



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Implementación de un Módulo Didáctico para el Control Directo de Cargas Domiciliarias Diferibles

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Martín Moresco

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA.

TUTOR

Álvaro Giusto..... Universidad de la República
Florencia Blasina Universidad de la República

CO-TUTOR

Leonardo Steinfeld Universidad de la República

TRIBUNAL

Isabel Briozzo..... Universidad de la República
Germán Fierro Universidad de la República
Nicolás Perez Universidad de la República

Montevideo
jueves 17 agosto, 2023

Implementación de un Módulo Didáctico para el Control Directo de Cargas Domiciliarias Diferibles, Martín Moresco.

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).
Contiene un total de 117 páginas.
Compilada el jueves 17 agosto, 2023.
<http://iie.fing.edu.uy/>

Este prólogo llega tarde, aunque no demasiado.
¿Qué son, a fin de cuentas, cinco o seis años? Un
libro como este, un problema como este, no tiene
ninguna prisa. Además, tanto yo como mi libro
somos amigos del lento.

FRIEDRICH WILHELM NIETZSCHE

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mis compañeros Brandon Martínez y Jorge Emaldi, quienes integraron desde un principio el equipo de GestDem. Sus aportes sobre la arquitectura, la implementación y el desarrollo del sistema fueron fundamentales para que yo pudiera continuar trabajando con el proyecto.

A todos mis compañeros de trabajo, quienes tuvieron una enorme empatía y comprensión sobre cuánto tiempo lleva estudiar y avanzar. Siempre conté con ellos y me permitieron tomarme el tiempo necesario para dedicarme al proyecto. Hago especial mención a mis compañeros Maximiliano Ferrari y a Luigi Madini, quienes me prestaron placas de desarrollo y equipos de comunicación para contar con diferentes estrategias y puntos de vista sobre este trabajo, así como sus aportes de ideas.

A Leo Steinfeld y Andrés Seré por el tiempo que se tomaron en atender mis consultas sobre el IoT.

A Álvaro y Florencia, tutores que supieron guiarme y orientarme y siempre estuvieron dispuestos a responder mis consultas y mis sugerencias. Agradezco también la paciencia que me han tenido.

A Reina, Henry y Carolina, mi madre, padre y hermana respectivamente. Es gracias a ellos que hoy en día cuento con las herramientas que me permiten avanzar y anteponerme ante dificultades. Siempre supieron educarme y me brindaron todo para que yo sea quien soy: la vida no es lo que a uno le pasa, sino lo que uno hace con lo que le pasa. Gracias mamá, papá y Caro.

A Fernanda, mi compañera, mi esposa y mi mejor amiga. Siempre estuvo a mi lado y me acompañó en las largas jornadas en las que me tenía que quedar avanzando. Agradezco mucho su empatía, su amor y su comprensión.

Por último, le doy las infinitas gracias a Amèlie Tamar, la persona que me motiva a intentar ser mejor persona cada día y me impulsa a no quedarme quieto nunca. Te amo hija.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

Los controles de frecuencia tradicionales de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) se basan en trabajar sobre la generación. Es decir, contar con reservas instantáneas de generación en caso de existir escalones positivos en la demanda, o contar con reguladores que, por ejemplo, hagan que la turbina en una represa genere más o menos potencia. En los últimos años, con los avances tecnológicos referidos al Internet de las Cosas (IoT), se han ido desarrollando otras clases de control que utilizan las ventajas de las telecomunicaciones, para lograr el equilibrio del Sistema mediante una Gestión en la Demanda. En este trabajo se desarrolla un nodo con fines didácticos para el Control Directo de Cargas y se estudian a nivel teórico los distintos escenarios de control existentes. El nodo es un dispositivo de adquisición de señales que calcula parámetros de interés como armónicos, defasajes, potencias, valores pico y valores eficaces asociadas a una carga. Mediante programación en Arduino para el procesamiento de señales y Python para implementar una Base de Datos, el dispositivo envía información y cuenta con una salida digital capaz de comandar al relé que alimenta dicha carga. Algunos resultados y componentes físicos serán utilizados en la unidad curricular de Ingeniería Eléctrica “Taller de Fourier”, de la Facultad de Ingeniería. Se implementan dos tipos diferentes de arquitectura. Uno es el modo encapsulado (o cerrado), donde lo interesante es ver al equipo como un nodo conector. El otro es el modo abierto, donde los estudiantes podrán manipular mediante terminales exteriores varias cargas y monitorear señales eléctricas de las mismas.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	III
Resumen	V
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Estrategia de trabajo	3
1.2.1. Modo abierto	4
1.2.2. Modo encapsulado	5
1.3. Alcance y objetivos	6
1.4. Estructura del documento	7
2. Marco teórico y estado del arte	9
2.1. Sistema eléctrico de potencia	9
2.1.1. Marco Teórico	9
2.1.2. La matriz energética en Uruguay	12
2.1.3. Regulación de frecuencia	16
2.2. Gestión de la demanda	21
2.2.1. Marco teórico	21
2.2.2. Estrategias de Control Directo sobre la Carga	23
2.2.3. Gestión de la Demanda en Uruguay	25
3. Medidas eléctricas	29
3.1. Monitor de Energía de Dispositivos (EDM)	30
3.2. Caracterización de los Transformadores de Medida	33
3.2.1. Transformador de Tensión	34
3.2.2. Transformador de Corriente	34
3.3. Circuito Inversor de Tensión	36
3.4. Circuito Acondicionador de Señales (AS)	37
3.4.1. Acondicionamiento de la tensión	39
3.4.2. Acondicionamiento de la corriente	43
3.5. Circuito Rectificador de Onda Completa	49
3.5.1. Cálculos de las ganancias de los circuitos	53
3.6. Relevamiento de señales	54
3.6.1. Señales de salida del TT	54
3.6.2. Señales de corriente: salida del TI, AS y circuito rectificador	56

Tabla de contenidos

4. Procesamiento de señales medidas	63
4.1. Adquisición y procesamiento de datos con la placa Arduino	63
4.1.1. Determinación de la frecuencia de muestreo	66
4.1.2. Validación de datos	66
4.1.3. Cálculo de constantes para tensión y corriente	71
4.1.4. Implementación con cargas	72
4.2. Implementación de la base de datos MySQL mediante comunicación serial	75
4.3. Resumen	80
5. Conclusión y trabajos a futuro	81
A. Código Arduino	83
A.1. Placa de desarrollo Arduino: validación de código	83
A.1.1. Declaración de constantes y variables	83
A.1.2. Declaración del Void Setup	84
A.1.3. Declaración del Void Loop	85
A.1.4. Declaración de las funciones	87
B. Manual de Usuario de la Caja EDM	91
B.1. Manual de Usuario Caja EDM	91
B.1.1. Modo Abierto	95
B.1.2. Modo Cerrado	95
Referencias	97
Índice de tablas	100
Índice de figuras	102

Capítulo 1

Introducción

Nuestro país viene desarrollando desde hace quince años una renovación en su matriz energética, explotando de manera extraordinaria las fuentes de obtención de energía renovable. Hasta el año 2006, el consumo eléctrico de Uruguay se abastecía principalmente de dos fuentes: hidráulica y fósil. Es a partir de este año que otros recursos comienzan a ser introducidos en la matriz energética, comenzando por la obtención de energía mediante combustión de biomasa. En el año 2008 comienza a participar la generación eólica, registrando importantes desarrollos entre 2014 y 2017 y representando, al día de hoy, un 31 % de la generación instalada en el país. A partir del año 2015 también entra en juego la generación mediante el aprovechamiento de la energía solar, aunque sin tanto crecimiento como el eólico. Dichas fuentes de energía tienen la ventaja de ser inagotables y limpias, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la inserción a gran escala de este tipo de fuentes genera en la matriz energética un factor grande de incertidumbre, en particular, la generación eólica, teniendo presente que dichas fuentes se encuentran esparcidas a lo largo de todo el territorio nacional (fuentes desperdigadas), que no todos los parques eólicos tienen la misma capacidad de generación, y que dependen de factores externos como las corrientes de aire. En caso de ocurrir una inestabilidad en la red, algunas variables de la misma dejan de trabajar en su punto de funcionamiento normal, pudiéndose observar apagones, sobre/sub-tensiones, y variaciones en la frecuencia. En este trabajo se desarrolla un módulo de medida con fines didácticos, sirviendo como base para la implementación de un nodo de control con el fin de regular la variable frecuencia. [17].

1.1. Motivación

La *Gestión de la Demanda* es una estrategia reciente y en desarrollo, donde el operador del sistema de energía eléctrica apela a los consumidores para gestionar el consumo, permitiendo mejorar la calidad y eficiencia del suministro eléctrico.

Desbalances momentáneos de potencia ocasionan variaciones en la frecuencia

Capítulo 1. Introducción

del sistema, la cual de sobrepasar ciertos umbrales, ocasiona importantes daños a los consumidores y al sistema eléctrico en su conjunto. Esto implica que, frente a un desbalance momentáneo de potencia (la salida de servicio imprevista de un generador, por ejemplo), el balance generación-consumo debe ser restituido lo antes posible. Tradicionalmente el balance es restaurado por el control de frecuencia de la generación, llamado Regulación Primaria de Frecuencia (RPF) cuyos tiempos de respuesta son de varios segundos.

Gestión de la Demanda es un término que engloba distintos paradigmas de gestión de las cargas del sistema eléctrico con el fin de mejorar el desempeño, eficiencia y durabilidad del sistema en sí mismo. El *Control Directo de la Carga* es un tipo de *Gestión de la Demanda*, su idea fue patentada en Estados Unidos en el año 1982 por el ingeniero Fred Schweppe [1]. La idea central del uso del *Control Directo de la Carga* para regular la frecuencia del sistema consiste en que el operador del sistema eléctrico controle directamente parte del consumo. Dependiendo de la estrategia de control utilizada, se puede llegar al equilibrio en una ventana de tiempo inferior a la RPF.

En promedio en Uruguay, un 36 % del consumo de energía eléctrica de los hogares está destinado a calentar agua en calefones [9], por lo que en cualquier momento del día, una fracción importante de la potencia que se consume es con este fin. Lo especial de este tipo de carga, es que se trata de un tipo de carga diferible: el usuario no notará ninguna afectación en su confort si esta carga es manipulada por el operador del sistema eléctrico durante un corto período de tiempo. Por lo que, si ante un momentáneo déficit de generación, el operador del sistema eléctrico pudiese desconectar parte del consumo diferible de los hogares durante algunos segundos, resolvería el problema en la ventana de tiempo en que el sistema está justamente expuesto, sin afectación del confort del usuario.

Para el proyecto se pretende estudiar (entre otras cosas), trabajos referidos a la gestión de las cargas de manera que no afecte el confort del cliente. Un antecedente respecto al estudio de la Gestión de Demanda fue realizado en la Facultad de Ingeniería es el proyecto de grado “*Gestión de la demanda eléctrica domiciliaria*” [8], en el cual se estudia el fenómeno descrito anteriormente pero no desde la óptica de realizar el control de la frecuencia en la red eléctrica, sino desde el punto de vista de eficiencia energética.

Por otro lado, se suma como motivación la necesidad de realizar experiencias de laboratorio a nivel de formación de ingeniería.

1.2. Estrategia de trabajo

Como se comentó en el resumen, algunas partes de este proyecto serán utilizadas para la unidad curricular Taller de Fourier de la Facultad de Ingeniería. Por lo tanto, se plantean dos tipos de arquitectura distinta con fines de mantener determinadas partes aisladas y protegidas contra contactos eléctricos, pero con el objetivo de adentrarse en mayor medida a las partes de desarrollo y adquisición de señales.

En la figura 1.1 se muestra el diagrama general con el que se estará trabajando y la figura 1.2 muestra el diagrama de bloques del módulo. Se cuenta con transformadores de tensión y corriente, un circuito acondicionador de señales que cumple la función de filtro pasa-banda, una placa de desarrollo Arduino MKR NB1500 para procesar las señales, un circuito rectificador de onda completa y un relé de estado sólido para comandar la carga.

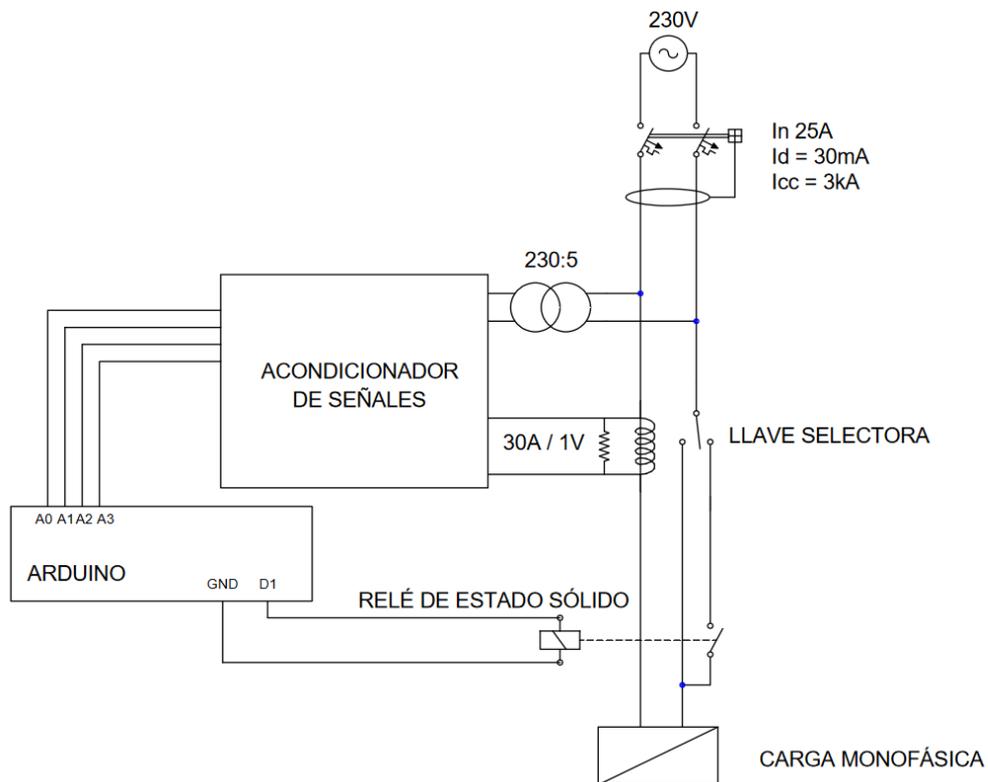


Figura 1.1: Esquemático general del trabajo

Capítulo 1. Introducción

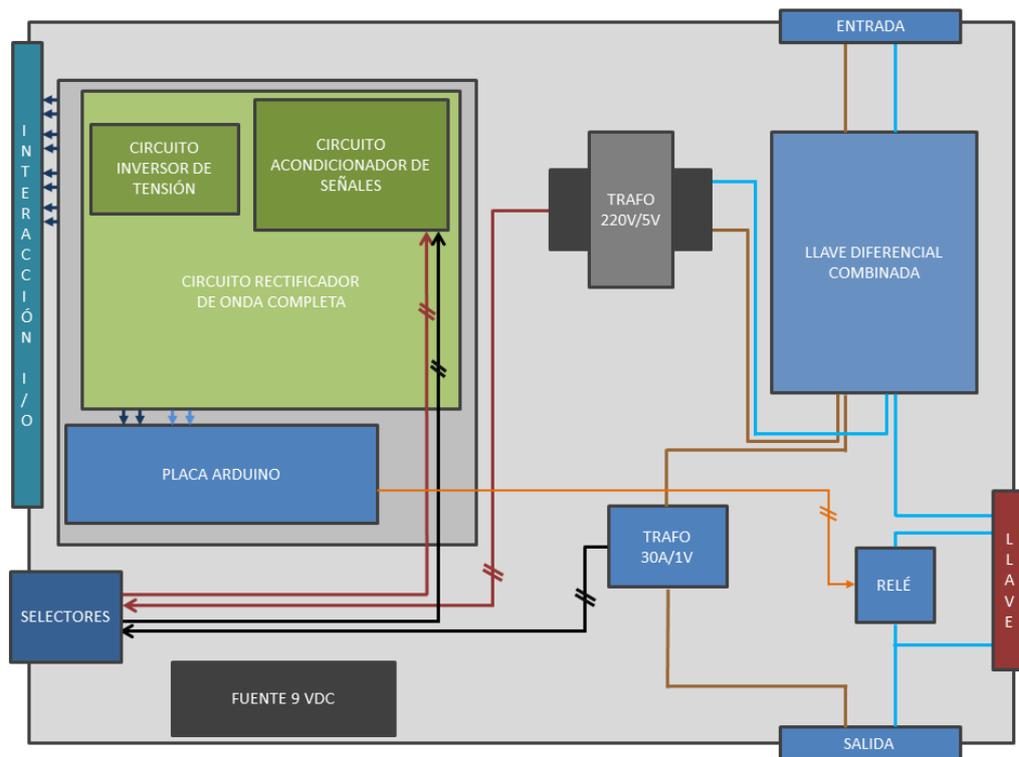


Figura 1.2: Esquema de montaje de la caja EDM diseñada

1.2.1. Modo abierto

El objetivo del modo abierto es contar con acceso a los terminales de conexión del dispositivo de medidas eléctricas (Energy Device Monitoring, EDM). En particular, se tiene acceso a los bornes de salida del transformador de tensión, bornes de salida del transformador de corriente y los bornes de entrada y salida del circuito acondicionador de señales. De esta forma se permite la lectura de las señales de salida de los transformadores de medida mediante un osciloscopio o el Analog Discovery 2 [20], y también poder manipular el circuito acondicionador, pudiendo imponer como entrada directamente las salidas de los transformadores de medida, o señales de interés generadas mediante un generador de ondas. Se cuenta también con acceso a los bornes de salida del circuito rectificador de señales. El mismo cumple con la función de rectificar señales para que puedan ser leídas por la placa Arduino, puesto que el rango de trabajo de sus entradas analógicas es de 0 V a 3.3 V. Seleccionando este modo mediante la llave que se encuentra en el exterior de la caja, la carga se conecta directamente de la salida de la llave diferencial combinada. En la figura 1.3 se muestra el esquema de entradas y salidas:

1.2. Estrategia de trabajo

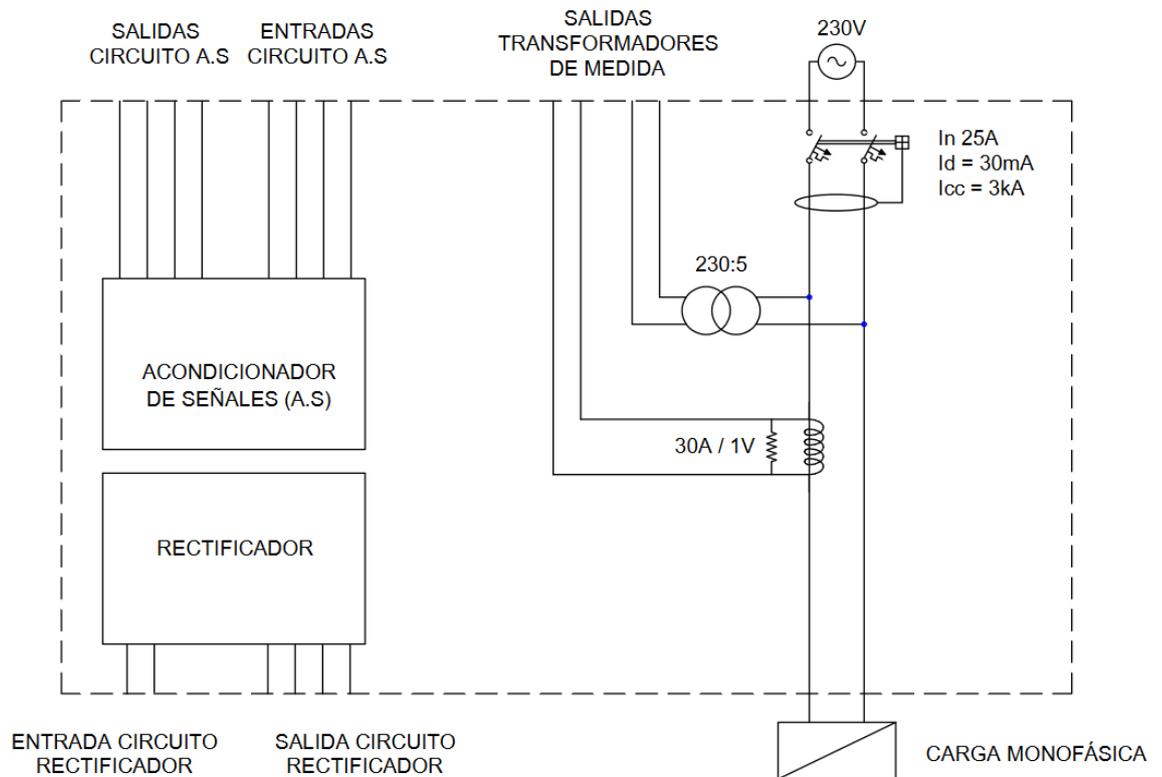


Figura 1.3: Esquemático modo abierto

1.2.2. Modo encapsulado

Para el modo encapsulado, las salidas de los transformadores de medida se conectan a la entrada del circuito acondicionador de señales, la salida de dicho circuito se conecta a la entrada del circuito rectificador de onda completa, y la salida del mismo se conecta a las entradas analógicas de la placa Arduino. Estas conexiones se realizan mediante llaves switch que se encuentran en el exterior de la caja.

De esta forma, la placa MKR recibe como entrada analógica las señales de tensión y corriente, las reconstruye, realiza cálculos con las mismas, y envía los valores calculados a una base de datos mediante el puerto serial hacia una PC. Seleccionando la llave de 3 posiciones para el modo encapsulado, la carga ahora pasa a ser comandada a través de un relé, que es accionado por la placa Arduino. La figura 1.4 muestra el conexionado para esta arquitectura:

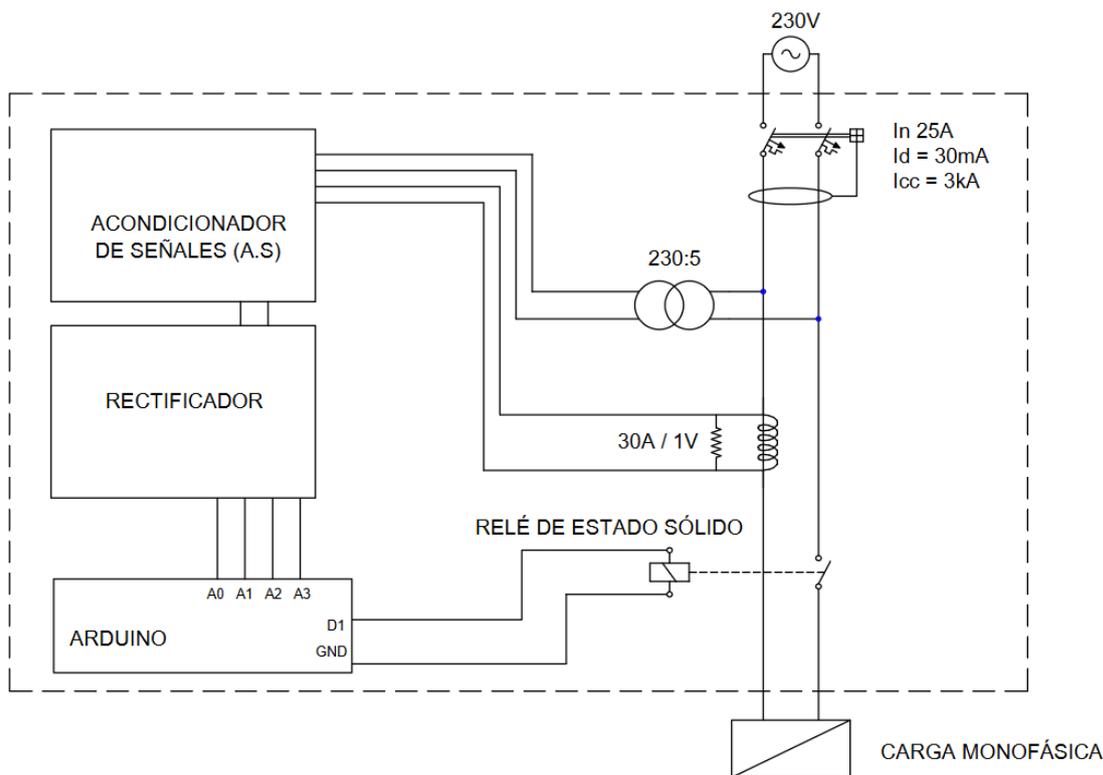


Figura 1.4: Esquemático modo cerrado

1.3. Alcance y objetivos

El objetivo del proyecto es desarrollar un módulo hardware de monitoreo y control con fines didácticos, para ser utilizado en la unidad curricular Taller de Fourier.

El alcance inicial del trabajo abarcaba temas pensados para resolver en el período de tiempo estipulado para el Proyecto (aproximadamente un año) y para tres estudiantes. La formación original de GestDem estaba integrada por: Brandon Martínez, Jorge Emaldi y Martín Moresco. El alcance debió ser modificado dado que el trabajo culmina con dos miembros menos. Se describen a continuación los alcances:

Alcance original del trabajo: implementar el sistema simulador del SEP, el cual estará compuesto por algunos bloques hardware/software preexistentes, y por otros a desarrollar. El sistema de control deberá ser capaz de realizar las siguientes funciones:

- Adquisición de señales de tensión y corriente de las CDD.
- Cálculo de características del consumo: tensión y corriente eficaz, potencia activa y reactiva, etc.

1.4. Estructura del documento

- Conexión/Desconexión remota de las CDD.
- Concentración en un servidor en tiempo real de los datos de las CDD que integren el sistema.
- Ejecución de un programa en el servidor que simule la respuesta de la frecuencia del sistema eléctrico en función de los consumos de CDD.
- Ejecución de un programa de control en el servidor capaz de asegurar regulación de frecuencia mediante la conexión/desconexión de las CDD sin perjuicio del confort de los usuarios.

El alcance fue modificado:

- Adquisición de señales de tensión y corriente de las CDD.
- Cálculo de características del consumo: tensión y corriente eficaz, potencia activa y reactiva, etc.
- Concentración en un servidor en tiempo real de los datos de las CDD que integren el sistema.

Alcaración: el documento y los resultados, así como los códigos de programación son en su totalidad de mi autoría. Sin embargo, los planteos generales como la arquitectura del sistema y los primeros prototipos de las cajas de medición fueron pensadas y planteadas entre los 3 miembros originales.

1.4. Estructura del documento

El documento se divide en cinco capítulos principales y dos anexos.

El primer capítulo es una introducción general del trabajo y se describe la motivación del proyecto junto con las dos diferentes estrategias de trabajo comentadas arriba. El segundo capítulo es un marco teórico de conceptos que son utilizados en el resto del trabajo. En particular se da una introducción al concepto de Sistema Eléctrico de Potencia, cómo se conforma la red eléctrica y cómo se aplican los controles de frecuencia en nuestro país, así como también una descripción del tema Gestion de la Demanda, con sus distintas estrategias de control y cómo se desarrolla la misma en Uruguay. En el capítulo 3 se describen las medidas eléctricas que fueron necesarias para conseguir adaptar las señales, detallando el funcionamiento de cada circuito y la justificación de su elección. En el capítulo 4 se detalla y explica el procesamiento de las señales para la obtención de los valores de interés y se realiza una comparación entre lo obtenido y lo esperado. Por último, se resumen las conclusiones en el capítulo 5.

