar ya que brindan una confianza del 99.74 % (suponiendo distribuciones gaussianas).

Dada la relativa complejidad del circuito de medición, para calcular su incerteza se recurre a Python (libre y gratuito). El fin es poder realizar una simulación cualitativa y cuantitativa de cómo afectan las incertezas individuales de cada componente a la performance general del medidor.

Por un lado, las especificaciones piden una incertidumbre máxima aplicada sobre el valor final medido. Por otro, el presupuesto de error aplica a cada etapa en particular empleada en la medición. Como el presupuesto de error es más restrictivo y permite un margen ante el no cumplimiento del mismo, entonces las tolerancias de los componentes se eligen a fin de cumplir con este último; siempre sin dejar de cumplir con las especificaciones.

Con el foco en el presupuesto de error, y asumiendo que los errores sistemáticos como el offset se encuentran calibrados, se calcula la incerteza correspondiente a cada etapa en la medición.

El sensor de corriente elegido tiene una precisión de 0.5 % que ya cubre todo el presupuesto que se le asignó anteriormente, aún sin considerar su alinealidad de 0.15 %. En el mejor de los casos, teniendo que la precisión y la alinealidad son incorrelacionadas, se tiene una incerteza combinada de 0.52 %. Suponiendo correlación total, queda el caso de incertezas aditivas y por ende la incerteza combinada es de 0.65 %.

Para la incerteza en la ganancia de los filtros antialias, se usa una simulación de montecarlo de manera de obtener la media y el desvío estándar de las mismas teniendo en cuenta la tolerancia de los componentes empleados así como su autocalentamiento (cuando aplique). Entonces, según las expresiones de las ganancias de los Anexos B y C, se calcula la distribución de las mismas considerando que los componentes tienen media en su valor nominal y una distribución gaussiana con desvío estándar de un tercio de su tolerancia (de manera que su tolerancia es 3σ).

Para la evaluación del autocalentamiento se necesita saber la resistencia térmica θ , la cual se considera de 38 K/W [14] para los resistores SMD con encapsulado 0805, y su coeficiente térmico, k_T , provisto por los fabricantes en ppm (partes por millón) que cambia

el valor de resistencia con la temperatura. Este último se puede elegir, cuanto menor, mayor el costo. Se considera el uso de $k_T = 25$ ppm al ser el valor superior para resistores de 0.1 % (y usar valores más pequeños no ofrece mucha diferencia en la incerteza final). Si el resistor R tiene su valor nominal r a temperatura ambiente T_a con un coeficiente térmico de k_T y una tolerancia τ , la resistencia total vendrá dada por $R_s = r(1 + \tau + k_T \Delta T)$, pero $\Delta T = P \theta = R I^2 \theta$, entonces:

$$R = \frac{r(1 + \tau)}{1 - r k_T \theta I^2}$$

En resumen, para la incerteza en las ganancias, se tendrán en cuenta las tolerancias de todos los componentes y el autocalentamiento solamente de R_{1v} y R_s pues son las únicas que disipan una potencia considerable (aproximadamente 100 mW, la primera prácticamente tiene una caída de 220 Vrms y la segunda tiene que convertir una seno de, a lo sumo, 36 mArms, 50 mApico). Los resultados del error relativo de las ganancias se muestran en la figura 23 siendo los intervalos de confianza expandido (3σ) de 0.125 % para ganancia de corriente y de 0.122 % para la de tensión (reducir la tolerancia de los componentes a la mitad reduce esta incerteza aproximadamente también a la mitad, lo mismo si se reduce las tolerancias a un cuarto).

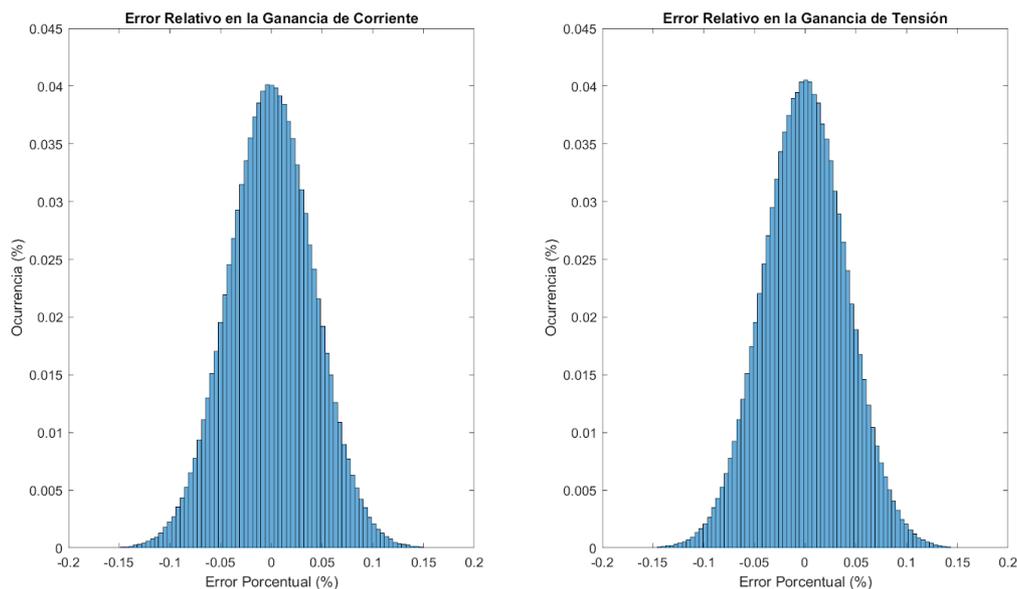


Figura 23: Distribución de probabilidad del error relativo de las ganancias de corriente (izquierda) y tensión (derecha) considerando componentes con distribución gaussiana y el autocalentamiento para R_{1v} y R_s .

La cuantización y el ruido electromagnético son las dos incertezas con las que se cumple lo presupuestado: sabiendo que los ADCs son de 12 bits y que los valores de alimentación son, respectivamente, de 5 y 3.3 V para la medición de tensión y corriente, se tendrá una potencia de ruido de 124 nW (352 uVrms) para la tensión y 54 nW (232 uVrms) para la corriente, lo que se traduce en una incerteza porcentual de 0.007 % para ambos casos. Para el ruido electromagnético se considera una potencia equivalente a 5 mVrms que al

pasar por el filtro boxcar de 16 muestras dentro de la FPGA se reduce en $1/\sqrt{16} = 0.25$. Este nuevo valor representa una incerteza de 0.025 % en 5 V y 0.038 % en 3.3 V.

Un estudio completo de las incertezas individuales de todas las componentes antes mencionadas y agregando 0.5 LSB debido a la calibración del offset y 0.5 LSB por la medición en sí, da como resultado una mejor aproximación a la incerteza combinada ya que no todas las incertezas individuales son aditivas (con correlación completa). Se obtienen, entonces, tres distribuciones gaussianas, una para la potencia, una para la corriente y una tercera para la tensión, todas sujetas al valor que se está midiendo y cuya incerteza expandida (3σ) se grafica en las figuras 24, 25 y 26, respectivamente (la incerteza en la potencia se calcula para una tensión de 220 Vrms).

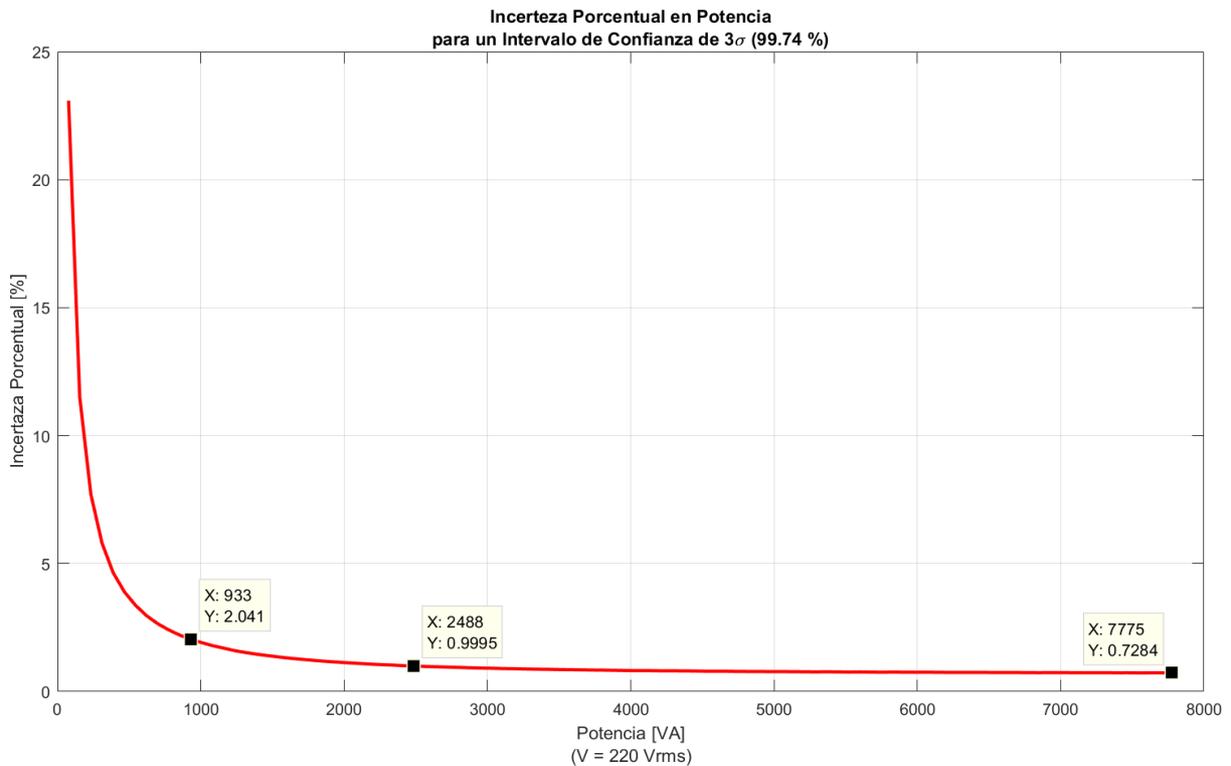


Figura 24: Incerteza porcentual en potencia para un intervalo de confianza de 3σ (99,74 %).

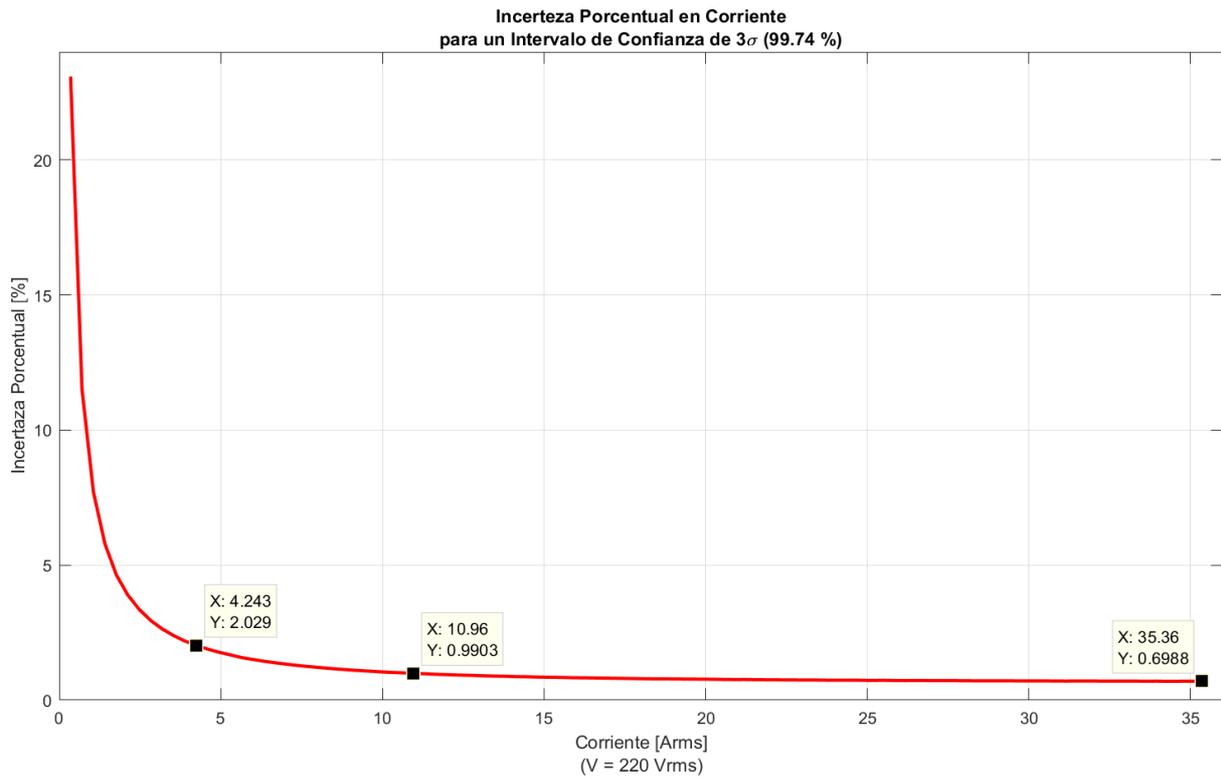


Figura 25: Incerteza porcentual en corriente para un intervalo de confianza de 3σ (99,74 %).

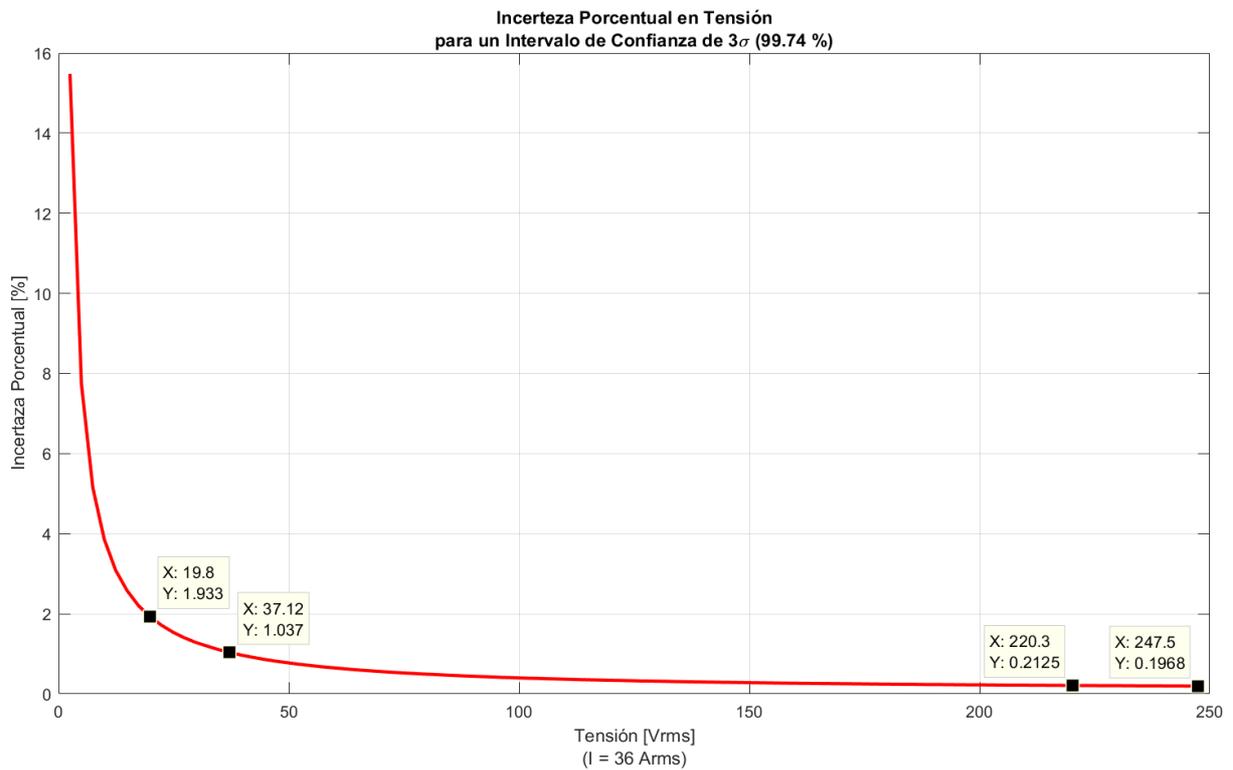


Figura 26: Incerteza porcentual en tensión para un intervalo de confianza de 3σ (99,74 %).

Módulo de alimentación

Módulo de alimentación

Figura 27: Detalles del módulo de alimentación.

El módulo de alimentación consiste en el convertidor ECL15UT02-P cuyas salidas de +12 V y -12 V alimentan todo menos la CPU y la FPGA del módulo de medición (la FPGA tiene pines independientes de alimentación). Estos últimos se alimentan con los 3.3 V provenientes del regulador cuya entrada es la salida del convertidor incluido en el BQ24165. Esta salida toma energía del convertidor ECL15UT02-P o de la batería. La figura 28 muestra la configuración utilizada, donde los 5 V del convertidor se conectan a IN y el SYS va conectado a la CPU y la FPGA. La elección de cada componente está dada por las instrucciones de la hoja de datos.

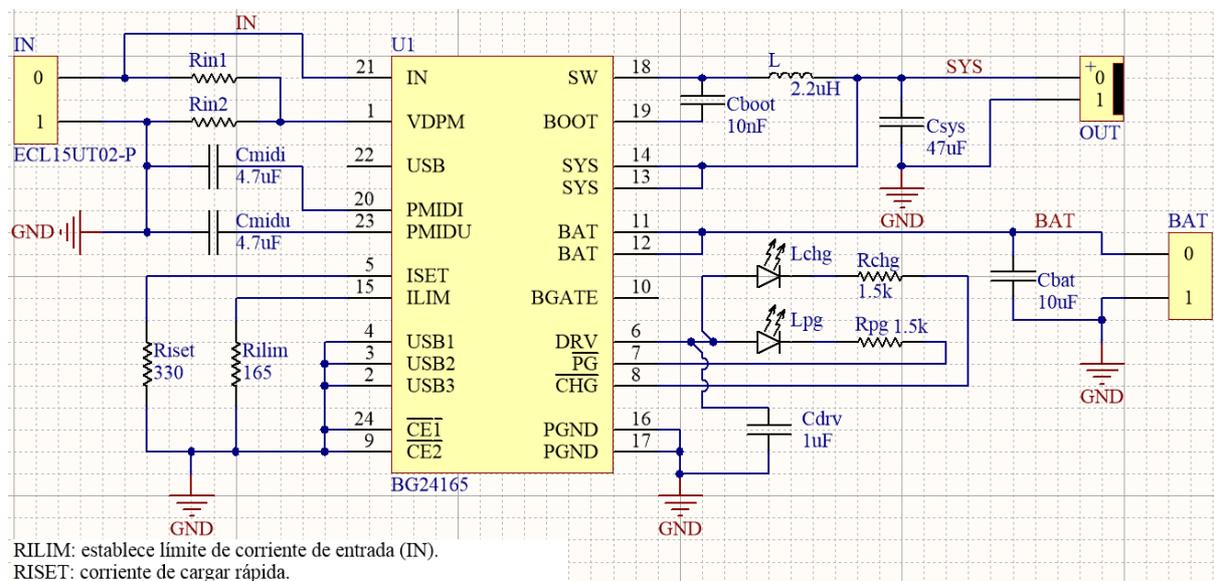


Figura 28: Esquemático del cargador de batería BQ24165 del módulo de alimentación.

Módulo de comunicación

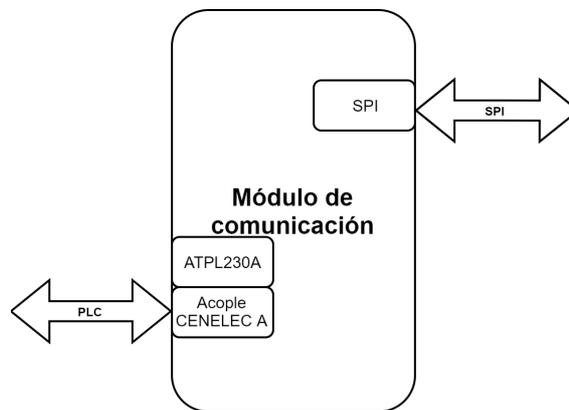


Figura 29: Detalles del módulo de comunicación.

ATPL230A es un modem PLC compatible con la capa física de la especificación PRIME. Es comúnmente utilizado en aplicaciones como *smart metering*, automatización industrial, automatización de hogar, alumbrado, y energía solar. ATPL230A puede operar en bandas de transmisión independientemente seleccionables de hasta 472 kHz, llegando a velocidades de transmisión desde 5,4 kbps hasta 128,6 kbps. Cuenta con varias prestaciones como encriptación AES y coprocesador MAC.

Para el uso de PLC en el módulo de comunicación, se partió del diseño de la placa de desarrollo ATPL230A-EK. Este kit de evaluación incluye un modem ATPL230A y un microcontrolador ATMEL SAM4C de núcleo ARM, el cual envía las instrucciones y datos a comunicar por SPI hacia el modem. Cuenta con una memoria EEPROM para almacenar las instrucciones y programación del microcontrolador, una interfaz serial para el uso del módem por parte de un microcontrolador externo, una interfaz JTAG para la programación del microcontrolador, un circuito de alimentación, y un circuito de acople a la red eléctrica.

Se removió el microcontrolador y sus periféricos e interfaces del diseño del módulo, dejando sólo la interfaz SPI para el uso del modem por un microcontrolador externo, que dentro del producto sería la unidad central de procesamiento. Se removió parte del circuito de alimentación, de manera que el mismo pudiera recibir 12 VDC desde el módulo de alimentación del medidor y convertir esta tensión a la tensión 3,3 VDC requerida por el modem. Luego se integró el circuito de acople ATPLCOUP001, definido en [13]. Este circuito provee aislación galvánica y optimiza el costo para el acople PLC para la banda de frecuencias entre 41 kHz y 89 kHz (canal 1 PRIME) dentro de la banda CENELEC A.

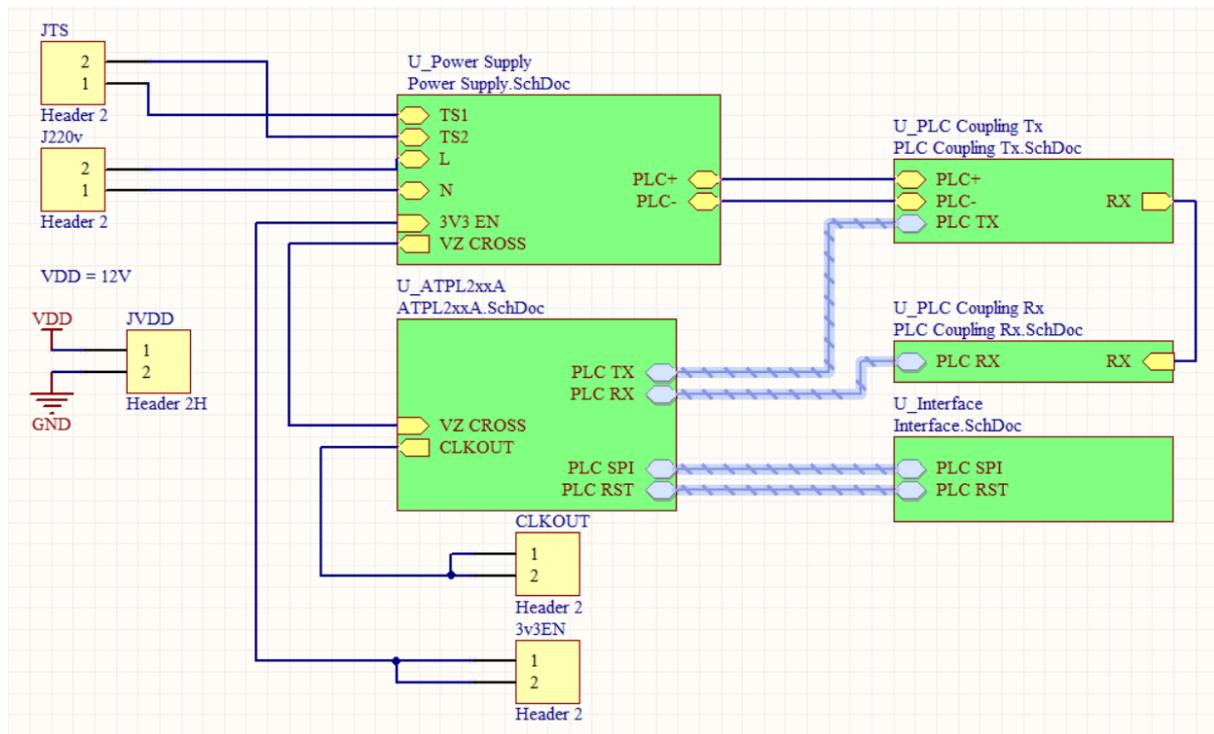


Figura 30: Esquema de alto nivel del módulo PLC.

La figura 30 enseña el esquema general del submódulo PLC dentro del módulo de comunicación. Puede dividirse en tres partes principales: alimentación, acople de transmisión y recepción, y transceptor.

Alimentación PLC

La unidad de alimentación recibe 12 VDC desde el módulo de alimentación del medidor, y los convierte en 3,3 VDC para la alimentación del sistema de comunicación PLC. También recibe una forma de onda de 12 VAC en fase con la señal de suministro. Esta señal proviene de la salida de un transformador de 220 VAC a 12 VAC, y se utiliza para determinar cruces por cero, los cuales son necesarios para la comunicación vía PLC. La unidad de alimentación también actúa como puente entre la señal de 220 VAC de suministro y el acople.

Acople PLC

La unidad de acople PLC fue diseñada siguiendo las recomendaciones de la nota de aplicación [13]. La figura 31 enseña los bloques que componen a la unidad de acople y su conexión con la red de suministro y con el modem ATPL230A. El acople consiste de cuatro etapas: transmisión, filtrado, recepción y el acople en sí.