En el Anexo A se presenta el desarrollo de código implementado en Arduino para el procesamiento de señales y en el Anexo B el Manual de Usuario de la caja de monitoreo.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 2

Marco teórico y estado del arte

2.1. Sistema eléctrico de potencia

2.1.1. Marco Teórico

Un Sistema Eléctrico de Potencia (S.E.P) tiene por objetivo principal el abastecimiento de la energía eléctrica a los centros de consumo, integrando para dicho fin una red eléctrica interconectada de una forma compleja, procurando mantener la confiabilidad y calidad del servicio dentro de márgenes aceptables. Por tanto, debe contar con los equipos generales y de protección adecuados, redundancia para poder realizar tareas de mantenimiento sin interrupción del servicio y reserva rotante en casos de déficit de generación. [2]

Dichos sistemas se dividen usualmente en 4 partes principales: generación, transmisión/subtransmisión, distribución y cargas, que se pueden apreciar en la figura 2.1

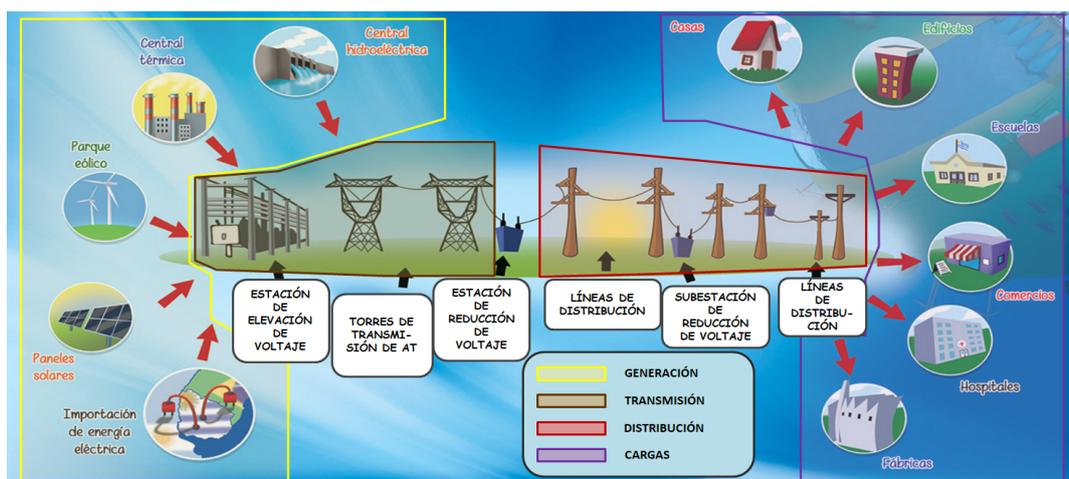


Figura 2.1: Esquema básico de un SEP. Fuente [7]

Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte

El siguiente listado resume las principales características de cada parte:

- **Generación:** Corresponde a la producción de la energía eléctrica y se realiza en centrales, manejando grandes volúmenes de potencia y niveles de tensión usualmente menores a 25kV. Uno de los componentes principales son los generadores síncronos trifásicos (alternadores). Su funcionamiento se basa en dos campos electromagnéticos rotatorios, donde uno de ellos es producido por el rotor excitado por corriente continua y girando a velocidad de sincronismo, y el otro producido en el estator por la armadura trifásica de corrientes. La fuente de movimiento mecánico rotativo puede surgir de una corriente de agua que mueve una turbina (represas hidroeléctricas), corrientes de aire que producen el giro de los molinos (parques aerogeneradores), turbinas movidas por vapor producto de la combustión de gas, carbón o biocombustibles, y en otros países combustión por energía nuclear, entre otros. También se cuenta con generación solar fotovoltaica, donde la corriente continua pasa a alterna mediante inversores de potencia. Al no ser rentable el transporte de volúmenes tan altos de potencia a tensiones menores a 25kV, dichos centros cuentan con transformadores elevadores, que permiten la conexión a las líneas de transmisión en alta tensión (AT).
- **Transmisión:** las redes de transmisión son las encargadas de transportar la energía en grandes cantidades desde las centrales generadoras hacia las estaciones reductoras para conectarse a la red de distribución. Los niveles de tensión manejados en nuestro país son 500kV, 230kV, 150kV y subtransmisión a nivel 63kV. Estos tipos de redes operan en anillo cerrado, garantizando la continuidad del servicio frente a fallos en una de las líneas, dado que el objetivo principal de la transmisión es la de continuidad en el servicio. En la figura 2.3 se muestra la red nacional de transmisión, donde se aprecian distancias de conexión de cientos de kilómetros entre las diferentes estaciones.
- **Distribución:** las redes de distribución canalizan la energía eléctrica desde las estaciones reductoras que la conectan a la red de transmisión, hacia los consumidores finales, generando un flujo unidireccional que es característico de redes que operan de forma radial. La distribución primaria trabaja usualmente en un rango de 4 a 34.5 kV y alimenta cargas puntuales definidas geográficamente. La distribución secundaria reduce aun más el nivel de tensión, a niveles de 400V y 230V, para poder ser utilizado en la red de baja tensión (BT) por sectores comerciales y residenciales.
- **Cargas:** Las cargas de un SEP se dividen generalmente en tres categorías: comercial, residencial e industrial. Algunas cargas industriales son alimentadas directamente desde la red de transmisión (cuando su potencia lo amerita), y otras mediante la red de distribución primaria. Las cargas industriales se componen por varias sub-cargas, y los motores de inducción son una de las sub-cargas que se encuentran en mayor proporción. Las cargas comerciales y residenciales se componen principalmente de luminarias, calentadores y enfriadores (agua y ambiente).

2.1. Sistema eléctrico de potencia

Los sistemas eléctricos cuentan con sistemas de protección y centros de control de la energía para asegurar una operación confiable y económicamente rentable. Los centros de control están equipados con computadoras y monitores que procesan toda la información del SEP en vivo a través de dispositivos de adquisición de datos a distancia. Los operadores que monitorean la red deben asegurar mediante comandos la estabilidad de la red, y cumplir con las demandas de energía. Al ocurrir contingencias, se establecen alarmas que dan aviso a los operadores cuando los parámetros monitoreados se salen del rango de valores normales. Para llegar a un sistema de control confiable y seguro, usualmente se hace uso de software y herramientas de simulación escritos en lenguaje de alto nivel, llamado sistema SCADA (supervisor de control y adquisidor de datos). En dicho sistema se monitorea y analiza continuamente: parámetros y rendimiento en las líneas de transmisión, análisis de control de flujo, planificación económica de generación, análisis de fenómenos transitorios en las máquinas síncronas, fallas balanceadas, componentes simétricas y fallas desbalanceadas, estudios de estabilidad y sistema de control de potencia. [2] [13] [11]

La figura 2.2 muestra el tablero de control que se encuentra en el Despacho Nacional de Cargas (DNC), donde se controla la totalidad del SEP de nuestro país:



Figura 2.2: Tablero de control del Despacho Nacional de Cargas [28]

Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte

2.1.2. La matriz energética en Uruguay

La figura 2.3 muestra la red de transmisión de energía eléctrica en nuestro país:

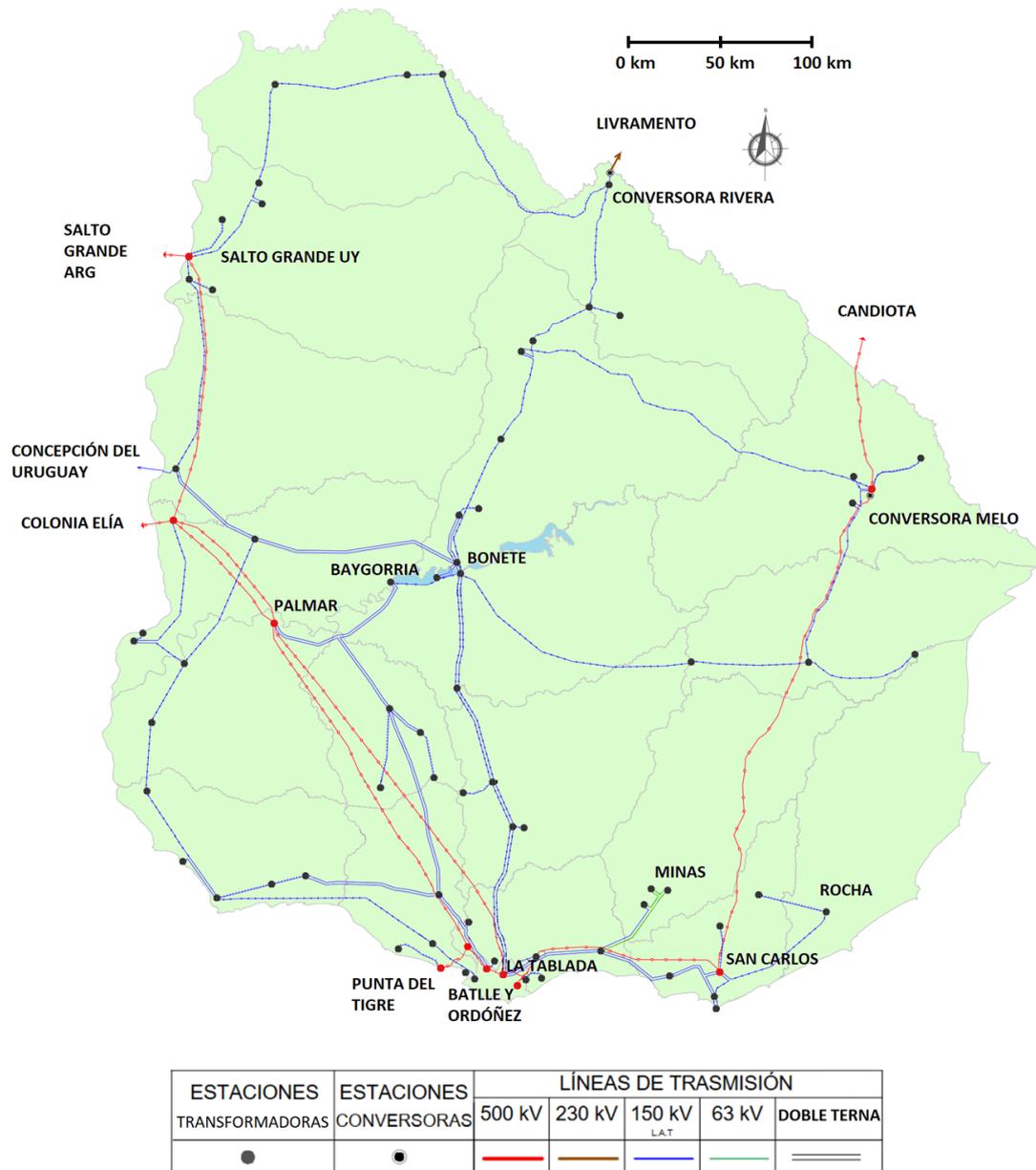


Figura 2.3: Red nacional de transmisión. Figura realizada a partir del Mapa de la red eléctrica de Transmisión de UTE actualizado al 16/04/2021

2.1. Sistema eléctrico de potencia

Al año 2021, la red de transmisión cuenta con una extensión total aproximada (kilómetros de líneas y cables) de 61 km a nivel 63 kV, 4580 km a nivel 150 kV, 11 km a nivel 230 kV, y 1140 km a nivel 500 kV. La red de distribución cuenta con extensiones totales (en todo el territorio nacional) de 5090 km para niveles de 30 kV y 60 kV, 54400 km para niveles de 22 kV, 15 kV, y 6 kV, y 28700 km para 230V y 400V [18].

Uruguay tiene una capacidad instalada de generación de 4912 MW, ¹ de los cuales 31 % corresponden a generación eólica, 31 % a generación hidráulica, 5 % solar, 9 % biomasa y 24 % fósil, lo que nos convierte en un país con un 76 % de potencia instalada proveniente de fuentes renovables [17].

La generación hidráulica corresponde a las 4 represas en el país:

- Gabriel Terra (Rincón del Bonete), con una capacidad instalada de 152 MW
- Baygorria, con capacidad de 108 MW
- Palmar (o Constitución), con potencia instalada de 333 MW
- Salto Grande, con potencia instalada de 945 MW

La generación térmica corresponde a las dos centrales con turbinas de gas, una central de ciclo combinado (combinan turbinas de gas y de vapor, el artículo de la cita [36] describe cómo funciona este ciclo en Uruguay), y una central con motores recíprocos (donde se obtienen gases a alta presión mediante el desplazamiento de un émbolo mecánico [34]):

- Motores recíprocos - José Batlle y Ordoñez, con potencia instalada de 70 MW
- Ciclo combinado - Central Punta del Tigre B, con potencia instalada de 532 MW
- Turbina de gas - Central Térmica de Respaldo La Tablada (CTR) con capacidad instalada de 212 MW
- Turbina de gas - Central Punta del Tigre A con potencia instalada de 350 MW

La generación eólica se encuentra distribuida a lo largo de todo el país, por lo que nombrar cada central se convertiría en una lista bastante extensa. El sistema uruguayo cuenta además con intercambios de energía internacional mediante la interconexión de la red con Brasil y con Argentina. La interconexión con Argentina se realiza a través de 2 puntos a niveles de tensión de 500kV, formando una configuración de cuadrilátero en Salto Grande AR - UY y San Javier - Colonia

¹Datos del Balance Energético 2021 del MIEM

Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte

Elía, y un tercer punto a nivel 150kV en Paysandú - Concepción del Uruguay (ver figura 2.4). La interconexión con Brasil se realiza mediante una convertora en Rivera, permitiendo intercambios de hasta 70 MW de forma bidireccional, y una convertora en Melo a nivel 500 kV, con capacidad de intercambio de 500 MW [18]

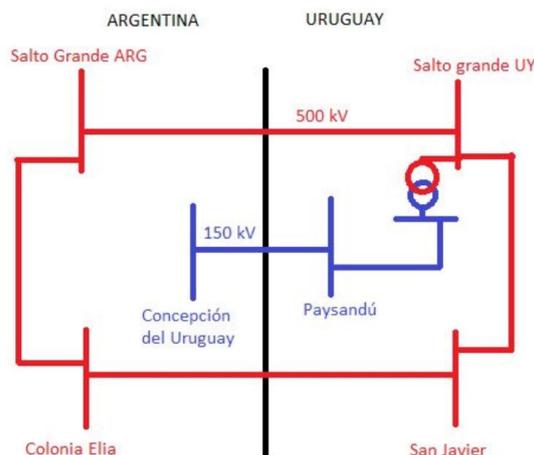


Figura 2.4: Conexiones Internacionales con Argentina²

En términos de la demanda, la participación por grupo es la que muestra la siguiente figura:

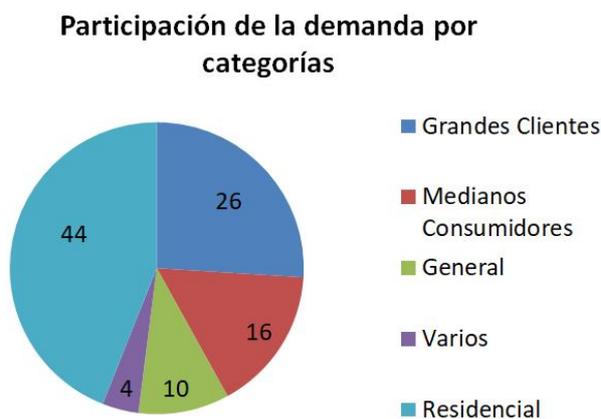


Figura 2.5: Demanda por categoría. Gráfica de elaboración propia en base a datos de UTE en Cifras, 2021 [18]

²https://adme.com.uy/mdl/mdl_protegido/faq.php

2.1. Sistema eléctrico de potencia

Dentro de la participación residencial, se subdivide el consumo según los tipos de carga de la siguiente forma:

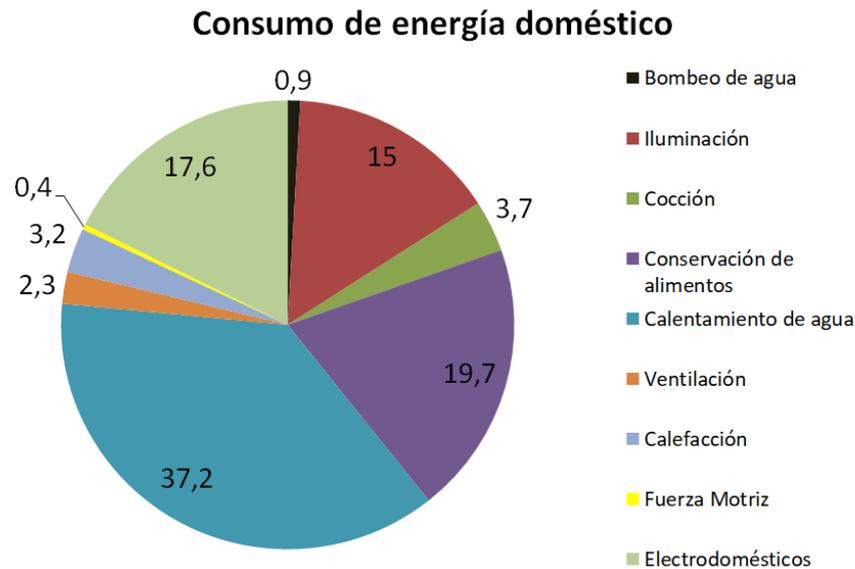


Figura 2.6: Demanda residencial por tipo de carga. Gráfica de elaboración propia en base a datos de Cuaderno de la Energía de UTE, 2015 [7]

Dichos datos sobre la demanda brindan los elementos suficientes para asegurar que actuando sobre cargas domiciliarias destinadas al calentamiento del agua, es posible llegar en la sumatoria a la potencia total necesaria para poder restituir al sistema frente a un desbalance energético, puesto que casi la mitad (un 44 %) de la demanda se destina a carga residencial, y un 37.2 % de la misma corresponde con calentamiento de agua.

Por otro lado, la demanda no es constante a lo largo del día, sino que presenta valles y picos a lo largo del mismo. Esta información se encuentra disponible en la referencia [33]. La siguiente figura muestra la demanda registrada entre el 8 y el 11 de mayo de 2023. Se puede observar un comportamiento periódico diario, donde los valles se encuentran en el entorno de los 900 MW y se dan a las 4 AM, luego un aumento gradual hasta el primer pico del mediodía, cercano a los 1400 MW, una disminución en el consumo formando un valle en “U” a lo largo de la tarde, hasta el segundo pico (máximo absoluto) que alcanza en promedio los 1600 MW y se da en un entorno de las 22 horas. Este comportamiento coincide con las actividades promedio de la población: descanso, comienzo de la jornada (laboral, escolar, etc), horario del almuerzo, el regreso a casa (utilización de calefones, aires acondicionados, luminarias, etc). La figura muestra además la generación y el origen de la misma.

Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte

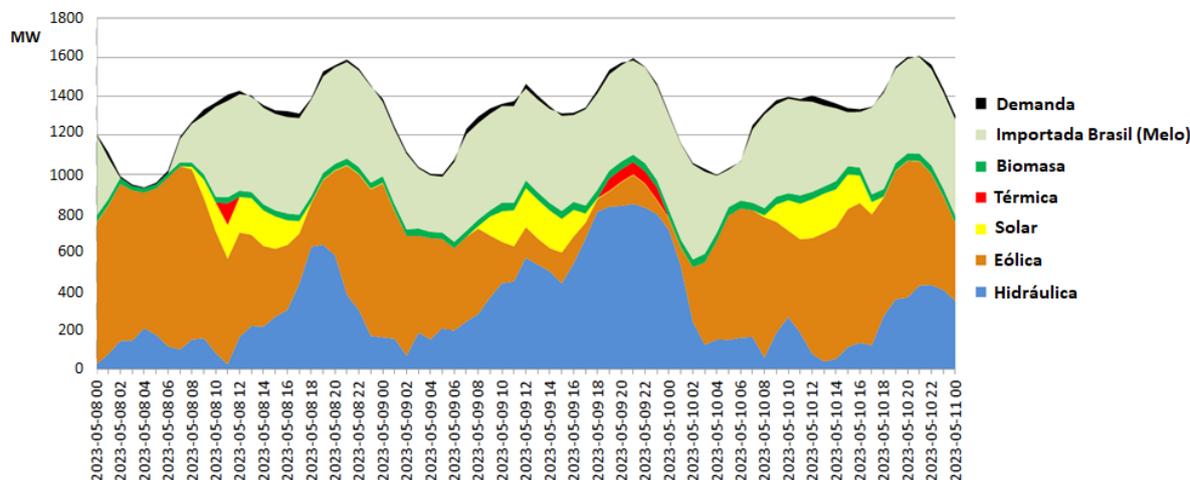


Figura 2.7: Generación por fuente. Gráfica de elaboración propia en base a datos de generación de ADME [33]

2.1.3. Regulación de frecuencia

La presente sección es principalmente un resumen del capítulo Regulación de frecuencia de la referencia [16].

En un SEP es crucial contar con regulación de frecuencia; la misma es una variable que asegura la buena calidad de la energía, y en caso de salirse de su rango de funcionamiento normal, puede generar daños en cargas y equipos industriales, además de afectar a equipos que funcionan con relojes y automatismos que sincronizan el tiempo a partir de la frecuencia, generando adelantos o atrasos no deseados.

Tradicionalmente, la regulación de frecuencia se lleva a cabo en tres etapas [14]:

- Regulación primaria de frecuencia (RPF): es el control más rápido, actuando en un rango menor a 30 segundos. De forma local, cada generador cuenta con unidades reguladoras automáticas de potencia, encargadas de cambiar el torque desarrollado de forma mecánica a través de sistemas de control, con el objetivo de equilibrar desbalances instantáneos entre generación y demanda [3].
- Regulación secundaria de frecuencia (RSF): su tiempo de actuación es del orden de minutos. Opera una vez superado el transitorio producto de la RPF. El objetivo es inyectar potencia mecánica en los generadores (actúa de manera zonal, en un área de control), de manera que se restituya el valor a la frecuencia nominal del sistema.

2.1. Sistema eléctrico de potencia

- Regulación terciaria de frecuencia (RTF): actúa en el orden de las decenas de minutos (usualmente 10 o 15 minutos) sobre un área de control, y busca repartir las cargas con el fin de preparar al sistema para una nueva perturbación, y minimizar costos en el abastecimiento de energía.

La frecuencia de una red eléctrica está relacionada con la velocidad de rotación de los generadores síncronos y de los pares de polos de los mismos. Dicha velocidad se rige por la ecuación 2.1

$$N_s = \frac{f}{p} \times 60 \quad (2.1)$$

donde N_s es la velocidad de rotación en revoluciones por minuto, f la frecuencia de la red eléctrica y p el número de pares de polos del generador. Por tanto, para ejemplificar, un generador cuyo rotor gira a 3000 rpm y tiene 2 polos, está generando en el estator un sistema de corrientes de 50 Hz.

Para que la velocidad rotacional sea constante, la aceleración angular debe ser cero. La siguiente ecuación representa la segunda cardinal para un cuerpo rígido en el que actúa una suma de torques en torno al eje:

$$\sum T = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2.2)$$

donde J es el momento de inercia y ω la velocidad angular del rotor. Para el caso de un generador, el rotor gira producto de dos pares opuestos: el par mecánico T_m que tiende a acelerar el eje y se produce por el movimiento de las turbinas, y el par eléctrico T_e que tiende a frenarlo y corresponde a la potencia eléctrica demandada por las cargas. En estado de equilibrio, ambos pares son iguales y el generador gira a velocidad constante. En la siguiente figura se ve un diagrama esquemático de ambos pares aplicados al rotor de un generador síncrono:

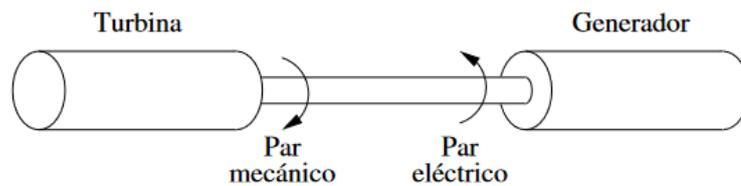


Figura 2.8: Pares aplicados al eje de un generador síncrono

Para esta aplicación, la ecuación 2.2 se convierte en:

$$T_m - T_e = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2.3)$$

Sea ω_0 la velocidad angular de referencia, la desviación de la velocidad del rotor respecto de la velocidad de referencia es $\Delta\omega = \omega - \omega_0$, por tanto:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d(\omega - \omega_0)}{dt} = \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (2.4)$$

Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte

Uniendo las ecuaciones 2.3 y 2.4 se tiene:

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (T_m - T_e) \quad (2.5)$$

Teniendo en cuenta que el par (mecánico o eléctrico) multiplicado por la velocidad angular es igual a la potencia (mecánica o eléctrica), se definen referencias base para obtener una ecuación en valores unitarios:

- Potencia base: S_{base}
- Velocidad angular base: ω_{base}
- Par base: $T_{base} = \frac{S_{base}}{\omega_{base}}$

Introduciendo las referencias base, la ecuación 2.5 se convierte en

$$\frac{1}{\omega_{base}} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{S_{base}}{\omega_{base}^2 \cdot T_{base}} \frac{1}{J} \cdot (T_m - T_e) \quad (2.6)$$

Existe un parámetro en los SEP llamado constante de inercia H , que representa el cociente entre la energía cinética que se acumula en el rotor de los generadores a la velocidad de sincronismo y la potencia base (por tanto tiene unidades de tiempo):

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{J\omega_{base}^2}{S_{base}}$$

Expresando 2.6 con H :

$$\frac{1}{\omega_{base}} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{2H} \cdot \frac{T_m - T_e}{T_{base}} \quad (2.7)$$

Dicha ecuación se puede expresar en términos p.u.

$$\frac{d\Delta\omega(p.u.)}{dt} = \frac{1}{2H} \cdot (T_m(p.u.) - T_e(p.u.)) \quad (2.8)$$

Resultados importantes:

- A igualdad de pares, la diferencia entre la velocidad de rotación y la velocidad de sincronismo es una constante.
- A mayor constante de inercia de un sistema eléctrico, más difícil es sacar al mismo de su punto de funcionamiento nominal.
- En caso de ocurrir un desbalance a favor del par mecánico (aumento en la generación manteniendo la demanda o mantenimiento en la generación frente a una disminución de demanda) se producirá una aceleración en el eje.

2.1. Sistema eléctrico de potencia

- De forma análoga, en caso de ocurrir un desbalance a favor del par eléctrico, el eje comenzará desacelerar.

Para ejercer un control frecuencia - potencia, se utilizan válvulas de admisión en las estaciones generadoras, que permiten regular el flujo del elemento mecánico que hace girar las turbinas, de acuerdo a información que recibe el sistema de control sobre: frecuencia de la red eléctrica y potencia demandada en la salida, frecuencia mecánica del eje, y la frecuencia y potencia de referencia. La figura 2.9 esquematiza esta idea:

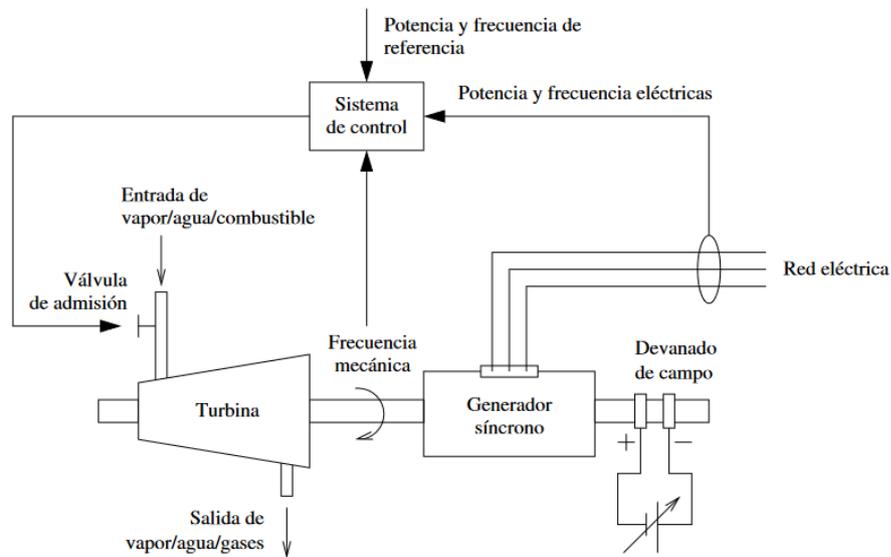


Figura 2.9: Sistema de control asociado a una central de generación

Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte

El sistema de control logra controlar la frecuencia a través de la regulación de potencia, por lo que resulta útil escribir la ecuación 2.8 en términos de potencia, y no de par, utilizando la relación $P = \omega T$. Considerando un modelo de pequeños deslizamientos, donde las desviaciones son referidas a un estado inicial de equilibrio P_0 , ω_0 y T_0 , se puede escribir que

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta\omega)(T_0 + \Delta T) \quad (2.9)$$

Haciendo una linealización en torno al punto de equilibrio, se obtiene

$$\Delta P = \omega_0 \Delta T + T_0 \Delta\omega \quad (2.10)$$

Aplicando la ecuación a los pares mecánico y eléctrico y considerando que en régimen permanente $T_{m0} = T_{e0}$:

$$\begin{aligned} \Delta P_m - \Delta P_e &= \omega_0 \Delta T_m + T_{m0} \Delta\omega - \omega_0 \Delta T_e - T_{e0} \Delta\omega = \\ &= \omega_0 (\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} - T_{e0}) \Delta\omega = \\ &= \omega_0 (\Delta T_m - \Delta T_e) \end{aligned}$$

Por lo tanto, en términos por unidad de frecuencia angular,

$$\Delta P_m(p.u) - \Delta P_e(p.u) = \Delta T_m(p.u) - \Delta T_e(p.u) \quad (2.11)$$

y la ecuación 2.8 en términos de potencia se puede escribir como

$$\frac{d\Delta\omega(p.u)}{dt} = \frac{1}{2H} \cdot (\Delta P_m(p.u) - \Delta P_e(p.u)) \quad (2.12)$$

La Transformada de Laplace de la ecuación 2.12 es

$$s \cdot \Delta\omega(s) = \frac{\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)}{2H} \quad (2.13)$$

cuya función de transferencia se representa por el siguiente diagrama de bloques:

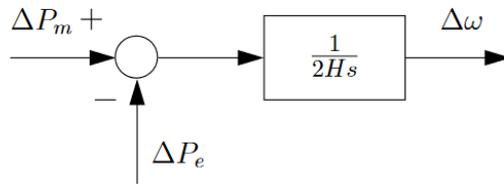


Figura 2.10: Función de transferencia del generador síncrono

Por último, es posible modelar también el efecto de la frecuencia sobre las cargas. En un SEP se pueden clasificar las cargas en dos categorías: las que demandan una potencia constante independientemente de la frecuencia (por ejemplo elementos resistivos, iluminación incandescente) y las que frente a variaciones en

2.2. Gestión de la demanda

la frecuencia, cambian la potencia demandada (por ejemplo los ventiladores y las bombas aumentan su demanda de potencia si la frecuencia sube). Sea ΔP_l el incremento de potencia independiente de la frecuencia y D una constante que relaciona la variación de la frecuencia con el incremento de potencia (constante de amortiguamiento) se tiene que

$$\Delta P_e = \Delta P_l + D\Delta\omega \quad (2.14)$$

por lo que tomando en cuenta dicho factor, la ecuación 2.13 se transforma en:

$$s \cdot \Delta\omega(s) = \frac{\Delta P_m(s) - \Delta P_l - D\Delta\omega}{2H} \quad (2.15)$$

cuyo diagrama de bloques es:

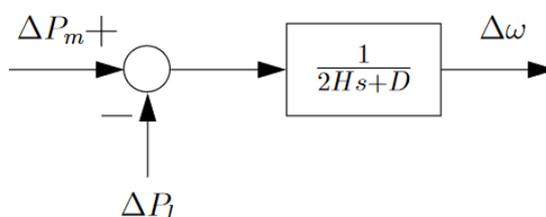


Figura 2.11: Efecto de la frecuencia sobre la demanda

Un resultado interesante es que esta dependencia que tienen ciertas cargas con la frecuencia, funciona como un mecanismo de amortiguamiento: un aumento en la frecuencia provoca un aumento en la potencia demandada de estas cargas, por tanto el término $D\Delta\omega$ se opone al aumento de frecuencia inicial. La figura 2.12 representa una diagrama de este efecto:



Figura 2.12: Efecto del coeficiente D en la frecuencia

2.2. Gestión de la demanda

2.2.1. Marco teórico

El concepto de Gestión de la Demanda engloba cualquier tipo de acción que implique un cambio en los patrones de consumo de la electricidad, con el fin de regular la potencia que está siendo demandada para lograr el equilibrio con la generación. El pensamiento tradicional del mercado eléctrico se basa en apoyarse

Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte

totalmente en la generación, brindando la potencia necesaria en el momento necesario para satisfacer a la demanda. Hoy en día, debido al aumento exponencial en el número de consumidores y las formas de obtención de energía no convencionales, se hizo necesario un cambio en la forma concebir al mercado eléctrico, por lo que el pensamiento actual es el de que un sistema es más eficiente, cuanto menores fluctuaciones tenga en la demanda [4].

Existen varias maneras de llevar a cabo la gestión sobre la demanda. La figura 2.13 intenta resumir las estrategias más usuales.

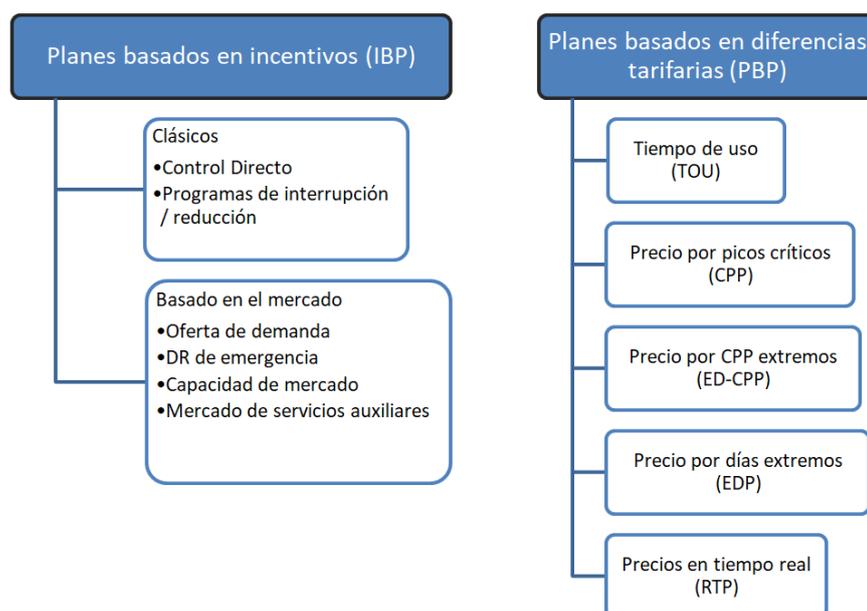


Figura 2.13: División de los diferentes tipos de gestión de la demanda.³

Para los planes basados en incentivos, los clientes reciben un descuento en su tarifa de energía eléctrica por su participación, o reciben dinero según la cantidad de reducción en la demanda durante situaciones críticas. En el caso de planes basados en diferencias tarifarias, los precios de la energía no son uniformes a lo largo del día, sino que varían dinámicamente con el objetivo de convertir la gráfica de la demanda lo más pareja o uniforme posible.

La siguiente lista resume las ideas fundamentales de algunos de los planes [4] [6]:

- Control Directo: conexión/desconexión de cargas de forma remota (usualmente aires acondicionados y termotanques).

³IBP: Incentive Based Programs, DR: Demand Response, PBP: Price Based Programs, TOU: Time of Use, CPP: Critical Peak Pricing, ED-CPP: Extreme Day Critical Peak Pricing, EDP: Extreme Day Pricing, RTP: Real Time Pricing

2.2. Gestión de la demanda

- Programas de interrupción/reducción: los clientes son beneficiados económicamente por reducir su consumo hacia valores predefinidos, y quienes no cumplan con la consigna pueden ser penalizados.
- Oferta de demanda: los clientes ofrecen una cierta reducción en su consumo. En caso de ser aceptada la oferta, el cliente debe reducir su consumo por el valor ofertado, o enfrentarse a multas en caso contrario.
- Gestión de la Demanda de Emergencia: Se le ofrece un incentivo económico a los clientes que reduzcan su consumo a valores calculados, durante una situación de emergencia.
- En el programa de capacidad de mercado se le ofrece a los clientes que son capaces de proveer una reducción de un valor prefijado de demanda, al ocurrir una contingencia. Los participantes reciben con un día de ventaja información sobre posibles eventos, y son penalizados si no responden a la reducción calculada.
- Tiempo de uso (TOU): los precios de la energía varían según bloques de tiempo. El más sencillo es el de dos bloques, teniendo por un lado el período de pico, y por el otro el período restante.
- CPP: se cobran costos adicionales al especificado en el TOU, y se aplican cuando el sistema está atravesando una contingencia.
- EDP: similar a CPP por la salvedad que el aumento del costo es a lo largo de todo el día.
- RTP: los clientes reciben con un día de anterioridad, cuál será el costo de la energía en cada hora (muchas veces, en lugar de recibir la información una día antes, se da la información horas antes).

2.2.2. Estrategias de Control Directo sobre la Carga

Esta sección se basa en la bibliografía [5][10] y [12].

Una buena estrategia de control debe ser capaz de:

- Maximizar la velocidad de respuesta de las cargas
- Minimizar la necesidad de reservas en generación destinadas a la regulación de la frecuencia.
- Minimizar el impacto en el confort de los usuarios.

Respecto al último punto, además de no afectar el confort en sí, debe también evitar el daño de los equipos, por lo que es necesario una estrategia que evite encendidos y apagados demasiado seguidos.

Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte

Las estrategias se dividen en 3 categorías: control centralizado, descentralizado e híbrido, y se diferencian en la manera en la que los controles centrales y los nodos conectores se comunican entre sí. Se entiende por nodo a un equipo capaz de recibir y enviar información hacia el centro de control, además de comandar su carga asignada. La figura 2.14 muestra un esquema general de las estrategias utilizadas:

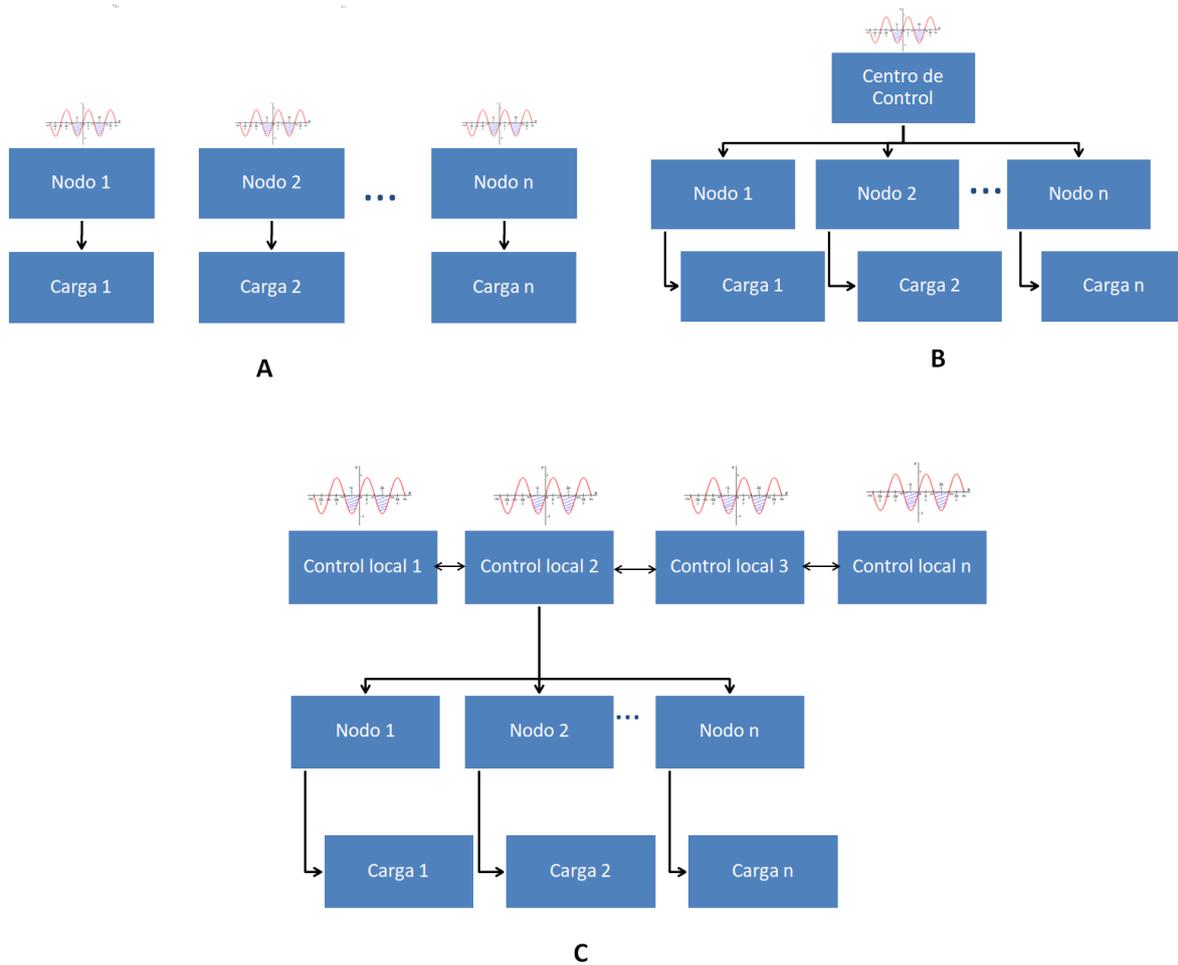


Figura 2.14: Las 3 estrategias utilizadas para CDD. A: Control Descentralizado, B: Control Centralizado, C: Control Híbrido ⁴

⁴Figura de elaboración propia basada en [10]

2.2. Gestión de la demanda

- **Control Descentralizado:** cada nodo de conexión monitorea la frecuencia del sistema de manera local, y en base a dicha lectura comanda la conexión/-desconexión de sus propias cargas. A diferencia del punto anterior, no se requiere la comunicación entre nodos, lo que la convierte en la estrategia más simple y económica. La desventaja es que sin un órgano central de control, podría suceder que frente a una contingencia actúen nodos en exceso o en defecto, por lo que es una estrategia poco precisa.
- **Control Centralizado:** el control central monitorea desvíos en la frecuencia nominal del sistema, determina la cantidad de carga que podría utilizar como reserva, y envía los comandos de encendido/apagado a un gran número de nodos de conexión. La principal desventaja es que se necesita una infraestructura de comunicación compleja y grande, capaz de tener un control sobre todos los nodos con un delay aceptable, puesto que uno de los objetivos es actuar antes que los controles primarios de frecuencia. La principal ventaja es que se conoce de forma exacta la cantidad de carga que se tiene disponible como reserva, lo que lo hace un control muy preciso. En resumen, es una estrategia cara, pero muy efectiva.
- **Control Híbrido:** estrategia que intenta integrar los dos esquemas anteriores, donde las estimaciones de contingencias y demás parámetros del sistema son realizados de forma centralizada, y la toma de decisiones y mediciones locales son realizadas de forma descentralizada.

2.2.3. Gestión de la Demanda en Uruguay

UTE cuenta con distintos planes tarifarios, cuyo objetivo son lograr una gestión sobre la demanda. De acuerdo a las clasificaciones vistas, podemos decir que UTE utiliza planes basados en diferencias tarifarias (PBP), y también utiliza un plan basado en incentivo (IBP) con el llamado Plan Termotanque Inteligente.

Tarifas diferenciales UTE

Como se puede ver en la figura 2.7, existen bloques horarios que resultan en picos y en valles de demanda de energía eléctrica. UTE cuenta con un plan llamado Plan Inteligente, donde se ofrece a los clientes dos tipos de tarifas residenciales, divididas en franjas horarias con diferentes precios. Las tarifas son (en pesos uruguayos) ⁵:

⁵las tarifas son las correspondientes a la cita [19] de precios vigentes al 01/01/2023. Cotización del dólar 37.78 \$/ USD al 28/6/2023

Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte

Tarifa Residencial Doble Horario:

- Horario Punta: \$ 10,680 por kWh.
- Horario Fuera de Punta: \$ 4,280 por kWh.

siendo el horario punta 4 horas consecutivas a elección del cliente, comprendidas entre las 17:00 y las 23:00, y el horario fuera de punta el resto de las horas de los días hábiles, y los sábados, domingos y feriados durante todo el día.

Tarifa Residencial Triple Horario:

- Horario Punta: \$ 10,680 por kWh.
- Horario Valle: \$ 2,223 por kWh.
- Horario Llano: \$ 4,875 por kWh.

siendo el horario punta idéntico a la tarifa anterior, horario valle desde las 00:00 hasta las 07:00, y horario llano el resto de las horas de los días hábiles, y sábados, domingos y feriados durante desde las 07:00 hasta las 00:00. [19].

Dichas tarifas incentivan a los usuarios a utilizar sus electrodomésticos en horarios de valle, debiendo por ejemplo utilizar timers para realizar tareas en horarios de la madrugada, como prender el calefón solo por la noche, etc.

Plan Termotanque inteligente

Este plan es una propuesta de UTE que consiste en utilizar el denominado “Enchufe Inteligente”, encargado de alimentar al termotanque. Dicho enchufe es capaz de comunicarse y enviar datos hacia un sistema que utiliza Inteligencia Artificial, además de poder funcionar como un timer, puesto que el usuario puede programar a través de una app los horarios que desea encender y apagar el equipo. Es posible también ver el estado del termotanque (puede detectar averías) y monitorear la energía que consume. En este caso, el usuario que participa en el plan ve una bonificación monetaria en forma de descuento de UY\$ 200 a su factura mensual ⁶. El objetivo principal de este plan es poder controlar varios termotanques, y evitar que se encuentren todos encendidos al mismo tiempo, estableciendo turnos de apagado de cada uno durante breves períodos de tiempo, de forma de no afectar el confort del usuario. Existen por el momento dos modelos de enchufes inteligentes: Modelo Shelly S y Modelo Timer UTE. El primer modelo hace uso de la red WiFi de cada hogar, conectándose a la misma y luego vinculando el dispositivo con la app de Shelly y la app de UTE [31]. El segundo enchufe no necesita de la red WiFi, sino que se comunica a través de la red celular [29]. La figura 2.15 muestra ambos modelos.

⁶<https://www.ute.com.uy/plan-termotanque-inteligente>

⁷Imagen de elaboración propia tomando recortes de la pág. <https://www.ute.com.uy/modelo-shelly-s>

2.2. Gestión de la demanda

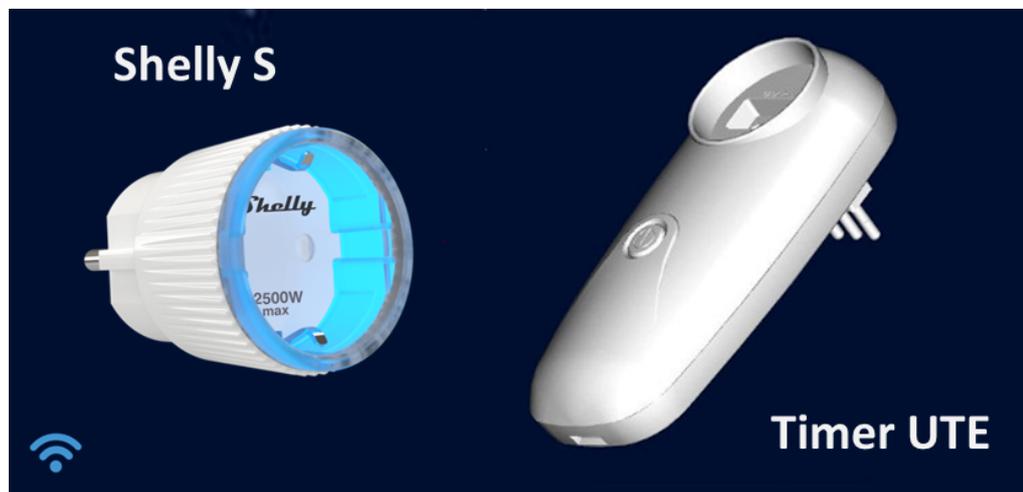


Figura 2.15: Modelos de enchufes inteligentes ofrecidos por UTE⁷

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 3

Medidas eléctricas

La figura 2.14 del capítulo anterior nos muestra las estrategias de control utilizadas para ejercer un control directo sobre las cargas. Las mismas se basan sobre una estructura en común, que contiene:

- Elementos de control: puede ser centralizado, local, o ser directamente un nodo
- Red de comunicación: encargada de facilitar la comunicación entre los centros de control y los nodos
- Nodos: encargados de monitorear y controlar los dispositivos conectados
- Cargas: calefones, aires acondicionados, refrigeración o cualquier otro dispositivo

En el presente capítulo se estudia cómo llevar a cabo el nodo inteligente y se presentan detalles del nodo realizado para el trabajo.

Los nodos permiten monitorear determinados parámetros eléctricos (tensión, corriente, potencia, contenido armónico) a la que se encuentra sometida una carga conectada a la red eléctrica. Las medidas no deben incidir en las lecturas, o lo tienen que hacer de manera despreciable. Al contar con placas electrónicas de procesamiento y acondicionamiento de señales, es necesario adaptar los niveles de tensión a valores que las mismas admitan como entrada. Para resolver el problema de la transducción, en una primera etapa se transforman las magnitudes tensión de la carga y corriente que esta consume, a valores de tensión medibles por la placa Analog Discovery (AD2) [20]. Esto se logra conectando e intercalando al sistema de potencia un bloque de transformación constituido por transformadores de tensión y de corriente apropiados. En una segunda etapa, se procesan las señales de salida del bloque de tensión para eliminar ruidos e imperfecciones que el bloque anterior pudo introducir a la medida. Para esto, se utiliza un circuito acondicionador de señales diseñado por los docentes de Taller de Fourier, el cual se encuentra compuesto por 2 filtros que se describen más adelante en este capítulo. Finalmente, para poder conectar las señales de medida a la placa de desarrollo Arduino (ver

Capítulo 3. Medidas eléctricas

4.1) se necesita introducir otro circuito más al sistema, debido a que el rango de trabajo de la placa es $[0 ; 3.3]$ V. Para esto se diseña un circuito de rectificadores de onda completa de las señales de tensión y corriente, que son luego reconstruidas mediante código.

Primero se describe la composición y características del bloque EDM, y luego los bloques de acondicionamiento de señales y el bloque rectificador.

3.1. Monitor de Energía de Dispositivos (EDM)

El Monitor de Energía de Dispositivos (Energy Device Monitoring) o caja EDM, es un equipo que cuenta con funcionalidades de medida, maniobra y protección de una carga monofásica. La idea y el diseño original pertenecen a los docentes de la Unidad Curricular Taller de Fourier [15]. Para este trabajo se realiza una adaptación a la caja. Los componentes de la caja original y de la adaptada se listan en la tabla 3.1:

Componentes EDM de GestDem	Componentes EDM del Taller de Fourier
Tomacorriente 230V	Tomacorriente 230V
Llave diferencial combinada (C10)	Llave diferencial combinada (C10)
Transformador de tensión (TT)	Transformador de tensión (TT)
Pinza de corriente (TI)	Pinza de corriente (TI)
Relé de estado sólido	Circuito acondicionador de señales
Fuente de tensión de 9 VDC	
Circuito inversor de tensión	
Circuito rectificador de onda completa	
Arduino MKR NB 1500	

Tabla 3.1: Componentes que forman la caja EDM

La figura 3.1 muestra la caja EDM vista de arriba, diferenciando en contorno verde las partes desarrolladas en el Taller de Fourier. La figura 3.2 muestra la caja desde varios ángulos.