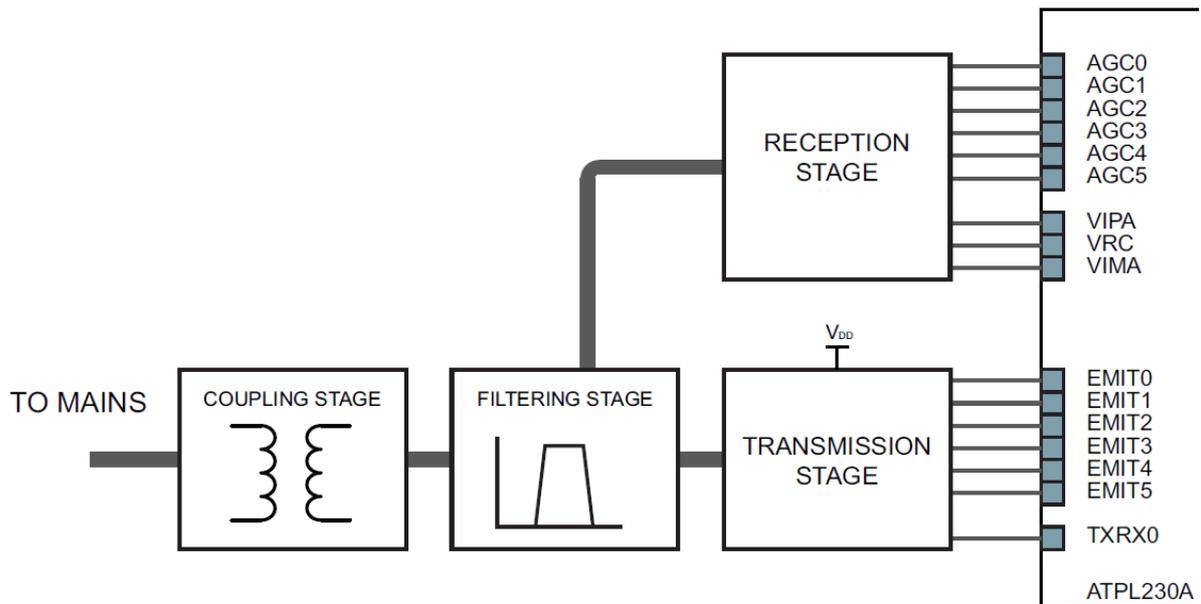


Figura 31: Diagrama de bloques del acople PLC⁵.

La etapa de transmisión adapta y amplifica las señales a transmitir. Está compuesta por:

- *Driver*: grupo de resistores que adaptan las señales a transmitir para controlar un amplificador clase D o para ser filtradas en la próxima etapa.
- Amplificador: amplificador clase D que genera una onda cuadrada de 0 a VDD.
- Bias y protección: resistores y diodos Schottky que proveen un componente DC y protegen de perturbaciones recibidas.

La etapa de filtrado consiste de filtros pasabanda que filtran los armónicos de alta frecuencia de la onda cuadrada generada por el amplificador de la etapa de transmisión, adapta la impedancia de entrada y salida para una transmisión y recepción óptima (adaptación controlada por el modem), y en algunos casos sirven para filtrar señales recibidas.

La etapa de acople en sí bloquea el componente DC de la línea hacia la cual se inyectan o de la cual se reciben señales, con el uso de un capacitor de alta tensión. Con el uso de un transformador 1:1, se aísla el circuito de la red de suministro.

La etapa de recepción adapta la señal analógica recibida para ser capturada apropiadamente por el modem ATPL230A. Consiste en un filtro anti-alias (filtro RC), un circuito de control automático de ganancia (AGC), y un driver para el ADC interno al modem. El circuito AGC previene la distorsión de la señal recibida que puede presentarse cuando la señal de entrada es lo suficientemente alta como para polarizar los diodos de protección. El driver comprende resistores y capacitores para proveer un componente DC y adaptar la señal recibida para el ADC.

⁵ Imagen obtenida de la hoja de datos del ATPL230A.

La figura 32 muestra con mayor detalle los subcircuitos que componen las etapas del circuito de acople.

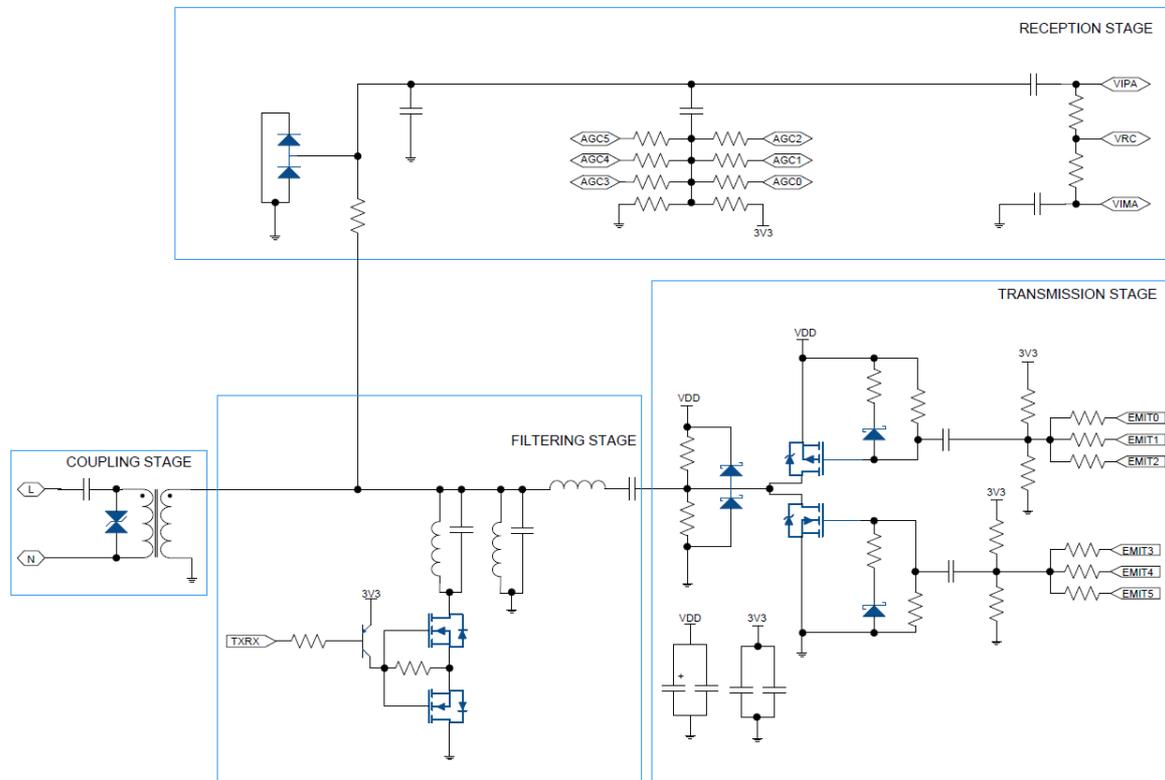


Figura 32: Subcircuitos del acople PLC⁶.

Transceptor PLC

El transceptor ATPL230A se conecta con la unidad de acople para transmitir y recibir mensajes PLC, con la modulación y en el canal configurados en los registros del modem. Recibe una señal de forma cuadrada desde el subcircuito de alimentación que indica los cruces por cero en la red de suministro de energía, necesarios para la comunicación siguiendo el protocolo PRIME. También se conecta a una interfaz SPI, la cual consiste de pines rectos a los cuales podrá conectarse el bus SPI de la unidad central de procesamiento para que este pueda enviar datos desde el medidor y recibir instrucciones desde el concentrador. El transceptor también presenta una salida de clock de 10 MHz para uso opcional por parte de otros módulos.

⁶ Imagen obtenida de la nota de aplicación del ATPL230A: AN2568 *PLC Coupling Reference Designs*.

Almacenamiento

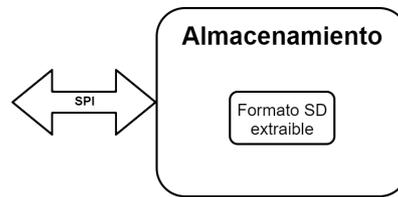


Figura 33: Detalles del almacenamiento.

El módulo de almacenamiento es un módulo independiente compatible con tarjetas de tamaño SD, miniSD o microSD formateadas en FAT16 o FAT32. La interfaz lectora consta básicamente de un conector para tarjetas, reguladores de tensión, buffers, drivers, capacitores de desacople y un level shifter para adaptar niveles lógicos de 3.3V y 5V.

Existen tres maneras de acceder a una memoria SD: modo SPI, modo un-bit SD y modo cuatro-bit SD. En este caso la memoria es accedida por la CPU a través del modo SPI y de un bus homónimo.

Cabe destacar que el periodo de tiempo con el que se guardan los datos en el módulo de almacenamiento es configurable y programable desde el concentrador.

Unidad central de procesamiento (CPU)

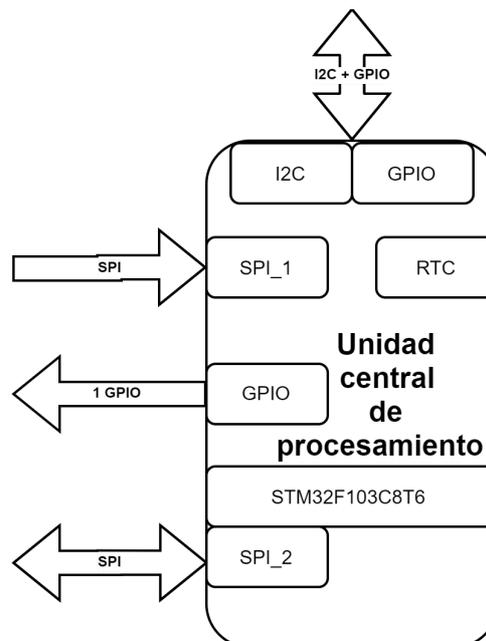


Figura 34: Detalles de la unidad central de procesamiento. El RTC es interno del microcontrolador.

Este módulo consiste básicamente en el microcontrolador STM32F103C8 y en los componentes necesarios para su funcionamiento tales como cristal oscilador, diodos, resistencias, capacitores, reguladores de tensión, entre otros. Se instala un conector tamaño microUSB-B hembra para su programación.

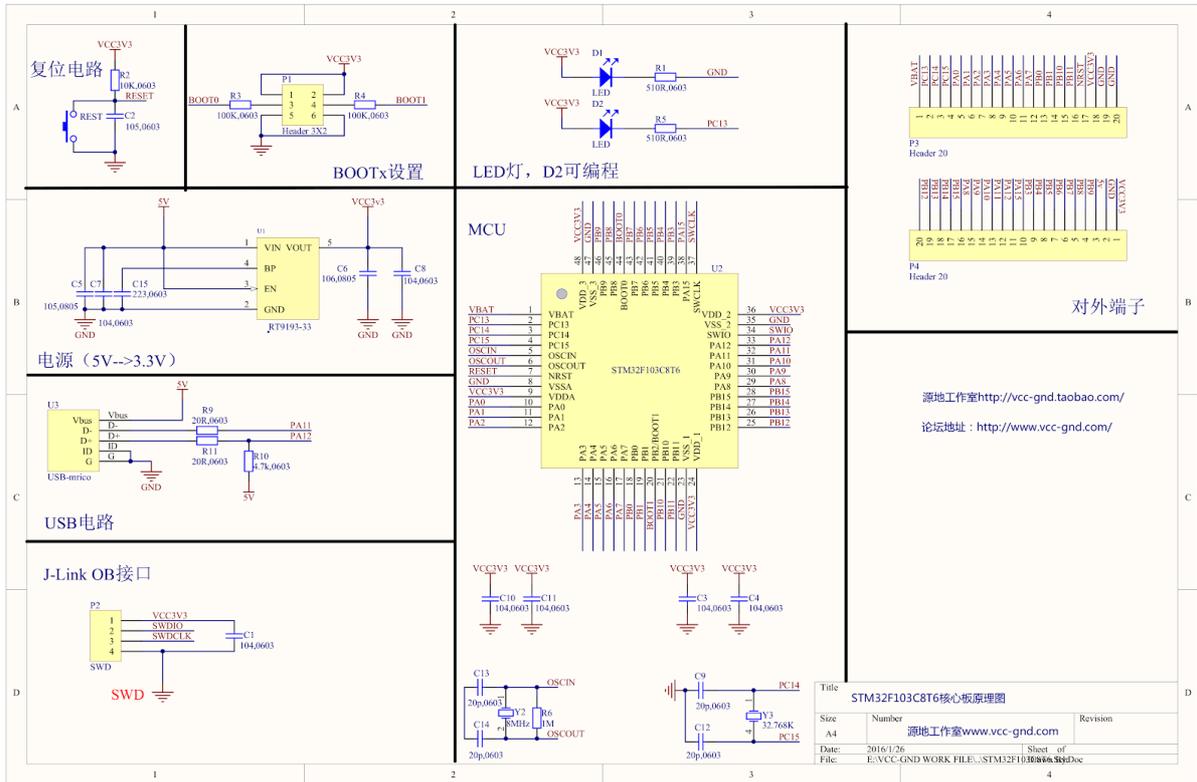


Figura 35: Diseño de referencia para el módulo central de procesamiento.

Interfaz de usuario

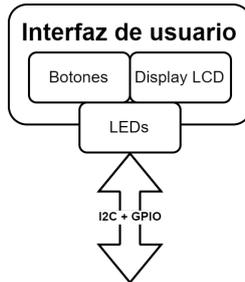


Figura 36: Detalles de la interfaz de usuario.

Se utiliza el módulo JHD1214M1 como display LCD. La unidad central almacena los datos actuales del punto de consumo y los envía hacia el display por medio de un bus I2C. Los datos mostrados son actualizados en base a un periodo de tiempo configurable.

Los botones permiten al usuario navegar a través del menú del display y mostrar diferentes métricas. Están conectados a la CPU a través de pines GPIO. Cada pin posee su propio circuito antirrebote RC y un inversor schmitt trigger (74HC14).

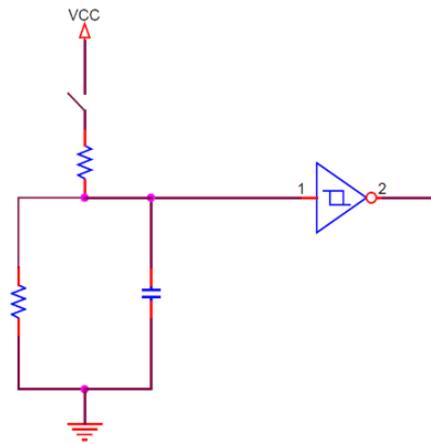


Figura 37: Esquema general del circuito antirrebote para cada pulsador.

Asimismo la interfaz cuenta con LEDs que tienen la funcionalidad de mostrar si el medidor y el módulo de comunicación se encuentran alimentados y funcionando correctamente, y si existe una conexión establecida entre el módulo de comunicación y el servidor concentrador. Los LEDs están comandados por la CPU a través de pines GPIO, empleando una resistencia en serie para controlar la corriente que circula por ellos.

9.2 Software

Se emplean los lenguajes C y C++ para programar el software que va a ejecutarse en el microcontrolador STM32F103C8 de la unidad central de procesamiento. Ambos son de medio nivel, es decir, disponen de las estructuras típicas de lenguajes de alto nivel y al mismo tiempo ofrecen construcciones del lenguaje que permiten un control a bajo nivel. Otros factores por los cuales se opta por ellos es que se cuenta con experiencia previa en el uso de los mismos y que las librerías PRIME 1.4 proporcionadas por Atmel para la interacción con el modem ATPL230A del módulo de comunicación se encuentran escritas en dichos lenguajes.

En particular para los drivers y funciones de bajo nivel se usa C, dado que el compilador cuenta con rutinas de optimización para este lenguaje. El lenguaje C++ se emplea principalmente para el programa principal ya que es orientado a objetos, facilitando la programación y haciendo más legible la estructura y el funcionamiento del mismo.

Para la programación de la FPGA iCE40UP5K del módulo de medición existen 2 opciones de lenguajes: VHDL o Verilog. Se opta por VHDL ya que se cuenta con experiencia previa en su uso y es de preferencia por poseer una sintaxis similar a C y C++ permitiendo un mejor flujo de lectura.

A continuación se presentan las funcionalidades y detalles del software de cada módulo.

9.2.1 Medición y preprocesamiento

Controlador ADC

Este módulo implementa un controlador simultáneo para los ADC ADC121S101 de tensión y corriente según las especificaciones de funcionamiento en su hoja de datos.

El control se lleva a cabo teniendo a enable como la única señal externa de control. Posee además, una entrada de clock (clockIn), que determina la frecuencia del clock de salida ($\text{clockOut} = \text{clockIn}/2$) y la de muestreo ($\text{clockOut}/20$), una salida de clock (clockOut) que alimenta a ambos ADCs simultáneamente, dos entradas de datos seriales para los datos de los ADCs de tensión y corriente (vIn, iIn), dos salidas en paralelo de 12 bits con la última adquisición (vOut, iOut), una salida de chip select (cs) que se conecta a ambos ADCs a la vez y que determina el funcionamiento de los mismos en base a los tiempos en que ocurren sus flancos, y, por último, una salida de dato válido, cuyo flanco ascendente indica que los datos de vOut e iOut son estables.

El módulo se implementa con una FSM de cuatro estados, cuyas transiciones se muestran en la figura 38:

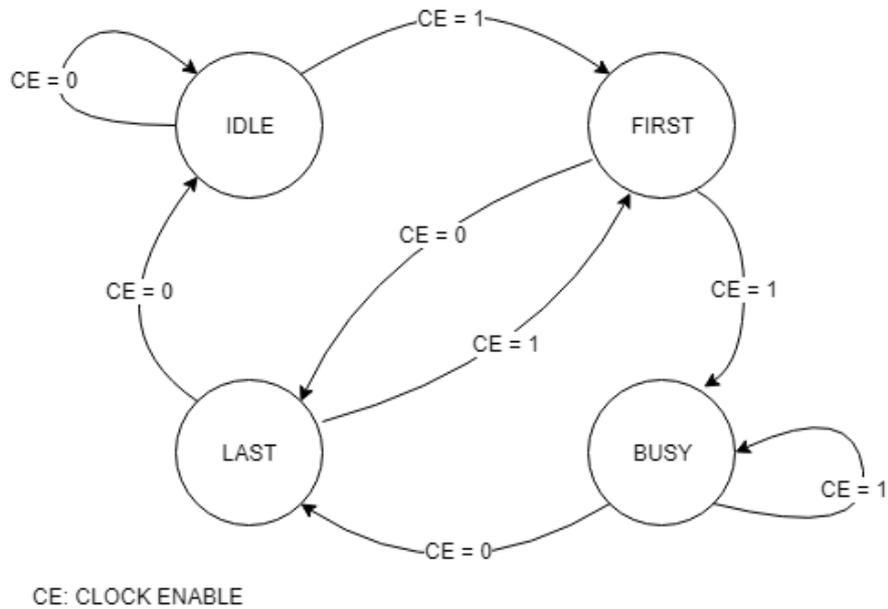


Figura 38: Diagrama de flujo del controlador del ADC.

1. IDLE, donde los ADCs se encuentran apagados (shutdown mode) y no se transmiten ni reciben datos.
2. FIRST, la FSM permanece en este estado durante la primera adquisición después de haberse encendido y no produce datos de salida, ya que los ADCs se están inicializando.
3. BUSY: modo normal de funcionamiento.
4. LAST: apaga los ADCs. No produce datos de salida.

Las transiciones se dan con los cambios de una señal interna de enable que está sincronizada con el clock de entrada (clockEnable).

En la figura 39 se muestran las formas de onda para un ciclo completo de funcionamiento, con el encendido, funcionamiento normal y apagado. Nótese que si bien el encendido se puede dar en cualquier momento, el apagado real de los ADCs se efectúa en el ciclo siguiente en el cual se baja el enable y dura un ciclo adicional.

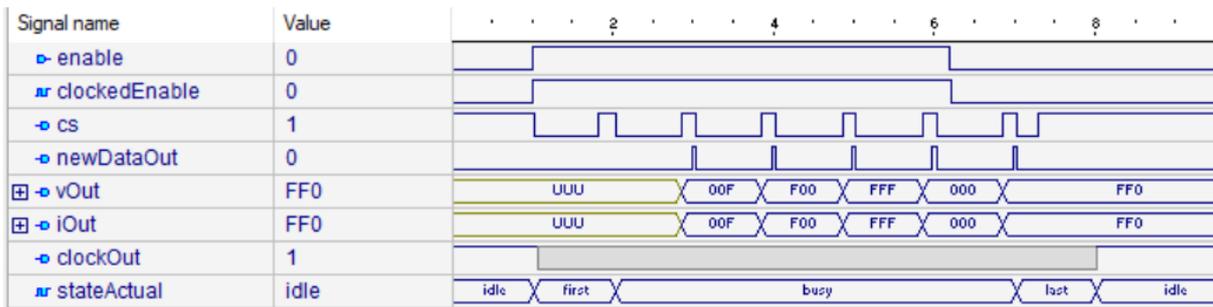


Figura 39: Formas de onda de entrada, salida e internas a la FPGA en los distintos estados de los ADCs.

Filtro Boxcar

El boxcar es simplemente un sumador: toma 16 muestras de 12 bits provenientes de los ADCs, las suma y proporciona una nueva muestra de salida de 16 bits. El mismo módulo, filtra las muestras de los ADC de tensión y de corriente y provee dos datos de salida.

Cuenta con una entrada de enable asíncrono activo alto, dos entradas de 12 bits correspondientes a la tensión y corriente proveniente de los ADCs, dos salidas de 16 bits correspondientes a las muestras de tensión y corriente ya filtradas, una entrada de nuevo dato (newDataIn) cuyo flanco ascendente indica que el dato en la entrada es válido y una salida de nuevo dato (newDataOut) cuyo flanco ascendente indica que la salida es válida. El pulso de salida de newDataOut se encuentra retrasado un periodo de newDataIn respecto al momento en que se actualizan los buses de salida, como se muestra en la figura 40, los cuales se actualizan en el flanco descendente de newDataIn correspondiente a la muestra décimo sexta de entrada.

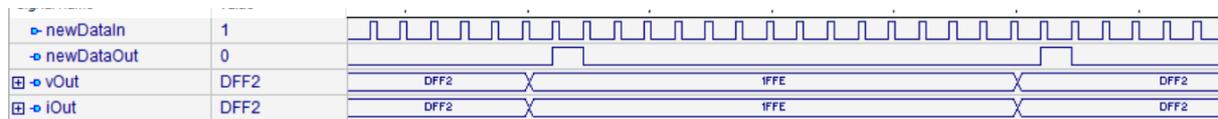


Figura 40: Formas de onda del decimador.

Calculador

Este módulo recibe los datos filtrados (vIn e iIn) y calcula, por periodo, las tensiones y corrientes máximas y mínimas, sus valores RMS, la potencia media y el periodo. Dado que el módulo usa el cruce por cero de la señal de tensión para determinar el periodo y generar los paquetes de datos de salida (dataChunk), la tensión de entrada debe ser alterna. Para obtener una mayor estabilidad, la detección del cruce por cero se hace con histéresis configurable.

El módulo cuenta también con una entrada de enable asíncrona activo alto, una entrada de nuevo dato (newDataIn) y una salida de nuevo dato (newDataOut).

El módulo recibe los datos de 16 bits (vector unsigned, vIn e iIn) y calcula, de forma combinacional o no sincrónica, la tensión y corriente sin offset, y en base a estas, la potencia instantánea y el cuadrado de la tensión y corriente. Este paso es importante ya que lo que se calcula sincrónicamente es el acumulado de estas tres magnitudes para luego calcular la potencia media y los valores RMS, y es posible ya que el vIn e iIn están presentes en los buses de entrada antes de que venga el flanco positivo de la señal newDataIn (newDataOut del decimador, ver figura 41), que da lugar a los cálculos sincrónicos.



Figura 41: Formas de onda del calculador.

9.2.2 Módulo de Comunicación

Interfaz SPI

El módulo de comunicación default del producto utiliza el módem PLC ATPL230A. Este módem interactúa con la CPU a través de una interfaz SPI especial que se puede observar en la siguiente figura.

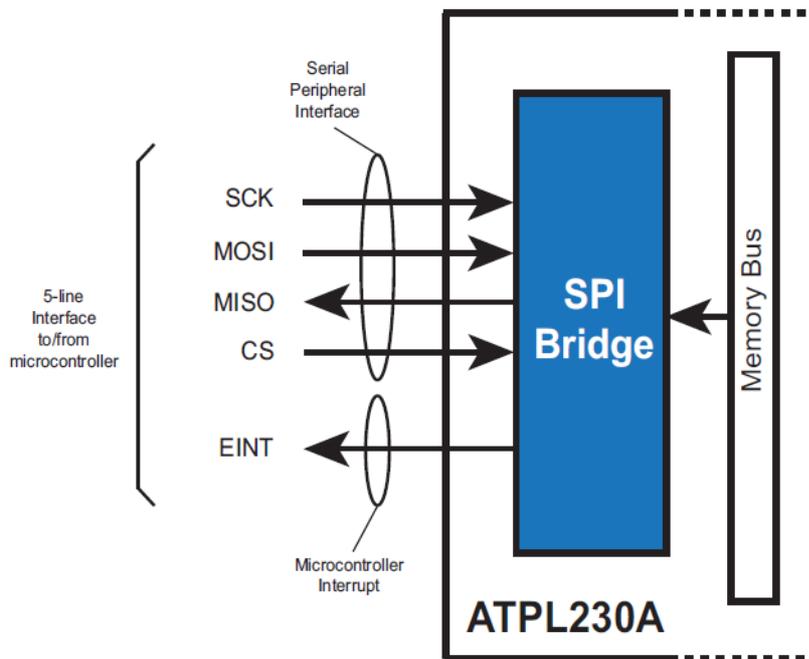


Figura 42: Interfaz SPI del módulo de comunicación PLC.