3.1. Monitor de Energía de Dispositivos (EDM)

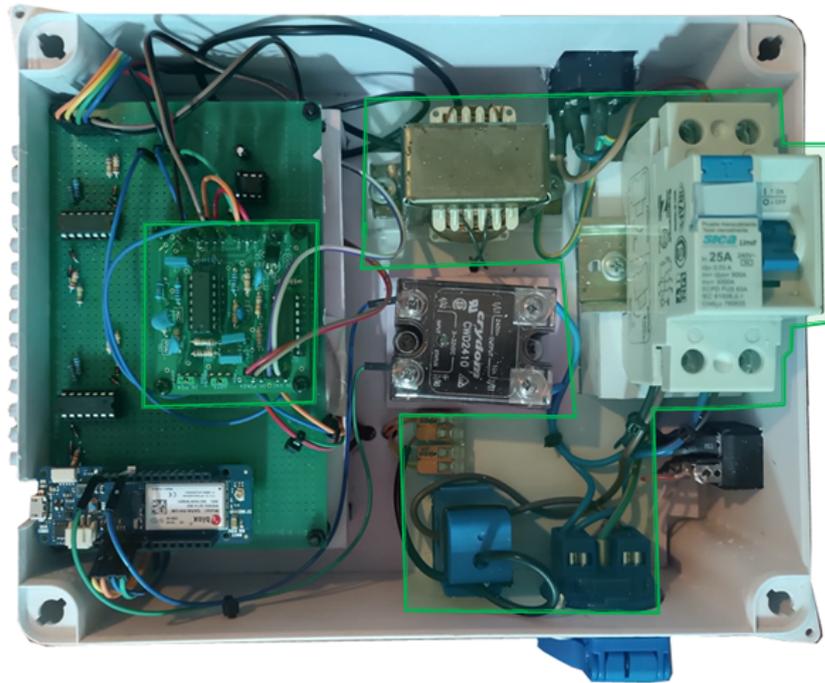


Figura 3.1: Caja EDM vista de arriba

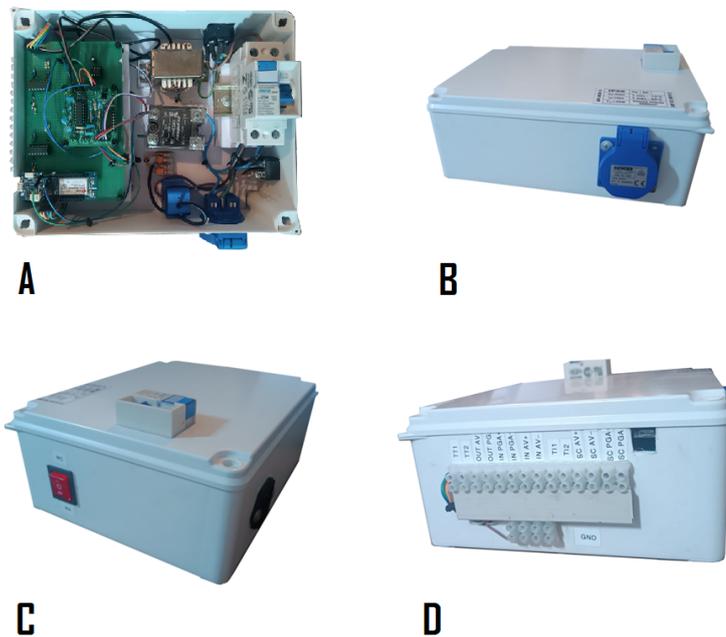


Figura 3.2: Caja EDM diseñada. A: alimentación, llave de protección, TT, TI y circuitos de procesamiento de señal. B: Vista lateral, conexión hacia la carga. C: Vista lateral con llave de 3 posiciones. D: Vista lateral con entradas y salidas de señal y entrada USB

Capítulo 3. Medidas eléctricas

Se resume a continuación la función de cada parte:

- Entrada: alimentación con la red eléctrica, que en nuestro caso es alterna 230 VAC de valor eficaz.
- Llave diferencial combinada: la llave seleccionada corresponde al modelo SCPD FUS 63A, con las siguientes características: corriente nominal de funcionamiento $I_{nom} = 25A$, corriente diferencial nominal $I_{\Delta n} = 30mA$, capacidad nominal de ruptura y de conexión $I_m = 500A$ y corriente nominal de cortocircuito $I_{nc} = 3kA$ [26].
- Transformador de corriente (TI) 30.38 Arms / 1Vrms: el modelo es el SCT013-030 con formato toroidal [25].
- Transformador de tensión (TT): transduce una tensión de entrada de 230 Vrms a 5.72 Vrms.
- Llave: es una llave de tres posiciones de 16 A de corriente nominal. La misma se encuentra empotrada fuera de la caja estanco, y hace posible seleccionar desde afuera el modo en que la carga es conectada: si se hace directamente desde la salida de la llave diferencial, o si se hace mediante el accionamiento del relé de estado sólido. En la posición central, la carga directamente no es alimentada. A la vez, alimenta en el modo cerrado a un módulo de 4 relés encargados de direccionar las salidas de los transformadores de medida hacia las entradas del Acondicionador de Señales
- Relé: es un relé de estado sólido que se alimenta con tensión continua en un rango de 3 V a 36V, cuya salida es de 240 Vac y 40A nominales. Se decide utilizar la tecnología de estado sólido, puesto que en el trabajo EnerHomGy [8] se llega a la conclusión que de esta forma se eliminan ruidos eléctricos efecto de utilizar relés de bobina [8].
- Salida: es un toma schuko de 2 polos y puesta a tierra (2P+T) de 250 Vac y 16 A nominales. De dicha salida es donde se conectarán los equipos a ser medidos y comandados.
- Fuente 9 Vdc: es una fuente de alimentación cuya entrada es tensión alterna en un rango de 100 a 240 Vac (50/60 Hz), y cuya salida es de 9 Vdc y 1 A. Dicha fuente será la encargada de alimentar: el circuito inversor de tensión, el circuito acondicionador de señales y el circuito rectificado de onda completa.

3.2. Caracterización de los Transformadores de Medida

- El circuito inversor de tensión toma como entrada la señal de 9 Vdc entregada por la fuente, y genera en su salida -9 Vdc, mediante un circuito que es descrito en la siguiente sección. Las tensiones de +9 Vdc y -9 Vdc alimentan los circuitos de: acondicionamiento de señales, y rectificador de onda completa.
- El circuito rectificador de onda completa toma como entrada las señales acondicionadas de tensión y corriente, que son señales alternas periódicas, las rectifica y las entrega en la salida en forma de dos señales (por cada entrada) por separado: una correspondiente al semiciclo positivo, y la otra al negativo. Además le modifica la amplitud para adaptarlas en un rango aceptable para ser medidas por la placa Arduino.
- El circuito acondicionador de señales cuenta con dos filtros: una para la señal del TT y otra para la señal del TI. Se trata de filtros pasabanda que adaptan por un lado la ganancia de la tensión del TT para que no sea demasiado elevada, y por el otro eliminan componentes de continua para el caso del TI y también modifican su amplitud, en este caso aumentándola para poder apreciar mejor la señal.
- La placa Arduino toma en sus entradas analógicas las salidas del circuito rectificador, reconstruye las señales mediante código, las procesa y calcula los parámetros de interés para cada carga: potencia, defasaje, contenido armónico, valores pico, valores rms, etc. Al conectarse mediante USB a la PC, se ejecuta un programa que lee el puerto serial de la placa y envía los datos en tiempo real hacia una base de datos. A su vez, la placa es capaz de comandar al relé que permite conectar o desconectar la carga.

El monitor EDM sensa la tensión y corriente eléctrica entregadas por la red a una carga monofásica para todo instante de tiempo. Mediante transformadores de tensión y de corriente, se transforma y transduce a valores de tensión reducidos, los valores reales que toma la carga. En la siguiente sección se presentan las características de estos transformadores.

3.2. Caracterización de los Transformadores de Medida

Se realizó una medición en el laboratorio de proyectos del Instituto de Ingeniería Eléctrica con el fin de caracterizar los equipos de medida. Si bien el fabricante indica en el equipo los valores, es mejor realizar una medición con equipos de laboratorio para estar seguros de los coeficientes de transformación, puesto que serán constantes a ingresar en el código Arduino o en la base de datos para que los valores procesados tengan un sentido físico real.

3.2.1. Transformador de Tensión

Se utiliza el osciloscopio SDS 1102CML+ de SIGLENT para hacer un relevamiento de las ondas de entrada (red de UTE) y de salida del TT y el multímetro de precisión SDM3045X [24]. La figura 3.3 muestra la señal de tensión de la red eléctrica a la derecha (las curvas rosa y amarilla corresponden a las tensiones Fase-Tierra, Neutro-Tierra, y la celeste es la resta de las mismas, quedando Fase-Neutro), y la salida del transformador de tensión a la izquierda.

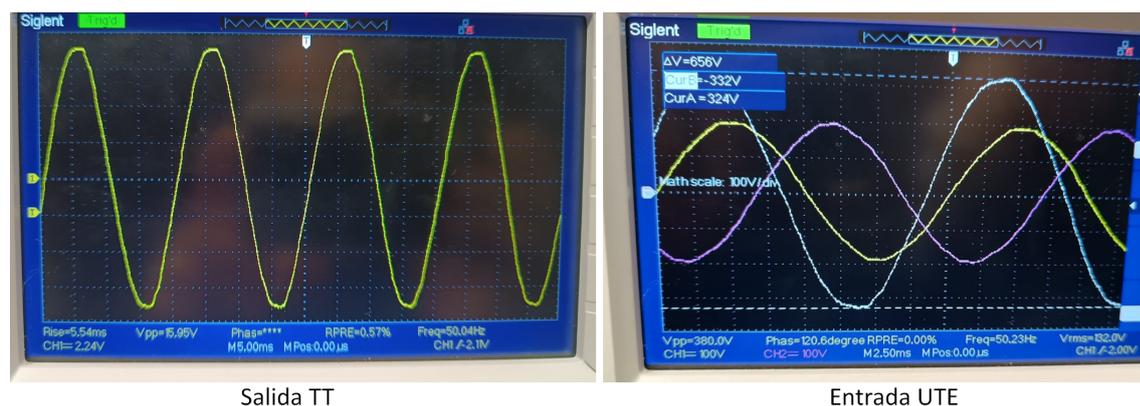


Figura 3.3: Señales relevadas del TT con el SIGLENT

Valores medidos con el multímetro:

- Valor TRMS de entrada UTE: $231,54 \pm 1,49$ Vrms
- Valor TRMS de salida TT: $5,76 \pm 0,04$ Vrms

Se utiliza el osciloscopio para visualizar las señales y verificar que sean correctas, y se toman los datos relevados por el multímetro, por lo que la relación de transformación del TT es:

$$k = \frac{N_s}{N_p} = \frac{5,76}{231,54} = 24,88 \pm 0,33 \text{ mV/V}$$

3.2.2. Transformador de Corriente

Para este relevamiento, se utilizó como carga el calefón instalado por el Proyecto Final de Carrera EnerHomeGy [8]. El mismo es un calefón de 45L de capacidad, y potencia nominal 1kW (220V tensión nominal). Se utilizó el multímetro de precisión para relevar corriente de salida y tensión entregada por el transformador toroidal:

- Valor TRMS de corriente: $4,79 \pm 0,03$ A_{rms}
- Valor TRMS de salida TI: $157,74 \pm 1,68$ mV_{rms}

3.2. Caracterización de los Transformadores de Medida

Por tanto, la constante de transducción del TI es:

$$k = \frac{157,74 \text{ mV}}{4,79 \text{ A}} = 32,93 \pm 0,56 \text{ mV/A.}$$

Sean $v_{tension}$ y v_{pinza} los valores reales de tensión a la salida del TT y tensión a la salida del TI:

$$v_{tension} = \frac{5,72}{230} v_{CA}, \quad v_{pinza} = \frac{i_{CA}}{30,38 (A/V)} \quad (3.1)$$

donde v_{CA} e i_{CA} son la tensión que alimenta la carga y la corriente que la misma consume.

En Uruguay, la tensión nominal es 230V. Suponiendo una tensión sinusoidal pura, la onda tiene una amplitud de $230 \times \sqrt{2} = 325 \text{ V}$. De acuerdo al Artículo 46 del Capítulo II del Texto Ordenado de Resoluciones de Ursea (2019) [37], se consideran rangos admisibles respecto al nivel de tensión nominal. Para el caso de baja tensión a nivel 230 V, el rango admitido de desviación ΔV es:

$$-10\% \leq \Delta V \leq \%6 \quad (3.2)$$

siendo $\Delta V = 100 \times \frac{(V-V_n)}{V_n}$ donde V es el valor eficaz promediado durante un intervalo de 15 minutos, tomadas como máximo cada 30 segundos (se exige un mínimo de 30 valores dentro de los 15 minutos) y V_n el valor de la tensión nominal. Por tanto se tiene valores admisibles de tensión en el rango de [207 ; 244] V, por lo que se espera (en condiciones normales) que la tensión de salida del TT varíe en el entorno de

$$v_{tension} \in [5,15 ; 6,07] \text{ V} \quad (3.3)$$

Por otro lado, se trabaja sobre el supuesto que las cargas monofásicas consumen una potencia $P \in [230 ; 2300] \text{ W}$ (cargas que pueden ir desde consumos pequeños hasta calefones de 2300 W). Por lo que se espera

$$v_{pinza} \in [33 ; 330] \text{ mV} \quad (3.4)$$

3.3. Circuito Inversor de Tensión

En un principio, se pensó alimentar los circuitos de acondicionamiento de señales (AS) y rectificador de onda completa mediante la fuente del Analog Discovery 2 (AD2). La misma entrega tensiones de +5 VDC, -5 VDC y la referencia de tierra (0 VDC). Sin embargo, teniendo en cuenta la ecuación 3.3 y considerando que los valores pico pueden llegar a $6,07 \times \sqrt{2} = 8,6 \text{ V}$, se hace necesario implementar un circuito extra, como un divisor de tensión por ejemplo. Dado que los amplificadores de ambos circuitos admiten tensiones de alimentación mayores a 5 Vdc, se decidió alimentar los mismos con una tensión de 9VDC. Esto a su vez genera la ventaja de una cierta independencia del AD2, ya que alimentar los circuitos es siempre necesario, se quiera monitorear las señales con el AD2 o no. Se implementa el circuito mostrado en la figura 3.4 mediante el integrado ICL7660 [30]

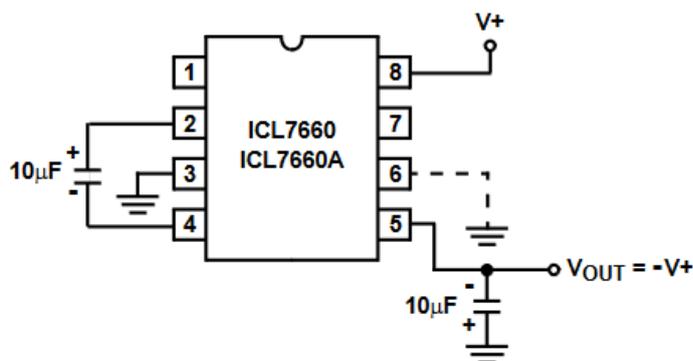


Figura 3.4: Circuito inversor de voltaje implementado con el integrado ICL7660

La tensión $V+$ en la figura representa los +9 Vdc entregados por la fuente, y la salida $-V+$ es la encargada de alimentar negativamente a los circuitos ya comentados.

3.4. Circuito Acondicionador de Señales (AS)

En esta sección se realiza un relevamiento del funcionamiento del circuito A.S, diseñado y desarrollado por los docentes de Taller de Fourier. Las figuras esquemáticas son modificaciones de figuras tomadas del Taller [15].

Las figuras 3.6 y 3.5 muestran al AS utilizado y un esquema general del circuito AS, donde se aprecian las dos etapas: el acondicionamiento de tensión, y el de corriente.

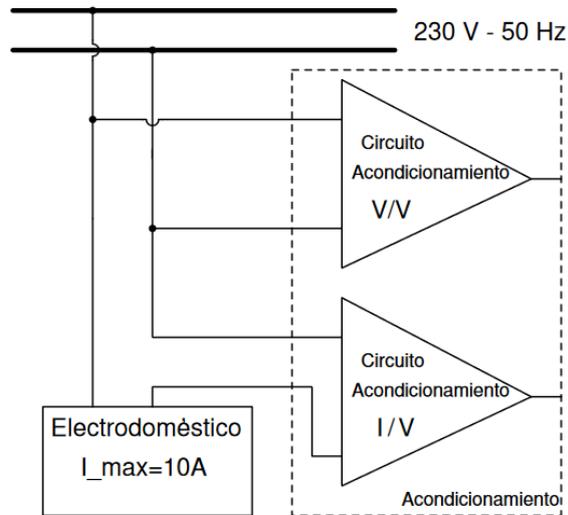


Figura 3.5: Circuitos implicados en la medición de tensión y corriente de un electrodoméstico

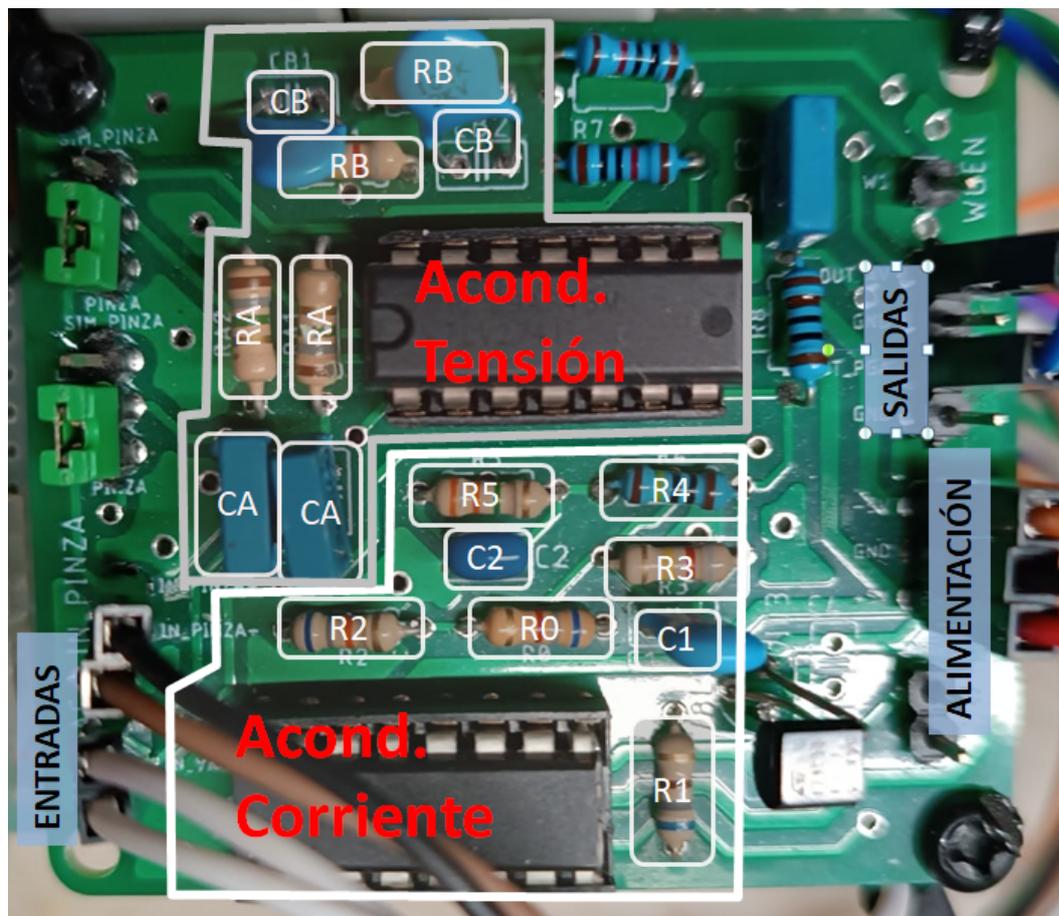


Figura 3.6: Circuito Acondicionador de Señales

En la tabla 3.2 se resumen los valores de los componentes del circuito A.S:

Acond. Corriente	Acond. Tensión
$R_0 = 6,8k\Omega$	$R_A = 1,8M\Omega$
$R_1 = 680\Omega$	$R_B = 820k\Omega$
$R_2 = 68k\Omega$	$C_B = 100pF$
$R_3 = 820k\Omega$	$C_A = 22nF$
$R_4 = 1,0M\Omega$	
$R_5 = 3,3M\Omega$	
$C_1 = 100pF$	
$C_2 = 47\mu F$	

Tabla 3.2: Valores de las resistencias y capacitores

3.4. Circuito Acondicionador de Señales (AS)

3.4.1. Acondicionamiento de la tensión

La figura 3.7 muestra el circuito acondicionador de tensión, cuya configuración es la del amplificador diferencial. Aplicando principio de superposición, suponiendo que en las entradas se conectan fuentes $\frac{v_i}{2}$ con la polaridad correcta, se obtiene:

$$\begin{aligned} v_{out}^- &= \frac{v_{in}}{2} \cdot \frac{\bar{Z}_B}{\bar{Z}_A} \\ v_{out}^+ &= \frac{v_{in}}{2} \cdot \frac{\bar{Z}_B}{\bar{Z}_A} \\ v_{out} &= v_{out}^- + v_{out}^+ = v_{in} \cdot \frac{\bar{Z}_B}{\bar{Z}_A} \end{aligned} \quad (3.5)$$

donde

$$\begin{aligned} \bar{Z}_A &= R_A + \frac{1}{j\omega C_A} \\ \bar{Z}_B &= \frac{R_B}{1 + j\omega C_B R_B} \end{aligned} \quad (3.6)$$

por lo tanto, la función de transferencia H_V es

$$H_V(j\omega) = \frac{j\omega}{R_A C_B \cdot (j\omega + \frac{1}{R_B C_B}) \cdot (j\omega + \frac{1}{R_A C_A})} \quad (3.7)$$

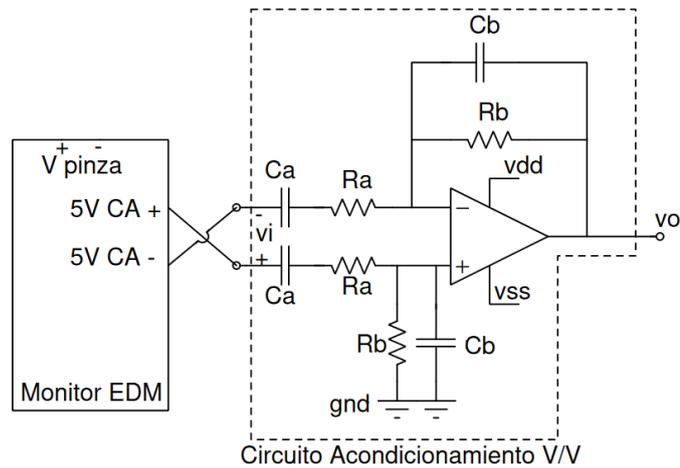


Figura 3.7: Circuito acondicionador de tensión

Capítulo 3. Medidas eléctricas

Dicha función presenta un cero en el origen, y dos polos, por lo que cumple la función de filtro pasa banda. La ganancia en banda pasante es $H_V = \frac{R_B}{R_A}$.

El objetivo del taller es que los estudiantes dimensionen cada componente, con el objetivo de cumplir:

- Ganancia en banda pasante $H_V \approx 0,45V/V$ ($-6,9$ dB) $\Rightarrow \frac{R_b}{R_a} \approx 0,45$
- Frecuencia de corte inferior $f_{-3dB} \approx 5Hz \Rightarrow C_a = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot R_a}$
- Frecuencia de corte superior $f_{-3dB} \approx 2kHz \Rightarrow C_b = \frac{1}{2\pi \cdot 2000 \cdot R_b}$

La figura 3.8 muestra un relevamiento mediante el AD2 del diagrama de Bode del circuito.

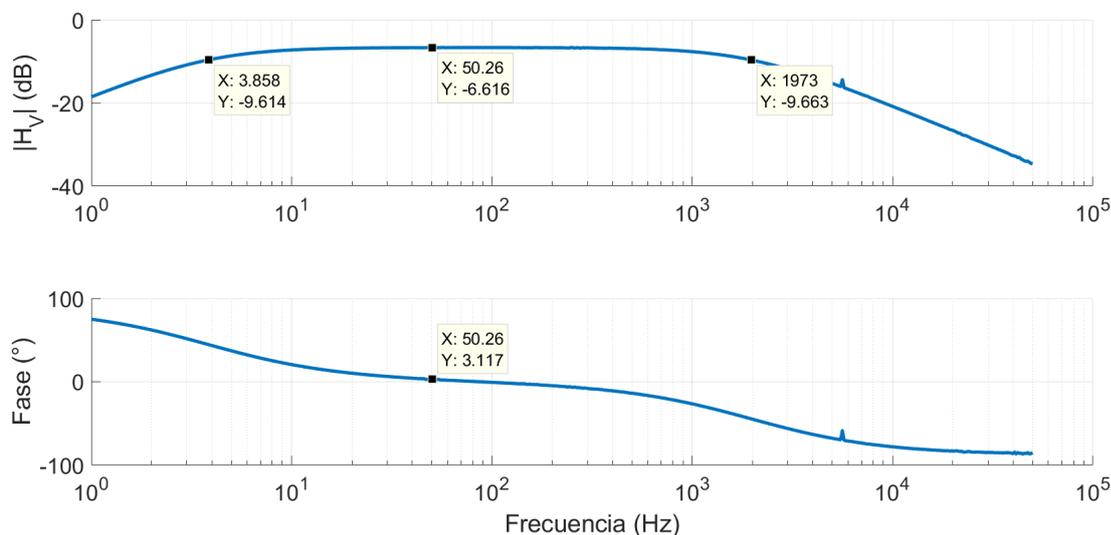


Figura 3.8: Diagrama de Bode del filtro acondicionador de tensión

Las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 muestran las señales en los puntos marcados en el diagrama de Bode, obtenidas por el AD2, donde el canal 2 representa la señal de entrada y el canal 1 la señal de salida. La señal de entrada consiste en una senoide de 1V de amplitud, a **3 frecuencias distintas**. La ganancia en banda pasante resultó ser 0.4662 V/V (-6.64 dB), y las frecuencias correspondientes a una caída de -3 dB son 3.8 Hz y 1973 Hz:

3.4. Circuito Acondicionador de Señales (AS)

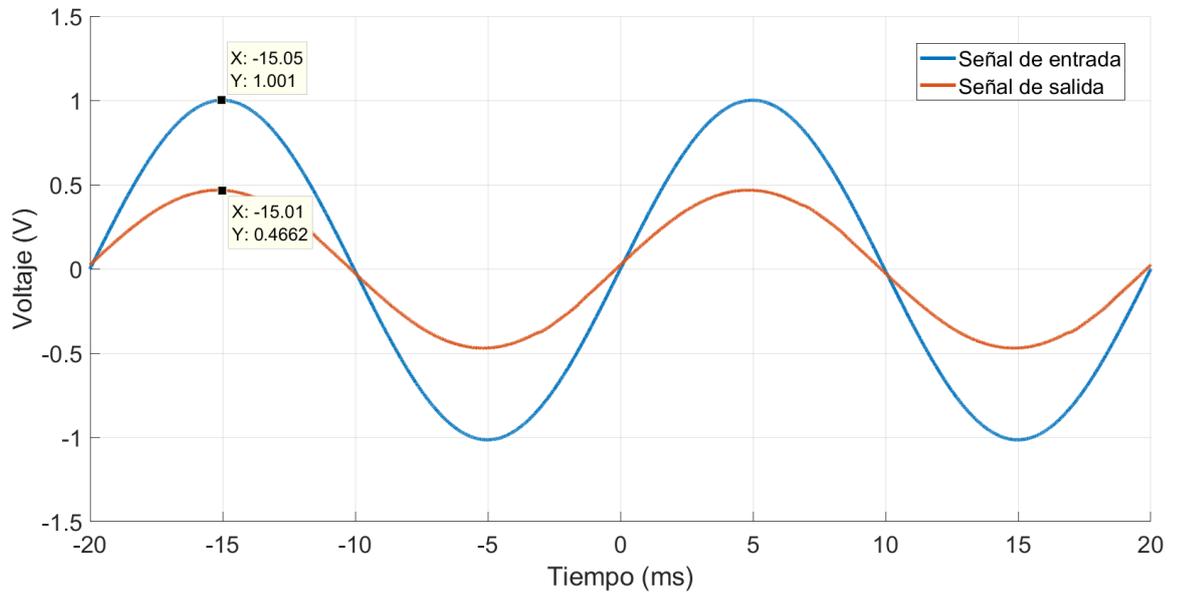


Figura 3.9: Señales de entrada y salida de una senoide de 1 V de amplitud y 50 Hz

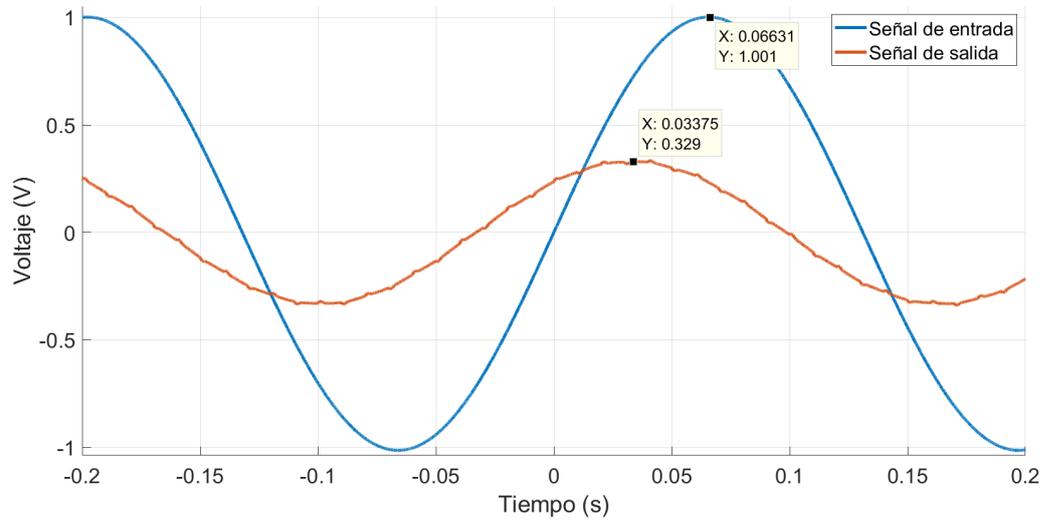


Figura 3.10: Señales de entrada y salida de una senoide de 1 V de amplitud y 3.8 Hz

Capítulo 3. Medidas eléctricas

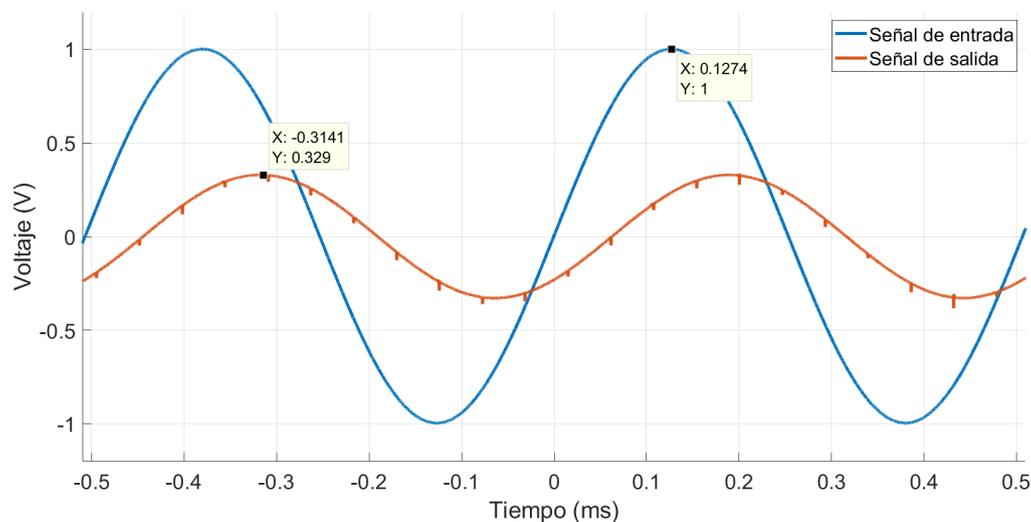


Figura 3.11: Señales de entrada y salida de una sinusoide de 1 V de amplitud y 1973 Hz

De acuerdo a la tabla 3.2, se esperaba una ganancia en banda pasante de $\frac{820k}{1,8M} = 0,4555 \text{ V/V}$. La ganancia relevada es un 2.3% superior a la teórica. Dicho error puede deberse a la incertidumbre de las resistencias (ambas tienen una incertidumbre del 5% dada por el fabricante). Las frecuencias de corte inferior y superior esperadas teóricamente son $\frac{1}{2\pi \cdot R_a \cdot C_a} = 4,02 \text{ Hz}$ y $\frac{1}{2\pi \cdot R_b \cdot C_b} = 1941 \text{ Hz}$ respectivamente, por lo que los valores relevados se encuentran dentro de un rango aceptable (5.6% y 1.6%).

3.4. Circuito Acondicionador de Señales (AS)

3.4.2. Acondicionamiento de la corriente

El circuito de acondicionamiento de corriente cuenta con varias partes. Una de ellas es el circuito amplificador de ganancia variable/programable (PGA). Este circuito es necesario si se quiere trabajar con un amplio rango de cargas, que van desde los 40 mA hasta 10 A. El esquema es el de la figura 3.12:

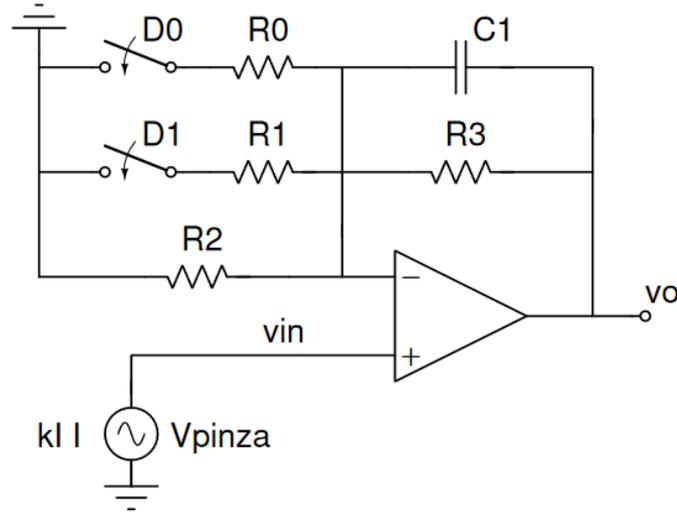


Figura 3.12: Circuito PGA

Observando la disposición de las llaves en el circuito, existen 4 posibles opciones para modificar la resistencia R_g en la entrada inversora. Definiendo,

$$R_g = \begin{cases} R2 & , \text{ si } D0, D1 = OFF, OFF \\ R2||R1 & , \text{ si } D0, D1 = OFF, ON \\ R2||R0 & , \text{ si } D0, D1 = ON, OFF \\ R2||R1||R0 & , \text{ si } D0, D1 = ON, ON \end{cases} \quad (3.8)$$

La transferencia del circuito es la correspondiente a la configuración no inversora:

$$H_{PGA}(j\omega) = 1 + \frac{\bar{Z}}{R_g} = \frac{(j\omega + \omega_{PGA} + \frac{1}{R_g \cdot C_1})}{j\omega + \omega_{PGA}} \quad (3.9)$$

donde $\omega_{PGA} = \frac{1}{C_1 \cdot R_3}$.

La misma presenta un polo en ω_{PGA} y un cero en $\omega_{PGA} + \frac{1}{C_1 \cdot R_g} > \omega_{PGA}$, por lo que tiene característica de pasa-bajos.

Capítulo 3. Medidas eléctricas

En este caso, se pide:

- Una ganancia de $|H| \approx 11 \text{ V/V}$, $\approx 101 \text{ V/V}$, $\approx 1001 \text{ V/V}$ según la posición de las llaves (OFF OFF, OFF ON, ON OFF).
- Ancho de banda $f_{-3dB} \approx 2 \text{ kHz}$ cuando (OFF OFF)

Por último, se agrega el circuito mostrado en la figura 3.13, que cumple la función de atenuador de continua:

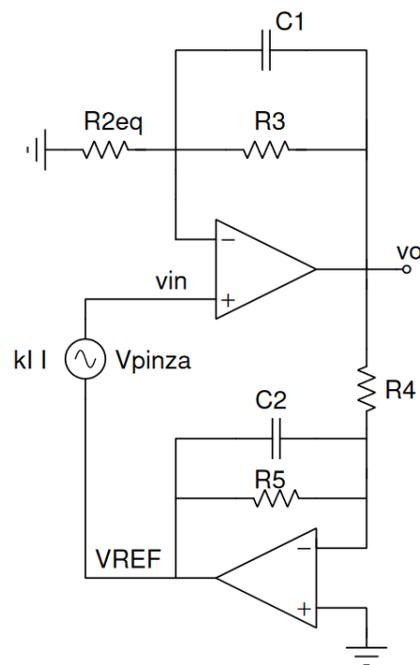


Figura 3.13: Circuito atenuador de DC

En este caso se tiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_o = \frac{-R_4}{C_1 || R_5} \cdot v_{ref} \\ v_{pinza} + v_{ref} - v_o = \frac{-C_1 || R_3}{R_g} \cdot (v_{pinza} + v_{ref}) \end{array} \right. \quad (3.10)$$

3.4. Circuito Acondicionador de Señales (AS)

por lo que la transferencia corresponde a un filtro pasa-banda con atenuación en baja frecuencia:

$$\frac{V_o}{V_{pinza}} = \frac{R_4 \cdot (R_g + C_1 || R_3)}{R_g \cdot (R_4 + C_2 || R_5) + (C_1 || R_3) \cdot (C_2 || R_5)} \quad (3.11)$$

Por lo que la ganancia del filtro PGA es:

$$H_{PGA}(j\omega) = \frac{R_g \cdot R_4 \cdot (1 + j\omega C_1 R_3) \cdot (1 + j\omega C_2 R_5) + R_3 \cdot R_4 \cdot (1 + j\omega C_2 R_5)}{R_g \cdot R_4 \cdot (1 + j\omega C_2 R_5) \cdot (1 + j\omega C_1 R_3) + R_g \cdot R_5 \cdot (1 + j\omega C_1 R_3) + R_3 R_5} \quad (3.12)$$

La ganancia en baja frecuencia es $|H_{DC}| = \frac{R_4(R_2 + R_3)}{R_2 R_4 + R_2 R_5 + R_3 R_5} \approx 0,296$.

Se estudia el caso en que las llaves se encuentran en el estado OFF OFF, puesto que el tipo de cargas para lo que está pensado el proyecto son cargas de consumo moderado a grande.

La figura 3.14 muestra el diagrama de Bode relevado mediante el AD2, y la figura 3.15 muestra las señales de entrada y salida de una sinusoide de 100 mV de amplitud y 50 Hz. El relevamiento del Bode comienza a partir de 1 Hz porque al AD2 le toma demasiado tiempo realizar un relevamiento de señales de menor frecuencia, y la diferencia en módulo no varía considerablemente. Se realizó una medición con una señal de entrada de 70 mHz y 100mV de amplitud, observándose a la salida una caída de -3 dB, por lo que se puede considerar que el polo inferior se encuentra en ese entorno de frecuencia. Se puede ver una ganancia en banda pasante de 22.54 dB (13.4 V/V)

Capítulo 3. Medidas eléctricas

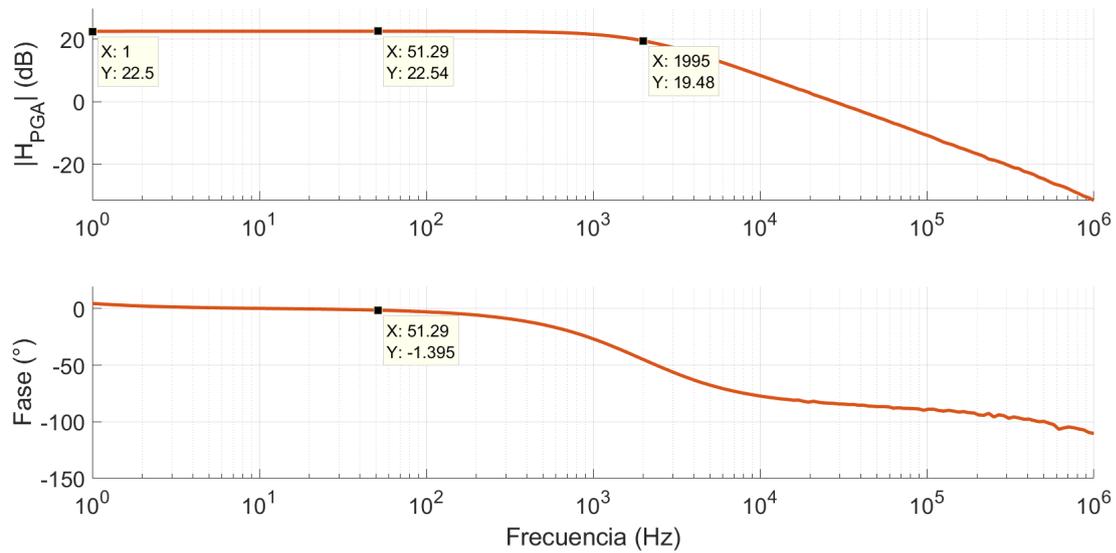


Figura 3.14: Diagrama de Bode del circuito PGA

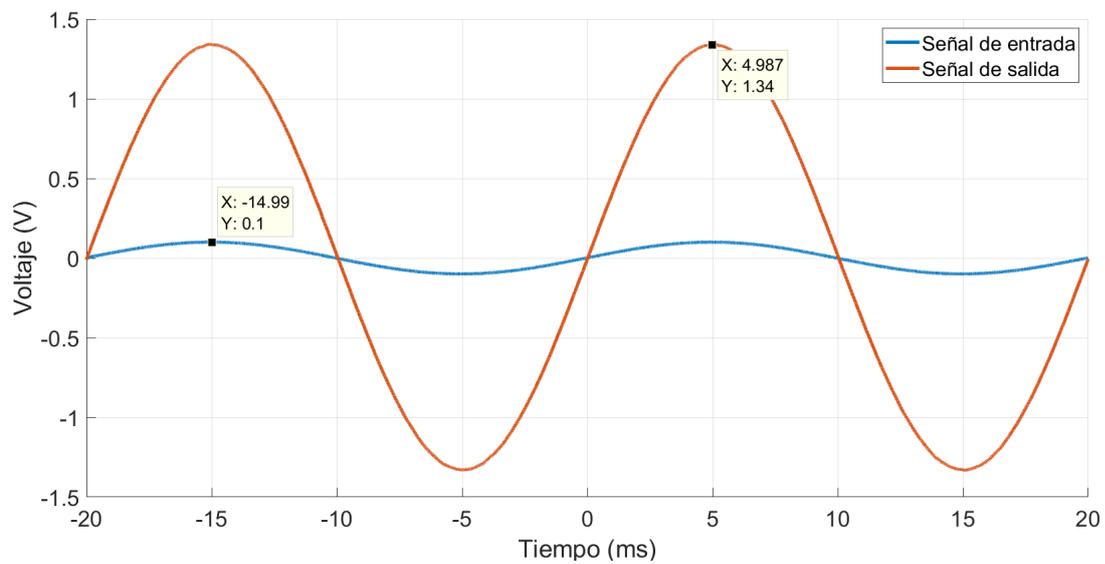


Figura 3.15: Señales de entrada y salida de una senoide de 100 mV de amplitud y 50 Hz

3.4. Circuito Acondicionador de Señales (AS)

La caída de 3 dB implica una ganancia de 9.48 V/V, que se da a una frecuencia de 1965 Hz:

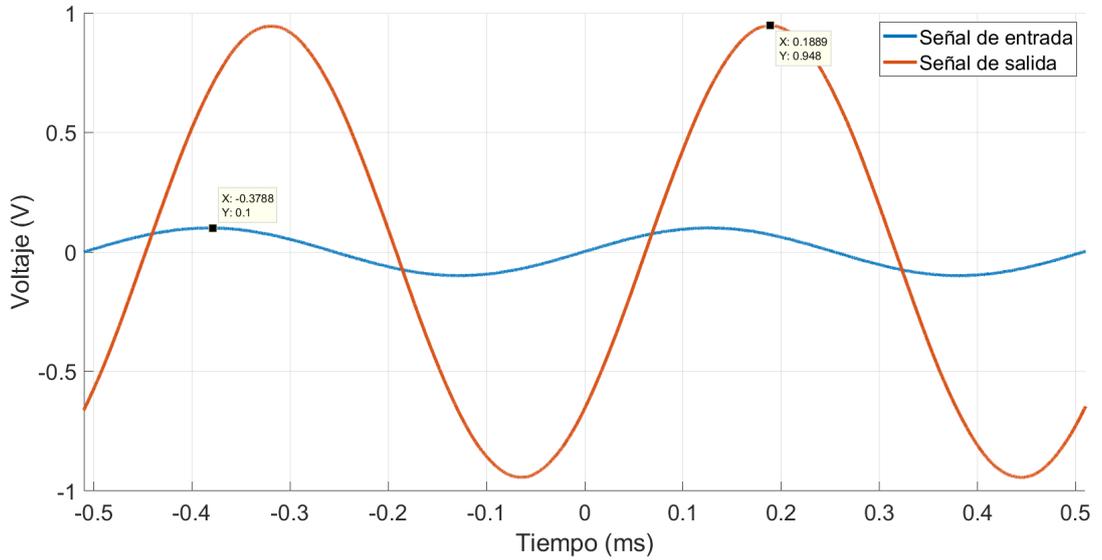


Figura 3.16: Señales de entrada y salida de una senoide de 100 mV de amplitud y 1965 Hz

Por otro lado, el circuito atenúa componentes en baja frecuencia. Una señal de continua de 1V tiene una ganancia de 0.3 V/V (-10.49 dB):

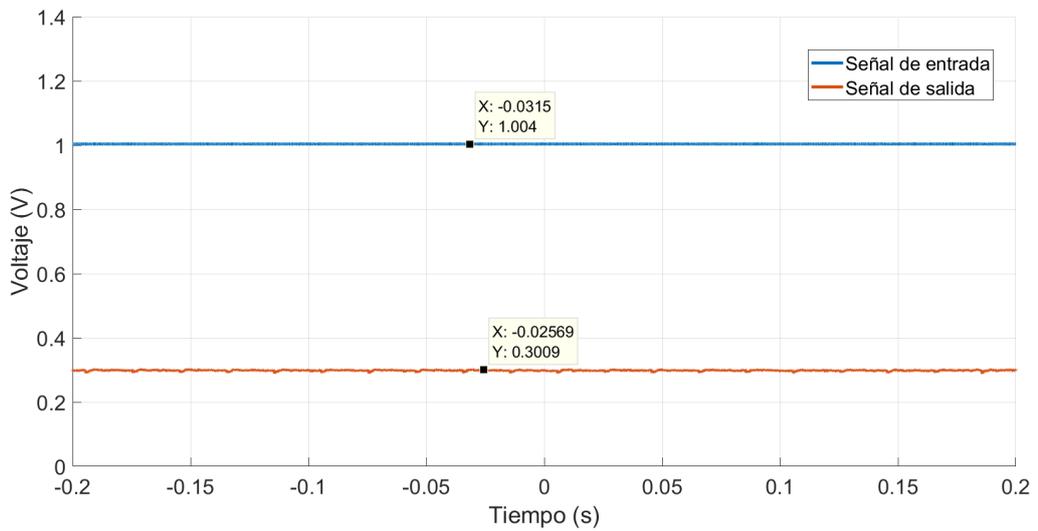


Figura 3.17: Señales de entrada continua de offset 1V y salida atenuada del A.S

Capítulo 3. Medidas eléctricas

Para una señal de 28 kHz, el A.S tiene una ganancia de 0 dB, como era de esperarse. Sin embargo, no se cumple que para mayores frecuencias la ganancia siga siendo cero. Esto puede deberse al rango de funcionamiento aceptable de frecuencias del integrado implicado en el filtro:

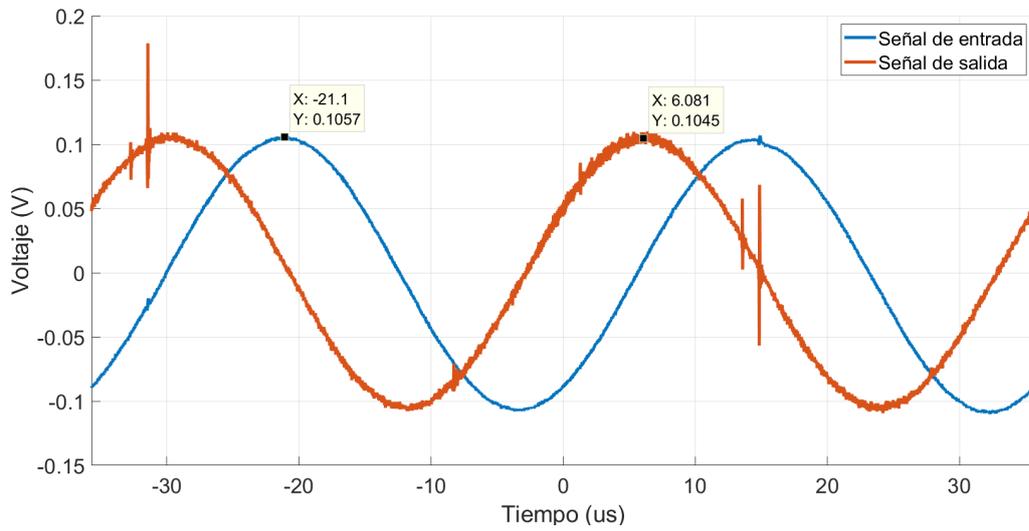


Figura 3.18: Ganancia de 0 dB a una frecuencia de 28 kHz

3.5. Circuito Rectificador de Onda Completa

El circuito rectificador de onda completa se implementa utilizando una configuración de diodo ideal mediante amplificadores operacionales:

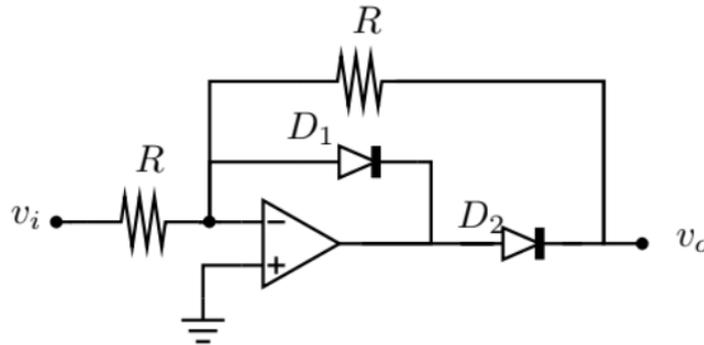


Figura 3.19: Configuración de diodo ideal [21]

El circuito de la figura 3.19 es un rectificador de media onda. En particular, del semiciclo negativo. Para una rectificación completa, podría utilizarse el circuito de la figura 3.20. Sin embargo, como el código implementado para Arduino se diseñó de forma tal que se resten las entradas analógicas, se decide implementar el circuito en 3 etapas: una de rectificación del semiciclo positivo, una del negativo, y una inversión, como se muestra en las figuras 3.21 y 3.22.

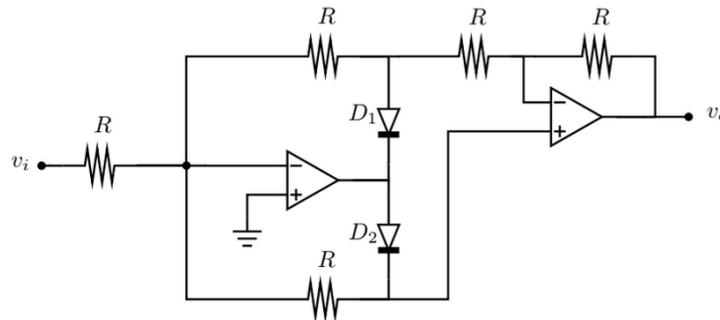


Figura 3.20: Configuración rectificador de onda completa ideal [21]

Capítulo 3. Medidas eléctricas

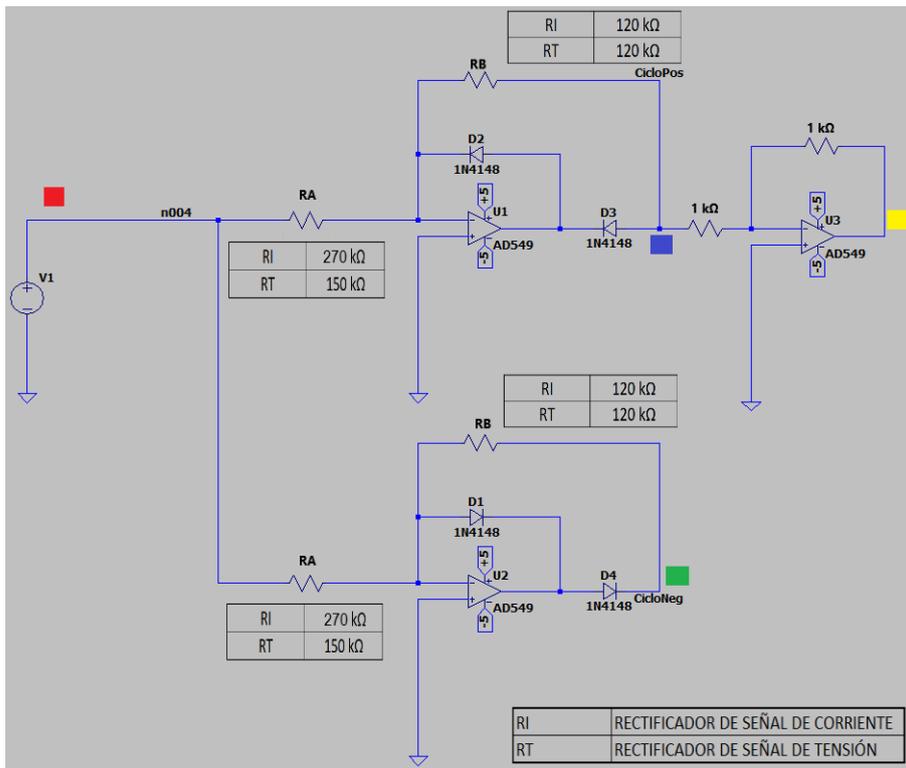


Figura 3.21: Rectificador de onda completa utilizado en el trabajo

3.5. Circuito Rectificador de Onda Completa

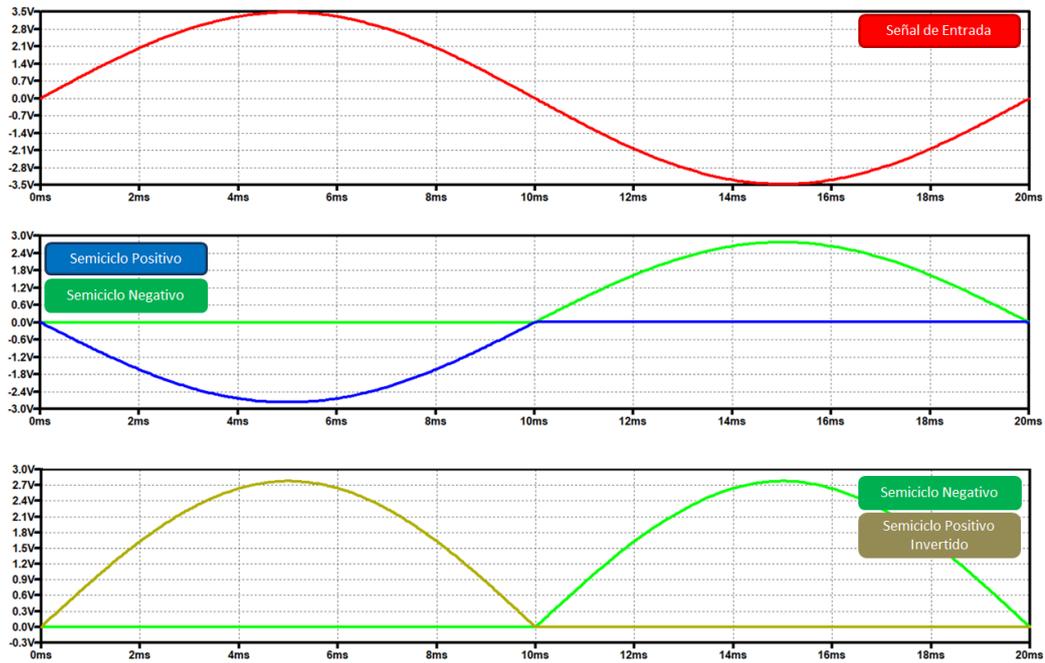


Figura 3.22: Señales de entrada y salida del circuito implementado, simulación LT Spice

En la figura 3.23 se muestra el esquemático, utilizando un integrado C324C, resistencias y diodos 1N418.

Se utilizan dos circuitos iguales al esquemático de la figura 3.23: uno para la rectificación de la señal de salida del filtro PGA, y uno para la señal del TT acondicionada. Las resistencias son $R_2 = 120\text{ k}\Omega$ y $R = 1\text{ k}\Omega$ para ambos casos. La R_1 es $150\text{ k}\Omega$ para la señal de tensión y $270\text{ k}\Omega$ para la señal de corriente. En conducción, el módulo de la ganancia del circuito es el de la configuración inversora: $|H| = \frac{R_2}{R_1}$.