A través de esta interfaz SPI, un microcontrolador externo puede acceder al ATPL230A y ejecutar operaciones “write”, “write_rep”, “read” y “mask”. Todos los registros periféricos del ATPL230A pueden alcanzarse mediante esta interfaz SPI, por lo cual el microcontrolador puede manejar y controlar al módem en su totalidad.

Esta interfaz permite que el CPU (operando como master) se comunice con el módem ATPL230A (operando como slave). Se utilizan las señales SPI comunes (SCK, MOSI, MISO, CS) y se trabaja con una línea adicional para enviar interrupciones hacia el microprocesador externo: EINT. Esta señal sirve para enviar interrupciones desde la capa PHY del ATPL230A hacia el microcontrolador. En la recepción de instrucciones PLC, enviadas por el servidor concentrador, cada vez que un mensaje PLC es recibido, la capa PHY genera dos interrupciones: una cuando el header de la capa física se lee correctamente y la otra cuando el mensaje se recibe completamente.

Los paquetes de datos enviados desde el CPU hacia el módem tienen la siguiente forma:

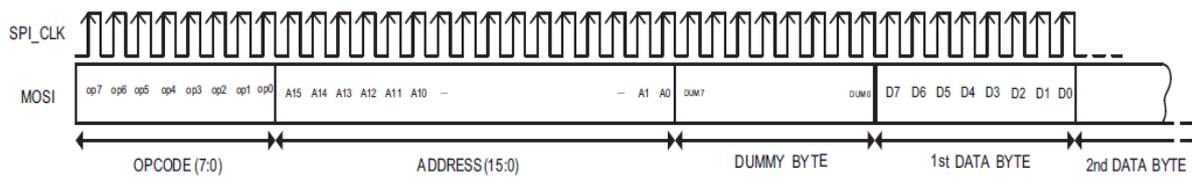


Figura 43: Paquete de datos desde CPU hacia módulo de comunicación PLC.

OPCODE es el tipo de operación a realizar sobre el registro del módem, ADDRESS es la dirección de memoria donde se encuentra el registro, y DUMMY BYTE sólo es utilizado en ciertas operaciones particulares. Luego siguen los bytes de datos necesarios para operaciones de escritura. Los valores de las distintas operaciones se definen en el manual de usuario del transceptor ATPL230A.

Para transmitir datos vía PLC, es necesario el envío de los datos hacia el buffer de transmisión, habilitar el buffer, y comenzar la transmisión en sí. Esto resulta en un total de 14 bytes que deben ser transmitidos junto a los datos en sí. El módem luego se ocupa del armado del paquete PRIME para la transmisión hacia la NAN.

En la recepción de instrucciones provenientes de la NAN, el módem se ocupa de la interpretación y decodificación de paquetes PRIME para luego transmitirlos vía SPI hacia el CPU por el bus MISO.

Los paquetes de datos enviados desde el módem hacia el CPU tienen la siguiente forma:

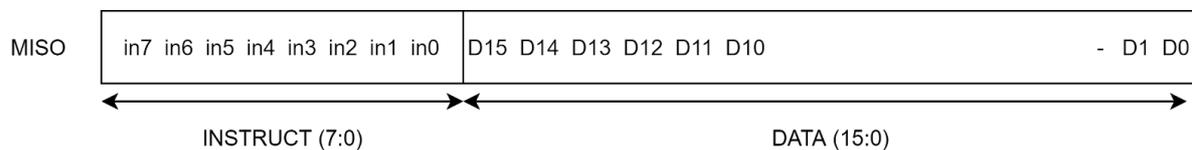


Figura 44: Paquete de datos desde el módulo de comunicación PLC hacia CPU.

INSTRUCT es el tipo de instrucción recibida desde la NAN, y DATA contiene información que solo algunas instrucciones utilizarán al ser llevadas a cabo. La siguiente tabla describe los distintos tipos de instrucciones de la NAN, su funcionamiento y datos necesarios.

Nombre de instrucción	INSTRUCT	DATA	Descripción
CONFIGURACIÓN	0x01	2 Bytes, DATA (15:0)	Configura el período de transmisión de datos desde el smart meter hacia la NAN. El período es igual a 5 segundos + DATA segundos. DATA toma el valor de un <i>unsigned short</i> (0 a 65536).
HST	0x02	1 Byte, DATA (15:8)	Comienza el modo HST. DATA contiene la cantidad de segundos de duración del modo HST. DATA toma el valor de un <i>unsigned char</i> (0 a 255). El segundo byte de DATA no es utilizado.
FACTURACIÓN	0x03	-	Señaliza el fin del período de facturación. Se reinician los contadores de energía y facturación. DATA no es utilizado.
CONECTAR	0x04	-	Cierra el contactor del smart meter si este se encuentra abierto. Si el contactor ya se encuentra cerrado, esta instrucción no hace nada. DATA no es utilizado.
DESCONECTAR	0x05	-	Abre el contactor del smart meter si este se encuentra cerrado. Si el contactor ya se encuentra abierto, esta instrucción no hace nada. DATA no es utilizado.

Tabla 51: Instrucciones de la NAN.

PRIME

El módulo de comunicación default del producto utiliza PLC para comunicarse con el servidor concentrador en la NAN aplicando el protocolo PRIME. Este protocolo define la estructura de sus paquetes de datos hasta la capa tres del modelo ISO-OSI, denominadas como capas PHY, MAC y Convergencia. Detalla un conjunto de funciones abstractas que actúan como interfaces entre cada capa del modelo. Dichas funciones deben ser implementadas en cada nodo de la red PLC para la correcta comunicación.

Para realizar la implementación del protocolo PRIME en este proyecto, se utilizó la librería de firmware PRIME 1.4 provista por la empresa Atmel en los nodos de servicio, es decir en los medidores. Esta librería provee interfaces e implementaciones de las funciones definidas por el protocolo PRIME en lenguaje C++ para la correcta interacción con el módem ATPL230A. Esta librería se instala en la CPU junto a una *hardware abstraction layer* (HAL) que permite operar el SPI de la CPU de manera correcta. Llamando a la API de la librería PRIME en la CPU, el sistema puede enviar las operaciones y los valores correctos a los registros del módem, permitiendo la transferencia y recepción de datos mediante PLC. Se realiza una transmisión de datos hacia el concentrador vía PLC con un periodo configurable. Asimismo, cuando el transceptor ATPL230A recibe datos desde la NAN, los reenvía por SPI hacia la CPU y los procesa para extraer la instrucción que ha sido enviada desde el servidor concentrador.

Modularidad

Es importante mencionar que debido a la propiedad de modularidad del producto, se pueden emplear otros módulos de comunicación siempre y cuando cuenten con un bus SPI para comunicarse con la CPU e implementen el protocolo SPI definido en los apartados anteriores.

9.2.3 Unidad central de procesamiento (CPU)

Recepción de datos de medición y validación

Cada 20 milisegundos la CPU (master) realiza una petición de datos vía protocolo SPI hacia el módulo de medición (slave). Entonces el módulo de medición le devuelve un *frame* (o paquete) de datos directamente relacionado al último ciclo de las señales de tensión y corriente.

Se valida que el nuevo paquete sea diferente al recibido previamente. Esto es posible ya que cada paquete contiene un ID incremental en relación al anterior.

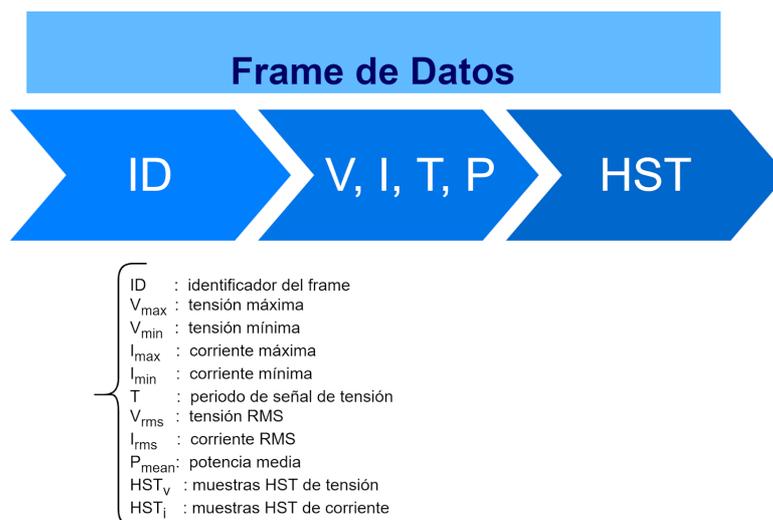


Figura 45: Paquete de datos que envía el módulo de medición a la CPU.

Reacondicionamiento de datos de medición

Una vez que los nuevos datos son validados, se normalizan y se convierten en un formato práctico para ser usados en futuros cálculos. Este proceso consiste básicamente en escalar el valor entero recibido a un valor de punto flotante representativo del valor real medido.

Actualización del display

Se considera que la máxima cantidad de veces que una persona puede requerir oprimir un pulsador para navegar en el menú de la interfaz de usuario es de 5 veces por segundo. Entonces se emplea un período de tiempo de refresco continuo del display T_{displ} de 200 ms.

Por otro lado, se define un periodo arbitrario de tiempo y configurable $T_{displ-new}$ durante el cual las muestras recibidas desde el módulo de medición se van acumulando. Al cumplirse dicho periodo, se realiza la media aritmética (promedio) de los valores acumulados de cada medición. Se eximen de la etapa de promediación los valores de energía consumida y facturación acumulada. Ellos se siguen acumulando hasta que vuelvan a valer cero por 2 motivos posibles: cuando se cumple el periodo de facturación configurable ó cuando llegue la instrucción correspondiente desde el módulo de comunicación.

Entonces $T_{displ-new}$ representa la tasa de actualización de un nuevo dato a ser mostrado en el display, y T_{displ} la tasa con la cual se actualiza el display (que puede ser con un mismo dato viejo o uno nuevo). Por lo cual se debe cumplir que $T_{displ-new} \geq T_{displ}$.

Control de la interfaz de usuario

La CPU debe atender las interrupciones ocasionadas por los botones de navegación del menú del display, así como también comandar los LEDs de funcionamiento de la interfaz de usuario.

Control del módulo de almacenamiento

Se envían los datos al módulo de almacenamiento cada cierto periodo configurable T_{almac} . Las muestras recibidas del módulo de medición se van acumulando durante dicho tiempo. Luego se envía al módulo de almacenamiento vía protocolo SPI el valor de la media aritmética (promedio) de cada medición (a excepción de los valores de energía consumida y facturación acumulada por los motivos antes mencionados).

Control de tráfico hacia el módulo de comunicación

Ocurre lo mismo que en el caso anterior del módulo de almacenamiento. El período $T_{comunic}$ con el cual se envían los datos vía SPI hacia el módulo de comunicación es configurable y puede diferir junto con la cantidad de muestras promediadas.

La siguiente figura resume las funcionalidades mencionadas y muestra el diagrama de flujo general del programa principal que corre en la unidad central de procesamiento:

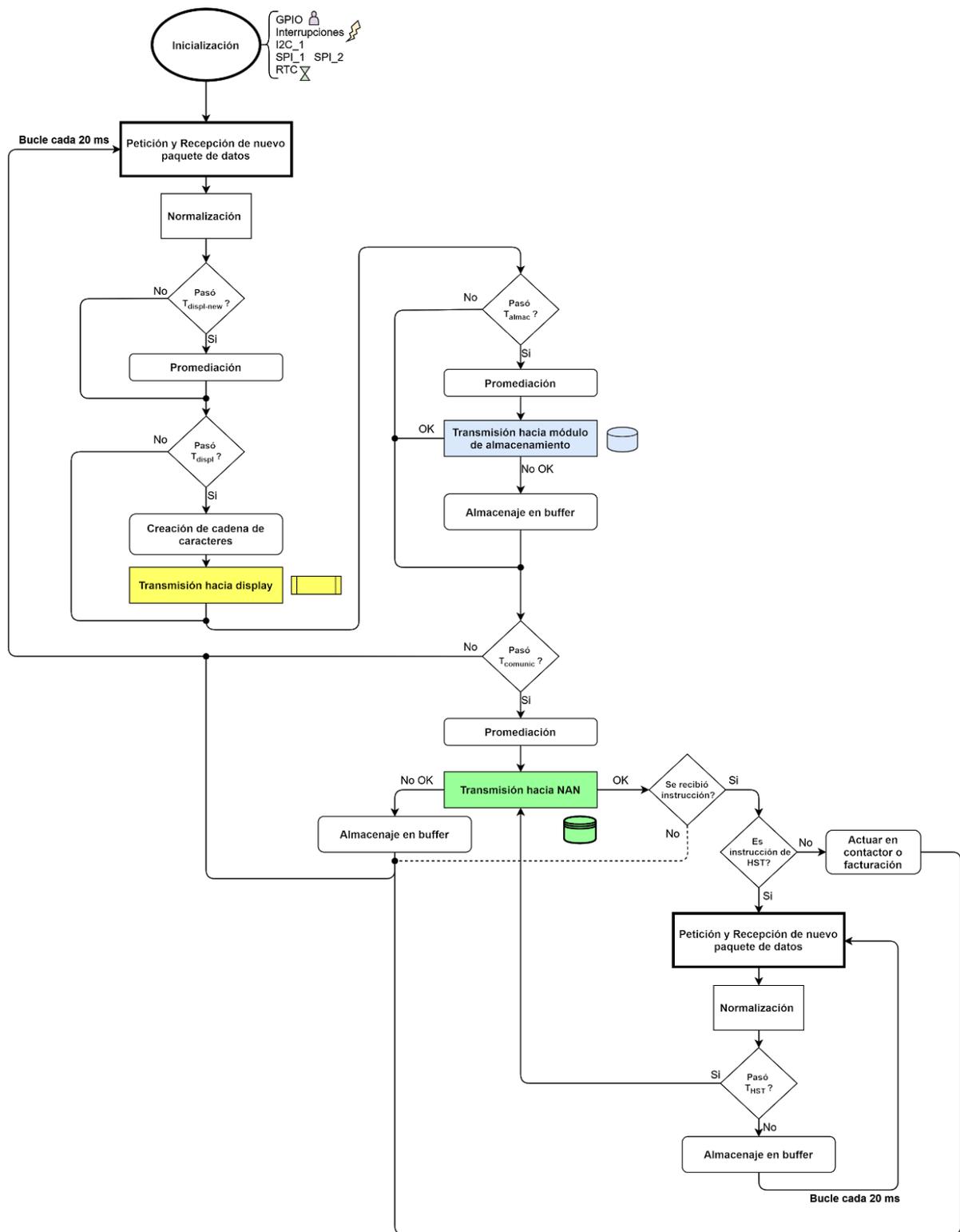


Figura 46: Flujo general del programa principal que ejecuta la CPU.

9.2.4 Funcionamiento general

Las figuras 47 y 48 muestran el flujo general de datos del sistema. Comienza con el muestreo de las señales de tensión y de corriente de la red eléctrica, su digitalización y preprocesamiento. Los datos obtenidos son almacenados en *frames* (o paquetes).

El tamaño total del paquete que envía el módulo de medición es de 529 bytes y se compone de la siguiente manera: 1 byte de identificador de paquete, más 28 bytes de información de tensión, corriente, potencia media, y periodo de la red eléctrica, más 500 bytes compuesto por 250 muestras de 2 bytes cada una de las señales de tensión y corriente. Las 250 muestras vienen determinadas por el hecho de que se debe calcular la distorsión armónica (THD) y la representación espectral de las señales de línea hasta los primeros 50 armónicos en base al requerimiento [REQ-32](#). Dado que el espectro resultante de calcular la DFT es bilateral, se requieren 101 muestras como mínimo. Ahora bien, para que la distancia espectral entre armónicos sea de 50 Hz, el producto NT debe ser 20 ms (donde N es la cantidad de muestras y T el tiempo de sampleo). Dado que T es fijo e igual a 160 μ s, se determina que N debe ser de 125, lo cual es fácilmente realizable al decimar las muestras originales por 10 (recuérdese que la frecuencia de sampleo es de 62.5 kHz, 1250 muestras por periodo de señal).

Se transmite un paquete cada 20 ms hacia la unidad central de procesamiento, es decir cada ciclo de señal de la línea eléctrica. La transmisión se realiza por medio del bus SPI_1 a una tasa de 4.5Mbps (562.5 kbps). A esta tasa el periodo mínimo de transferencia de un paquete de 529 bytes es de 1 ms aproximadamente, 20 veces más rápido que el periodo de las señales de línea.

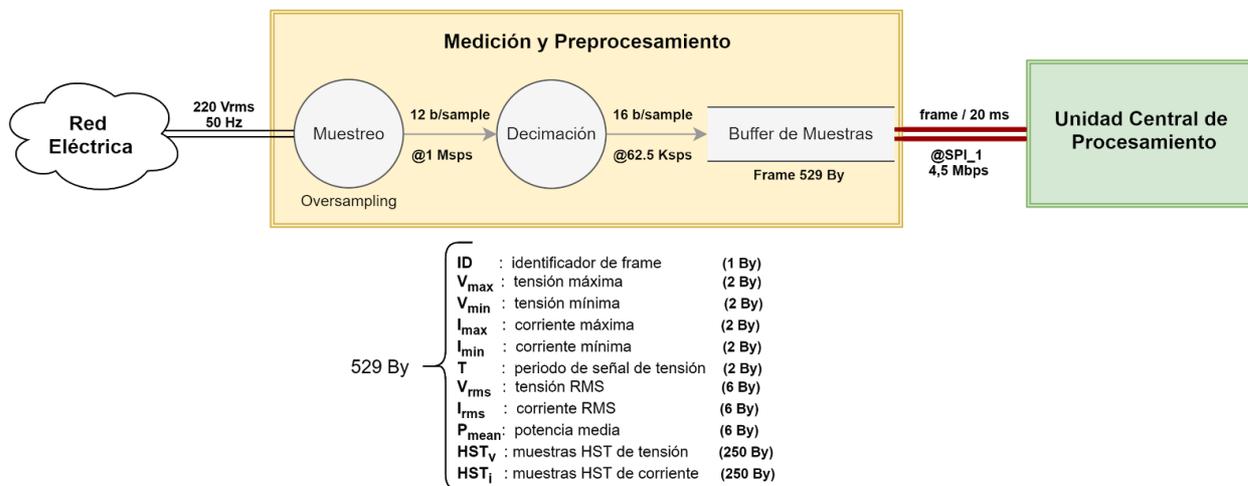


Figura 47: Diagrama del flujo de datos desde red eléctrica hasta CPU.

Modo Normal de Funcionamiento

La CPU recibe el paquete de 529 bytes de datos y toma los 29 bytes correspondientes al ID y a los datos que no son HST. Se los normalizan y se los agrupa en un nuevo paquete de 32 bytes. Luego en base a ellos la CPU calcula los nuevos datos de potencia aparente, factor de potencia ($\cos \phi$), energía y facturación, que son adicionados formando un paquete aumentado de 48 bytes.

Durante el periodo en el cual fuera necesario enviar un paquete de datos desde la CPU, es decir ya sea T_{displ} , T_{almac} o $T_{comunic}$, cada dato del paquete aumentado es sumado al anterior y almacenado en memoria interna. Al cumplirse alguno de los periodos, los datos almacenados son promediados y enviados al módulo correspondiente. Cabe mencionar nuevamente que los datos de energía consumida y facturación acumulada no se promedian y se siguen acumulando, hasta que vuelven al valor cero cuando se cumple el periodo de facturación configurable ó cuando llegue la instrucción correspondiente desde el módulo de comunicación.

En particular:

- **Display:** la CPU lo actualiza continuamente cada T_{displ} enviando una cadena de 32 bytes a través del bus I2C_1 para mostrar en su pantalla de 2x16 caracteres. Cada $T_{displ-new}$ la CPU actualiza las cadenas a enviar considerando los nuevos valores calculados y promediados.
- **Módulo de Almacenamiento:** se envía por el bus SPI_2 cada T_{almac} los datos promediados.
- **Módulo de Comunicación:** comparte el bus SPI_2 con el módulo de almacenamiento. Cada $T_{comunic}$ los datos promediados son enviados.

En la figura de abajo se muestra un buffer que sirve para almacenar los datos a ser enviados en caso que alguno de los módulos no se encuentre disponible en el momento. Entonces en el próximo envío se transmiten los datos almacenados en el buffer y los nuevos de forma conjunta.

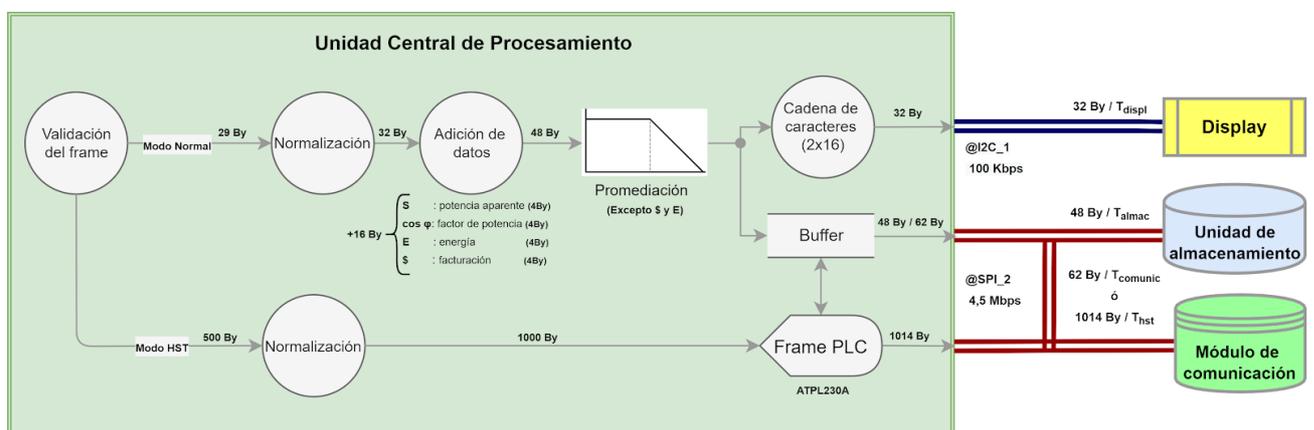


Figura 48: Diagrama del flujo de datos desde CPU hasta los distintos módulos.

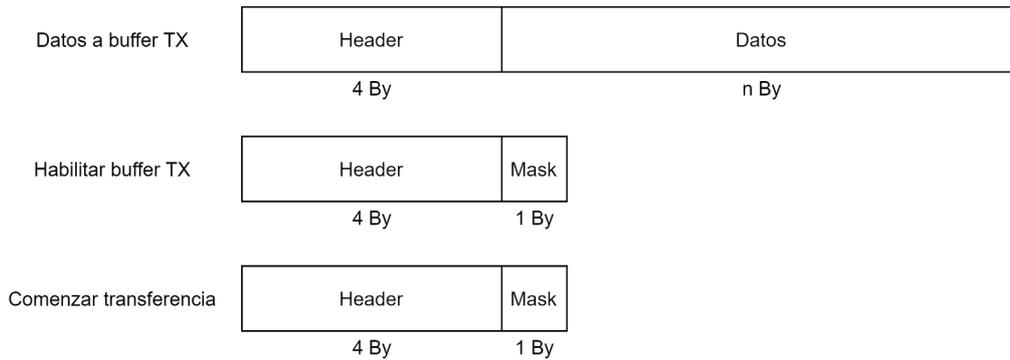


Figura 49: Paquetes a enviar necesarios para realizar una transmisión al modulo de comunicacion PLC.

Instrucciones

Al realizar una transferencia por el bus SPI_2 al módulo de comunicación, la CPU también recibe simultáneamente un paquete de datos desde este módulo (propiedad full duplex del SPI). Entonces cada vez que se realiza una transferencia ($T_{comunic}$) la CPU corrobora si el paquete recibido es una instrucción válida o no, y actúa en consecuencia.

En particular si es una instrucción de HST, la misma debe indicar la cantidad de períodos de las señales de línea a considerar. En base a esta cantidad la CPU calcula un nuevo periodo llamado T_{HST} y pasa al modo HST de funcionamiento.

Modo HST de Funcionamiento

Del paquete de 529 bytes que recibe la CPU cada 20 ms, se toman los 500 bytes que corresponden a datos de HST y son normalizados a un nuevo paquete de tamaño 1000 bytes. Estos son almacenados en un buffer durante el periodo T_{HST} , y enviados al módulo de comunicación cuando se cumple dicho periodo.

10 Estudio de confiabilidad

Para el estudio de confiabilidad de hardware se emplea el método de “análisis por estrés de partes” descrito en la norma MIL-HDBK-217F Notice 2 redactada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

Este método es aplicable sólo cuando el diseño ya fue finalizado o cuando éste se encuentra en revisión/mejora dado que requiere del conocimiento detallado de la lista de componentes utilizados y sus características constructivas (tensión y corriente máximas, rango de temperatura, frecuencia, etc.) además de las condiciones en las que se emplean.

El método en sí le asigna una tasa de fallas a cada componente en base a su tipo y naturaleza así como también en función de las condiciones en las que será usado. Estas tasas luego se suman (suponiendo que los componentes fallan independientemente unos de otros) para obtener la tasa de fallas total del sistema o circuito. La inversa multiplicativa de dicha tasa determina el MTBF (o “tiempo medio entre fallas” por sus siglas en inglés) el cual es usado normalmente como una medida para comparar la “durabilidad” de circuitos y sistemas.

Las tasas de falla obtenidas son aplicables a equipos bajo condiciones normales de operación, con la alimentación conectada y cumpliendo las funciones para las cuales fueron diseñados y en sus entornos normales de trabajo. Las tasas base, pueden ser interpoladas a otras condiciones de funcionamiento utilizando las ecuaciones que la norma enuncia.

Las tablas de tasas de fallas se realizarán por tipo de componentes siendo algunos de sus factores involucrados, los siguientes:

λ_b : Tasa de falla base.

λ_p : Tasa de falla de la parte.

π_S : Factor de carga por estrés.

π_C : Factor de carga por capacidad.

π_V : Factor de carga por estrés de voltaje.

π_Q : Factor de carga por calidad.