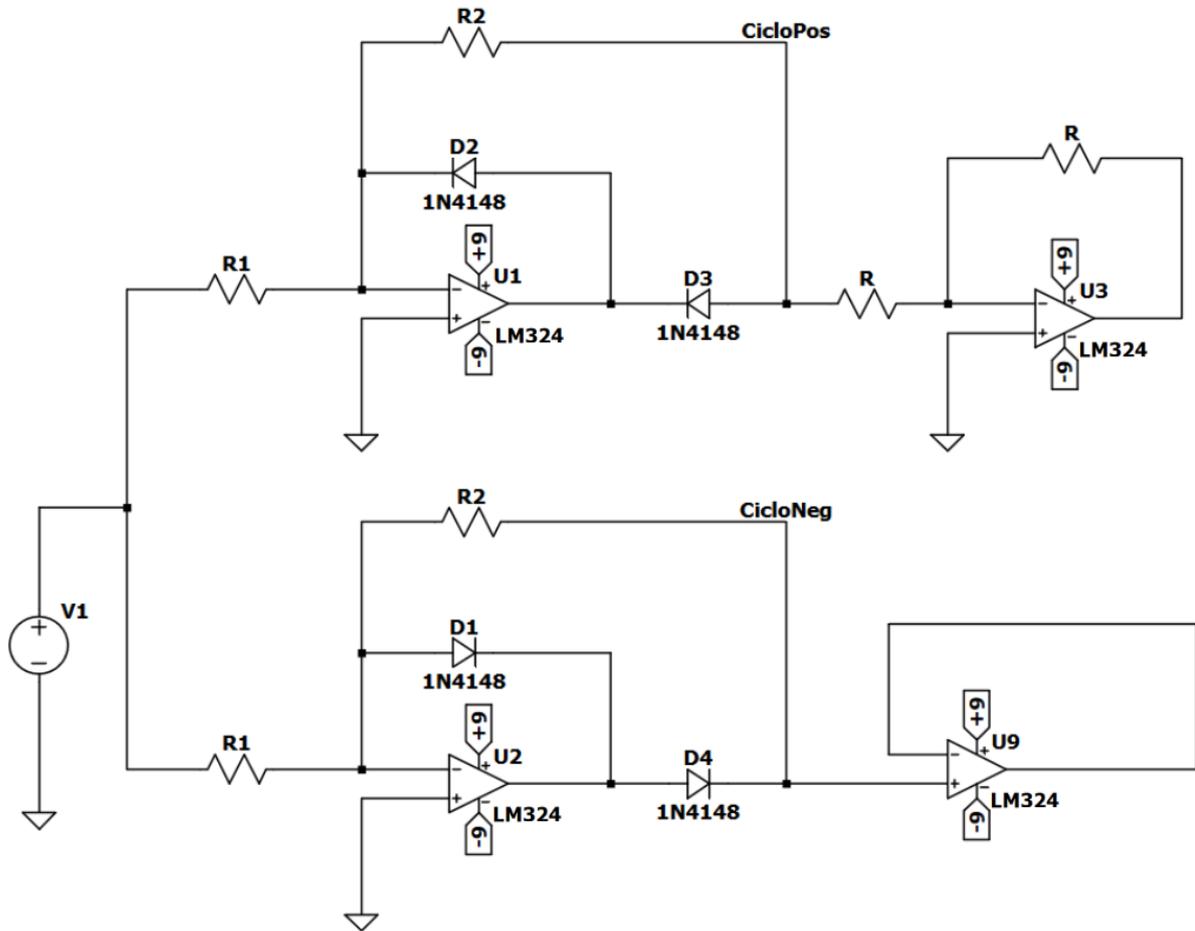


Figura 3.23: Esquema eléctrico del rectificador de onda completa

Los semiciclos negativos pasan por un circuito seguidor de tensión, con el fin de generar una señal de salida estable independiente de la carga que se conecte. Se decidió implementar este último circuito por el hecho que se obtenían medidas de este semiciclo que variaban considerablemente por factores externos, como la estática o la proximidad de las manos al manipular el circuito.

3.5. Circuito Rectificador de Onda Completa

En la figura 3.24 se puede ver el montaje en circuito impreso de los circuitos diseñados, junto con el Acondicionador de señales diseñado en Taller de Fourier:

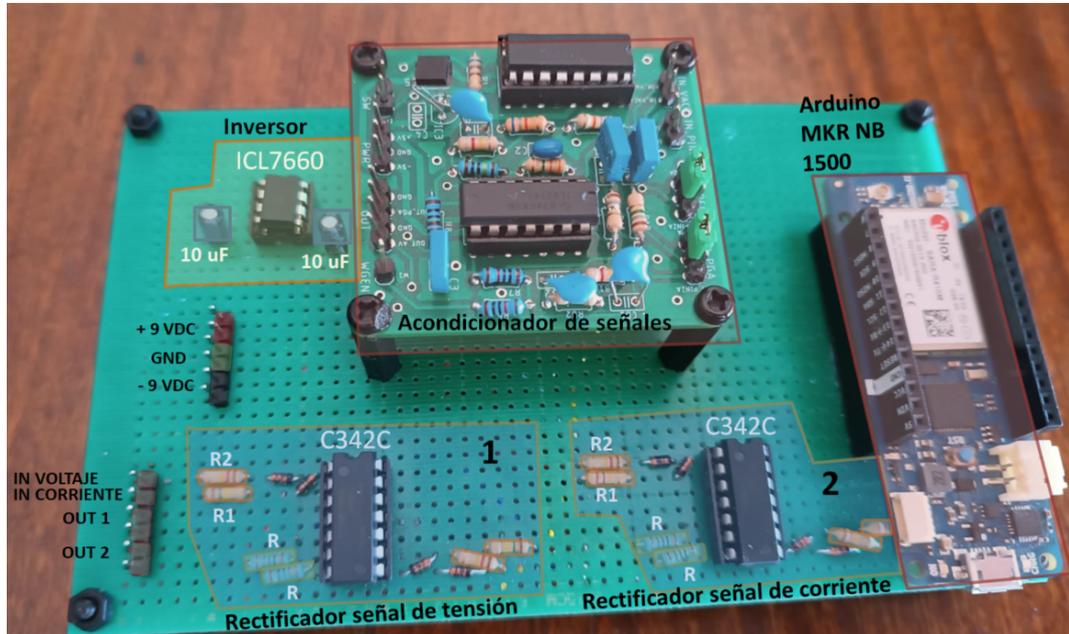


Figura 3.24: Montaje del circuito utilizado para la implementación del nodo

3.5.1. Cálculos de las ganancias de los circuitos

Señal de la pinza

La señal de salida de la pinza tiene un rango de $v_{pinza} \in [33 ; 333] \text{ mV}$, por lo que luego de pasar por el bloque acondicionador de señal, cuya ganancia es de 13.4 V/V , el máximo valor de amplitud (asumiendo una onda sinusoidal) es $v_{pico AS}^{pinza} = 0,333 \cdot 13,4 \cdot \sqrt{2} = 6,31 \text{ V}$. Dicha señal necesita además de la rectificación, una adecuación de ganancia, para poder ser leída por la placa Arduino, que maneja una amplitud máxima de 3.3 V . La ganancia teórica de acuerdo a los valores elegidos de resistencias para este circuito es de $\frac{120}{270} = 0,444 \text{ V/V}$ (ver la figura 3.21). De esta manera: $v_{max} = 2,79 \text{ V}$, por lo que se consigue un margen frente a la máxima señal posible del 15% .

Señal del TT

La señal de salida del TT tiene una amplitud máxima de $6,07 \cdot \sqrt{2} = 8,6 \text{ V}$, y luego de pasar por el AS cambia a $v_{max}^{TT} = 8,6 \cdot 0,467 = 4,02 \text{ V}$. La ganancia del circuito rectificador para esta señal es $G = \frac{120000}{150000} = 0,8$, por tanto $v_{pico}^{Arduino} = 3,2 \text{ V}$ generando un margen de $\approx 3 \%$ en el peor de los casos.

Capítulo 3. Medidas eléctricas

En la tabla 3.3 se resumen los valores de las ganancias del rectificador, y los datos relevados de la placa diseñada en el Taller de Fourier:

	Acondicionador de Tensión	Acondicionador de Corriente	Rectificador de Tensión	Rectificador de Corriente
Frecuencia de corte inferior (Hz)	3.8	< 1	N/A	N/A
Frecuencia de corte superior (Hz)	1973	1965	N/A	N/A
Ganancia en banda pasante (V/V)	0.467	13.4	0.8	0.444

Tabla 3.3: Resumen de ganancias y frecuencias de corte de los circuitos utilizados

3.6. Relevamiento de señales

En la presente sección se releva mediante el Analog Discovery algunas señales adquiridas por la caja EDM.

3.6.1. Señales de salida del TT

Las figuras 3.25 y 3.26 representan las señales medidas con el Analog Discovery 2 de: la salida del transformador de tensión y del acondicionador de señales por un lado, y la onda rectificada por el otro:

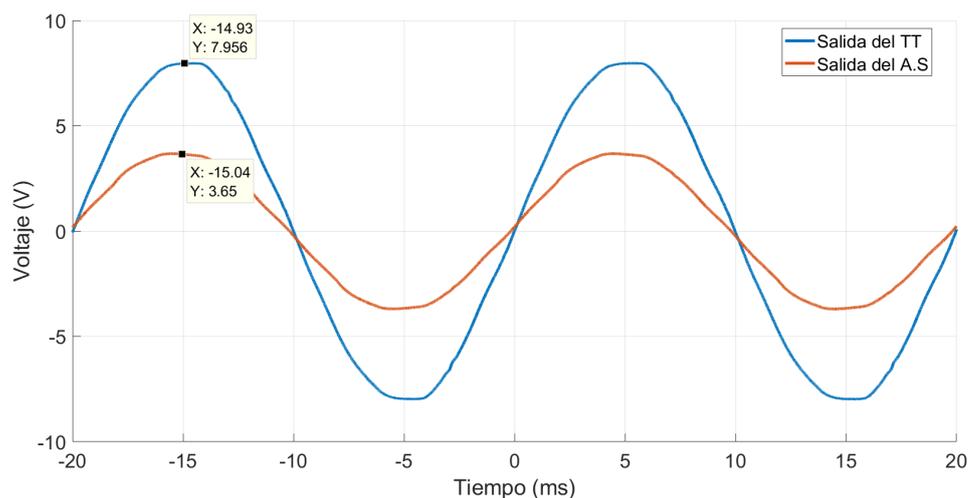


Figura 3.25: Señales relevadas con el AD2 de la salida del TT y del A.S

3.6. Relevamiento de señales

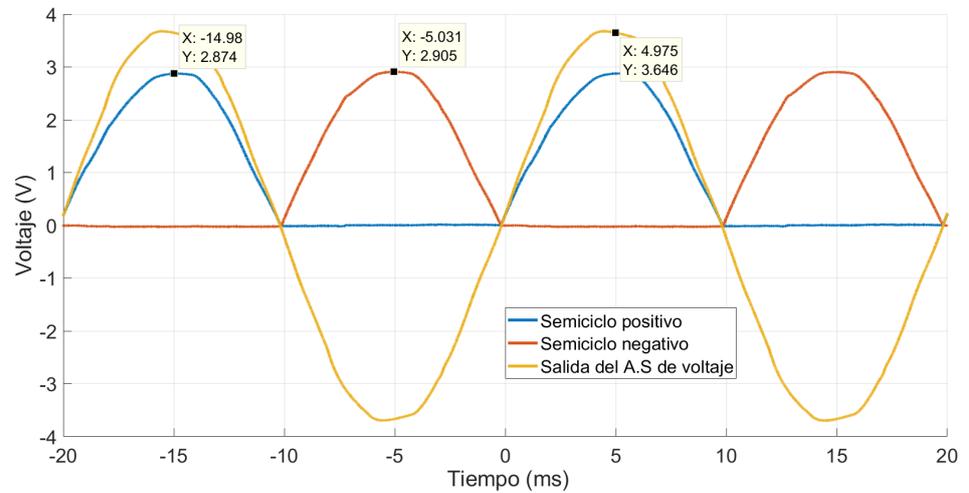


Figura 3.26: Señales relevadas con el AD2 de la salida del A.S y la rectificación

La señal de salida del TT tiene una forma fuertemente sinusoidal con valor de pico $V_{pico\ in} \approx 7,95\ V$. Sin embargo es posible notar que el transformador se encuentra trabajando muy cerca del codo de saturación. El valor eficaz de la señal es $V_{rms} = 5,78\ V$ (calculado mediante Matlab utilizando la definición de valor eficaz).

La señal de salida del A.S es también fuertemente sinusoidal, y su valor pico es $V_{pico\ out} \approx 3,65\ V$, que es coherente por el valor de la ganancia calculada para este circuito.

Por último, se muestra la señal de salida del A.S, junto con su rectificación de onda completa. Los valores pico de ambos semiciclos tienen una diferencia, debido a que las resistencias utilizadas para cada circuito son diferentes (del mismo valor comercial, pero distintas en sí). Sin embargo, la diferencia observada es del orden del 1%. Para mitigar este efecto podrían usarse resistencias de menor incertidumbre, o regular los circuitos mediante reóstatos. La ganancia del rectificador de tensión es de 0.8 V/V, que es lo que se espera de este circuito, ya que la amplitud de las señales de salida deben ser procesadas por la placa Arduino.

3.6.2. Señales de corriente: salida del TI, AS y circuito rectificador

En esta sección se relevan las señales de corriente de varios tipos de cargas. Se eligen cargas que son prácticas (por su uso doméstico en casi todos los hogares) y de diferente naturaleza, para poder observar diferencias (cargas resistivas, inductivas).

Caso 1: Cargador de PC

Cargador con entrada de 100 a 240 V_{AC} (50/60 Hz) y potencia máxima 65W. Las figuras 3.27 y 3.28 muestran las señales de tensión y corriente y la salida del filtro PGA rectificada respectivamente.

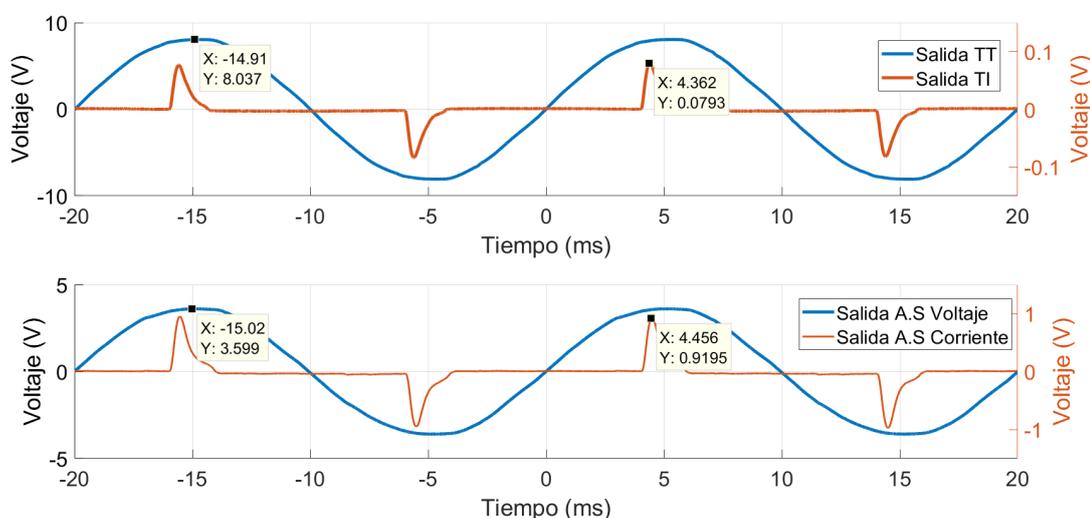


Figura 3.27: Señales relevadas con el AD2 de tensión y corriente de una carga tipo cargador de PC

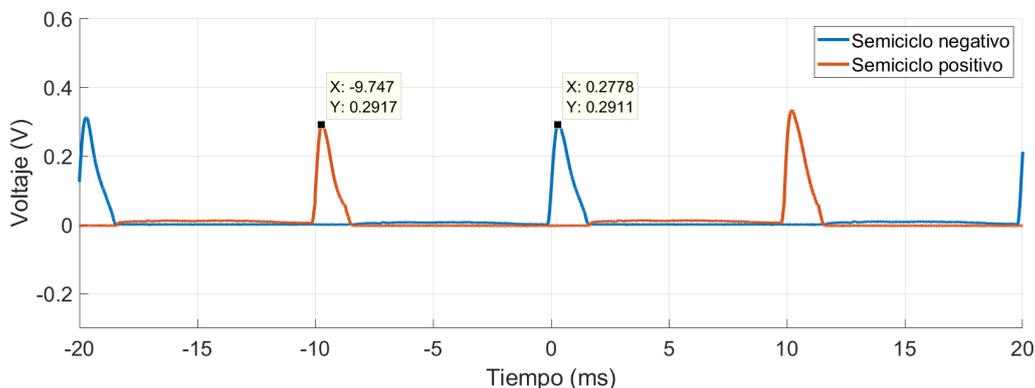


Figura 3.28: Señal de salida del PGA rectificada

3.6. Relevamiento de señales

Caso 2: Cargador de celular

Cargador de celular con potencia máxima de 33W.

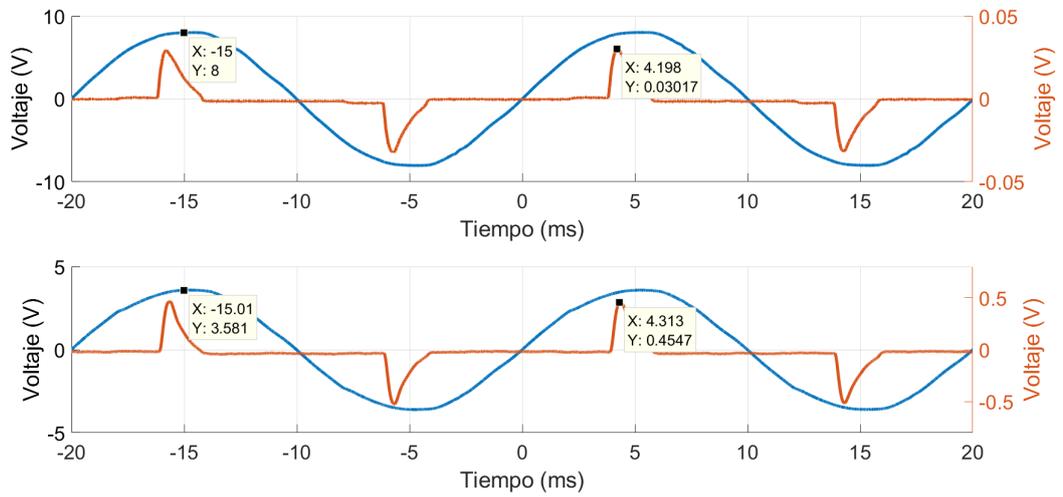


Figura 3.29: Señales relevadas con el AD2 de tensión y corriente de una carga tipo cargador de celular. La figura superior son las señales sin acondicionar, y la figura inferior son las acondicionadas

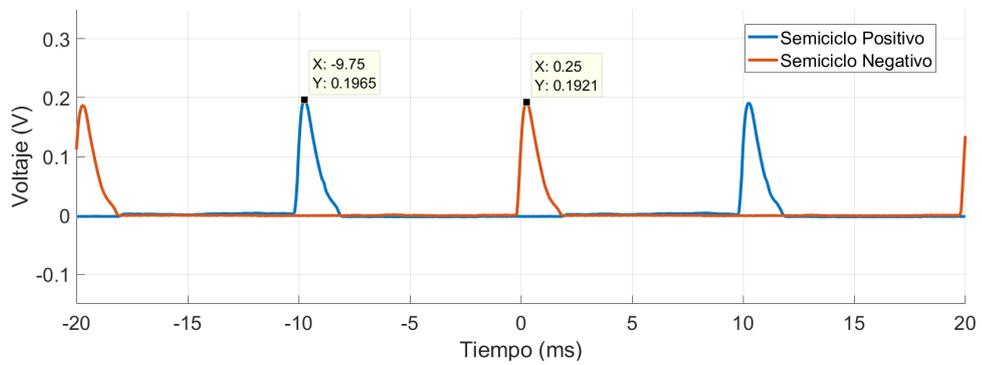


Figura 3.30: Señal rectificada

Capítulo 3. Medidas eléctricas

Observando las figuras de las cargas vistas, se puede concluir que ambas tienen formas de corriente similares. Esta forma de onda también es característica de cargas tipo lámpara fluorescente (ver [35])

Caso 3: Caloventilador

Caloventilador modelo *TCCV20* con potencia de 2 kW. Se toman medidas en 3 puntos de funcionamiento diferentes: solo ventilador, modo calor nivel medio y modo calor nivel máximo. En el primer modo, se observa una señal sinusoidal con amplitud $V_{pico}^{ventilador} \approx 0,0012 \cdot V_{pico}^{calor\ max}$. La amplitud de la misma es demasiado pequeña como para ser leída de forma correcta por el TI, por esta razón se ve una onda sinusoidal con bastante interferencia. Cambiando la ganancia del filtro PGA se podría tomar una mejor medida. También se puede observar un atraso en fase (aproximadamente 45 grados) respecto a la tensión, puesto que se trata de una impedancia con componente inductiva. Cuando se cambia al modo calor, este desfase se corre a 0 puesto que la componente resistiva es la que predomina.

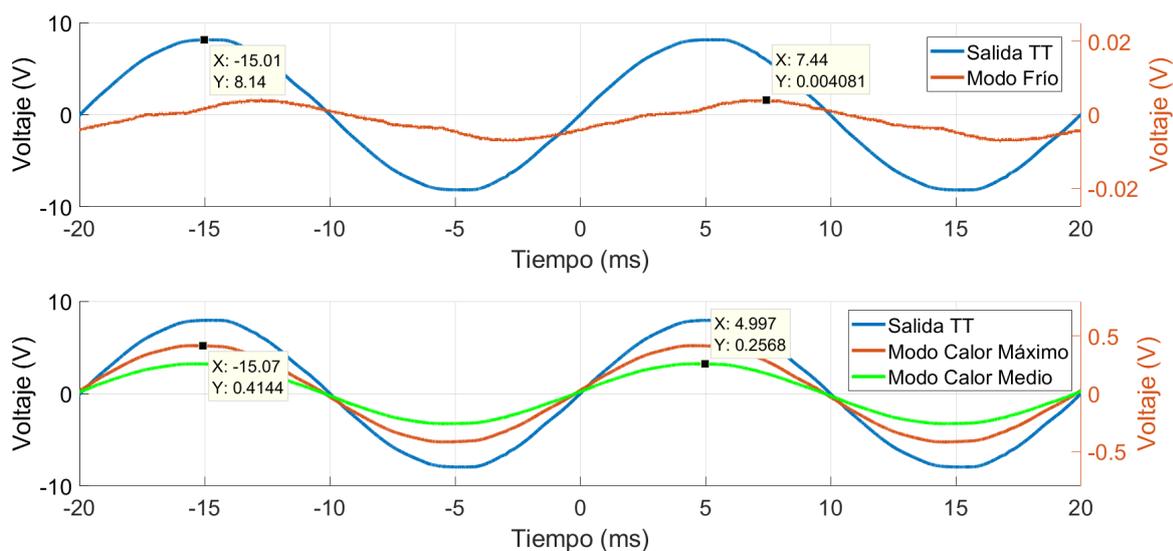


Figura 3.31: Señales relevadas (sin acondicionar) del caloventilador en 3 modos: solo frío, calor nivel medio y calor nivel máximo

3.6. Relevamiento de señales

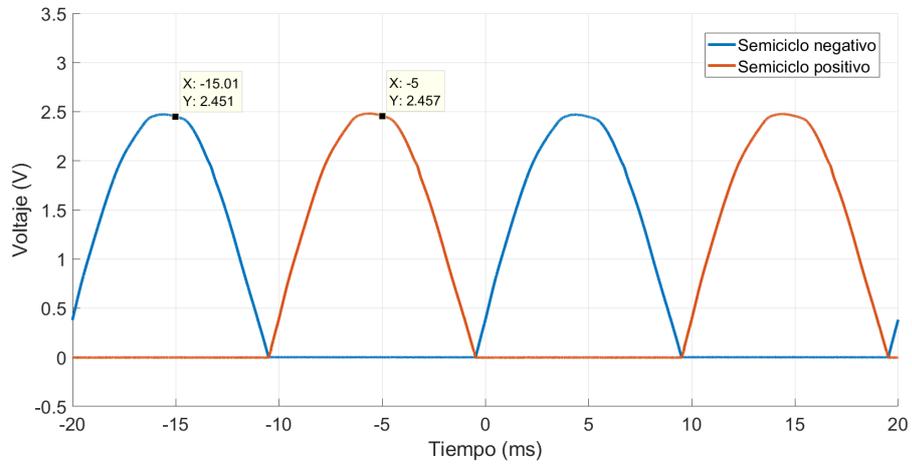


Figura 3.32: Señal de salida del PGA rectificada en modo calor máximo

Caso 4: Estufa

Se utilizó una estufa radiador de aceite. Nuevamente se comprueba la componente resistiva, en este caso absoluta. El modelo del radiador es antiguo y carece de chapa con características de potencia, sin embargo, observando los valores de corriente, se puede estimar que es un equipo de 1500 W (ver 4.3).

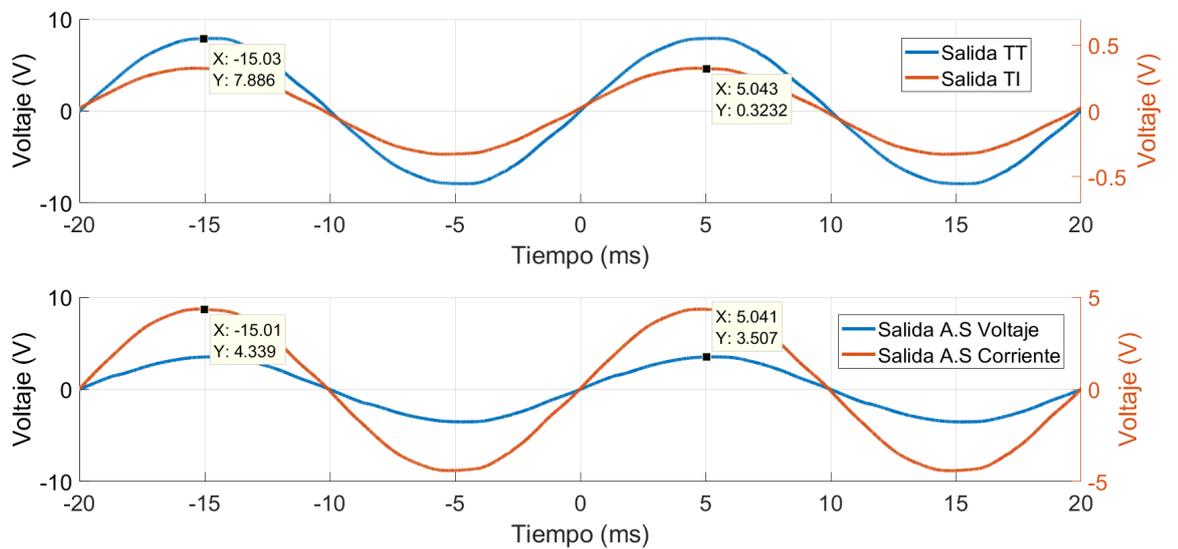


Figura 3.33: Señales relevadas con el AD2 de tensión y corriente de una carga tipo estufa

Capítulo 3. Medidas eléctricas

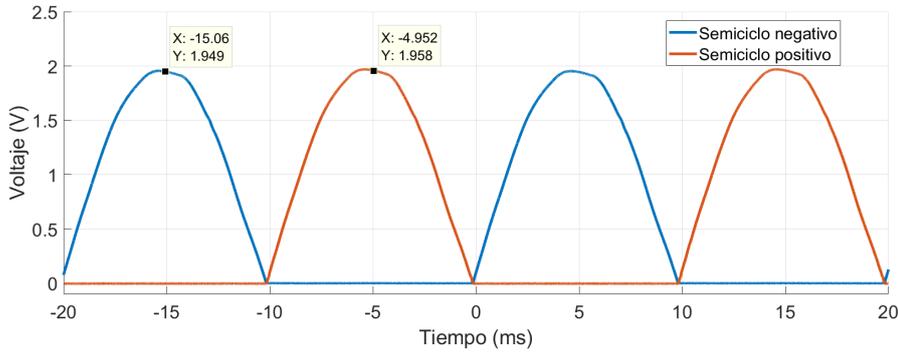


Figura 3.34: Señal de salida del filtro PGA rectificada

Caso 5: Calefón de 60L, 1.5kW

Este caso es similar al anterior. Una carga resistiva pura de potencia 1.5 kW, como se ve en las figuras 3.35 y 3.36.