π_E : Factor de carga por ambiente.

π_T : Factor de carga por temperatura.

Donde π_T se toma considerando un temperatura media de 50 grados celsius dentro del gabinete debido a la poca ventilación y la posibilidad de que le incida la luz solar⁷ (este es un enfoque pesimista ya que no todos los medidores se encuentran en el camino de la luz solar, pero muchos se encuentran instalados en las fachadas de las casas o comercios en un gabinete cerrado sin ventilación y con escasa posibilidades de disipación o

⁷ <https://dothemath.ucsd.edu/2012/01/basking-in-the-sun/>

transferencia de calor). Para los circuitos integrados (ICs) la temperatura refiere a la temperatura de junta y no del empaquetado y suele ser mayor que la ambiente dependiendo de muchos factores, los externos como la temperatura ambiente, la temperatura de la placa y los componentes adyacentes, la humedad, la ventilación, etc. y los internos como la frecuencia de reloj y el uso de recursos internos (controladores, periféricos, memoria, etc.). En última instancia la cantidad de transistores conmutando y su velocidad de conmutación. Se considera entonces que la temperatura de junta se eleva unos 20 grados celsius respecto a la temperatura ambiente tomando como referencia la figura 13 de Thermal management guidelines for STM32 applications (AN5036) de STMicroelectronics.

Para π_E se consideran sólo las dos primeras opciones de la lista (ver tabla 3-2, página 3-4 de la norma) por ser las únicas que consideran equipos estacionarios, pero se opta por usar la segunda, el entorno ground fixed (GF), ya que el ambiente no está completamente controlado pudiendo alcanzar temperaturas relativamente extremas (según lugar de instalación). Tampoco dispone de un mantenimiento fácilmente accesible como tendría un equipo médico o de laboratorio.

El factor de carga por calidad π_Q determina en gran medida el resultado final ya que se encuentra en todos los componentes y castiga severamente a los componentes comerciales o que no cumplen ninguna norma particular de confiabilidad. Es el elemento a mejorar si se quiere modificar ampliamente la confiabilidad final del sistema. Otra manera de mejorar la confiabilidad es usando componentes sobredimensionados, aceptando las consecuencias que eso pueda traer, al disminuir los factores de estrés como π_V y π_S (por ejemplo usar capacitores de 100 V máximos a sólo 10 V).

Para el caso se presentan las siguientes tablas con las tasas de fallas para cada tipo de componente empleado incluyendo solo los factores que la norma especifica para dicho tipo.

Cristales (Sección 19.1)						λ_p	$\times N$	$\lambda_p \times N$
Módulo	TAG	Freq (MHz)	λ_b	π_Q	π_E	[1/10 ⁶ hr]		[1/10 ⁶ hr]
FPGA	Cristal	12	0,02302	2,1	3	0,14504	1	0,14504
PLC	Cristal	20	0,02589	2,1	3	0,16313	1	0,16313
CPU	Cristal	8	0,02097	2,1	3	0,13213	1	0,13213
Total							3	0,44030

Tabla 52: Cálculo de tasa de fallas para los cristales.

Diodos (Sección 6.1 y 6.11)									λ_p	$\times N$	$\lambda_p \times N$
Módulo	TAG	Modelo	λ_b	π_T	π_S	π_C	π_Q	π_E	[1/10 ⁶ hr]		[1/10 ⁶ hr]
Contactador	D1	1N4148	0,00380	1,6	0,054	1	8	6	0,01576	1	0,01576
Contactador	OPTO	PC817	0,01300	2,1			8	2	0,43680	1	0,43680
Interfaz	LED1		0,00023	2,1			8	2	0,00773	1	0,00773
Interfaz	LED2		0,00023	2,1			8	2	0,00773	1	0,00773
Interfaz	LED3		0,00023	2,1			8	2	0,00773	1	0,00773
FPGA	Diodos		0,00380	1,6	0,054	1	8	6	0,01576	4	0,06304
Total										9	0,53878

Tabla 53: Cálculo de la tasa de fallas para los diodos.

Integrados (Sección 5.1, 5.8, 5.9 y 5.10)											λ_p	$\times N$	$\lambda_p \times N$
Módulo	TAG	Tecnología	C_1	π_T	C_2	λ_{cyc}	π_L	π_Q	π_E	[1/10 ⁶ hr]		[1/10 ⁶ hr]	
ed. Tensión	OPAv	OPA2365	0.0100	2.8	0.0062		1	10	2	0.4040	1	0.404	
ed. Tensión	ADCv	ADC121S101	0.0400	0.6	0.0025		1	10	2	0.2900	1	0.290	
ed. Tensión	ISOv	ISO7631	0.0200	0.6	0.0062		1	10	2	0.2440	1	0.244	
ed. Corriente	OPAi	OPA2365	0.0100	2.8	0.0062		1	10	2	0.4040	1	0.404	
ed. Corriente	ADCi	ADC121S101	0.0400	0.6	0.0025		1	10	2	0.2900	1	0.290	
ed. Corriente	BUF	BA8522	0.0100	2.8	0.0034		1	10	2	0.3480	1	0.348	
l. Alimentación	VRv	LP2950-5.0	0.0100	2.8	0.0012		1	10	2	0.3040	1	0.304	
l. Alimentación	VRi	LP2950-3.3	0.0100	2.8	0.0012		1	10	2	0.3040	1	0.304	
l. Alimentación	NKE	NKE1209	0.0100	2.8	0.0016		1	10	2	0.3120	1	0.312	
CPU	U1	STM32F103C8T6	0.5600	0.6	0.0190		1	10	2	3.7400	1	3.740	
CPU	VR	LP2950-3.3	0.0100	2.8	0.0012		1	10	2	0.3040	1	0.304	
Contactador	U1	SN74LVC1G17	0.0100	2.8	0.0034		1	10	2	0.3480	1	0.348	
FPGA	Memoria		0.0750	0.3	0.0034	0	1	10	2	0.2855	1	0.285	
FPGA	Regulador		0.0100	0.3	0.0016		1	10	2	0.0610	2	0.122	
FPGA	FTDI		0.5800	0.3	0.0190		1	10	2	2.0620	1	2.062	
FPGA	FPGA		0.5800	0.3	0.0190		1	10	2	2.0620	1	2.062	
Regulador	U5		0.0100	0.3	0.0016		1	10	2	0.0610	1	0.061	
Regulador	U6		0.0100	0.3	0.0034		1	10	2	0.0970	1	0.097	
ATPL230A	U1		0.5800	0.3	0.0410		1	10	2	2.5020	1	2.502	
Total											20	14.48	

Tabla 54: Cálculo de la tasa de fallas para los circuitos integrados.

Inductores (Sección 11.2)							λ_p	$\times N$	$\lambda_p \times N$
Módulo	TAG	λ_b	π_T	π_Q	π_E	[1/10 ⁶ hr]		[1/10 ⁶ hr]	
Med. Alimentación	L	0,00003	1,4	3	6	0,00076	1	0,00076	
FPGA		0,00003	1,4	3	6	0,00076	4	0,00302	
PLC		0,00003	1,4	3	6	0,00076	5	0,00378	
Total							10	0,00756	

Tabla 55: Cálculo de la tasa de fallas para los inductores.

Relés (Sección 13.1)										λ_p	$\times N$	$\lambda_p \times N$
Módulo	TAG	S	λ_b	π_L	π_C	π_{cyc}	π_F	π_Q	π_E	[1/10 ⁶ hr]		[1/10 ⁶ hr]
Contactor	Contactor	1	0,0098	4.77	2	0,1	5	2,9	2	0,05684	1	0,05684
Total											1	0,05684

Tabla 56: Cálculo de la tasa de fallas para los relés.

Resistores (Sección 9.1)												λ_p	$\times N$	$\lambda_p \times N$
Módulo	TAG	Potencia (mW)	Power Rating (mW)	Tecnología	λ_b	π_T	π_P	π_S	π_Q	π_E	[1/10 ⁶ hr]		[1/10 ⁶ hr]	
Med. Tensión	R1av	125	250	Metal Film	0,00370	1,3	0,44442	1,23061	10	4	0,10523	1	0,10523	
Med. Tensión	R1bv	3,4	250	Metal Film	0,00370	1,3	0,10896	0,72070	10	4	0,01511	1	0,01511	
Med. Tensión	Raav	1,4	250	Metal Film	0,00370	1,3	0,07709	0,71439	10	4	0,01060	1	0,01060	
Med. Tensión	Rabv	0,02	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,01470	0,71012	10	4	0,00201	1	0,00201	
Med. Tensión	Rbav	1,4	250	Metal Film	0,00370	1,3	0,07709	0,71439	10	4	0,01060	1	0,01060	
Med. Tensión	Rbbv	0,04	250	Metal Film	0,00370	1,3	0,01927	0,71012	10	4	0,00263	1	0,00263	
Med. Tensión	R2v	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Tensión	Rfv	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Tensión	Rad1v	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Tensión	Rad2v	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Tensión	Rad3v	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Corriente	Rsa	45	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,29837	1,05497	10	4	0,06056	1	0,06056	
Med. Corriente	Rsb	45	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,29837	1,05497	10	4	0,06056	1	0,06056	
Med. Corriente	Rai	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Corriente	R1i	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Corriente	R2i	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Corriente	Rfi	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Corriente	Rad1i	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Corriente	Rad2i	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Corriente	Rad3i	0,001	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,00457	0,71001	10	4	0,00062	1	0,00062	
Med. Alimentación	Rledv	0,1	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,02754	0,71063	10	4	0,00377	1	0,00377	
Med. Alimentación	Rledi	0,1	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,02754	0,71063	10	4	0,00377	1	0,00377	
Contacor	R1	2,4	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,09512	0,72515	10	4	0,01327	1	0,01327	
Contacor	R2	25	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,23724	0,88471	10	4	0,04038	1	0,04038	
Contacor	R24	0,1	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,02754	0,71063	10	4	0,00377	1	0,00377	
CPU	R1	20	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,21747	0,84663	10	4	0,03542	1	0,03542	
CPU	R2	1	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,06761	0,71628	10	4	0,00932	1	0,00932	
CPU	R3	0,1	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,02754	0,71063	10	4	0,00377	1	0,00377	
CPU	R4	0,1	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,02754	0,71063	10	4	0,00377	1	0,00377	
CPU	R5	20	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,21747	0,84663	10	4	0,03542	1	0,03542	
CPU	R6	0,01	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,01122	0,71006	10	4	0,00153	1	0,00153	
FPGA	Res x88	10	125	Metal Film	0,00370	1,3	0,16596	0,77531	10	4	0,02476	88	2,17853	
Total												119	2,60750	

Tabla 57: Cálculo de la tasa de fallas para los resistores.

Transistores (Sección 6.3)										λ_p	$\times N$	$\lambda_p \times N$
Módulo	TAG		λ_b	π_T	π_A	π_R	π_S	π_Q	π_E	[1/10 ⁶ hr]		[1/10 ⁶ hr]
Contactor	Q1	FMMT614TA	0,00074	1,7	0,7	0,77	0,11	8	6	0,0036	1	0,0036
Total											1	0,0036

Tabla 58: Cálculo de la tasa de fallas para los transistores.

Capacitores (Sección 10.1)											λ_p	x	$\lambda_p \times N$
Módulo	TAG	Capacidad (nF)	S	Vmax	λ_b	π_T	π_C	π_V	π_Q	π_E	[1/10 ⁶ hr]	N	[1/10 ⁶ hr]
Med. Tensión	C1v	18	0,03	100	0,00099	2,9	0,69659	1,00000	10	10	0,19999	1	0,19999
Med. Tensión	C2v	18	5	100	0,00099	2,9	0,69659	1,00058	10	10	0,20011	1	0,20011
Med. Tensión	Cfv	0,68	5	100	0,00099	2,9	0,51871	1,00058	10	10	0,14901	1	0,14901
Med. Tensión	CdOPAv	100	5	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00058	10	10	0,23350	1	0,23350
Med. Tensión	CdADCv1	100	5	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00058	10	10	0,23350	1	0,23350
Med. Tensión	CdADCv2	1000	5	100	0,00099	2,9	1,00000	1,00058	10	10	0,28727	1	0,28727
Med. Tensión	CdISO1	100	5	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00058	10	10	0,23350	1	0,23350
Med. Tensión	CdISO2	100	3,3	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00017	10	10	0,23340	1	0,23340
Med. Corriente	C1i	82	0,15	100	0,00099	2,9	0,79844	1,00000	10	10	0,22923	1	0,22923
Med. Corriente	C2i	18	3,3	100	0,00099	2,9	0,69659	1,00017	10	10	0,20002	1	0,20002
Med. Corriente	CdOPAi	100	3,3	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00017	10	10	0,23340	1	0,23340
Med. Corriente	CdBUF1	100	12	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00800	10	10	0,23523	1	0,23523
Med. Corriente	CdBUF2	100	12	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00800	10	10	0,23523	1	0,23523
Med. Corriente	CdSen1	100	12	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00800	10	10	0,23523	1	0,23523
Med. Corriente	CdSen2	100	12	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00800	10	10	0,23523	1	0,23523
Med. Corriente	Cfi	0,68	3,3	100	0,00099	2,9	0,51871	1,00017	10	10	0,14895	1	0,14895
Med. Corriente	CdADCi1	100	3,3	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00017	10	10	0,23340	1	0,23340
Med. Corriente	CdADCi2	1000	3,3	100	0,00099	2,9	1,00000	1,00017	10	10	0,28715	1	0,28715
Med. Alimentación	Cvrv1	10000	5	100	0,00099	2,9	1,23027	1,00058	10	10	0,35341	1	0,35341
Med. Alimentación	Cvrv2	1000	5	100	0,00099	2,9	1,00000	1,00058	10	10	0,28727	1	0,28727
Med. Alimentación	Cvrv3	100	5	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00058	10	10	0,23350	1	0,23350
Med. Alimentación	Cvrv4	1000	5	100	0,00099	2,9	1,00000	1,00058	10	10	0,28727	1	0,28727
Med. Alimentación	Cvri1	10000	3,3	100	0,00099	2,9	1,23027	1,00017	10	10	0,35327	1	0,35327
Med. Alimentación	Cvri2	1000	3,3	100	0,00099	2,9	1,00000	1,00017	10	10	0,28715	1	0,28715
Med. Alimentación	Cvri3	100	3,3	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00017	10	10	0,23340	1	0,23340
Med. Alimentación	Cvri4	1000	3,3	100	0,00099	2,9	1,00000	1,00017	10	10	0,28715	1	0,28715
CPU	C2	1000	3,3	100	0,00099	2,9	1,00000	1,00017	10	10	0,28715	1	0,28715
CPU	C3	100	3,3	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00017	10	10	0,23340	1	0,23340
CPU	C4	100	3,3	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00017	10	10	0,23340	1	0,23340
CPU	C5	1000	3,3	100	0,00099	2,9	1,00000	1,00017	10	10	0,28715	1	0,28715
CPU	C6	10000	3,3	100	0,00099	2,9	1,23027	1,00017	10	10	0,35327	1	0,35327
CPU	C8	100	3,3	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00017	10	10	0,23340	1	0,23340
CPU	C9	0,02	3,3	100	0,00099	2,9	0,37765	1,00017	10	10	0,10844	1	0,10844
CPU	C10	100	3,3	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00017	10	10	0,23340	1	0,23340
CPU	C11	100	3,3	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00017	10	10	0,23340	1	0,23340
CPU	C12	0,02	3,3	100	0,00099	2,9	0,37765	1,00017	10	10	0,10844	1	0,10844
CPU	C13	0,02	3,3	100	0,00099	2,9	0,37765	1,00017	10	10	0,10844	1	0,10844
CPU	C14	0,02	3,3	100	0,00099	2,9	0,37765	1,00017	10	10	0,10844	1	0,10844
FPGA	Cap x10	1000	3,3	100	0,00099	2,9	1,00000	1,00017	10	10	0,28715	10	2,87148
FPGA	Cap x13	100	3,3	100	0,00099	2,9	0,81283	1,00017	10	10	0,23340	13	3,03423
Total												61	14,79981

Tabla 59: Cálculo de la tasa de fallas para los capacitores.

La suma total de las tasas de fallas por tipo de componente es $48.8514 \times 10^{-6} \text{hs}^{-1}$ e incluye la tasa de fallas del módulo de alimentación ($2.5 \times 10^{-6} \text{hs}^{-1}$), el cual se encuentra tercerizado y cuyo valor viene especificado en su respectiva hoja de datos. Dicha tasa se traduce a un MTBF (la inversa multiplicativa de la tasa de fallas) de aproximadamente dos años y dos meses (2.336 años), considerando que un año tiene 8760 horas (365 días), lo cual es considerablemente más bajo que lo que se espera de un medidor energético, teniendo en cuenta que los medidores electromecánicos instalados actualmente llevan más 50 años en funcionamiento. Este valor se puede mejorar sustancialmente al tratarse sólo de la primera iteración del método: ahora que se conocen los elementos que más contribuyen a

la tasa de fallas se los puede modificar o cambiar por otros mejores: estos son los circuitos integrados dada su relativa complejidad y cantidad de posibles modos de fallas, y a los capacitores y resistores, principalmente debido a la gran cantidad de ellos. También se puede mejorar el MTBF considerando normas más recientes, teniendo en cuenta que la empleada es relativamente antigua, redactada en la década de los 90, y que carece de normativas adecuadas para muchos de los avances en los últimos 20 o 30 años.

En conclusión y dado que el uso del MTBF no es un estándar ni está especificado para los distintos productos, sino que se usa como una medida de comparación y da hincapié en qué componentes modificar para obtener un producto más durable: lo primero sería reducir la cantidad de circuitos integrados, por ejemplo haciendo una mejor administración de la alimentación general usando solo algunos reguladores de gran corriente y no muchos de poca (aunque habría que ver cada caso en particular). Mejorando el factor de calidad o el factor ambiental (que afecta a todos los componentes) se puede lograr una mejora significativa de algunos años (según los valores empleados se pueden superar los 20 años). Por último, la temperatura juega un papel crucial en todos los componentes, pero sobre todo en los resistores, pues su capacidad de disipar energía se ve limitada al elevar la temperatura, haciendo que sobredimensionarlos pueda tener sentido, además de utilizar un buen gabinete y elegir su ubicación cuidadosamente (la incidencia de luz solar es crítica).

Puesto que se trata de la primera instancia de un producto y que por ende nunca ha sido mejorado (primera iteración en el proceso de mejora) se acepta el MTBF obtenido y se lo considera la base para futuros diseños y mejoras. Como se menciona en el párrafo anterior, eligiendo componentes de calidad superior se puede mejorar aproximadamente 10 veces el MTBF y, de forma considerable, la probabilidad de fallas, que se reduce aproximadamente 5 veces para el caso de 5 años (no hay una relación lineal) y llega a valer 78.92 % recién a los 50 años. Se espera entonces una vida útil de 10 a 15 años considerando una tasa de fallas no tan generosa como la mejorada pero ciertamente mejor que la primera calculada (para una tasa de $10/(10^6 \text{ hs})$ se obtiene una probabilidad de fallas del 58.36 % a los 10 años). En la siguiente tabla se muestra un resumen de las tasas de fallas por tipo de componente y según el módulo al que pertenecen.

Tipo de Componente	Tasa de Fallas [1/10 ⁶ hs]	Módulo	Tasa de Fallas [1/10 ⁶ hs]	Probabilidad de fallas a un año [%]	Probabilidad de fallas a cinco años [%]
Resistores	2.60749727	Alimentación	2.50000000	2.17	10.37
Capacitores	14.79981313	Contactador	0.91840025	0.80	3.94
Inductores	0.00756000	CPU	6.79370334	5.78	25.74
Diodos	0.53878080	FPGA	12.82684608	10.63	42.98
ICs	14.48350000	Interfaz	0.02318400	0.02	0.10
Transistores	0.00358017	Sensado	9.54882823	8.02	34.18
Cristales	0.44029563	Varios	2.82690510	2.45	11.65
Relés	0.05684000	Total	35.43786699	26.69	78.82
		Total (mejorado)	3.55438489	3.07	14.42

Tabla 60: Cálculo de la tasa y probabilidad de fallas según tipo de componente y módulo.

11 Construcción del prototipo

Para la construcción del prototipo se prioriza un diseño que facilite el armado y desarmado mecánico del medidor y la rápida implementación de modificaciones de software en la unidad central de procesamiento. También se reemplazaron algunos elementos elegidos por otros similares de los que ya se disponían, o más económicos y disponibles en el mercado local. De esta manera se pudo reducir el tiempo de adquisición y el costo de envío.

11.1 Diseño de los circuitos impresos

Los circuitos impresos se diseñaron usando el programa libre y gratuito KiCad siguiendo las recomendaciones de los fabricantes respecto a los componentes y al PCB, considerando las dimensiones de los footprints y ubicaciones relativas, tamaño de las pistas, cercanía a la fuente de alimentación, tamaño de agujeros, distancias mínimas entre componentes y capacitores de desacople.

La mayoría de los componentes tienen un único footprint de fábrica. En el caso de los resistores y capacitores se pudo optar por emplear componentes SMD con el fin de reducir el tamaño de la placa. En particular se usó el tamaño 0805 ya que es el mínimo que se pudo soldar a mano.

Luego del diseño, las placas se mandaron a fabricar a Seeed⁸ empleando un panelizado para maximizar la obtención de placas por el mismo costo. En cambio la placa madre se fabricó manualmente ya que consta principalmente, junto con algunos resistores y pines de prueba, de elementos en donde se conectan cada uno de los módulos empleados. Se tuvo en cuenta la orientación de cada módulo a fin de poder programarlos fácilmente, y poder extraer de manera sencilla la memoria SD en caso del módulo de almacenamiento.

11.2 Diferencias respecto al Producto Final

Alimentación

La alimentación en el prototipo se basa principalmente en el módulo RAC10-12DK/277. Este circuito integrado alimenta con ± 12 VDC a los circuitos de medición, al sensor de corriente y al contactor.

Por otro lado se tiene el transformador de 220 a 12 Vrms, con un rectificador de onda completa, y un convertidor Buck LM2596, que reduce la tensión a 5 VDC. Esta rama del módulo de alimentación alimenta la FPGA, la unidad central de procesamiento, la interfaz de usuario, el módulo WiFi, y el módulo de memoria SD. Este esquema de alimentación separada se planteó inicialmente ya que se pensaba usar el módulo de PLC para hacer la transmisión de datos, el cual necesita de la salida de 12 VAC del transformador para detectar cruces por cero. Se desestimó el uso de PLC para el prototipo, como se detalla en el apartado “Comunicación” más abajo, pero se conservaron las ramas de alimentación.

⁸ <https://www.seeedstudio.com/fusion.html>

La siguiente figura muestra las ramas del circuito de alimentación contemplando la inclusión del módulo de comunicación PLC. Se resaltan las partes del prototipo que fueron desestimadas.

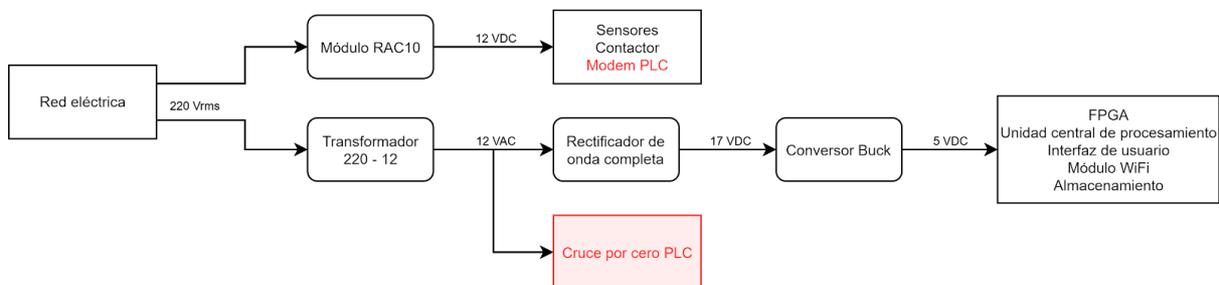


Figura 50: Ramas de alimentación del sistema.

Contactor

Mientras que el circuito del driver permanece inalterado, el contactor en sí se reemplazó debido a costos y disponibilidad por uno disponible en el CIDEI. Dicho contactor es el DIL EEM-10-G de Moeller que permite una corriente máxima de hasta 20 Arms. Este contactor es trifásico con un par de contactos auxiliares y una bobina de 24 V y aproximadamente 200 Ω (120 mA @ 24 V).



Figura 51: Contactor DIL EEM-10-G de Moeller empleado en el prototipo. De izquierda a derecha los contactos son: los tres interruptores principales, el auxiliar y la bobina.

CPU

Se utilizó el mismo microcontrolador STM32f103C8T6 que el propuesto para el producto final, en particular implementado en una placa de desarrollo comercial llamada BluePill que ya cuenta con los componentes necesarios para su funcionamiento. Se opta por dicha placa debido a su precio económico, alta disponibilidad local, es Arduino-compatible, y cuenta con las conexiones necesarias accesibles a sus pines para desarrollar las funcionalidades del medidor.

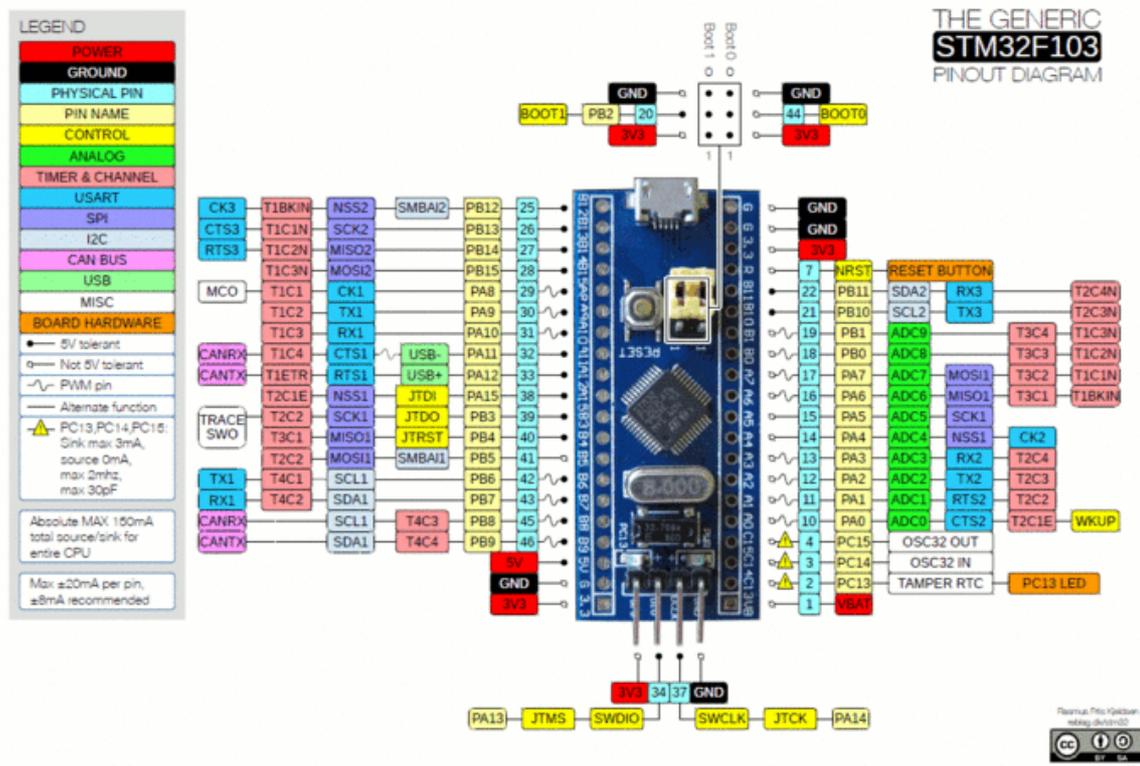


Figura 52: Diagrama funcional de los pines de la placa Arduino-compatible BluePill usada en el prototipo como módulo central de procesamiento.

Comunicación

Se analizaron diseños PLCs de diversas empresas como Atmel para implementar el módulo de comunicación. Se desarrolló un modelo propio adaptando dichos diseños a las prestaciones necesarias para este proyecto.

Sin contar con experiencia previa en el uso de la tecnología PLC, y luego de varias pruebas fallidas del modelo adaptado propio, finalmente se decidió reemplazar la tecnología PLC por otra comunicación estándar siguiendo el lineamiento de IoT (Internet of Things), inalámbrica por practicidad y en la cual sí se cuente con experiencia previa y extensa documentación disponible.

Tras la elección de la placa BluePill como módulo de unidad central de procesamiento, se opta por una placa de desarrollo llamada Wemos D1 mini de similar precio, alta disponibilidad local, también Arduino-compatible, que permite comunicación WiFi y HTTP con pila TCP/IP completa y cuenta con las conexiones necesarias accesibles a sus pines para desarrollar las funcionalidades del medidor.

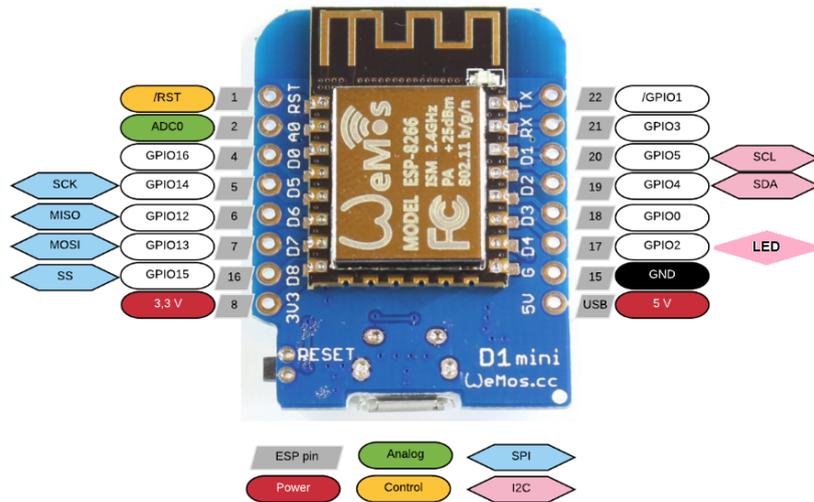


Figura 53: Diagrama funcional de los pines de la placa Arduino-compatible Wemos D1 mini usada en el prototipo como módulo de comunicación.

Cabe destacar que el reemplazo fue sencillo ya que el prototipo cuenta con la modularidad propuesta en el producto final. El funcionamiento del sistema es transparente respecto a la capa física de transmisión que se emplee.

Al realizar el reemplazo fue necesario además generar una red LAN inalámbrica a la cual deben estar conectados tanto el concentrador como este nuevo módulo de comunicación WiFi. Se programó una computadora portátil con el fin de actuar como concentrador, es decir, recibir los datos del módulo de comunicación y mostrarlos en pantalla.

11.3 Diseño mecánico

El elemento estructural principal que se eligió fueron dos cajones de fibrofácil de 315x200x70 mm³ que ya se tenían a disposición y los cuales se unieron en oposición con bisagras, permitiendo un espacioso interior y un fácil acceso a el interior. El fibrofácil permite un maquinado sencillo tanto con herramientas eléctricas como manuales.

La sujeción de los elementos internos se realizaron mediante tornillos con tuerca o con el propio elemento (por ejemplo porta-LEDs y pulsadores cuentan con elementos roscados para su propio montaje). Se crearon compartimientos internos empleando retazos de madera pegados con cola o pegamento caliente.

Dado que el contactor utilizado para el prototipo es de hasta 20 Arms (especificado paracargas IEC/AC-1, con coseno phi entre 0.95 y 1, lo esperable de la mayoría de los electrodomésticos encontrados en las residencias), para la entrada del medidor se usaron dos conectores power (IEC 60320) macho (C14), cada uno capaz de conducir 10 A. Si bien existen conectores IEC para mayores corrientes, son difíciles de conseguir y poco económicos en comparación con los C13 y C14 que se consiguen fácilmente y prácticamente sin costo. Se emplearon cables de cobre de 6 mm² de sección para todo el conexionado interno de medición (tomando una densidad de corriente máxima de 6 A/mm²,

se necesitan 6 mm² para 36 Arms) y de 0.25 mm (cable de propósito general ya disponible) para todo lo demás.

En cuanto al conexionado a la red, por simplicidad se optó por hacerlo para que el medidor no mida su propio consumo. No obstante es posible reconectar para que si lo haga. Ambas configuraciones son válidas y dependerá del distribuidor que instale los medidores.

11.4 Precauciones especiales de montaje

1. La conexión de tierra no debe pasar por el contactor.
2. Tener en cuenta si se desea o no medir el consumo del propio medidor.
3. Tener en cuenta el sentido de circulación de la energía: el sentido marcado en la placa de medición es el de consumo, va de proveedor a usuario.

A continuación se muestran la tapa superior en la figura 54, la vista interior en la figura 55 y finalmente la placa madre en funcionamiento y los periféricos, figuras 56 y 57.

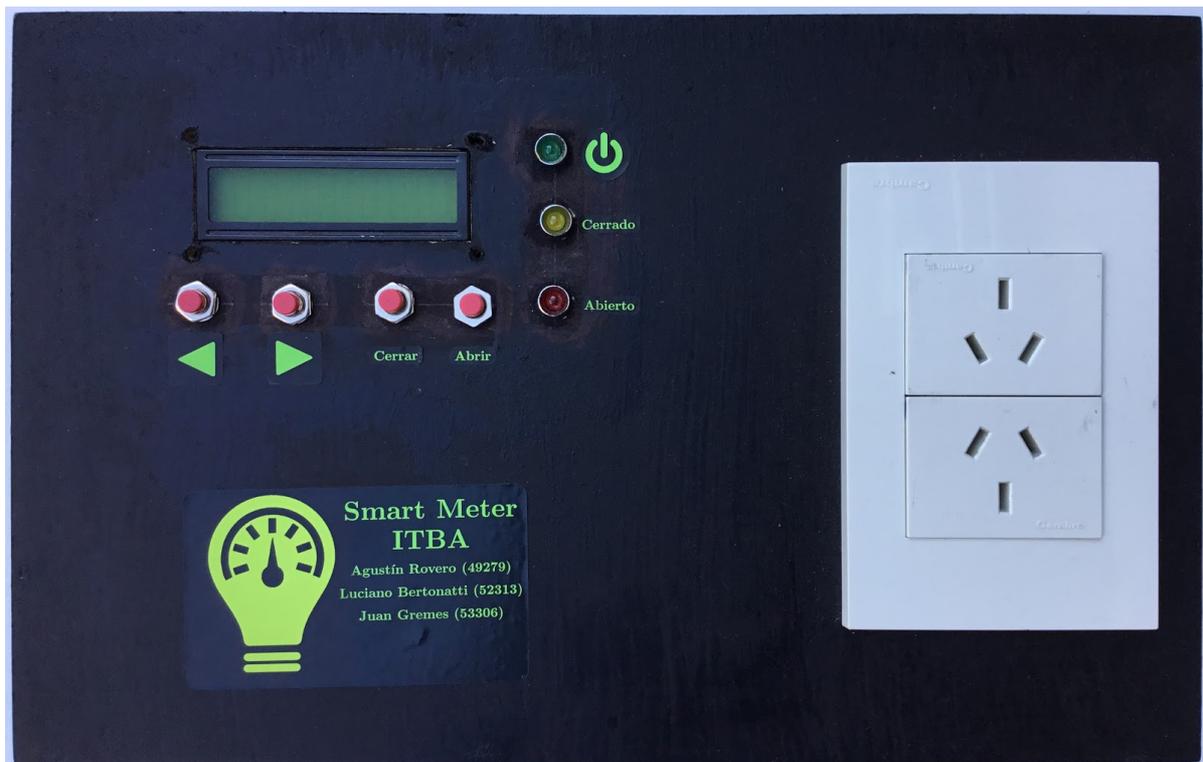


Figura 54: Vista exterior del gabinete.

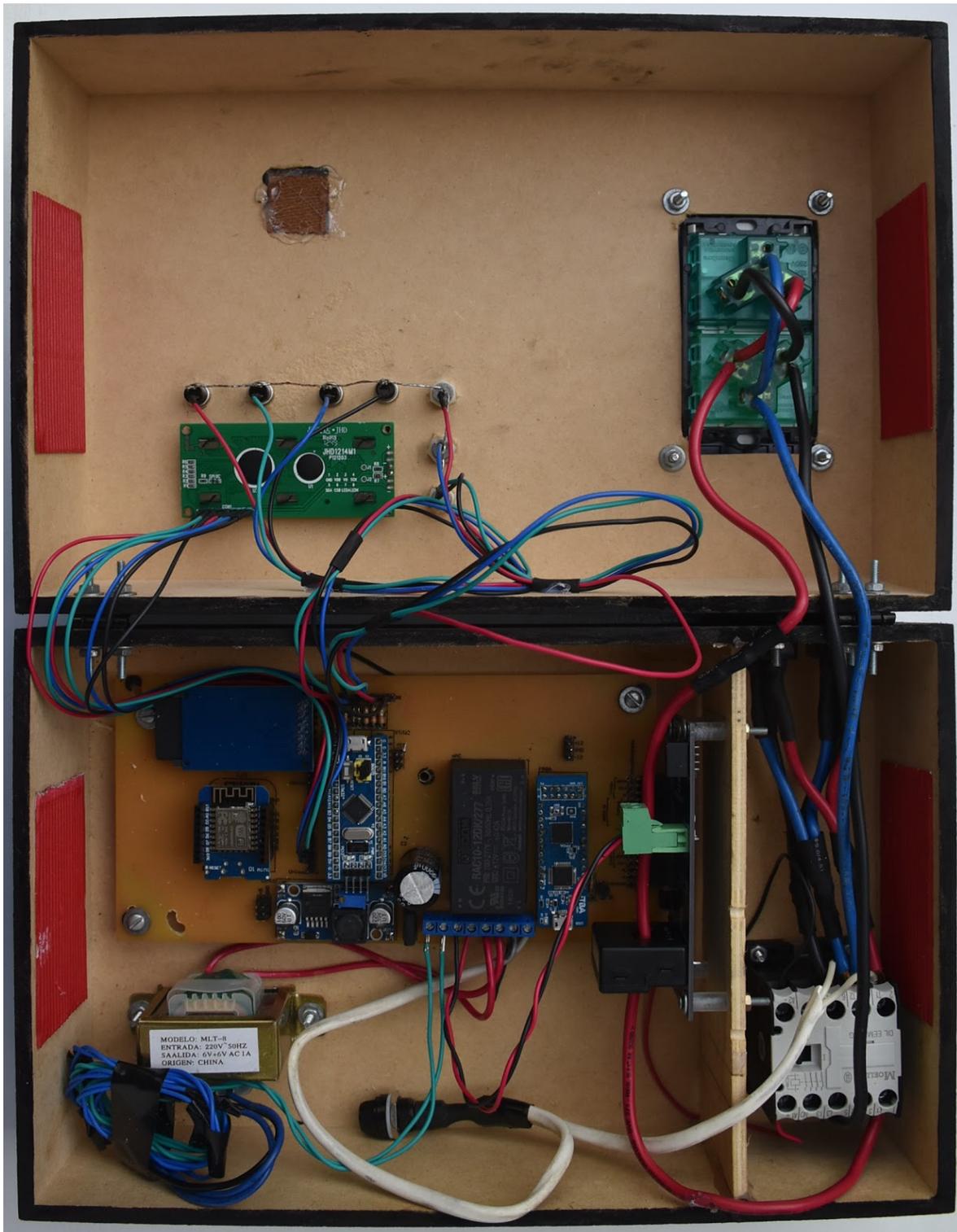


Figura 55: Imagen interior del gabinete. Se puede observar la 'Placa madre con la mayoría de la electrónica, el transformador abajo a la izquierda, el contactor abajo a la derecha, la entrada de alimentación/suministro arriba del contactor, la salida de suministro arriba a la derecha y los elementos de la interfaz arriba a la izquierda.

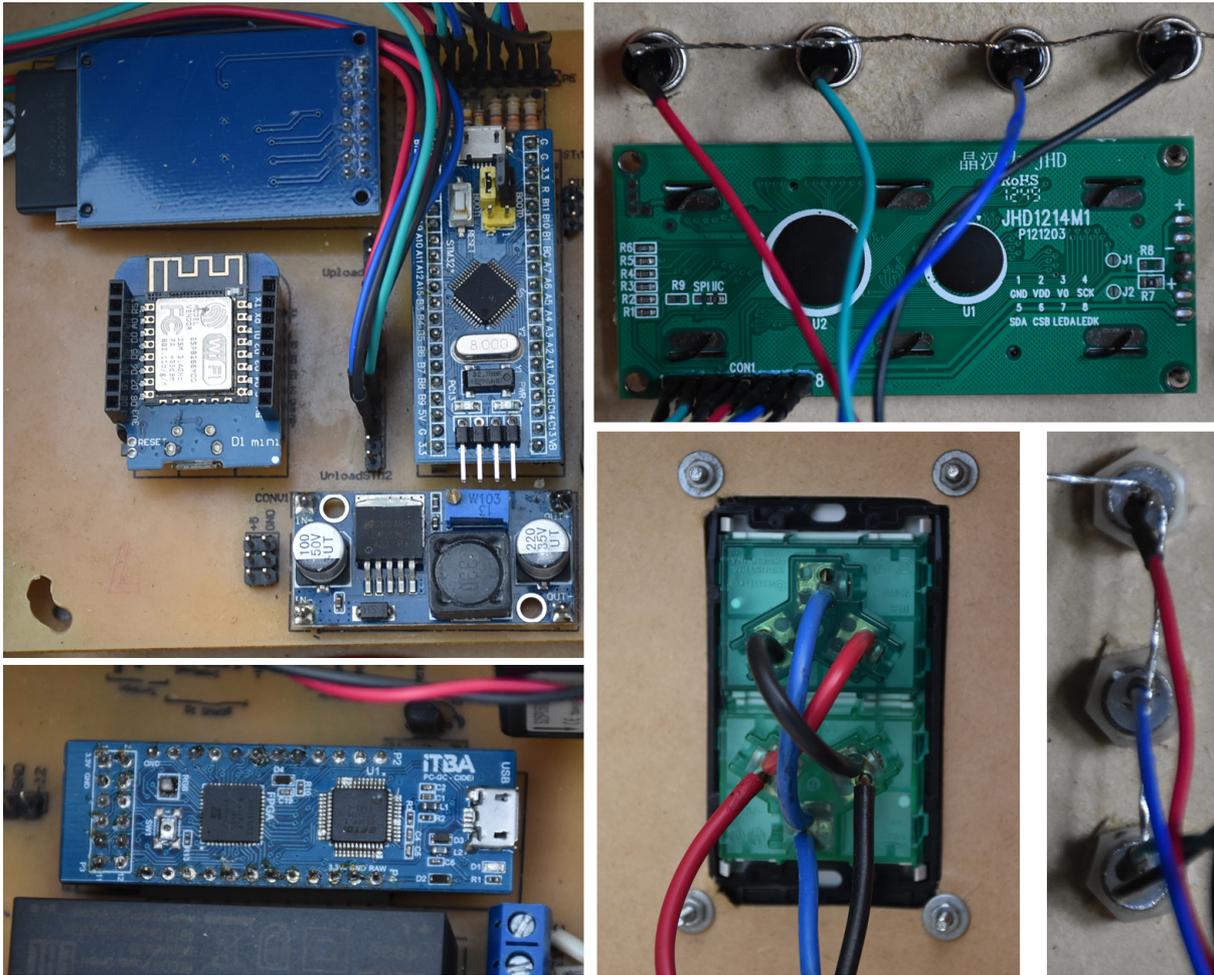


Figura 56: Acercamiento a algunas de las partes interiores del medidor. Se observan el microcontrolador STM junto con el módulo WIFI (D1 mini), el módulo SD y el convertidor DC/DC arriba a la izquierda; la FPGA abajo a la izquierda; la parte trasera del display y los botones arriba a la derecha; el conexionado de la salida abajo en el centro, y la parte trasera de los LEDs abajo a la derecha.

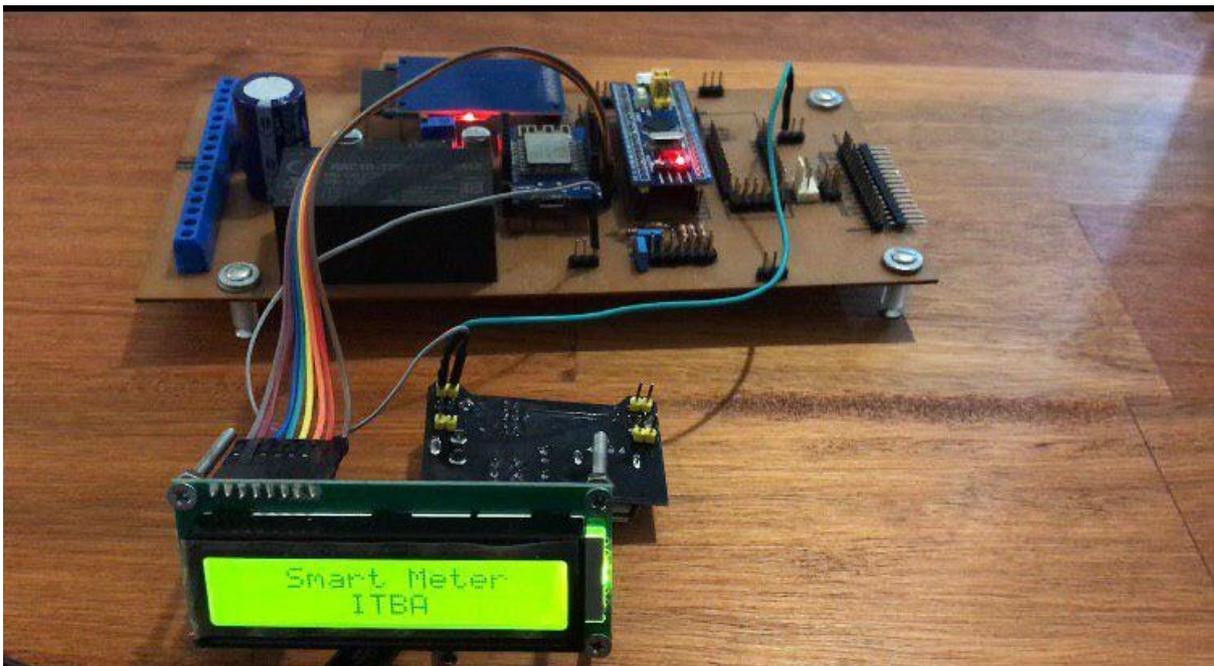


Figura 57: Prueba de funcionamiento del display y de la placa madre sin el módulo de medición.

11.5 Software

El programa principal de la CPU no varía en relación al funcionamiento general propuesto para el producto final pues se implementó con el mismo microcontrolador. Por otro lado, como se menciona anteriormente en la sección [11.2 Diferencias respecto al Producto Final](#), fue necesario implementar una computadora portátil como concentrador con el fin de probar el funcionamiento del módulo de comunicación y poder mostrar los datos relevados del medidor. Para ello se emplea el paquete de software libre Xampp en el ordenador como sistema de gestión del servidor web Apache y de la base de datos MySQL.

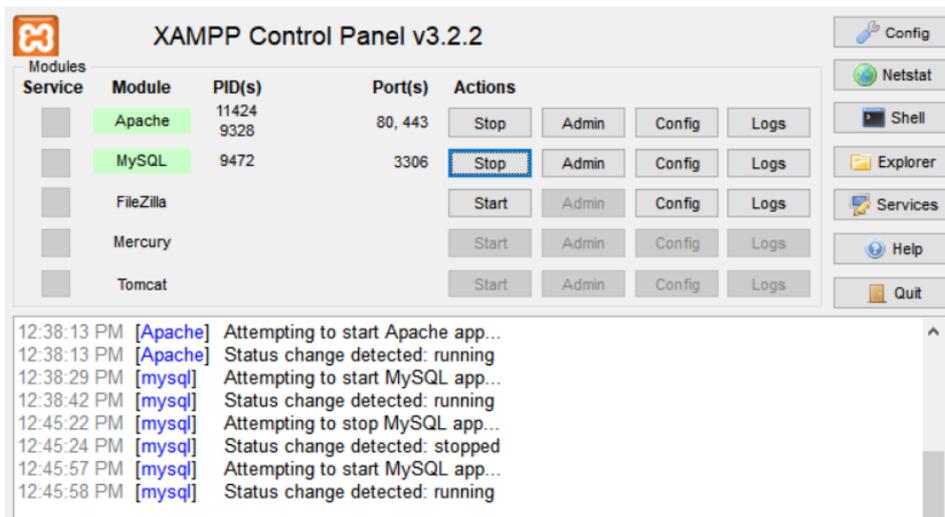


Figura 58: Sistema de gestión Xampp corriendo Apache y MySQL.

Se crea una red LAN con acceso a Internet a la cual deben estar conectados la computadora (servidor), la placa de comunicación WiFi Wemos D1 mini (cliente) y todo aquel dispositivo que desee hacer consultas a la base de datos (clientes). El motivo del acceso a Internet es para que al energizar o inicializar el medidor, la placa Wemos pueda realizar una petición HTTP hacia un servidor de tiempo, reciba la fecha y hora actuales y luego le transmita dicha información a la CPU para ajustar el RTC.

Siempre que Apache esté corriendo, el servidor se encuentra escuchando el puerto 80 a la espera de una petición HTTP de sus clientes. En particular en este proyecto las peticiones se limitan a tres situaciones que se describen a continuación: subir datos a SQL, mostrar datos desde SQL hacia clientes y conectarse al servidor de tiempo.



Figura 59: Esquema de comunicación general del prototipo. El medidor es el dispositivo IoT.

Subir datos a SQL

La computadora (o servidor) posee un programa en lenguaje PHP que recibe los datos enviados por la placa Wemos, realiza la Transformada Discreta de Fourier de los datos HST, calcula las THDs de tensión y corriente, y ejecuta las consultas SQL pertinentes para cargar la información en las tablas de la base de datos. También ejecuta una política de retención que permite tener una cantidad total fija de entradas en las tablas de información y no se llene la base de datos.