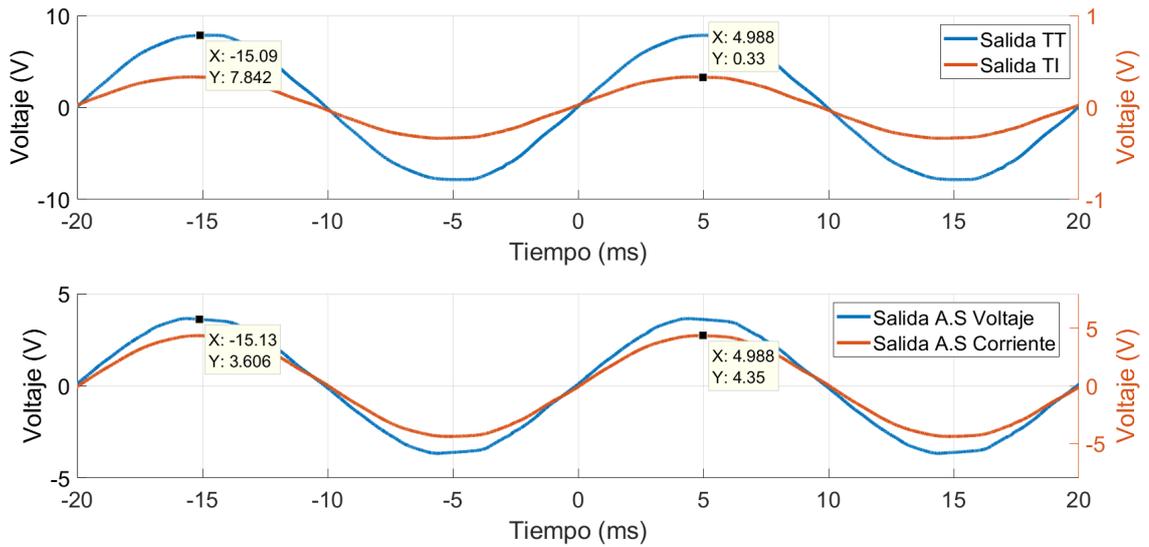


Figura 3.35: Señales relevadas con el AD2 de tensión y corriente de una carga tipo calefón

3.6. Relevamiento de señales

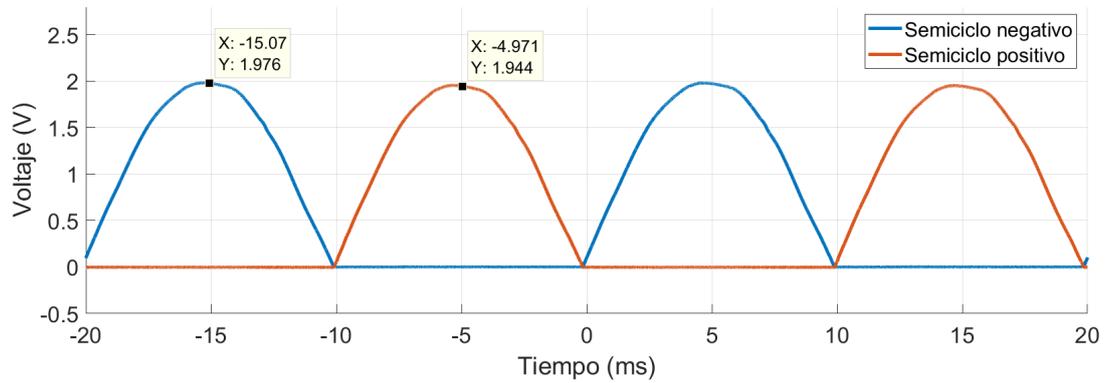


Figura 3.36: Señal de salida del filtro PGA rectificada

Caso	Valor eficaz (V)	Corriente (A)
Cargador de PC sin acondicionar	0.0176	0.535
Cargador de PC acondicionada	0.1996	0.453
Cargador de Celular sin acondicionar	0.0082	0.25
Cargador de Celular acondicionada	0.1225	0.28
Caloventilador sin acondicionar modo frío	0.0037	0.11
Caloventilador sin acondicionar modo calor 1	0.1837	5.58
Caloventilador sin acondicionar modo calor 2	0.2957	8.98
Radiador sin acondicionar	0.2317	7.04
Radiador acondicionada	3.0999	7.03
Calefón sin acondicionar	0.2363	7.18
Calefón acondicionada	3.1010	7.03

Tabla 3.4: Valores eficaces de las señales de salida del PGA y del TI, y cálculo de la corriente.

La columna 2 de la tabla 3.4 resume los valores eficaces calculados con Matlab de las señales de salida del circuito acondicionador de corriente y del transformador toroidal, utilizando la definición de valor eficaz. En la columna 3 se calcula el valor de la corriente, utilizando las siguientes relaciones:

- Para las señales sin acondicionar (es decir, directamente la salida del TI) se utiliza la relación de la ecuación 3.1: $i_{CA} = v_{pinza} \cdot 30,38 \text{ A}$
- Para las señales acondicionadas, se utiliza la ganancia calculada para el filtro PGA 3.3 y nuevamente la relación anterior: $i_{CA} = \frac{v_{pinza}}{13,4} \cdot 30,38 \text{ A}$

Valores nominales para comparar:

Capítulo 3. Medidas eléctricas

- Caloventilador de 2 kW: $I_{nom} = \frac{2000 W}{230 V} = 8,7 A$
- Calefón de 1.5 kW: $I_{nom} = \frac{1500 W}{230 V} = 6,5 A$
- El cargador de PC entrega una potencia máxima de 65 W
- El cargador de celular es de 33 W

En el caloventilador, la corriente medida es un 3% mayor que la nominal ($\frac{8,98}{8,7} = 1,03$). Para el caso del calefón, el valor de la corriente calculada se aproxima al 110% de la nominal, siendo $\frac{7,18}{6,5} = 1,1$. En estos cálculos se consideró que la carga es puramente resistiva.

Para el caso de los cargadores, las señales de potencia se muestran en la figura 3.37. Los valores medio calculados de las potencias (según la definición de valor medio, calculado con Matlab) del cargador de PC y de celular son 53.3 W y 31 W respectivamente.

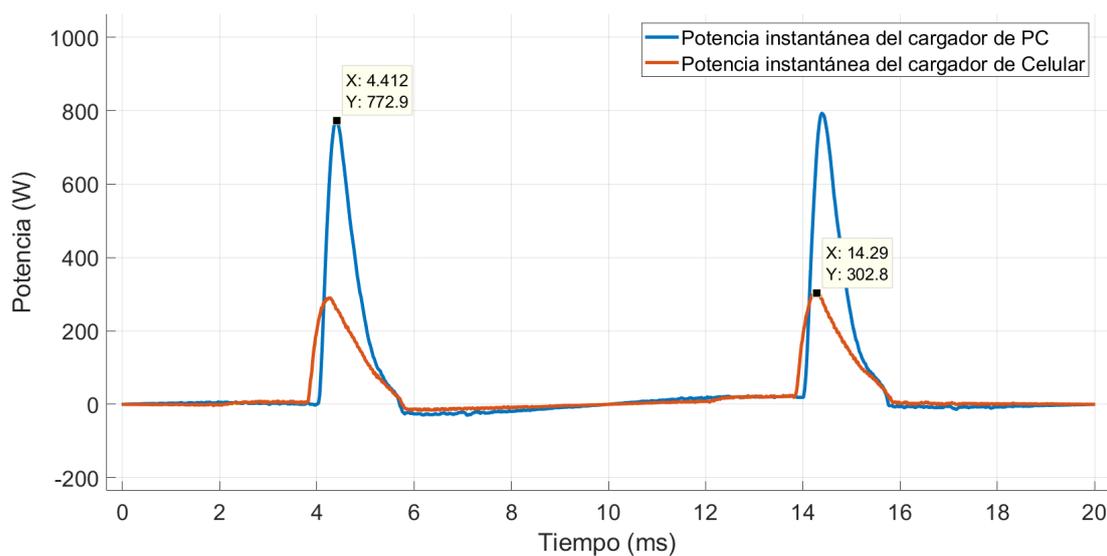


Figura 3.37: Señal de potencia instantánea para cargador de PC y de celular

Capítulo 4

Procesamiento de señales medidas

Hasta ahora se trabajó sobre el nodo como caja de monitoreo de señales. Las mismas son una entrada para el tema que se trata en el presente capítulo: cómo utilizar la información que entrega el circuito acondicionador para poder generar lecturas de valores válidos (tensión, corriente, defasajes, potencias, etc) y comandar la carga conectada.

4.1. Adquisición y procesamiento de datos con la placa Arduino

La figura 4.3 muestra el diagrama de pines de la placa Arduino MKR NB 1500 utilizada para procesar las señales. Dicha placa tiene por elemento central el procesador de baja potencia Arm[®] Cortex[®]-M0 32-bit SAMD21 [22], y cuenta con módulo de comunicación SARA-R410M-02B [23] de u-blox y un puerto MicroSIM en la parte inferior. La comunicación se realiza a través de las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 8, 12, 13, 18, 19, 20, 25, 26 y 28 de LTE Cat M1/NB1. La alimentación es mediante puerto USB (5VDC), y cuenta también con la opción de acoplar una batería en caso de querer trabajar con una fuente externa de alimentación. Tiene 8 pines de entradas y salidas digitales, 7 pines de entradas analógica y 1 pin de salida analógica, entre otros. El rango de trabajo es de 0V a 3,3V. Las entradas analógicas cuentan con un Conversor Analógico Digital (ADC), cuya resolución se puede setear en 8, 10 o 12 bits. La memoria estática (SRAM) es de 32 kB, y la velocidad de reloj (Clock Speed) es de 48 MHz [32].

El programa implementado tiene tres partes principales:

1. Declaración de constantes y variables: se declaran constantes que se utilizan como contadores y factores, y variables de distintos tamaños para almacenar las señales y los valores calculados. Se define la ventana que se utiliza (cantidad de períodos a procesar por ciclo) y la cantidad de armónicos que se quiere calcular.

Capítulo 4. Procesamiento de señales medidas

2. Lectura analógica: Al principio del programa, se declara un bucle *for* que cumple la función de lectura en las entradas analógicas A0, A1, A2 y A3, y almacena en el vector *corriente* la diferencia entre A0 y A1 y en el vector *tension* la diferencia entre A2 y A3, recordando que se debe restar la entrada del semiciclo negativo que entrega el inversor, para poder reconstruir la señal. También multiplica los valores por el factor 0.805 para realizar la conversión ADC de 12bits.
3. Una vez cargados los vectores *corriente* y *tension*, se los procesa por diferentes funciones como: detección de valores pico, cálculo RMS, transformada rápida de Fourier, defasaje, potencia aparente, potencia activa, factor de distorsión.

A grandes rasgos, el bucle de lecturas y proceso se resume en la figura 4.1.

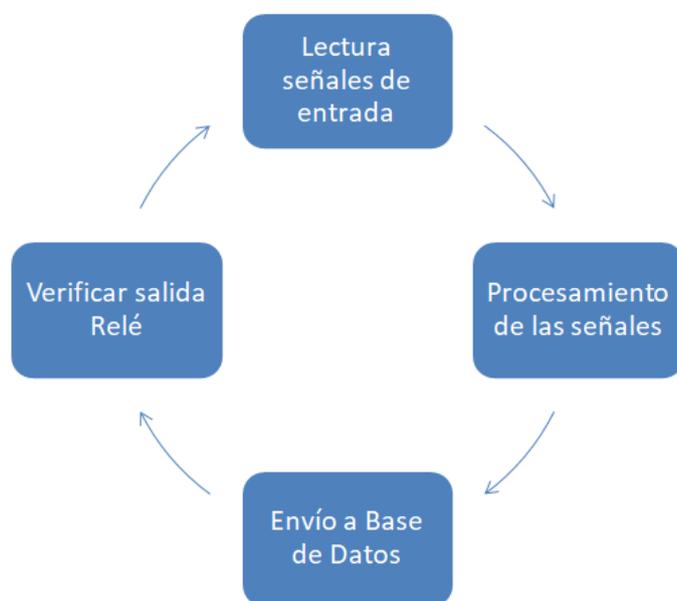


Figura 4.1: Bucle de la forma de trabajo del código Arduino

En la sección A.1 se encuentra el código completo y comentado, además de la validación de las mediciones y valores entregados por el programa.

La figura 4.3 muestra el diagrama de pinout de la placa MKR y la figura 4.2 esquematiza el diagrama de conexiones utilizado.

4.1. Adquisición y procesamiento de datos con la placa Arduino

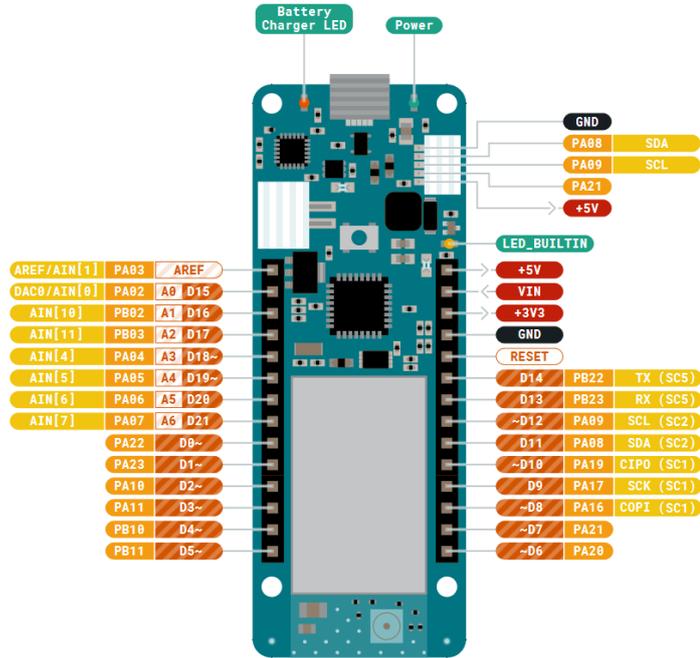


Figura 4.2: Pinout de la placa Arduino MKR NB 1500 [32]

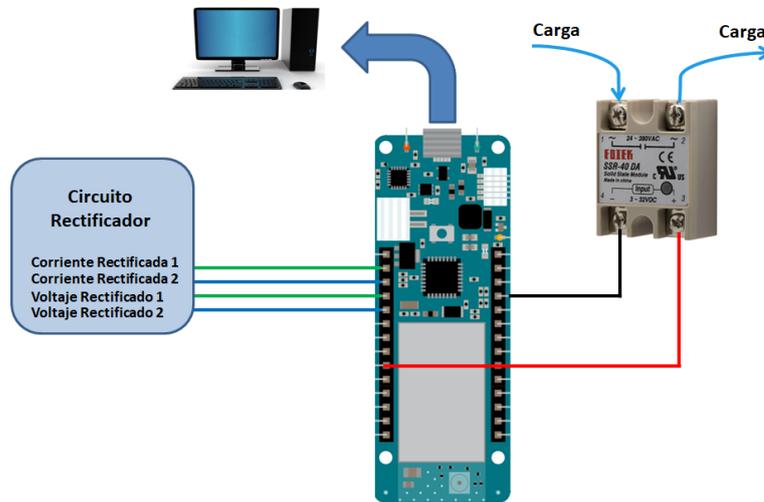


Figura 4.3: Conexiones entre la placa y Arduino

Capítulo 4. Procesamiento de señales medidas

4.1.1. Determinación de la frecuencia de muestreo

Para relevar la frecuencia de muestreo del código, se impone en la entrada analógica una señal sinusoidal de 1 V de amplitud, 1.5 V de offset y 50 Hz mediante el generador del AD2. La figura 4.4 muestra la señal almacenada en un vector mediante un bucle *for* encargado de realizar las lecturas. La diferencia de muestras M en un período completo de la señal es

$$\Delta M = 409 - 85 = 324 \text{ muestras} \quad (4.1)$$

por lo tanto el código obtiene 324 muestras en 20 ms, o el equivalente a 16.200 muestras por segundo.

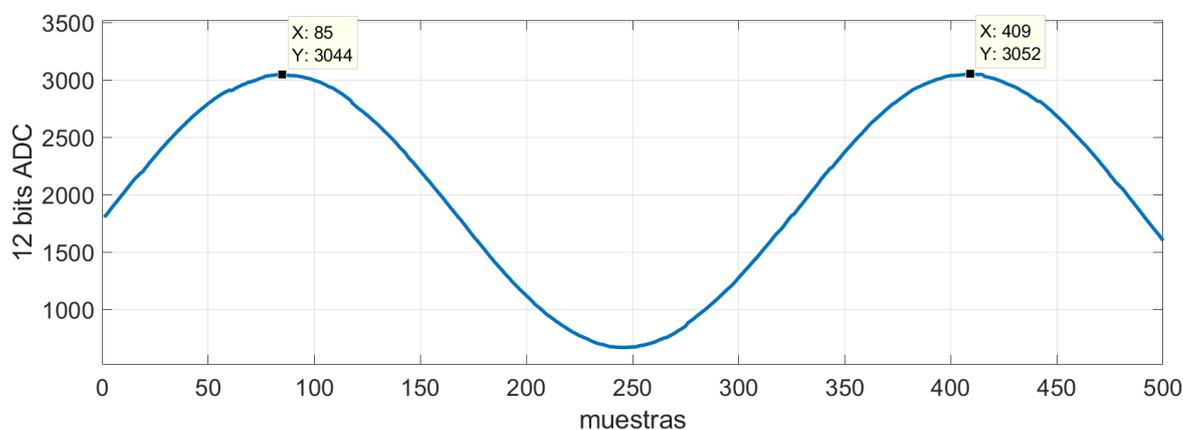


Figura 4.4: Cálculo de la frecuencia de muestreo de Arduino

Para validar el resultado anterior, se procede a evaluar la salida del código en la siguiente sección.

4.1.2. Validación de datos

En esta sección, se impone como entrada señales con el AD2 con determinadas características conocidas a priori (amplitud, frecuencia, armónicos, defasajes) y se realizan lecturas del monitor serial, para realizar un relevamiento y verificar si el programa realiza cálculos que dan valores acordes a los reales.

Caso 1: FFT, valor medio, valor pico, RMS, factor de distorsión

La señal de entrada se configura desde WaveForms como muestra la figura 4.5

Es importante aclarar que la señal está normalizada. Esto quiere decir que cuando se le indique al Waveforms que la señal tendrá amplitud 1, se normalizan los armónicos para que la señal completa tenga esa amplitud.

4.1. Adquisición y procesamiento de datos con la placa Arduino

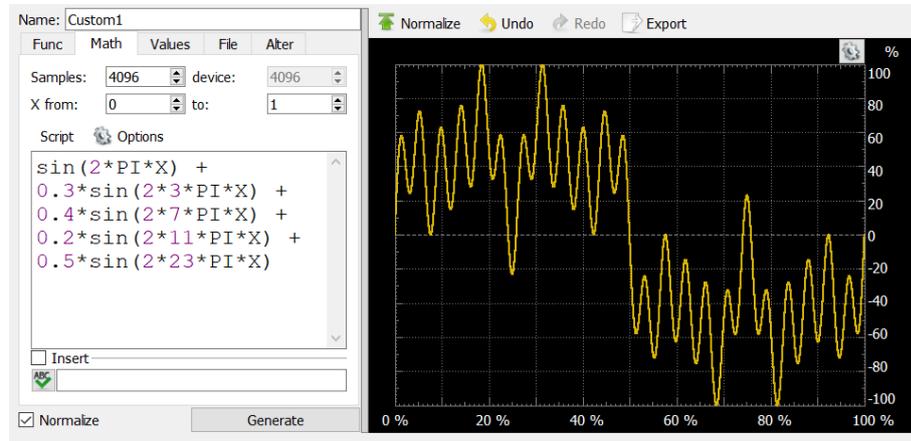


Figura 4.5: Peso ponderado de cada armónico de la señal de prueba 1

- Armónico 1 al 100 %
- Armónico 3 al 30 %
- Armónico 7 al 40 %
- Armónico 11 al 20 %
- Armónico 23 al 50 %
- Amplitud de la señal: 1V
- Frecuencia del armónico 1: 50 Hz
- Componente DC: 1.5 V

La salida del monitor serie de Arduino entrega los resultados mostrados en la figura 4.6:

Capítulo 4. Procesamiento de señales medidas

```
Componente DC corriente: 1.53
A_1 = 0.585   Theta_1=0.0109
A_2 = 0.001   Theta_2=0.0250
A_3 = 0.174   Theta_3=-0.0227
A_4 = 0.002   Theta_4=0.0213
A_5 = 0.002   Theta_5=-0.0245
A_6 = 0.004   Theta_6=-0.0159
A_7 = 0.236   Theta_7=0.0203
A_8 = 0.007   Theta_8=0.0178
A_9 = 0.003   Theta_9=0.0106
A_10 = 0.001  Theta_10=0.0187
A_11 = 0.112  Theta_11=0.0073
A_12 = 0.001  Theta_12=0.0137
A_13 = 0.002  Theta_13=-0.0180
A_14 = 0.006  Theta_14=0.0218
A_15 = 0.001  Theta_15=-0.0091
A_16 = 0.004  Theta_16=-0.0087
A_17 = 0.001  Theta_17=0.0083
A_18 = 0.003  Theta_18=-0.0090
A_19 = 0.005  Theta_19=0.0249
A_20 = 0.006  Theta_20=-0.0272
A_21 = 0.009  Theta_21=-0.0268
A_22 = 0.015  Theta_22=-0.0258
A_23 = 0.292  Theta_23=0.0267
A_24 = 0.010  Theta_24=0.0215
```

Figura 4.6: Salida del Monitor Serie de Arduino

A partir de los datos entregados por Arduino, se grafica la señal

$$f(t) = 1,53 + 0,585 \cdot \sin(2\pi ft - 0,0109) + \\ 0,174 \cdot \sin(2\pi (3 \cdot f) t + 0,0250) + \\ 0,236 \cdot \sin(2\pi (7 \cdot f) t + 0,0203) + \\ 0,112 \cdot \sin(2\pi (11 \cdot f) t + 0,073) + \\ 0,292 \cdot \sin(2\pi (23 \cdot f) t + 0,0267)$$

4.1. Adquisición y procesamiento de datos con la placa Arduino

En la figura 4.7 se grafican ambas señales. Se puede comprobar que salvo algunas diferencias, los parámetros calculados por Arduino generan una señal que se aproxima de forma aceptable a la real.

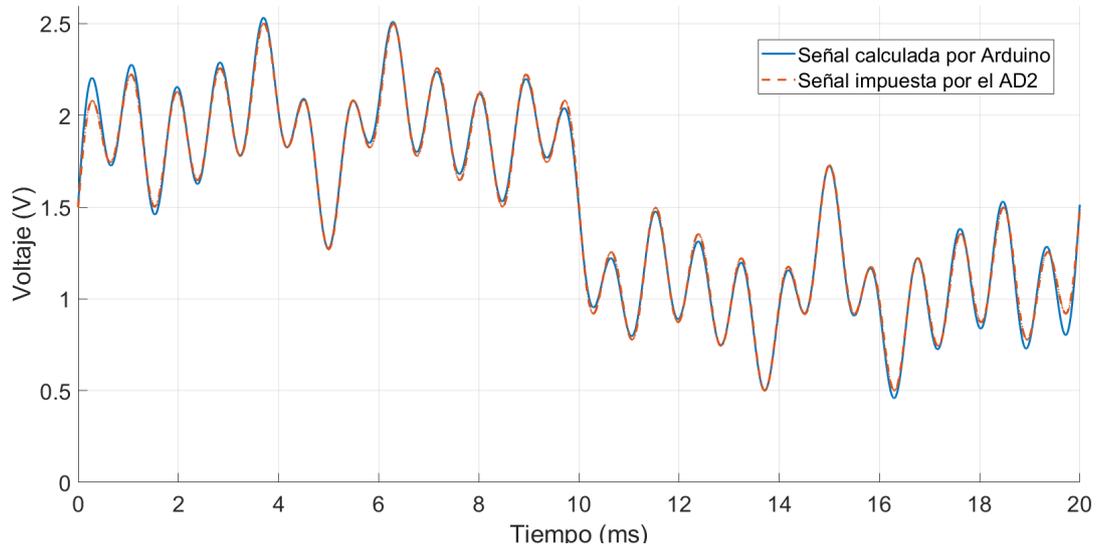


Figura 4.7: Gráfica generada y calculada por Arduino

RMS señal generada (V)	RMS calculada por Arduino (V)	Error Porcentual
1.5821	1.5859	0.24%

Tabla 4.1: Valores RMS de Waveforms y calculado por Arduino

Factor de distorsión Waveforms	Factor de distorsión calculado	Error Porcentual
$\sqrt{0,3^2 + 0,4^2 + 0,2^2 + 0,5^2} = 0,7348$	0.7328	0.27%

Tabla 4.2: Factores de distorsión armónica

Capítulo 4. Procesamiento de señales medidas

Caso 2: defasaje y potencia

Para validar el defasaje y la potencia entre dos señales, se impuso

- Entrada de corriente: señal periódica de 50 Hz y con el armónico 5 al 10 %, offset de 1.5 V y amplitud 1 V (recordando que Waveform da la onda normalizada)
- Entrada de voltaje: senoide pura de 50 Hz, offset de 1.7 V y amplitud de 1.2 V
- Defasaje de 30 grados entre ambas señales

En la figura 4.8 se muestran ambas señales y la señal de potencia, y en la figura 4.9 se muestra la salida del monitor de Arduino.