Para que se ejecute este programa PHP la placa WiFi debe realizar una petición HTTP POST como cliente hacia la IP del servidor enviando los datos de medición y de HST con sus parejas apropiadas de key-value (etiqueta-valor) en el cuerpo del mensaje.

```
//***** 3) Sending Data

client.print(String("POST ") + url + " HTTP/1.0\r\n" +
              "Host: " + server_host + "\r\n" +
              "Accept: *" + "/" + "*\r\n" +
              "Content-Length: " + postData.length() + "\r\n" +
              "Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\r\n" +
              "\r\n" + postData);
```

Figura 60: Fragmento del programa C++ que corre en la placa Wemos donde se envían los datos al servidor por el método POST.

```

//***** 2) POST DATA FROM ESP8266

$Vpk_Max = $_POST ["Vpk_Max"];           //Tags received must match with WEMOS program!
$Vpk_Min = $_POST ["Vpk_Min"];
$Ipk_Max = $_POST ["Ipk_Max"];
$Ipk_Min = $_POST ["Ipk_Min"];
$Period = $_POST ["Period"];
$Vrms = $_POST ["Vrms"];
$Irms = $_POST ["Irms"];
$Pmean = $_POST ["Pmean"];
$Papp = $_POST ["Papp"];
$Pwr_Fact = $_POST ["Pwr_Fact"];
$Energy = $_POST ["Energy"];
$Bill = $_POST ["Bill"];

$Size_hst = intval($_POST ["Size_hst"]); //#samples for HST and DFT

//***** 3) HST DATA

$V_hst = array();
$I_hst = array();

for ($i = 0; $i < $Size_hst; ++$i)
{
    $aux_v = $_POST ["V_hst".strval($i)]; //Retrieve all hst values from POST
    $aux_i = $_POST ["I_hst".strval($i)];

    $V_hst[$i] = $aux_v;
    $I_hst[$i] = $aux_i;

    $hst_values[] = "(NULL,CURRENT_TIMESTAMP,'$aux_v','$aux_i)"; //array of Strings to INSERT
}

$hst_insert_sql = "INSERT INTO `hst` (`ID`, `Date_Time`, `V_Hst`, `I_Hst`) VALUES ";
$hst_insert_sql .= implode(', ', $hst_values); //format all Strings in only one separated by ','

```

Figura 61: Fragmento del programa PHP que corre en el servidor donde se reciben los pares etiqueta-valor de datos de medición y HST enviados por la placa Wemos.

```

require_once 'DFT.php';

$dft = new DFT($Size_hst); //create class DFT instance
$idft = new DFT($Size_hst);

$dft->calculate($V_hst); //Voltage DFT
$V_dft = $dft->getSpectra();
$V_Thd = 100*($dft->getTHD());

$idft->calculate($I_hst); //Current DFT
$I_dft = $idft->getSpectra();
$I_Thd = 100*($idft->getTHD());

//***** 5) INSERT DATA INTO DB

mysql_query ($conexion,"INSERT INTO `data` (`ID`, `Date_Time`, `Vpk_Max`, `Vpk_Min`, `Ipk_Max`, `Ipk_Min`, `Period`, `Vrms`, `Irms`, `Pmean`, `Papp`, `Pwr_Fact`, `Energy`, `Bill`, `V_Thd`, `I_Thd`
)
VALUES (NULL, CURRENT_TIMESTAMP, '$Vpk_Max', '$Vpk_Min', '$Ipk_Max', '$Ipk_Min', '$Period', '$Vrms', '$Irms', '$Pmean', '$Papp', '$Pwr_Fact', '$Energy', '$Bill', '$V_Thd', '$I_Thd');
");

mysql_query ($conexion,$hst_insert_sql); //HST DATA

```

Figura 62: Fragmento del programa PHP que corre en el servidor donde se calculan los valores de THD de tensión y corriente. Luego son subidos a la base de datos conjuntamente con los datos de medición.

ID	Date_Time	Vpk_Max	Vpk_Min	Ipk_Max	Ipk_Min	Period	Vrms	Irms	Pmean	Papp	Pwr_Fact	Energy	Bill	V_Thd	I_Thd
Borrar 1	2020-02-26 18:52:09	320.00	-320.00	20.00	-20.00	20.00	220.00	18.00	1500.00	1000.00	0.70	300.00	110.00	0.20	0.10
Borrar 2	2020-02-26 18:52:10	330.00	-330.00	30.00	-30.00	20.00	225.00	25.00	2000.00	1800.00	0.90	1000.00	500.00	0.30	0.20
Borrar 3	2020-02-26 18:52:11	320.00	-320.00	20.00	-20.00	20.00	220.00	18.00	1500.00	800.00	0.70	300.00	110.00	0.20	0.10

Figura 63: Tablas de la base de datos sm_id_000001 en SQL para guardar los datos de medición, de HST, de usuarios y de sus sesiones. En particular se muestra la tabla donde se guardan los datos de medición.

Mostrar datos desde SQL hacia clientes

Se pretende que el servidor pueda mostrar los valores medidos por el prototipo en forma de gráficos (usando Highcharts, www.highcharts.com) hacia clientes conectados en la misma red, como por ejemplo otras computadoras o teléfonos celulares. Para lograr esto se emplea un entorno de código abierto llamado NodeJs en la ejecución de los programas de red del servidor. Estos programas se escriben en el lenguaje JavaScript. El entorno es

multiplataforma, en tiempo de ejecución y permite escalabilidad de los programas. Se emplean diversos módulos o librerías que ayudan a la gestión del servidor y permiten desarrollar funcionalidades de manejo de usuarios (clientes) como registración, autenticación y sesiones.

Registro de Usuario Smart Meter

—Información de la Cuenta—

Usuario* Usuario (Maximo 15 caracteres) Email* Email

Password* Password (Minimo 8 caracteres) Repita Password* Repita Password

—Información Personal—

Nombre

Telefono

Pais

Ciudad

Direccion

—Terminos y Condiciones—

Acepto los terminos y condiciones [Politica de Privacidad de Datos](#)

Quiero recibir ofertas y novedades de mi proveedor de energia electrica

Registrarse

Figura 64: Portal que muestra el servidor para la registración de usuario.

Base de Datos Smart Meter - ID 000001

Usuario

Password

Ingresar

Recuerdame [Recuperar Password](#)

Figura 65: Portal que muestra el servidor para logueo del usuario.

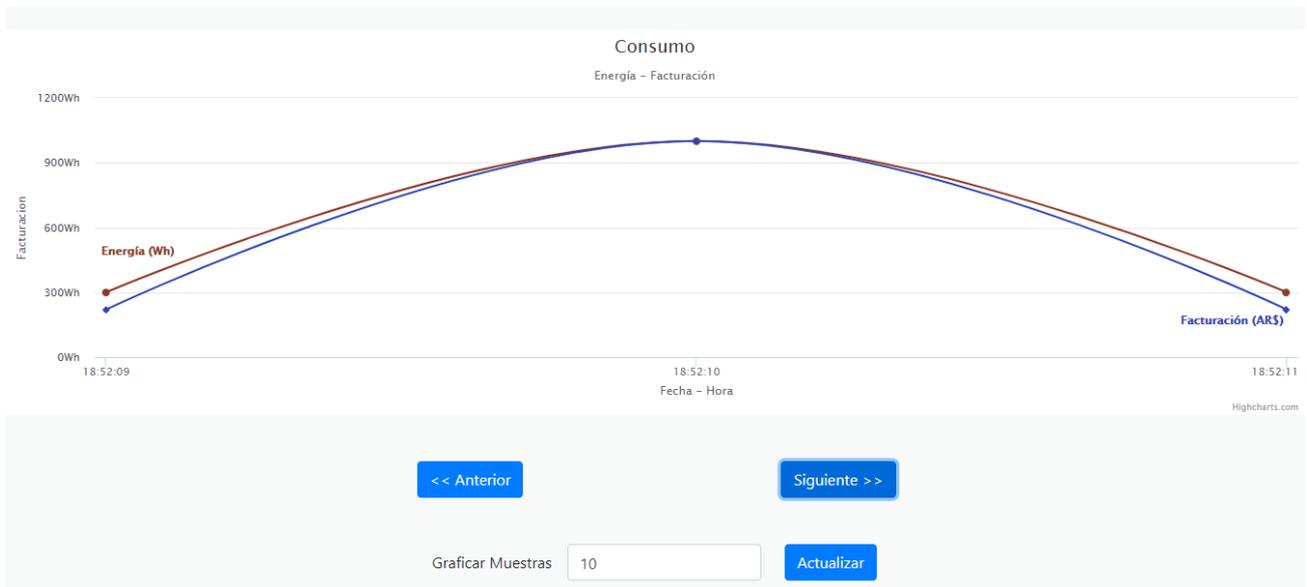


Figura 66: Ejemplo de gráfico de Facturación y Consumo que puede ver el cliente una vez autenticado su usuario. Notar que al ser un medidor bidireccional si el cliente entrega energía a la red, se descuenta de su consumo y facturación.

Conectarse al servidor de tiempo

La placa Wemos simplemente realiza una conexión como cliente hacia el servidor de tiempo y recibe su respuesta. Comienza a leer el encabezado HTTP recibido hasta encontrar los datos de interés de fecha y hora.

```
//Connect to time host and get datetime in HTTP format.
String Http_Time ()
{
    WiFiClient client;
    while (!client.connect(time_host, HTTP_PORT))
        Serial.print("Connection to "); Serial.print(time_host); Serial.println(" failed, retrying...");

    client.print("HEAD / HTTP/1.1\r\n\r\n"); //ask host for only header, not the body!
    while(!client.available())
        yield();
    while(client.available()) //search the field "Date:"
    {
        if (client.read() == '\n')
        {
            if (client.read() == 'D')
            {
                if (client.read() == 'a')
                {
                    if (client.read() == 't')
                    {
                        if (client.read() == 'e')
                        {
                            if (client.read() == ':')
                            {
                                client.read();
                                String theDate = client.readStringUntil('\r'); //read the Date in HTTP format
                                client.stop();
                                return theDate;
                            }
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}
```

Figura 67: Fragmento del programa C++ que corre en la placa Wemos donde se reciben los datos de fecha y hora del servidor de tiempo.

Además del guardado de datos cada periodo $T_{comunic}$ en el servidor concentrador, el medidor también envía cada T_{almac} los datos de medición a su módulo de almacenamiento SD en formato CSV. Inicialmente el medidor crea una carpeta con el mismo nombre que su base de datos, es decir "sd_id_XXXXXX" donde las X representan el número del medidor instalado. Este número viene fijado desde el programa de la CPU. Luego dentro de la carpeta, se crea un archivo "Date XX-ABC-XXXX" usando la fecha actual. Cabe destacar que se van creando nuevos archivos CSV cada vez que se cumple el periodo de facturación. A continuación se muestra un ejemplo del archivo generado y su estructura:

1	VpkMax [V]	VpkMin [V]	IpKMax [A]	IpKMin [A]	Period [ms]	Vrms [V]	Irms [A]	Pmean [W]	Pappr [VA]	PowFact	Energy [Wh]	Bill [SAR]	HH:MM:SS
2	314.6	-314.44	0	0.5	19.99	224.73	0.2	0.7	5.58	0.1	0	0	15:13:01
3	313.59	-313.95	0	0.5	20	224.37	0.2	0.7	5.58	0.1	0	0	15:13:06
4	313.62	-313.94	0	0.5	20.1	224.53	0.2	0.7	5.56	0.1	0	0	15:13:10
5	313.74	-314.1	0	0.5	20.1	224.59	0.2	0.7	5.55	0.1	0	0	15:13:15
6	313.89	-314.13	0	0.5	20	224.75	0.2	0.7	5.54	0.1	0	0	15:13:20
7	313.62	-313.97	0	0.5	19.99	224.65	0.2	0.7	5.52	0.1	0	0	15:13:24
8	313.4	-313.74	0	0.5	19.99	224.5	0.2	0.7	5.49	0.1	0	0	15:13:29
9	313.45	-313.85	0	0.5	19.99	224.56	0.2	0.7	5.49	0.1	0	0	15:13:34
10	313.61	-313.97	0	0.5	20	224.7	0.2	0.7	5.47	0.1	0	0	15:13:38
11	313.78	-314.27	0	0.5	19.84	0	0	0	0	0	0	0	15:14:02
12	313.28	-313.73	0	0.4	20	224.58	0.2	0.7	5.43	0.1	0	0	15:14:07
13	313.26	-313.45	0	0.4	20	224.37	0.2	0.7	5.41	0.1	0	0	15:14:12
14	312.73	-313.1	0	0.5	20	223.87	0.2	0.7	5.39	0.1	0	0	15:14:17
15	312.75	-313.1	0	0.5	19.99	224.16	0.2	0.7	5.39	0.1	0	0	15:14:21
16	313.26	-313.61	0	0.5	19.99	224.35	0.2	0.8	5.39	0.1	0	0	15:14:26
17	313.28	-313.62	0	0.4	19.99	224.56	0.2	0.8	5.39	0.1	0	0	15:14:31
18	313.57	-313.94	0	0.4	19.99	224.63	0.2	0.8	5.38	0.1	0	0	15:14:35
19	313.65	-314.1	0	0.5	19.99	224.24	0.2	0.8	5.36	0.2	0	0	15:14:40
20	313.19	-313.62	0	0.5	19.99	224.27	0.2	0.8	5.35	0.2	0	0	15:14:45
21	312.86	-313.26	0	0.4	19.99	224.29	0.2	0.9	5.33	0.2	0	0	15:14:49
22	313.43	-313.78	0	0.4	19.99	224.38	0.2	0.9	5.32	0.2	0	0	15:14:54
23	313.77	-314.13	0	0.4	20	224.66	0.2	0.1	5.31	0.2	0	0	15:14:59
24	314.11	-314.42	0	0.4	20	224.77	0.2	0.1	5.31	0.2	0	0	15:15:03
25	313.78	-314.3	0	0.4	19.99	224.64	0.2	0.1	5.3	0.2	0	0	15:15:08
26	313.89	-314.14	0	0.4	19.88	0	0	0	0	0	0	0	15:15:53
27	313.85	-314.28	0	0.4	20	225.5	0.2	0.14	5.2	0.3	0	0	15:15:58
28	313.77	-314.13	0	0.4	20	224.66	0.2	0.14	5.18	0.3	0	0	15:16:03

Figura 68: Contenido del archivo CSV generado por el medidor en el módulo de almacenamiento SD.

12 Validación del prototipo

12.1 Validación del hardware

12.1.1 Plan y protocolos especiales de medición

Dado que todas los cálculos realizados se basan en la medición de la tensión y la corriente, la validación se hará sobre estas dos magnitudes para luego propagar las correcciones sobre los cálculos que así lo requieran.

Cabe decir que inicialmente se pensaba calibrar estas magnitudes empleando curvas interpoladoras lineales a tramos, pero como los puntos se encuentran muy próximos a una recta, como se muestra más adelante, se decidió hacer un ajuste sólo de la ganancia (recuérdese que el offset se encuentra corregido para cada muestra en la FPGA a fin de no tener que propagarlo en todos los cálculos realizados).

12.1.2 Mediciones y Calibración

El instrumento de calibración empleado es el Fluke 435, cuyas mediciones serán consideradas como los valores reales de tensión y corriente (medidor patrón).

Para las mediciones de corriente se dispuso de 6 resistores de 10 Ω y 1500 W cada uno en distintas topologías a fin de permitir circular distintas corrientes. Para obtener puntos adicionales se agregaron cargas como una secadora de pelo, planchas varias, lámparas, pistolas de calor e incluso un horno eléctrico. Para todos estos casos la tensión fue de 220 Vrms.

A continuación se definen los tres tipos de error que acompañan a cada dato medido en las siguientes tablas. Tienen su origen en base a qué se calculan.

El de tipo 1 es el error relativo estándar según:

$$e_{1i} = \frac{\text{medinenpel}_i - \text{fluke}_i}{\text{fluke}_i}$$

donde el primer término del numerador refiere a la medición i-ésima del prototipo, mientras que el segundo se refiere a la medición i-ésima del Fluke.

El error de tipo 2 es el error relativo entre el Fluke y la recta de cuadrados mínimos h creada a partir de los puntos obtenidos y evaluada en el i-ésimo punto:

$$e_{2i} = \frac{h(\text{medinenpel}_i) - \text{fluke}_i}{\text{fluke}_i}$$

$$h : y = Ax + B \Rightarrow \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) A + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) B = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) A + nB = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases}$$

Este error se calcula sólo con fines comparativos simplemente por ser el mínimo de los errores cuadráticos. Tiene el inconveniente de introducir offset. Las rectas respectivas de cuadrados mínimos son:

Vrms:	$h : y = 0.99070176x + 0.2553944121$
Vpico:	$h : y = 0.9908339064x + 0.3956547705$
Irms:	$h : y = 1.0330973954x - 0.0453070308$
Ipico:	$h : y = 1.035887748x - 0.0611670119$

El error de tipo 3 es el error relativo entre el Fluke y la recta de cuadrados mínimos pero sin ordenada al origen: en el cálculo de h se hace $B = 0$ a fin de lograr una recta que pase por el origen. De esta manera:

$$e_{3i} = \frac{G \cdot \text{medinpenp}_{i} - \text{fluke}_{i}}{\text{fluke}_{i}}$$

Las ganancias para cada una de las magnitudes resultan ser las siguientes:

Vrms:	0.992281
Vpico:	0.992577
Irms:	1.029389
Ipico:	1.032318

Teniendo en cuenta que se busca un instrumento de clase 2, se puede observar que, al menos teóricamente, se satisface un error menor al 2 % de para magnitudes mayores al 10 % de la escala, inclusive. Para magnitudes menores a dicho valor el error del instrumento empieza a ser comparable con la magnitud medida haciendo que los errores se disparen.

Las mediciones se llevan a cabo sobre los valores RMS y pico de la tensión y la corriente y cuyos valores se muestran en las siguientes cuatro tablas (61 a 64). Para la medición de tensión se debió alterar la alimentación del prototipo ya que este se alimenta directamente de la red eléctrica. Se cortó la conexión a la red del módulo de alimentación y se empleó una fuentes de tensión para alimentar los circuitos directamente. La entrada del medidor fue conectada a un variador de tensión a fin de obtener los puntos necesarios para realizar la calibración, tablas 61 y 62. Debe tenerse en cuenta que la relación entre estas dos magnitudes no es $\sqrt{2}$ como se puede llegar a pensar pues la tensión de línea se encuentra distorsionada como se ve en la figura a continuación. Esta distorsión se debe principalmente a gran cantidad de dispositivos electrónicos con fuentes conmutadas conectados a la red cuyo rectificador consume picos masivos de corriente en cada semiciclo.

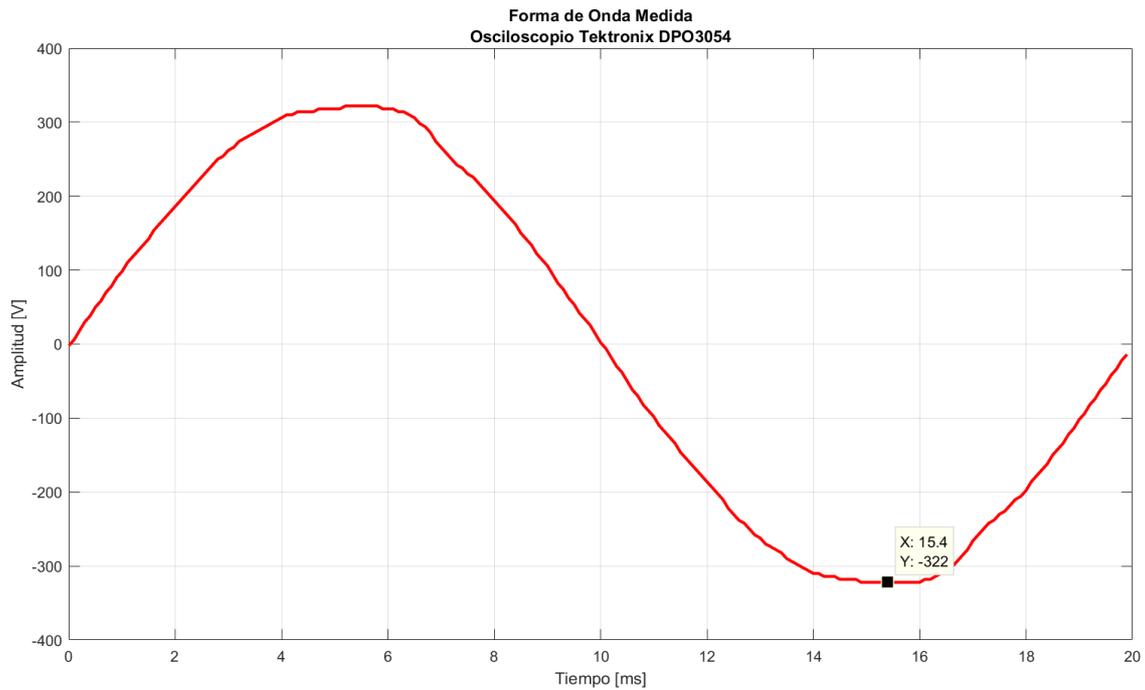


Figura 69: tensión de línea con distorsión en los extremos debida a los rectificadores conectados a la red. Datos extraídos del osciloscopio Tektronix DPO3054.

Medinenpel	Fluke	Error 1 (%)	Error 2 [%]	Error 3 [%]
1,32	1,35	-2,222	15,787	-2,977
5,07	5,10	-0,588	3,495	-1,356
10,12	10,13	-0,099	1,494	-0,870
14,91	14,90	0,067	0,851	-0,705
20,20	20,20	0,000	0,335	-0,772
30,18	30,15	0,100	0,016	-0,673
40,42	40,34	0,198	-0,100	-0,575
50,57	50,42	0,298	-0,129	-0,477
60,36	60,18	0,299	-0,209	-0,475
70,30	69,84	0,659	0,088	-0,118
80,22	79,84	0,476	-0,138	-0,300
90,21	89,79	0,468	-0,182	-0,308
100,45	99,98	0,470	-0,209	-0,305
120,40	119,70	0,585	-0,137	-0,192
141,30	140,11	0,849	0,094	0,071
160,20	159,06	0,717	-0,059	-0,061
181,50	180,14	0,755	-0,040	-0,023
202,00	200,48	0,758	-0,051	-0,019
222,40	220,30	0,953	0,130	0,174
232,50	230,56	0,841	0,015	0,063
243,20	241,09	0,875	0,043	0,097

Tabla 61: Mediciones realizadas de la tensión RMS desde el prototipo (primera columna) y desde el Fluke (segunda columna) junto con los distintos tipos de errores relativos.

Medinenpel	Fluke	Error 1 (%)	Error 2 [%]	Error 3 [%]
1,85	2,00	-7,500	11,435	-8,187
7,70	7,30	5,479	9,933	4,697
14,80	14,30	3,497	5,315	2,728
20,90	21,00	-0,476	0,496	-1,215
28,25	28,40	-0,528	-0,047	-1,266
42,37	42,40	-0,071	-0,054	-0,812
56,60	56,70	-0,176	-0,394	-0,917
70,93	70,90	0,042	-0,317	-0,700
84,77	84,60	0,201	-0,250	-0,543
98,60	98,10	0,510	-0,008	-0,236
112,50	112,10	0,357	-0,210	-0,388
126,70	126,10	0,476	-0,131	-0,270
141,10	140,40	0,499	-0,141	-0,247
169,00	168,30	0,416	-0,269	-0,329
198,30	197,00	0,660	-0,062	-0,087
224,20	223,70	0,224	-0,518	-0,520
255,10	253,00	0,830	0,062	0,082
283,80	281,50	0,817	0,034	0,069
312,30	309,70	0,840	0,043	0,091
327,00	324,00	0,926	0,123	0,177
341,60	338,20	1,005	0,196	0,256

Tabla 62: Mediciones realizadas de la tensión pico desde el prototipo (primera columna) y desde el Fluke (segunda columna) junto con los distintos tipos de errores relativos.

Medinenpel	Fluke	Error 1 (%)	Error 2 [%]	Error 3 [%]
0,51	0,49	4,082	-1,720	7,141
1,18	1,18	0,000	-0,530	2,939
1,49	1,50	-0,667	-0,399	2,253
1,90	1,93	-1,554	-0,644	1,339
2,51	2,55	-1,569	-0,088	1,324
2,97	3,03	-1,980	-0,231	0,901
3,49	3,55	-1,690	0,287	1,199
4,18	4,27	-2,108	0,071	0,769
5,21	5,33	-2,251	0,134	0,621
6,91	7,08	-2,401	0,189	0,467
10,19	10,47	-2,674	0,114	0,186
15,09	15,50	-2,645	0,285	0,216
16,68	17,20	-3,023	-0,077	-0,173
19,67	20,31	-3,151	-0,169	-0,305

Tabla 63: Mediciones realizadas de la corriente RMS desde el prototipo (primera columna) y desde el Fluke (segunda columna) junto con los distintos tipos de errores relativos.

Medinenpel	Fluke	Error 1 (%)	Error 2 [%]	Error 3 [%]
0,71	0,71	0,000	-5,026	3,232
1,66	1,68	-1,190	-1,285	2,003
2,10	2,13	-1,408	-0,742	1,778
2,68	2,73	-1,832	-0,549	1,341
3,54	3,60	-1,667	0,163	1,511
4,17	4,27	-2,342	-0,270	0,814
4,91	5,01	-1,996	0,300	1,171
5,88	6,02	-2,326	0,164	0,831
7,33	7,51	-2,397	0,291	0,758
9,72	9,97	-2,508	0,378	0,643
14,31	14,74	-2,917	0,152	0,220
21,19	21,85	-3,021	0,180	0,114
23,47	24,20	-3,017	0,211	0,118
27,52	28,55	-3,608	-0,363	-0,492

Tabla 64: Mediciones realizadas de la corriente pico desde el prototipo (primera columna) y desde el Fluke (segunda columna) junto con los distintos tipos de errores relativos.

12.1.3 Resultados

Luego de realizar las mediciones pertinentes a la calibración (enero/febrero 2020), el 11 de marzo de 2020 se entró oficialmente en la pandemia del COVID-19 y el 20 de marzo entró en rigor la cuarentena obligatoria en Argentina. En consecuencia el ITBA cerró sus puertas y con ello el acceso al prototipo y al instrumental necesario para llevar a cabo las validaciones finales que permitan garantizar el cumplimiento de las normas y requerimientos en lo que refiere a tolerancias e incertezas.

Medidas tomadas por el Departamento de Electrónica del ITBA a finales de septiembre 2020 permitieron la distribución de equipos entre los estudiantes que lo necesitaran y se pudo obtener el prototipo y el instrumental mínimo necesario para mostrar el funcionamiento del mismo. De todas maneras no fue posible contar con el préstamo del medidor patrón Fluke 435 con el que se realizaron las calibraciones y con el cual se pensaban realizar las validaciones finales.

Frente al desafío de no contar con el instrumental de laboratorio necesario y las limitaciones dadas por la situación actual, las pruebas se llevaron a cabo sobre velas de cuarzo de 47 cm y 1500 W para estufas eléctricas por ser cargas puramente resistivas. Esto permite calcular las diferentes corrientes y potencias involucradas conociendo solamente la tensión aplicada y su resistencia. El instrumento de comparación utilizado fue un osciloscopio Tektronix DPO3054 empleando puntas x100 midiendo la tensión de línea sobre las cargas.

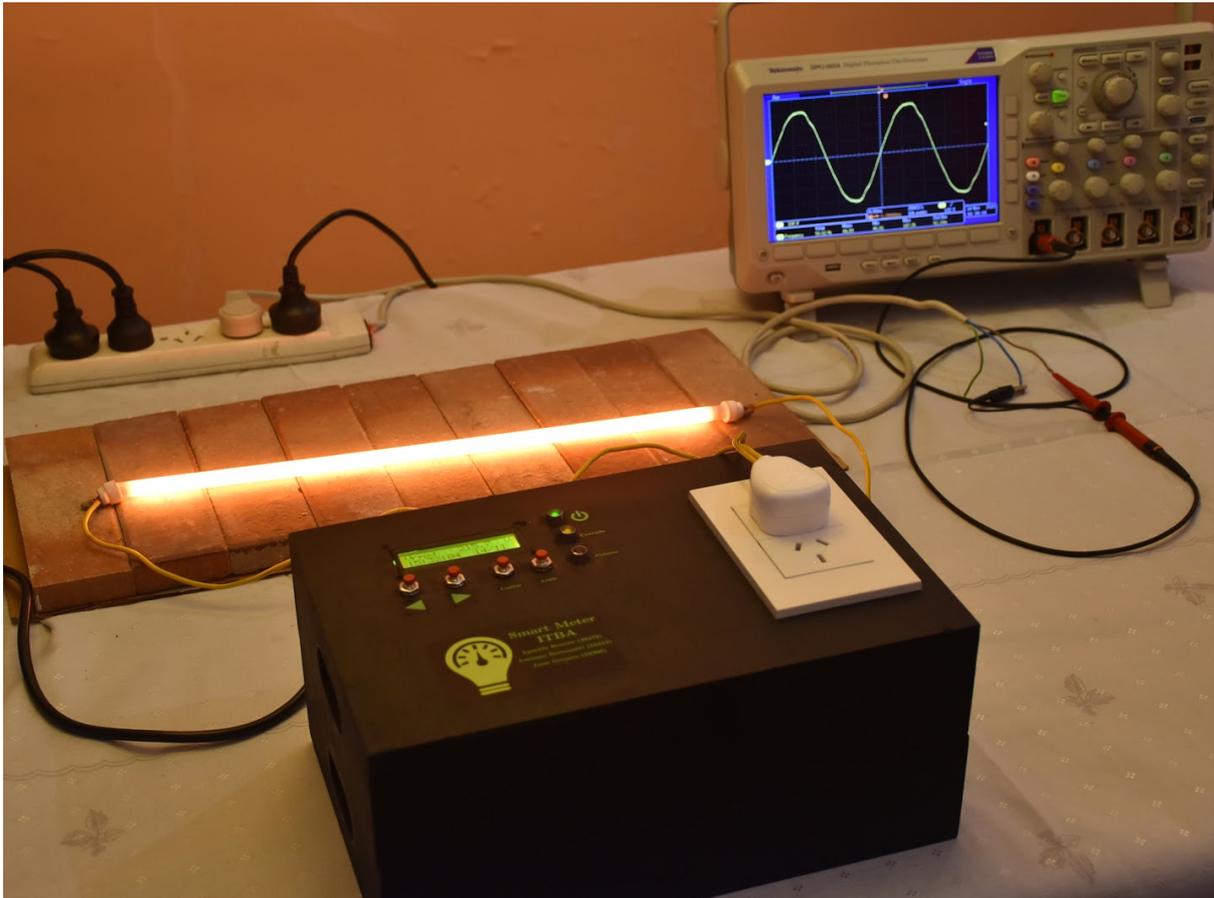


Figura 70: Mediciones de validación llevadas a cabo sobre velas de cuarzo (varillas sobre los ladrillos refractarios) empleando un osciloscopio Tektronix DPO3054.

En la figura anterior se puede ver el prototipo junto con las velas de cuarzo (varillas sobre los ladrillos) y el osciloscopio empleado. Se usa una computadora portátil como servidor para recibir las muestras enviadas.

Se configuró el osciloscopio con 100 V/división y en modo de alta resolución (ADC de 11 bits). Tomando los valores provistos en su hoja de datos y utilizando las fórmulas apropiadas [28] se obtuvo que el error de medición del osciloscopio sería de 32,2 V. Tomando el span vertical de 800 V (8 divisiones, 100 V/división), se obtiene un error del 4%. Este error es significativamente mayor al del medidor patrón utilizado para la calibración del prototipo, y es mayor que el esperado para el prototipo en sí. Consecuentemente, se decidió que los resultados de las validaciones de precisión serían tomados en cuenta sólo para obtener una estimación cercana de la validez de las mediciones y para ver que se cumpla con los parámetros principales del producto.

La siguiente tabla enseña las distintas métricas tomadas en cuenta en las validaciones, siguiendo el plan de pruebas definido en el apartado [Plan de validación](#). Se indica si cada métrica puede ser medida con la instrumentación reducida con la que se dispone.

Métrica	¿Se puede con instrumentación reducida?
Potencia activa	No
Potencia aparente	Sí
Energía activa	No
Energía reactiva	No
Energía aparente	No
Factor de potencia	No
Frecuencia de fase	Sí
Tensión RMS	Sí
Corriente RMS	Sí
Tensión pico	Sí
Corriente pico	Sí
Tarifa en uso	No aplica
Fecha y hora	No aplica

Tabla 65: Métricas para validaciones con instrumentación reducida.

A continuación se presentan los resultados de la ejecución del plan de validación del prototipo, que consiste de pruebas funcionales y de precisión.

Resultado	ID banco de prueba	ID prueba	Precondiciones	Procedimiento	Resultado esperado	Aclaraciones
Aprobado	BP-01	T-INIT-01 Prototipo / Final	-	Conectar el DUT a la alimentación. Observar la interfaz de usuario esperando obtener el resultado esperado.	Las luces indicadoras de la interfaz de usuario indican que el sistema y el módulo de comunicación se encuentran alimentados. El display del DUT se enciende y muestra que no hay consumo.	
Aprobado	BP-01	T-INIT-02 Prototipo / Final	T-INIT-01	Luego de verificar que el DUT se encuentra energizado, conectar el concentrador a su alimentación para energizarlo. Monitorear mensajes enviados y recibidos por el concentrador.	Al energizarse ambos dispositivos comienza el establecimiento de la conexión entre ambos (handshake). Al establecerse la conexión, el DUT envía periódicamente datos de consumo al concentrador. Como no hay carga, no hay consumo.	
Aprobado	BP-02	T-FUN-01 Prototipo / Final	T-INIT-02	Habilitar la alimentación del DUT y conectar la carga de consumo. Observar el display del DUT, en la pantalla de consumo energético. Observar la actualización del reloj y de los datos en el display. Monitorear los datos recibidos por el concentrador y su horario de recepción.	Los datos de consumo de energía son actualizados periódicamente en el display del DUT a la frecuencia de actualización. Los mismos datos pueden observarse en los mensajes recibidos por el concentrador, los cuales también se actualizan con la frecuencia default de transferencia.	Períodos default son: display = 1 segundo, concentrador = 2 segundos
Aprobado	BP-02	T-FUN-02 Prototipo / Final	T-INIT-02	Presionar varias veces el botón de la interfaz UI del DUT.	Distintas pantallas son mostradas en el display, con diferentes mediciones según REQ-19.	
Aprobado	BP-02	T-FUN-04 Prototipo / Final	T-INIT-02	Desde el concentrador, enviar una instrucción de desconexión hacia el DUT.	El contactor del DUT se abre, cortando el suministro de energía al banco de cargas. El DUT continúa energizado. El display del DUT muestra que el contactor se encuentra abierto. El concentrador continúa recibiendo datos, los cuales muestran que no hay consumo.	Para el prototipo, la instrucción de desconexión es enviada al presionar un pulsador en el DUT.
Aprobado	BP-02	T-FUN-05 Prototipo / Final	T-FUN-04	Ejecutar la prueba T-FUN-04 Desde el concentrador, enviar una instrucción de conexión hacia el DUT.	El contactor del DUT se cierra, devolviendo el suministro de energía al banco de pruebas. El DUT continúa energizado. El consumo de energía mostrado en el display del DUT es actualizado periódicamente. El concentrador continúa recibiendo datos de mediciones.	Para el prototipo, la instrucción de conexión es enviada al presionar un pulsador en el DUT.

Aprobado	BP-02	T-FUN-06 Prototipo / Final	T-INIT-02	Desde el concentrador enviar una instrucción de comienzo de high-speed tracing hacia el DUT, indicando un tiempo de duración de 5 segundos. Observar los datos recibidos por el concentrador y el timestamp de cada dato.	El DUT comienza a enviar datos de la forma de onda de la red eléctrica. El concentrador recibe suficientes muestras para calcular la THD de corriente y tensión con al menos 50 armónicos. Al pasar el tiempo indicado de HST, el DUT vuelve a su frecuencia de transferencia de datos anterior y termina el high-speed tracing.	Para el prototipo, las muestras del modo HST son enviadas en todo momento.
Aprobado	BP-02	T-FUN-08 Prototipo / Final	T-FUN-01	Esperar unos minutos para que el display actualice la cantidad de energía consumida. Cortar la alimentación del smart meter con el interruptor. Remover la memoria no volátil del sistema para analizar su contenido.	El DUT ya no se encuentra energizado externamente. La memoria contiene datos de medición del tiempo en el que el sistema estuvo energizado.	
Aprobado	BP-02	T-FUN-12 Prototipo / Final	T-FUN-01	Conectar el circuito generador de energía como carga, cerrar el interruptor para energizar al DUT. Esperar unos minutos para que el display actualice la cantidad de energía generada. Observar los datos mostrados en el display del DUT y recibidos por el concentrador.	El display muestra un valor negativo de energía consumida. La tarifa a pagar también es negativa. Los datos almacenados en la memoria interna y los enviados al concentrador son correspondientes a la generación de energía.	Para el prototipo, se utiliza una conexión especial para simular la generación de energía: se conecta la salida del smart meter (que normalmente sería el punto de consumo) a la red eléctrica, y se conecta la entrada del smart meter a la carga. Al forzar el cerramiento del contactor, se obtiene un circuito simulado de generación de energía eléctrica.
Falla	BP-03	T-OPE-03 Prototipo / Final	T-INIT-02	Configurar el banco de pruebas sin carga. Conectar el DUT.	La corriente de arranque es menor o igual a la mencionada en la especificación IMP-OPE-04.	Se agrega una resistencia de 1 Ohm, 7W en serie a la entrada y se mide la tensión sobre la misma con el osciloscopio.
Falla	BP-03	T-VLIN-01 Prototipo / Final	T-INIT-02	Conectar la carga A. Variar la tensión de entrada al DUT utilizando el variac. Variar entre 198 Vrms y 242 Vrms, en pasos de 10 Vrms. Observar el display del DUT y los mensajes enviados al concentrador. Contrastar con los valores del medidor patrón.	El sistema sigue operando con normalidad en las distintas tensiones de entrada. El error de medición de energía y potencia es menor al 2%.	Carga A: vela de cuarzo, 25 ohm. Al ser una carga resistiva, alcanza con medir la tensión para obtener la potencia instantánea.

Falla	BP-03	T-ERR-01 Prototipo / Final	T-VLIN-01	Conectar la carga A. Observar las mediciones del DUT y del servidor concentrador, y contrastar con el medidor patrón.	El error de medición de energía y potencia es menor al 2%.	Carga A: vela de cuarzo, 25 ohm. Al ser una carga resistiva, alcanza con medir la tensión para obtener la potencia instantánea.
Aprobado	BP-03	T-ERR-02 Prototipo / Final	T-ERR-01	Repetir el test T-ERR-01 con la carga B.	El error de medición de energía y potencia es menor al 2%.	Para el prototipo, se utiliza una conexión especial para simular la generación de energía: se conecta la salida del smart meter (que normalmente sería el punto de consumo) a la red eléctrica, y se conecta la entrada del smart meter a la carga. Al forzar el cerramiento del contactor, se obtiene un circuito simulado de generación de energía eléctrica.
Aprobado	BP-03	T-ERR-05 Prototipo / Final	T-ERR-01	Conectar la carga A. Habilitar el modo high-speed tracing (HST) enviando la instrucción correspondiente desde el concentrador. Observar los datos recibidos por el servidor concentrador. Obtener el valor de la THD y contrastar con el analizador de espectro.	El error de medición de energía y potencia es menor al 2%.	Carga A: vela de cuarzo, 25 ohm. No se puede contrastar el valor de la THD de forma directa. Se mide la tensión sobre la carga A en el osciloscopio y se guarda una captura de la pantalla y la forma de onda de la tensión en formato CSV. Se calcula la THD utilizando el mismo código PHP que la calcula en el servidor concentrador. Para el DUT se guardan los datos de THD calculados en el modo HST. Luego se contrastan estos datos con los obtenidos del programa.
Aprobado	BP-03	T-POW-01 Prototipo / Final	T-INIT-02	Desconectar el módulo de comunicación, la carga, y todos los instrumentos de medición, excepto el vatímetro a la entrada del DUT. Medir el consumo del DUT observando el vatímetro.	El sistema consume menos de 2 W de potencia activa, y menos de 10 VA de potencia aparente.	Se coloca una resistencia de 1 Ohm, 7W en serie a la entrada del DUT y se mide la tensión sobre la misma con el osciloscopio.

Tabla 66: Resultados de validaciones del prototipo.

Las pruebas funcionales resultaron satisfactorias y los parámetros se cumplieron apropiadamente. Por otro lado, las pruebas de precisión presentaron un error de medición mayor al esperado dado el desafío de no contar con el instrumental de laboratorio adecuado y necesario.

Si bien el error porcentual obtenido en las mediciones de consumo resultó ser más elevado de lo esperado, dada la instrumentación inadecuada, se pudo verificar que los parámetros principales fueron correctos.

Los siguientes apartados presentan en detalle los resultados de las validaciones cuantitativas y de precisión.

T-OPE-03: Corriente de arranque

Para esta prueba se esperaba una corriente de arranque menor a 0,212 A pico, según la especificación [IMP-OPE-04](#). Como puede apreciarse en la figura 71, se obtuvo una corriente máxima (en valor absoluto) de 4,8 A pico, por lo cual el prototipo no cumple con su especificación.

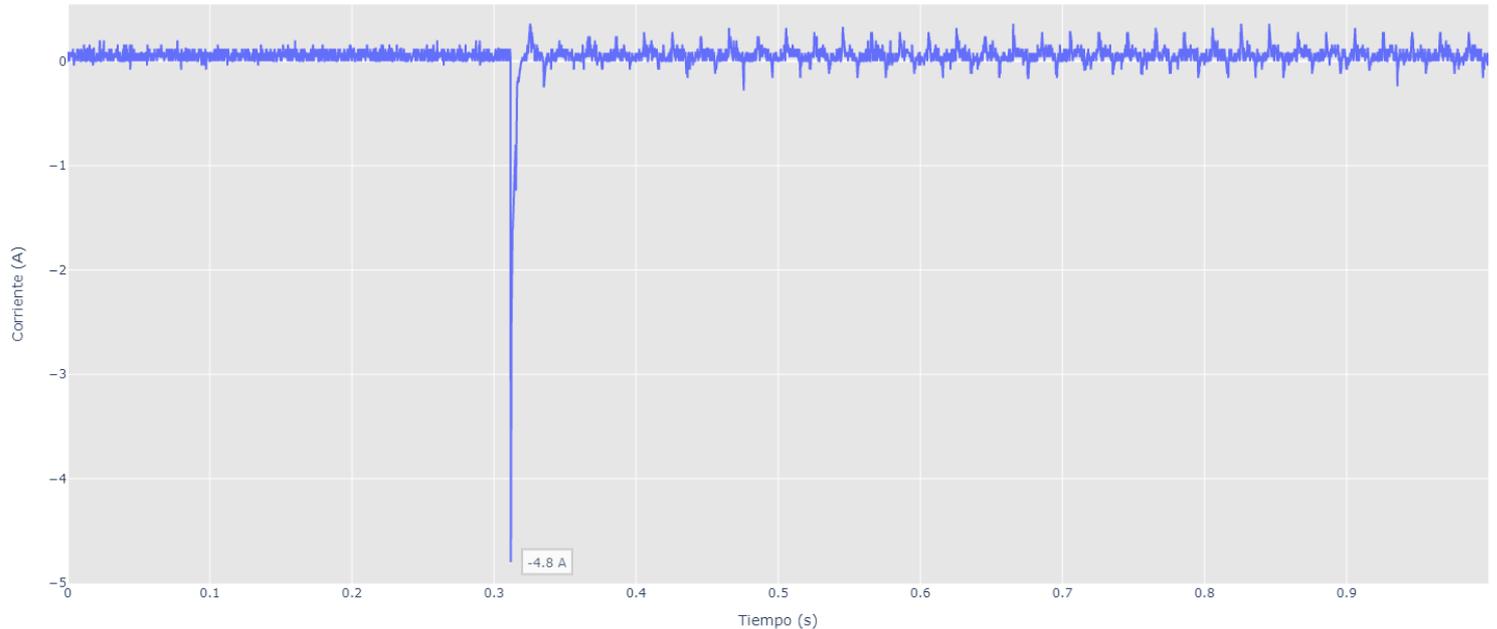


Figura 71: Corriente de arranque del prototipo medida con instrumentación reducida.

T-VLIN-01: Precisión en tensiones variadas

Esta prueba verifica que el producto pueda realizar mediciones de consumo de energía y potencia en cierto rango de tensiones de entrada, manteniendo un error menor al 2%. La siguiente tabla muestra en detalle los resultados de esta prueba. Las métricas que contienen las siglas *SM* se refieren al *smart meter* o DUT. Las métricas que contienen las siglas *osc* se refieren al osciloscopio utilizado para contrastar resultados. Las columnas de error contienen el error relativo del DUT respecto al osciloscopio. Se observan sólo las métricas que pueden obtenerse con instrumentación reducida.

	SM	Osc	Error	SM	Osc	Error	SM	Osc	Error	SM	Osc	Error	SM	Osc	Error
V RMS [V]	198,40	197,10	0,66%	212,70	211,70	0,47%	221,3	219,7	0,73%	232,6	231,2	0,61%	240,7	240	0,29%
Vpk [V]	276,40	278,80	0,86%	296,60	300,00	1,13%	309	312	0,96%	324,5	327,5	0,92%	335,9	339,5	1,06%
I RMS [A]	7,56	7,88	4,11%	8,12	8,47	4,11%	8,45	8,79	3,85%	8,83	9,25	4,52%	9,13	9,60	4,90%
I pk [A]	10,56	11,15	5,31%	11,30	12,00	5,83%	11,8	12,48	5,45%	12,32	13,10	5,95%	12,75	13,58	6,11%
PF	0,98	-	-	0,98	-	-	0,98	-	-	0,98	-	-	0,98	-	-
Pot aparente [VA]	1.503,00	1.553,94	3,28%	1.724	1.792,68	3,83%	1867	1930,72	3,30%	2042	2138,14	4,50%	2192	2304,00	4,86%
Pot activa [W]	1.473,00	-	-	1.692	-	-	1835	-	-	2009,9	-	-	2147	-	-
Periodo [ms]	19,99	19,99	0,00%	19,99	19,99	0,00%	20,1	20	0,50%	19,99	19,99	0,00%	20	20	0,00%

Tabla 67: Resultados de prueba T-VLIN-01.

T-ERR-01: Precisión de consumo en condiciones normales

Esta prueba verifica que el producto pueda realizar mediciones al estar conectado a una tensión de entrada nominal (220 Vrms), manteniendo un error menor al 2% en mediciones de consumo de energía y potencia. La columna *SM* se refiere al *smart meter* o DUT. La columna *Osc* se refieren al osciloscopio utilizado para contrastar resultados. La columna de error contiene el error relativo del DUT respecto al osciloscopio.

Métrica	SM	Osc	Error
V RMS [V]	223	218,9	1,87%
Vpk [V]	311,6	311,1	0,16%
I RMS [A]	8,35	8,76	4,64%
Ipk [A]	11,6	12,44	6,78%
PF	0,98	-	-
Pot aparente [VA]	1861,5	1916,69	2,88%
Pot activa [W]	1826,5	-	-
Periodo [ms]	20	20	0,00%

Tabla 68: Resultados de prueba T-ERR-01.

Se observa que el error relativo en la medición de potencia es levemente mayor al esperado.

T-ERR-02: Precisión de generación en condiciones normales

Esta prueba verifica que el producto pueda realizar mediciones de generación de energía, manteniendo un error menor al 2% en generación de energía y potencia. La columna *SM* se refiere al *smart meter* o DUT. La columna *Osc* se refieren al osciloscopio utilizado para contrastar resultados. La columna de error contiene el error relativo del DUT respecto al osciloscopio.

Métrica	SM	Osc	Error
V RMS [V]	218	212	2,83%
Vpk [V]	305	299	2,01%
I RMS [A]	8,14	8,48	4,01%
Ipk [A]	11,4	11,96	4,68%
PF	-0,98	-	-
Pot aparente [VA]	1773	1797,76	1,38%
Pot activa [W]	-1741	-	-
Periodo [ms]	20	20	0,00%

Tabla 69: Resultados de prueba T-ERR-02.

Se observa que el error relativo en la medición de potencia se encuentra dentro de los parámetros esperados.

T-ERR-05: Precisión en modo HST

Esta prueba verifica que al iniciar el modo HST, el servidor concentrador recibe las muestras suficientes para el cálculo de la THD. La siguiente figura muestra los datos de tensión de línea provenientes del osciloscopio.

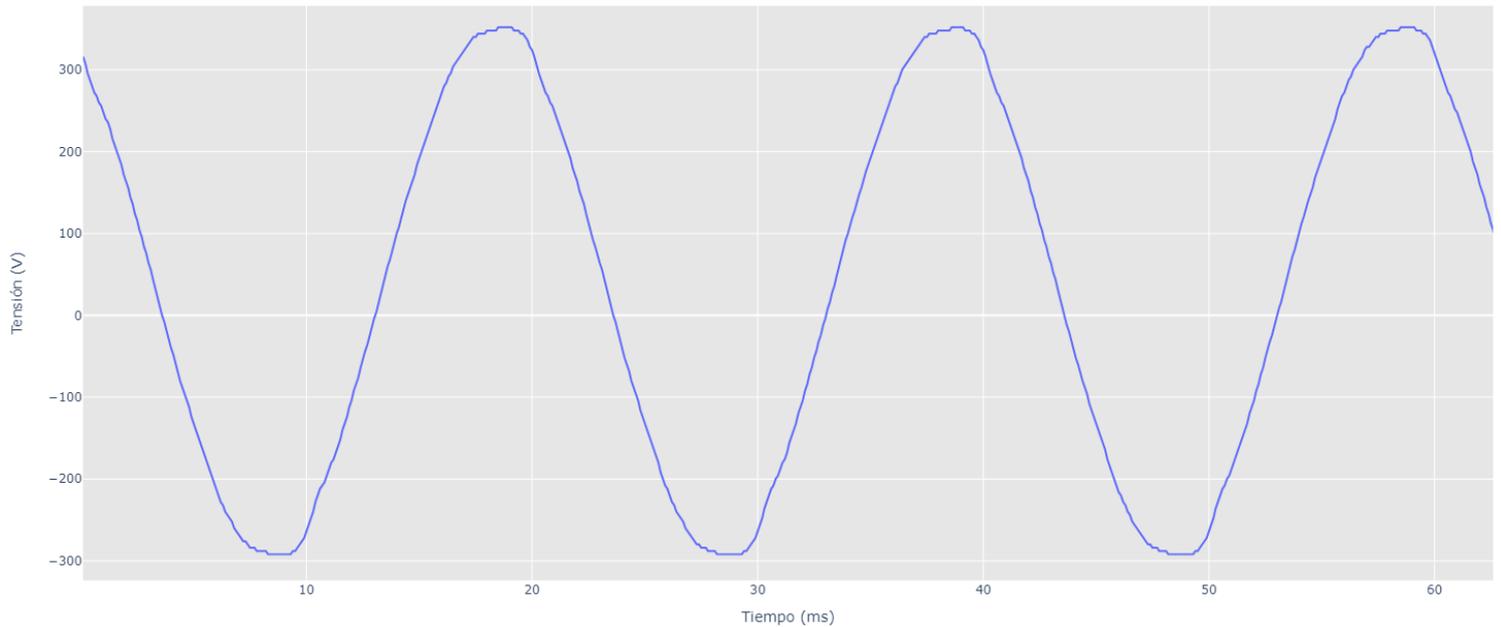


Figura 72: Tensión de línea obtenida por el osciloscopio en prueba T-ERR-05.

En contraste, la siguiente figura muestra los datos recolectados por el servidor concentrador en la ejecución de la prueba.

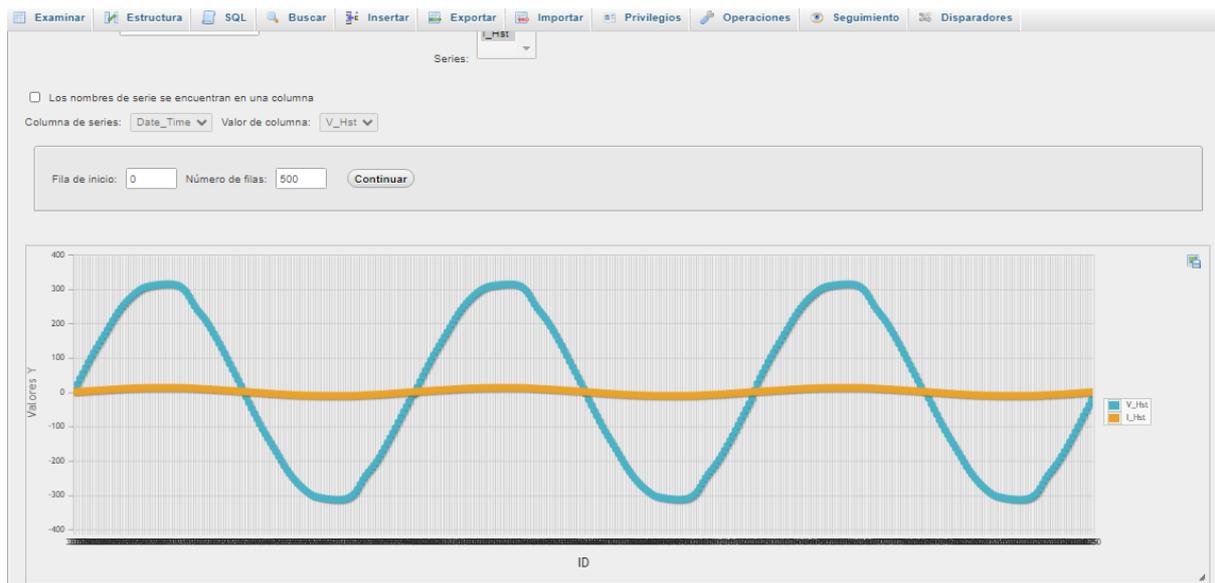


Figura 73: Tensión y corriente obtenidas por el servidor concentrador en modo HST en prueba T-ERR-05.

El servidor calculó una THD de 1,93 % utilizando un programa escrito en PHP. Utilizando el mismo programa para procesar los datos de tensión del osciloscopio, se obtuvo una THD de

1,9384%, resultando en un error del 0,4%, lo cual se encuentra dentro de los parámetros esperados.

T-POW-01: Consumo del DUT

Esta prueba verifica que el consumo de potencia del DUT sea menor a 2 W de potencia activa y menor a 10 VA de potencia aparente. Se mide la tensión sobre una resistencia de 1 Ohm en serie a la entrada de consumo del DUT para obtener la corriente de consumo. La siguiente figura presenta los resultados.

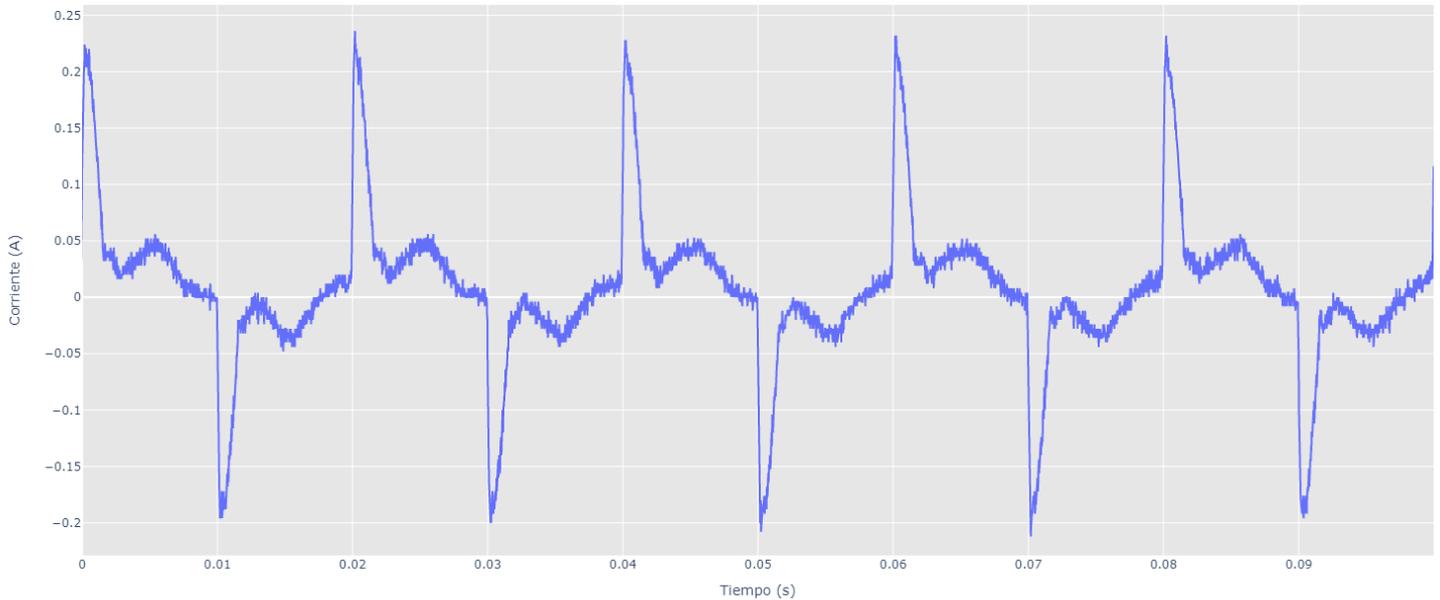


Figura 74: Corriente consumida por el DUT en prueba T-POW-01.

Del mismo osciloscopio se obtiene que la corriente RMS es igual a 21.8 mA. Al estar trabajando en una tensión RMS de 220 Vrms, se tiene una potencia aparente de 4,8 VA, que al ser menor a 10 VA, se encuentra dentro de los parámetros esperados.

13 Conclusiones

La realización de este trabajo ha mostrado los puntos importantes a tener en cuenta a la hora de fabricar un medidor de energía inteligente, observando tanto las cuestiones técnicas y de implementación, como las legales y económicas.

Desde el punto de vista tecnológico, las alternativas actuales para la implementación de un medidor de energía inteligente son abundantes y variadas. Esto posibilita elegir la más conveniente de acuerdo a los fines buscados y la experiencia previa y/o conocimiento en el área. De cualquier forma, ha de tenerse en cuenta que en Argentina las opciones son limitadas y algunas soluciones implican la compra de componentes en el exterior (como fue el caso en este trabajo) afectando el tiempo de finalización y el costo de desarrollo del proyecto. Aún así, es un proyecto viable y de fácil implementación, no requiere ninguna técnica ni tecnología de vanguardia y se puede implementar con elementos relativamente comunes y maduros, de los que se conoce su funcionamiento y los que cuentan con documentación, librerías y abundante material bibliográfico.

Un problema frecuente en proyectos como este es la buena planificación, la cual es difícil ya de por sí y aún más si no se cuenta con experiencia previa en proyectos similares. Los imprevistos alteran aún más los tiempos estimados y dificultan el cálculo final.

El desarrollo de este trabajo demuestra que es viable el diseño y la construcción de un medidor de consumo eléctrico inteligente modular y escalable. Se propone una arquitectura que permite la medición de sistemas monofásicos o trifásicos de distintas escalas mediante el reemplazo de un único módulo, el de medición, sin tener que modificar nada más. También se propone el uso de un módulo de comunicación vía PLC, reemplazable por módulos que utilicen otro medio de comunicación, para conectarse con el servidor concentrador de una distribuidora eléctrica.

El diseño presentado cumple con los requerimientos y las especificaciones del producto. Dicho diseño es implementado con componentes seleccionados para optimizar los costos y el rendimiento del producto, particularmente buscando disminuir el error en la medición.

Se analiza la rentabilidad de un proyecto de construcción y despliegue de grandes cantidades de este producto. En base a las métricas del mercado y datos de proyectos similares, se proyecta la demanda esperada y la producción necesaria en un plazo de 7 años. Se concluye que el proyecto es rentable, con una tasa interna de retorno del 5 %. Observando que los primeros semestres presentan grandes flujos de fondos negativos, se deduce que este proyecto sería viable para grandes empresas que cuenten con el dinero necesario para las inversiones iniciales. Pequeñas y medianas empresas deberían buscar distintas fuentes de financiamiento para solventar los gastos iniciales.

Se analizan los aspectos legales que conciernen el desarrollo del proyecto de construcción y despliegue del producto. Se evalúa la adquisición de licencias y patentes, el cumplimiento de normas IRAM e IEC, el uso de herramientas y software libres, la constitución de una

Sociedad por Acciones Simplificada, y la firma de un contrato de compraventa. De esta manera se cumple con todos los requerimientos legales para llevar a cabo el emprendimiento.

Se logra construir un prototipo que cuente con las prestaciones principales del producto final. Se realiza una serie de pruebas sobre este prototipo para validar el cumplimiento de los requerimientos y las especificaciones. A pesar de no contar con acceso a los instrumentos adecuados para realizar las validaciones, debido a la pandemia del virus COVID-19, fue posible ejecutar las pruebas necesarias con instrumentación reducida y concluir que el prototipo cumple con los parámetros principales del producto.

13.1 Objetivos Alcanzados

La gran mayoría de los objetivos fueron alcanzados, sobre todo los que refieren a funcionalidades y modularidad. Para los objetivos de precisión, se debe tener en cuenta que, si bien algunos no fueron satisfechos, no se contaba con una instrumentación adecuada para realizar las validaciones finales sobre el prototipo, por lo que no se pudo validar la calibración realizada con anterioridad.

Los dos principales fallos fueron el tiempo de realización del proyecto y el hecho de que no se pudo implementar la comunicación vía PLC en el prototipo. El primer fallo fue debido a una organización inexperta de los tiempos dadas las imposiciones de la propia carrera y cuestiones laborales y médicas⁹. El segundo fallo fue debido a la complejidad de implementación del módulo de comunicaciones PLC. Se intentó construir el mismo a la par del módulo WiFi, pero dada la complejidad de la tecnología PLC y la falta de experiencia en dicha tecnología, se optó por continuar con el módulo más sencillo. Un análisis más exhaustivo hubiera resultado en la tercerización del mismo, ahorrando tiempo, dinero y esfuerzo.

13.2 Recomendaciones para futuros diseños

A continuación se presentan algunas recomendaciones para futuros diseños relacionados al presente trabajo, ya sea para un diseño similar o para la construcción de productos complementarios.

Respecto a PLC, y como se mencionó anteriormente, se recomienda adquirir un módulo de desarrollo en vez de implementarlo, ya que requiere de determinados conocimientos específicos para que funcione correctamente. En última instancia, se cree que podría ser un proyecto de tesis interesante para complementar el smart meter diseñado en este trabajo.

Asimismo, el diseño de un servidor concentrador que se comunique desde la NAN con varios smart meters podría ser un proyecto de tesis que complemente al presente trabajo y provea otro punto de vista al concepto de redes inteligentes de energía.

⁹ Uno de nosotros debió operarse de la vista y surgieron complicaciones durante el procedimiento. El proyecto se atrasó unos 4 meses.

Se puede considerar hacer una mayor integración de “centros de procesamiento” al juntar en un mismo microcontrolador el procesado de todos los posibles módulos. Esto puede ayudar a simplificar la codificación y las comunicaciones internas al no tener que distribuir datos entre distintos “centros de procesamiento” pero aumenta considerablemente la capacidad de procesamiento del microcontrolador necesario.

14 Bibliografía

1. "Federal Energy Regulatory Commission Assessment of Demand Response & Advanced Metering." *United States Federal Energy Regulatory Commission*. United States Federal Energy Regulatory Commission.
2. M. S. Saleh, A. Althaibani, Y. Esa, Y. Mhandi and A. A. Mohamed, "Impact of clustering microgrids on their stability and resilience during blackouts," *2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, Offenburg, 2015, pp. 195-200.
3. "Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA)," Title XIII - Smart Grid.
4. Ho, Quang-Dung & Gao, Yue & Rajalingham, Gowdemy & Le-Ngoc, Tho. (2014). "Wireless Communications Networks for the Smart Grid." 10.1007/978-3-319-10347-1.
5. S. Galli, A. Scaglione and Z. Wang, "Power Line Communications and the Smart Grid," *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, Gaithersburg, MD, 2010, pp. 303-308.
6. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9903>
7. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9904>
8. https://elearning.renesas.com/pluginfile.php/355/mod_folder/content/0/DevCon_On-the-Road/DevCon_On-the-Road/Automotive/Narrowband_Powerline_Communication_Applications_and_Challenges.pdf?forcedownload=1
9. M. Hoch, "Comparison of PLC G3 and PRIME," *2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, Udine, 2011, pp. 165-169.
10. Torsten Berger, Lars & Schwager, Andreas & Escudero-Garzas, J. Joaquin. (2013). "Power Line Communications for Smart Grid Applications." *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2013. 10.1155/2013/712376.
11. <https://www.lg.com/us/experience-tvs/oled-tv/oled-vs-lcd>
12. <https://blog.squix.org/2015/03/esp8266-module-comparison-esp-01-esp-05.html>
13. "AN2568 PLC Coupling Reference Designs," Microchip.
14. <https://www.digikey.com/en/pdf/v/vishay-beyschlag/thermal-management-in-surface-mounted-resistor-applications>
15. <https://kicad-pcb.org/>
16. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/switch-basics/all>

17. <https://trimantec.com/blogs/t/solid-state-relays-3-reasons-make-switch>
18. “Medidores estáticos de energía eléctrica activa para corriente alterna (Clases 1 y 2).” Norma IRAM 2420.
19. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC33123/>
20. <https://econojournal.com.ar/2019/06/los-medidores-inteligentes-permitiran-optimizar-los-usos-de-la-energia/>
21. <https://www.smart-energy.com/features-analysis/argentina-smart-grids-feature/>
22. [https://www.enre.gov.ar/web/web.nsf/Files/RTI-EDESUR-233342%20-%20Plan%20de%20Inversi%C3%B3n%20Plurianual%20para%20las%20Redes%20de%20Alta,%20Media%20y%20Baja%20Tensi%C3%B3n%20-%20ANEXO%20III.pdf/\\$FILE/RTI-EDESUR-233342%20-%20Plan%20de%20Inversi%C3%B3n%20Plurianual%20para%20las%20Redes%20de%20Alta,%20Media%20y%20Baja%20Tensi%C3%B3n%20-%20ANEXO%20III.pdf](https://www.enre.gov.ar/web/web.nsf/Files/RTI-EDESUR-233342%20-%20Plan%20de%20Inversi%C3%B3n%20Plurianual%20para%20las%20Redes%20de%20Alta,%20Media%20y%20Baja%20Tensi%C3%B3n%20-%20ANEXO%20III.pdf/$FILE/RTI-EDESUR-233342%20-%20Plan%20de%20Inversi%C3%B3n%20Plurianual%20para%20las%20Redes%20de%20Alta,%20Media%20y%20Baja%20Tensi%C3%B3n%20-%20ANEXO%20III.pdf)
23. <https://www.gemalto.com/iot/industries/energy-utilities>
24. https://www.clarin.com/economia/edesur-promete-medidores-inteligentes-toda-red-2021_0_HkIOFQwcb.html
25. <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=4021>
26. <https://econojournal.com.ar/2017/05/comienzan-a-instalar-medidores-inteligentes-de-electricidad/>
27. https://www.cac.com.ar/data/documentos/15_Modificaciones%20Ley%20Impositiva%20y%20C%C3%B3digo%20Fiscal%202020%20PBA.pdf
28. <https://edadocs.software.keysight.com/kkbopen/understanding-voltage-measurement-accuracy-for-infiniivision-oscilloscopes-584425356.html>

15 Anexos

15.1 Anexo A

Análisis de costos de materia prima directa (MPD).

Descripción Componente	Precio Unitario (US\$)	Cantidad por módulo	Precio Total por módulo
FPGA iCE40UP5K	30	1	30,00
IC REG LINEAR 3.3V 100MA DPAK	0,65	1	0,65
IC REG LINEAR 5V 100MA DPAK	0,68	1	0,68
ADC 12BIT 1CH 1MSPS SOT23-6	4,61	2	9,22
DC DC CONVERTER 9V 1W	1,85	1	1,85
DGTL ISO 2.5KV GEN PURP 16SOIC	1,80979	1	1,81
IC OPAMP GP 50MHZ RRO 8SOIC	2,69	2	5,38
SENSOR CURRENT HALL 50A AC/DC	2,0146	1	2,01
IC OPAMP GP 6MHZ 8SOP	1,25	1	1,25
TRANS NPN DARL 100V 0.5A SOT23-3	0,11817	1	0,12
CAP CER 1UF 25V X7R 0805	0,00874	6	0,05
LED BLUE CLEAR 0805 SMD	0,16632	2	0,33
FIXED IND 47UH 250MA 1.69 OHM	0,32	1	0,32
CONV AC/DC 10W 85-305VIN +/-12VO	10,78	1	10,78
RES 10K OHM 0.01% 1/8W 0805	0,87	2	1,74
RES SMD 64.9 OHM 0.1% 1/8W 0805	0,21968	1	0,22
RES SMD 13K OHM 0.1% 1/4W 0805	0,08704	1	0,09
RES SMD 200 OHM 0.1% 1/4W 0805	0,08704	1	0,09
RES SMD 470K OHM 0.1% 1/4W 0805	0,08704	1	0,09
RES SMD 6.8K OHM 0.1% 1/4W 0805	0,08704	2	0,17
RES SMD 100 OHM 0.1% 1/8W 0805	0,038	1	0,04
CAP CER 10UF 25V X5R 0805	0,02113	2	0,04
CAP CER 0.1UF 25V X7R 0805	0,02696	12	0,32
Opto PC817	0,14	1	0,14
1N4148	0,00948	1	0,01
Borneras 2 vias	0,34	2	0,68
Pines Rectos	0,015	16	0,24
PCB SeedStudio (manufactura+envío)	1,224263333	1	1,22
PCB AllPCB (soldadura)	0,9647501667	1	0,96
TOTAL MÓDULO DE MEDICIÓN			70,51

Tabla 70: Detalle de costos del módulo de medición y preprocesamiento.

Descripción Componente	Precio Unitario (US\$)	Cantidad por módulo	Precio Total por módulo
Capacitor 680nF 25V 10% X7R 1206	0,03616	2	0,07232
Capacitor 33nF 25V 10% X7R 1206	0,02926	1	0,02926
Capacitor 100nF 25V 10% X7R	0,00408	4	0,01632
Cap Al Electrolytic 100uF 25V 20% Case E	0,32	1	0,32
Capacitor 4.7uF 6.3V x7R 10% 0805	0,10658	1	0,10658
Schottky Barrier Diode	0,37	2	0,74
Schottky Barrier Double Diode	0,07	1	0,07
LED YELLOW CLEAR 0603 SMD	0,29	1	0,29
Transient Voltage Suppressor	0,45	1	0,45
Inductor 10uH 1.9A 20% SMD 6x6mm	0,36	1	0,36
Inductor 220uH 180mA 10% 4.5Ohms Unshielded 2.5x1.8mm	0,2	1	0,2
Inductor 10uH 3.1A 20% SMD 6x6mm	0,43	1	0,43
N & P-Channel PowerTrench MOSFETs	0,72	1	0,72
N-channel Enhancement Mode Field-effect Transistor	0,52	2	1,04
PNP General-purpose Transistor	0,15	1	0,15
Resistor 22R 5% 0603	0,00238	6	0,01428
Resistor 10K 5% 0603	0,00238	6	0,01428
Resistor 33K 5% 0603	0,00238	3	0,00714
Resistor 3K 5% 0603	0,00238	2	0,00476
Resistor 1K 5% 0603	0,00238	1	0,00238
Resistor 300 5% 0603	0,00238	1	0,00238
Resistor 0 Ohm	0,024	1	0,024
Signal-Transformer	1,32	1	1,32
Test Point Compact Yellow Base	0,2523	3	0,7569
Capacitor 4.7uF 6.3V x7R 10% 0805	0,10658	11	1,17238
Capacitor 100nF 25V 10% X7R	0,00408	43	0,17544
Capacitor 100nF 50V 10% X7R 0603	0,0052	2	0,0104
Capacitor 10uF 6V3 X7R 10%	0,11809	2	0,23618
Capacitor 2.2uF 6.3V X7R 10% 0603	0,05819	4	0,23276
Capacitor 4.7uF 50V 10% X7R 1206	0,08632	1	0,08632
CAP 470nF X2	0,24255	1	0,24255
Capacitor 1uF 6.3V X7R 10% 0805	0,13969	2	0,27938
Capacitor 1uF 6.3V X7R 10% 0603	0,01126	5	0,0563
Capacitor 100pF 25V 10% X7R 0603	0,05775	1	0,05775
Capacitor 10nF 25V 10% X7R	0,02605	3	0,07815
Cap Al Electrolytic 470uF 50V 20% 12.5x20mm	0,95	2	1,9
Capacitor CER 12PF 16V C0G/NP0	0,04807	4	0,19228
Capacitor Ceramic 10uF 25V X7R 10% 1206	0,0797	1	0,0797
27pF NP0 1%	0,03722	2	0,07444
Capacitor 22nF 50V 10% X7R 0603	0,01392	1	0,01392
Capacitor 4.7uF 25V 10% X5R 0805	0,0693	1	0,0693

CAP 1nF 25V 10% X7R	0,03261	1	0,03261
Capacitor 22uF 6.3V 10% X5R 1206	0,10074	1	0,10074
CAP CER 470PF 10V X7R 0603	0,01698	2	0,03396
CAP CER 47PF 10V C0G/NP0 0603	0,02052	2	0,04104
Capacitor 330pF 50V 5% C0G	0,01016	1	0,01016
LED GREEN CLEAR 0603 SMD	0,04418	5	0,2209
Schottky Diode 1A 30V SMA	0,38	1	0,38
LED RED CLEAR 0603 SMD	0,05382	1	0,05382
High-speed Switching, Double Diode	0,14	1	0,14
4A 250Vac Time Lag Fuse Radial 5.08mm pitch	0,13635	1	0,13635
Ferrite Bead 1.5A 470 Ohms@100MHz 0603	0,02736	9	0,24624
Connector Header 2.54mm pitch dual row 10 positions Right Angle	0,4123	1	0,4123
Connector Header Male 2.54mm pitch single row 2positions	0,087	3	0,261
Inductor 10UH 100MA 780 MOHM	0,1008	4	0,4032
Inductor 10uH 1.9A 20% 0.084hms Shielded 6x6mm	0,1422	1	0,1422
Resistor 300 5% 0603	0,00238	5	0,0119
Resistor 1 5% 0603	0,00554	4	0,02216
Resistor 10K 1% 0603	0,00291	3	0,00873
Resistor 10K 5% 0603	0,00238	6	0,01428
Resistor 100K 5% 0603	0,00238	11	0,02618
Resistor 0R 5% 1206	0,01018	4	0,04072
RES 270K 0.25W 5% 1206	0,00631	3	0,01893
Resistor 10 5% 0603	0,00238	5	0,0119
Resistor 0 Ohm 5% 0805	0,00198	1	0,00198
Resistor 0 Ohm 5% 0603	0,02	13	0,26
Resistor 49.9K 1% 0603	0,00331	1	0,00331
Resistor 9.53K 1% 0603	0,00331	1	0,00331
Resistor 220 5% 0603	0,00238	1	0,00238
Resistor 1K 5% 0603	0,00238	2	0,00476
Resistor 100R 1% 0603	0,00291	2	0,00582
Resistor 330R 1% 0603	0,00291	2	0,00582
Resistor 1K2 1% 0603	0,00291	2	0,00582
Resistor 1K 1% 0603	0,00291	2	0,00582
Resistor 6.65K 1% 0603	0,00291	1	0,00291
Resistor 43K 1% 0603	0,00291	1	0,00291
RES 2K2	0,14	1	0,14
Resistor 51K 1% 0603	0,00331	1	0,00331
Resistor 140K 1% 0603	0,00331	1	0,00331
Resistor 90.9K 1% 0603	0,00196	1	0,00196
Resistor 243K 1% 0603	0,00196	1	0,00196
Complementary Mosfet 2.5V Vgs SC-70	0,10125	1	0,10125

Step Down Converter 1.2A 24V 1.4MHz SOT23-6	2,86	1	2,86
3V3 1A Fast Transient LDO regulator with enable	0,14544	1	0,14544
Soc PLC Transceiver OFDM 80QFP	3,87	1	3,87
CRYSTAL 20MHz 18pF 30ppm HC49	0,196	1	0,196
OPTOISO 3.75KV TRANS 6-SO 4 LEAD	0,51	1	0,51
IC INVERTER SCHMITT 1CH SOT23-5	0,48	1	0,48
Transform 220V to 12VAC 1A	3,63	1	3,63
SeedStudio (fabricación del PCB + envío)	1,224263333	1	1,224263333
PCB AIIPCB (soldadura)	0,9647501667	1	0,9647501667
TOTAL COMUNICACIÓN			29,30

Tabla 71: Detalle de costos del módulo de medición.

Descripción Componente	Precio Unitario (US\$)	Cantidad por módulo	Precio Total por módulo
Borneras 2 vias	0,34	8	2,72
Pines Rectos	0,02	197	2,96
Tamecos	0,68	4	2,71
DC-DC STEP DOWN LM2596	1,80	1	1,80
Diode Bridge RS207	0,45	1	0,45
PCB SeedStudio y AIIPCB (manufactura+envío+soldadura)	2,19	1	2,19
STM32F103C8T6	4,94	1	4,94
TOTAL CPU			17,77

Tabla 72: Detalle de costos de la unidad central de procesamiento.

Descripción Componente	Precio Unitario (US\$)	Cantidad por módulo	Precio Total por módulo
Portaled	0,2	3	0,6
Pulsador	1,04	4	4,16
Display LCD 2x16	5,8	1	5,8
Leds 5mm	0,07	3	0,21
Ficha macho y hembra 20A	2,65	1	2,65
Cable power 10A	3,2	2	6,4
Ficha macho power 10A	0,91	2	1,82
TOTAL INTERFAZ DE USUARIO			21,64

Tabla 73: Detalle de costos de la interfaz de usuario.

Descripción Componente	Precio Unitario (US\$)	Cantidad por módulo	Precio Total por módulo
ECL15UT02-P	32,87	1	32,87
Bateria Ultrafire 26650	4,94	1	4,94
TOTAL ALIMENTACIÓN			37,81

Tabla 74: Detalle de costos del módulo de alimentación.

Descripción Componente	Precio Unitario (US\$)	Cantidad por módulo	Precio Total por módulo
Modulo SD (sin tarjeta de memoria)	1,80	1	1,80
Tarjeta SD 2GB	9,02	1	9,02
TOTAL ALMACENAMIENTO			10,82

Tabla 75: Detalle de costos del módulo de almacenamiento.

Descripción Componente	Precio Unitario (US\$)	Cantidad por módulo	Precio Total por módulo
CRT-2510	25,00	1	25,00
TOTAL CONTACTOR			25,00

Tabla 76: Detalle de costos del contactor.

15.2 Anexo B y C

Ver archivo adjunto “Anexos B y C.pdf”.

15.3 Anexo D

Ver archivos adjuntos “Anexo D - INPI.pdf” y “Anexo D - SAS.pdf”.