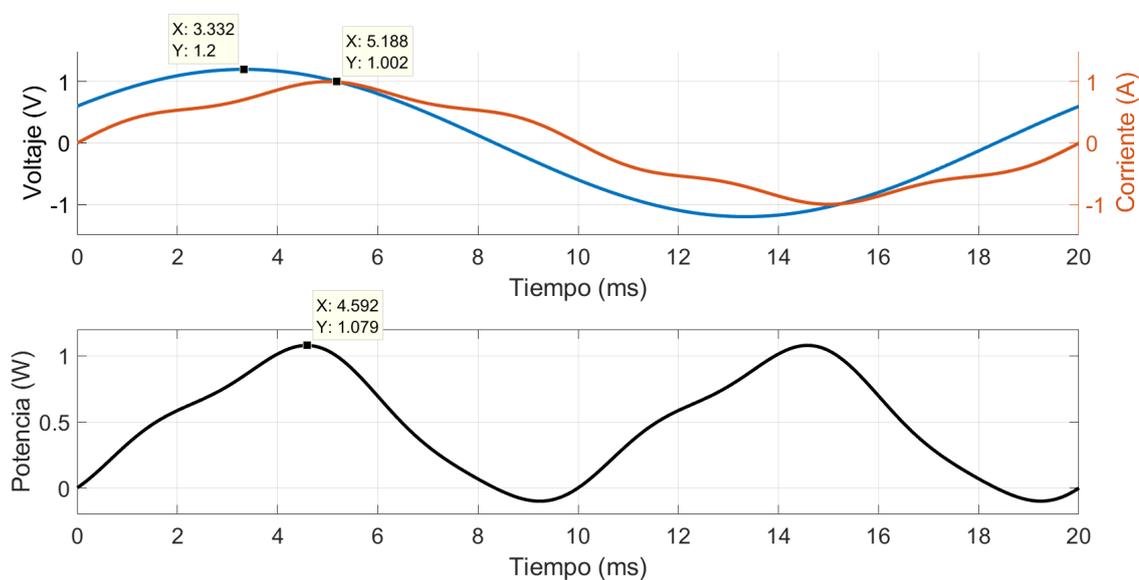


Figura 4.8: Señales de corriente, voltaje y potencia instantánea

4.1. Adquisición y procesamiento de datos con la placa Arduino

```
Componente DC corriente: 1.50 A
Componente DC tension: 1.70 V
Valor de pico de corriente: 1.02 A
Valor de pico de tension: 1.22 V
Valor RMS de la corriente: 0.649 A
Valor RMS de la tension: 0.854 V
Potencia activa: 0.47 W
Potencia aparente: 0.55 VA
Defasaje (grados): 30.54
Factor distorsion: 0.10
```

Figura 4.9: Salida del monitor serial de Arduino

	Arduino	Calculada	Error Absoluto
Potencia (mW)	470	472.3	0.487 %
Corriente RMS (mA)	649	646	0.46 %
Voltaje RMS (mV)	854	848.5	0.65 %
Defasaje (grados)	30.54	30	1.77 %

Tabla 4.3: Valores calculados por Arduino y por Matlab

La tabla 4.3 resume valores obtenidos por el código Arduino, los obtenidos procesando la señal con Matlab utilizando las definiciones de valor eficaz y potencia, y el error relativo que tiene el código.

El factor de distorsión calculado por Arduino es 0.1, resultado que es correcto puesto que el armónico 5 está al 10 %.

4.1.3. Cálculo de constantes para tensión y corriente

Hasta ahora, los valores que se cargan en los vectores *corriente* y *tension* son las señales de salida del circuito rectificador que pasan por el convertor ADC del Arduino. Por tanto, es necesario calcular dos constantes, una por cada vector, que le agregue un significado físico real a ambas magnitudes.

Constante para la tensión

El vector *tension* es la diferencia entre las entradas analógicas *A2* y *A3*, y recibe como entrada la señal de salida del circuito rectificador de onda completa asociada al TT, como muestra la figura 3.26.

1. Utilizando la definición de valor eficaz, se calcula mediante Matlab el valor rms de la señal rectificada (restando el semiciclo negativo): $V_{rms} = 2,016 V$.

Capítulo 4. Procesamiento de señales medidas

El valor eficaz de la tensión al momento de tomar la medida era de $V_{rms}^{toma} = 232,7 V$. Por lo tanto, la primera constante $K_1 = \frac{232,7}{2,074} = 115,42 V/V$.

2. El conversor ADC de Arduino tiene una resolución de 12 bits, y funciona en un rango de 0 V a 3.3 V. Por lo tanto, se debe agregar la constante de conversión $K_2 = \frac{3,3}{2^{12}} = 805,66 \mu V/bit$

La constante que multiplica al vector de tensión es:

$$K_T = K_1 \cdot K_2 = 93 \cdot 10^{-3} V/bit \quad (4.2)$$

Constante para la corriente

El vector *corriente* es la diferencia entre las entradas analógicas A0 y A1, y recibe como entrada la señal de salida del circuito rectificador de onda completa asociada al TI.

- El acondicionador de corriente genera una ganancia de $G_1 = 13,4 V/V$
- El rectificador de corriente genera una ganancia de $G_2 = 0,444 V/V$
- El TI tiene una constante transducción de $G_3 = \frac{30,38}{1} A/V$
- Al igual que el caso anterior, se cuenta con la conversión ADC de 12 bits $K_2 = 805,66 \mu V/bit$

El vector almacenado en la variable corriente debe ser multiplicado por:

$$K_I = \frac{K_2 \cdot G_3}{G_1 \cdot G_2} = 4,114 \cdot 10^{-3} A/bit \quad (4.3)$$

por lo tanto, la modificación considerando las constantes es:

```
1 for (cont = 0; cont < samples; cont++){
2     corriente[cont] = corriente[cont]*0.004114;
3     tension[cont] = tension[cont]*0.093;
4 }
```

4.1.4. Implementación con cargas

Se sometió al código bajo una prueba con una carga resistiva de 1500 W:

4.1. Adquisición y procesamiento de datos con la placa Arduino

Carga tipo: Radiador

La figura 4.10 muestra los valores de los primeros 10 armónicos de ambas señales, siendo $A(i)$ y $C(i)$ los módulos y $B(i)$ y $D(i)$ los defasajes de los mismos para voltaje y corriente respectivamente. Dichos valores se cargan en Matlab y las curvas se muestran en la figura 4.11. El valor RMS de la tensión antes de alimentar a la carga era de aproximadamente 230.6 V. Dicho valor baja a 224.3 V como indica la tabla 4.4, y la principal causa se debe a que al ser una carga considerable, entra en juego la caída de voltaje de los cables de la instalación eléctrica. La potencia calculada de 1466 W es un resultado que se encuentra dentro de los límites del valor nominal esperado. La distorsión armónica es prácticamente 0, así como el ángulo de defasaje calculado, debido a que la carga es fuertemente resistiva.

A(i)	B(i)	C(i)	D(i)
316.709	0.0010	9.231	0.0015
1.219	-0.0166	0.377	0.0071
10.089	-0.0226	0.123	-0.0081
1.787	-0.0076	0.269	0.0223
12.653	0.0034	0.294	0.0012
0.499	-0.0249	0.301	-0.0227
6.541	0.0177	0.181	0.0156
1.213	0.0125	0.111	-0.0051
3.863	0.0149	0.169	0.0127

Figura 4.10: Armónicos calculados por el código Arduino

La tabla 4.4 resume los resultados arrojados por Matlab como referencia, y los arrojados por el código Arduino de las señales de la figura 4.11.

Capítulo 4. Procesamiento de señales medidas

	Arduino	Matlab
Componente DC corriente (A)	0.23	$2,8197 \cdot 10^{-4}$
Componente DC tensión (V)	0.91	$7,0994 \cdot 10^{-6}$
RMS Corriente (A)	6.546	6.545
RMS Tensión (V)	224.3	224.3
Potencia Activa (W)	1466.1	1465.7
Potencia Aparente (VA)	1468.3	1468.2
Factor de distorsión de corriente	0.08	0.085
$\cos \phi$	0.998	0.999

Tabla 4.4: Valores de corriente RMS calculada en Matlab

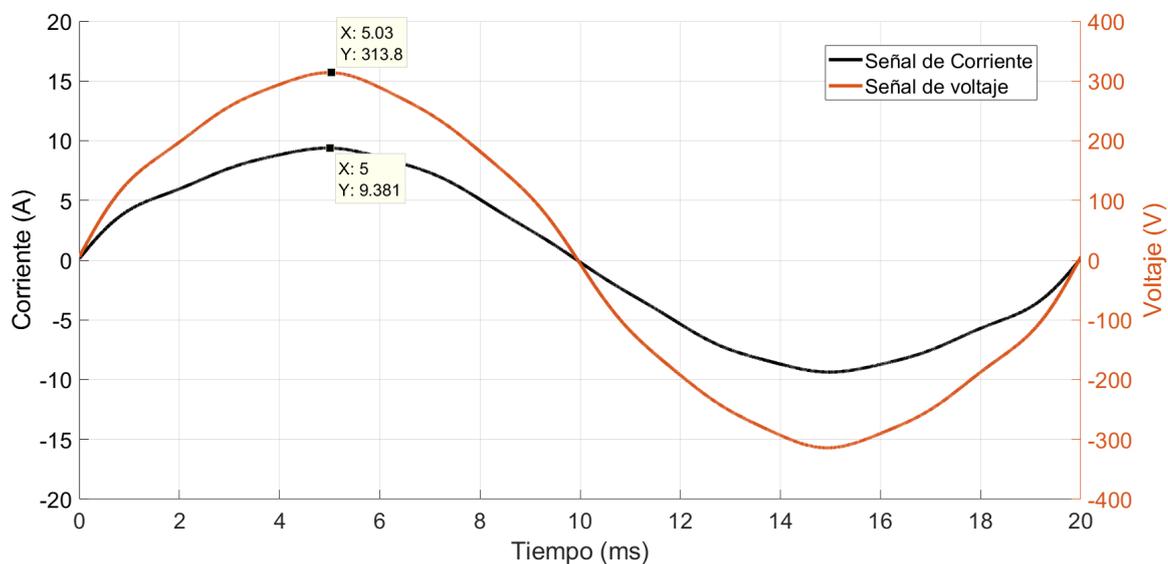


Figura 4.11: Tensión y corriente utilizando como entrada los armónicos calculados por Arduino

4.2. Implementación de la base de datos MySQL mediante comunicación serial

4.2. Implementación de la base de datos MySQL mediante comunicación serial

Una base de datos (BD) consiste en un conjunto de archivos que contienen información almacenada en forma estructurada, usualmente en tablas con campos que guardan registros de interés sobre un sistema. En el caso de GestDem, se cuenta con un servidor de base de datos, un entorno gráfico para poder visualizar las tablas, y un conector que genera el lazo entre una aplicación y la BD para poder cargar datos o leerlos.

A continuación se listan las principales características de la BD implementada:

- Servidor de base de datos MariaDB: es una base de datos desarrollada por MySQL. Es de código abierto y tiene la ventaja de ser una de las más utilizadas a nivel mundial, por lo que cuenta con varios foros de consultas colectivas.
- IDE HeidiSQL: es un entorno gráfico cuya función es gestionar (visualizar, agregar/eliminar elementos) de la BD.
- Xampp: es un entorno distribuido de forma gratuita por Apache que contiene la aplicación de MariaDB, PHP y Perl. En nuestro caso lo usaremos solo para MariaDB.
- Pycharm: editor de código diseñado especialmente para programar en Python.

El diagrama de funcionamiento de la aplicación para la base de datos se esquematiza en la figura 4.12.

El programa de Arduino es el encargado de procesar las señales y realizar las cuentas necesarias para generar en la salida de su monitor serial los datos de interés ya vistos en la sección anterior. El programa en Python es el encargado de captar estos datos, generar un enlace con la BD de SQL y agregar/eliminar/leer datos dentro de la tabla.

Capítulo 4. Procesamiento de señales medidas



Figura 4.12: Diagrama de flujo de la implementación de la BD

A continuación se presenta el programa implementado para desarrollar la aplicación:

```

1 import mysql.connector, serial, time, datetime
2
3 def insertar(hh, A, B, C, D, E, F, G, H):
4     cur = cnn.cursor()
5     sql = ''' INSERT INTO data_ (Hora, _DCCorriente, _DCTension
6         , _RMSCorriente, _RMSTension, _P, _S, _PHI, _FD)
7         VALUES ('{}', {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {})'''.format(hh, A, B, C
8         , D, E, F, G, H)
9     cur.execute(sql)
10    cnn.commit()
11    cur.close()
12 def eliminar(A):
13    cur = cnn.cursor()
14    sql = ''' _DELETE FROM data_ WHERE _HH<'{}' _'''.format(A)
15    cur.execute(sql)
16    cnn.commit()
17    cur.close()
18 def consultar():
19    cur = cnn.cursor()
20    cur.execute("SELECT *_ FROM data")
21    datos = cur.fetchall()

```

4.2. Implementación de la base de datos MySQL mediante comunicación serial

```
20     cur.close()
21     cnn.close()
22     return datos
23
24 arduino = serial.Serial('COM3', 2000000)
25 cnn = mysql.connector.connect(host="localhost", port='3307'
    , user="root", password="root", database="GestDemDB")
26
27 while True:
28     now = datetime.datetime.now()
29     A = arduino.readline().decode('ascii')
30     B = arduino.readline().decode('ascii')
31     C = arduino.readline().decode('ascii')
32     D = arduino.readline().decode('ascii')
33     E = arduino.readline().decode('ascii')
34     F = arduino.readline().decode('ascii')
35     G = arduino.readline().decode('ascii')
36     H = arduino.readline().decode('ascii')
37     insertar(now,A,B,C,D,E,F,G,H)
38 }
```

- Línea 1: se importan las librerías para generar el conector con mysql, para la lectura de datos seriales con Arduino, y para contar con una referencia de fecha y hora con la cual adjuntar cada envío de datos;
- Líneas 3 a 9: se define la función insertar, que recibe como parámetros de entrada los valores Hora, componente DC de la Corriente, componente DC de la tensión, valores RMS de corriente y tensión, potencia activa, aparente, factor de potencia y factor de distorsión y los inserta en la BD.
- Líneas 10 a 15: se define la función eliminar, que recibe como entrada una fecha, y elimina los datos de la tabla anteriores a esa fecha.
- Líneas 16 a 22: se define la función consultar, encargada de enviar los datos para su lectura.
- Línea 24: Se crea la variable arduino, que lee la salida del monitor serial del Arduino, ubicado en el COM3 y a una baud rate de 2000000.
- Línea 25: Se genera el conector entre Python y SQL. La base de datos en este caso se llama GestDemDB, y se realiza la conexión desde un host local. En caso de tener acceso a un escritorio remoto conectado al Arduino, se podría cambiar "localhost" por la IP del equipo remoto y lograr también la comunicación con la BD.
- Líneas 27 en adelante: se crea un bucle infinito que carga en la variable now la fecha y hora, y en las variables de la A a la H todos los datos que Python

Capítulo 4. Procesamiento de señales medidas

lee en el monitor serial de Arduino. El orden es el que se vio en el punto 2. Luego invoca a la función insertar, con esos parámetros como entrada.

En primer lugar, se debe abrir el entorno Xampp para activar MySQL, y luego se abre el IDE Heidi para entrar a la BD:

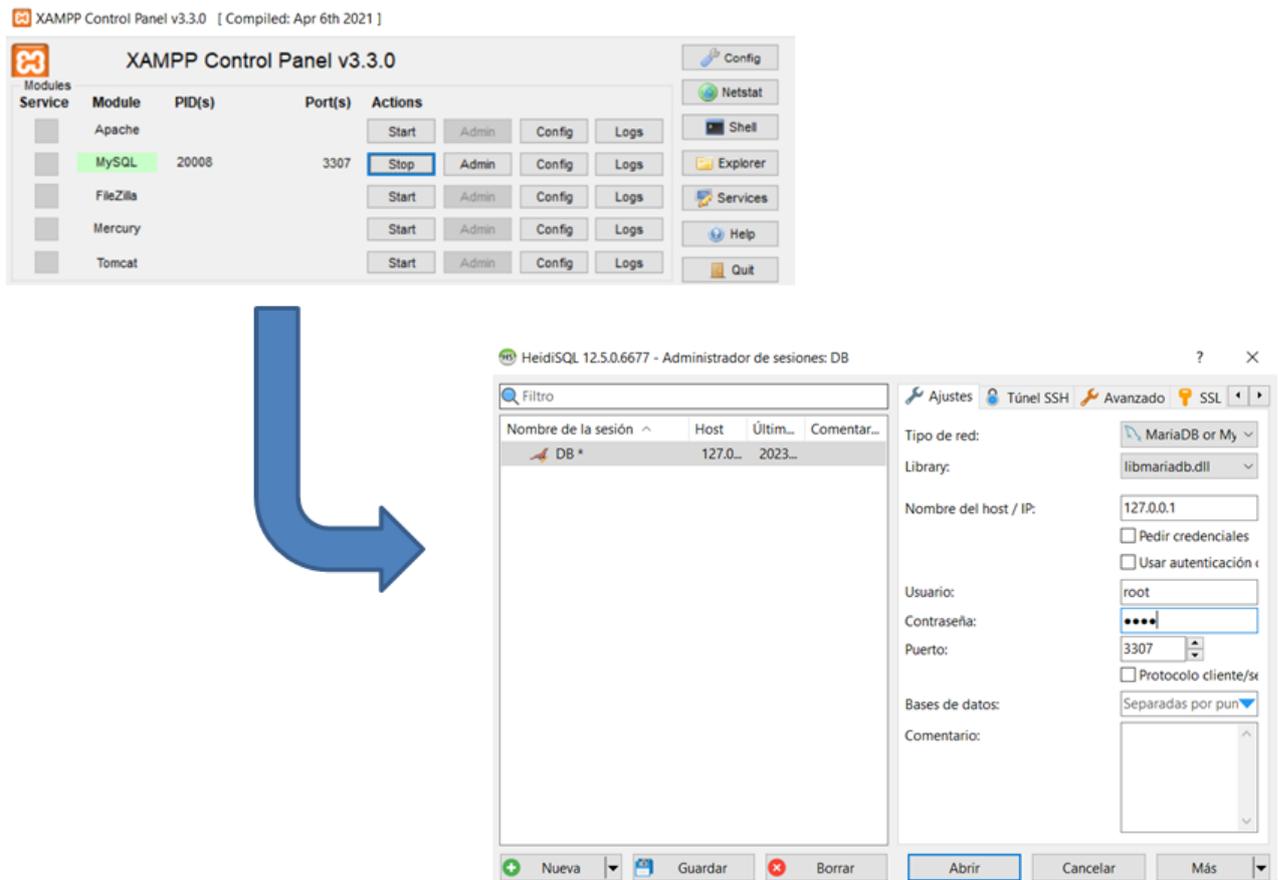


Figura 4.13: Servidor Xampp y Heidi

4.2. Implementación de la base de datos MySQL mediante comunicación serial

Por último, se conecta el Arduino y se ejecuta el código de Python, logrando así el envío de datos a la tabla mostrada en la figura 4.14.

gestdembd.data: 53 filas en total (aproximadamente)

Hora	DCCorriente	DCTension	RMSCorriente	RMSTension	P	S	PHI	FD
2023-07-02 23:23:44.517793	0	0,74	0,089	231,271	3,68	20,61	79,71	4,08
2023-07-02 23:23:45.512515	0	1,7	0,078	233,331	-1,1	18,11	93,47	5,46
2023-07-02 23:23:48.246845	0,01	3,34	0,078	232,561	4,69	18,11	75	3,96
2023-07-02 23:23:50.983023	0,01	4,74	0,102	231,032	3,35	23,59	81,83	7,57
2023-07-02 23:23:53.733756	0,01	2,74	0,055	232,636	3,76	12,88	73,01	3,46
2023-07-02 23:23:56.456537	0,03	1,96	0,087	233,839	2,9	20,34	81,81	4,52
2023-07-02 23:23:59.193321	0,01	0,14	0,107	232,473	3,25	24,77	82,46	3,52
2023-07-02 23:24:01.946283	0	0,52	0,101	231,355	4,51	23,42	78,9	4,79
2023-07-02 23:24:04.668196	0	0,59	0,078	231,439	3,23	18,13	79,75	4,43
2023-07-02 23:24:07.418558	0,21	0,61	6,777	226,541	1.532,04	1.535,19	3,67	0,07
2023-07-02 23:24:10.158864	0,2	2,38	6,708	225,955	1.513,01	1.515,75	3,44	0,07
2023-07-02 23:24:12.929109	0,23	1,06	6,712	226,277	1.516,06	1.518,7	3,38	0,07
2023-07-02 23:24:15.667467	0,25	0,02	6,708	226,347	1.515,79	1.518,23	3,24	0,07
2023-07-02 23:24:18.422812	0,19	1,56	6,682	226,289	1.508,74	1.512	3,76	0,08
2023-07-02 23:24:21.192597	0,2	1,82	6,647	225,809	1.498,68	1.500,92	3,13	0,07
2023-07-02 23:24:23.946212	0,27	0,06	6,646	225,735	1.497,14	1.500,25	3,69	0,07
2023-07-02 23:24:26.690855	0,24	0,43	6,641	226,109	1.498,83	1.501,67	3,52	0,07
2023-07-02 23:24:29.454849	0,2	1,91	6,632	225,757	1.495,03	1.497,19	3,08	0,08
2023-07-02 23:24:32.211540	0,2	1,96	6,595	226,319	1.490,25	1.492,51	3,15	0,08
2023-07-02 23:24:34.966453	0,22	0,5	6,606	226,958	1.497,01	1.499,28	3,15	0,07
2023-07-02 23:24:37.706581	0,28	0,15	6,612	225,938	1.491,55	1.493,95	3,25	0,07
2023-07-02 23:24:40.461794	0,23	0,05	6,593	226,813	1.493,06	1.495,38	3,19	0,07
2023-07-02 23:24:43.232156	0,25	1,19	6,815	230,704	1.560,64	1.572,3	6,98	0,08
2023-07-02 23:24:45.974174	0,28	3,54	6,593	229,458	1.511,08	1.512,82	2,75	0,06

Figura 4.14: Envío de datos del monitor serial a la BD

En este caso, se comenzó con la caja sin carga, y luego se conectó una carga resistiva (radiador) de 1500 W.

4.3. Resumen

Se mostró el modo de trabajo de la placa Arduino en cuanto a la toma de datos y procesamiento, y se la sometió a pruebas con señales generadas por el AD2 con componentes armónicos y defasajes conocidos, y también a una carga eléctrica real de tipo Radiador.

Las pruebas realizadas para la validación de código demostraron que el programa calcula de forma satisfactoria las componentes armónicas para una señal (en el caso del ejemplo con contenido de hasta 1150 Hz, vigésimotercer armónico). Los valores eficaces y la distorsión armónica calculadas tienen errores porcentuales del orden de 0,25 % respecto a los calculados de acuerdo a las definiciones utilizando Matlab. También se lo sometió a señales defasadas 30 grados entre sí. El código detectó de forma correcta los valores pico, las componentes de continua y los valores eficaces con un error absoluto en el entorno del 0,5 %. El defasaje lo calculó de forma satisfactoria, aunque en este caso el error absoluto llegó al entorno del 2 %. Este error es esperable, ya que el código Arduino calcula el defasaje utilizando relaciones que involucran la potencia activa, la potencia aparente, y el factor de distorsión, mientras que en Matlab se utiliza un método más directo (función $angle(z)$ [27]) (4.1.2).

Se calcularon los coeficientes que multiplican a los vectores *corriente* y *tension* con el fin de que los mismos tengan sentido como magnitudes y se impuso una carga resistiva de 1500 W, comprobando que los valores eficaces de tensión y corriente, y valores de potencia y defasaje son los esperados de acuerdo a los datos de la carga y los valores leídos con un multímetro digital. Los valores calculados tienen diferencias mínimas comparado con lo obtenido mediante Matlab (4.1.3 y 4.1.4).

Por último, se implementa una base de datos y se verifica que los valores se actualizan en tiempo real con una diferencia de aproximadamente 4 segundos entre datos (4.2).

Capítulo 5

Conclusión y trabajos a futuro

Retomando los alcances del proyecto:

- Adquisición de señales de tensión y corriente de las CDD.
- Cálculo de características del consumo: tensión y corriente eficaz, potencia activa y reactiva, etc.
- Concentración en un servidor en tiempo real de los datos de las CDD que integren el sistema.

Se resumen los resultados conseguidos:

Se diseñó un equipo capaz de comandar y obtener información sobre distintos tipos de carga (3.1). Se implementaron dos arquitecturas diferentes, logrando el relevamiento de señales de voltaje y corriente de cargas domiciliarias comunes como calentadores de agua, de ambiente y cargadores de dispositivos electrónicos. Se desarrolló código para procesar dicha información en dos plataformas diferentes. El primero (4.1 y A.1) es el código implementado en Arduino, que fue capaz de brindar información precisa sobre: cálculos de valores eficaces, valores pico, defasajes entre señales y contenido armónico y valores de offset. Sin embargo, la frecuencia de muestreo de dicho código no lo hace apto si lo que se desea es monitorear señales como las vistas de naturaleza tipo cargador de celular o PC. Esto se debe a que dichas señales presentan picos agudos de 1 ms aproximadamente de duración, por lo que a la tasa de muestreo del código se consiguen relevar unas 16 muestras. Para monitorear este tipo de señales, se recomienda el uso de la arquitectura en modo abierto, puesto que el AD2 es un dispositivo adecuado para este tipo de señal. El segundo código (4.2) es el implementado en Python, que consiguió enviar los datos transmitidos por Arduino a la BD a una velocidad de aproximadamente 1 dato cada 4 segundos.

Capítulo 5. Conclusión y trabajos a futuro

Circuitos

Se estudió a fondo el funcionamiento del circuito Acondicionador de Señales (3.4) diseñado y desarrollado por docentes de Taller de Fourier. El mismo sirve para adecuar las señales entregadas por los transformadores de medida y se comprobó que se trata de filtros pasa-banda con ganancias que adecuaban las señales para poder visualizarlas de una forma óptima.

Se desarrolló el circuito inversor de tensión (3.3). El mismo invierte la tensión entregada por la fuente DC de una manera estable y con ruido despreciable. Este circuito se implementó para dar alimentación negativa a todos los integrados que forman parte del diseño.

Se desarrolló también un circuito rectificador (3.5) de onda completa que adapta las señales para poder imponerlas como entrada a la placa Arduino. Se verificó que el mismo entrega en su salida las señales correctamente rectificadas y con ruido mínimo.

Trabajos a futuro

Los códigos diseñados, como se comentó al principio, fueron capaces de procesar señales de origen resistivo de manera aceptable, por lo que la caja puede ser utilizada para implementar un nodo que conforme un sistema de control. De esta forma, es posible lograr un sistema de control descentralizado con el objetivo de integrar un sistema de gestión de cargas domiciliarias diferibles. Para continuar con el trabajo y cumplir con los puntos 5 y 6 del alcance original, se hace necesaria la implementación de un código que simule un Sistema Eléctrico y utilice las cajas como nodos de comando.

Apéndice A

Código Arduino

A.1. Placa de desarrollo Arduino: validación de código

En esta sección se muestra el código que se implementó en Arduino:

A.1.1. Declaración de constantes y variables

```
1 #include<math.h>
2
3 const int mpp = 324;           // 325
4 const int n = 1;             // Tamano de la
   ventana
5 const int samples = n*mpp;
6 const int M = 10;           // Cantidad de
   armonicos que son calulados
7
8 const int A = A0;           // pin Entrada se al
   de corriente positiva
9 const int B = A1;           // pin Entrada se al
   corriente invertida
10 const int C = A2;           // pin Entrada se al
   tension positiva
11 const int D = A3;           // pin Entrada se al
   tension invertida
12
13 double tension[samples];    // Vector que
   almacena senal de tension
14 double corriente[samples]; // Vector que
   almacena senal de corriente
15 double pot_inst[samples];   // Vector que
   almacena la potencia instantanea
16 int cont = 0;
```

Apéndice A. Código Arduino

```
17
18 double a[samples];           // Coeficientes a_n
    de Fourier
19 double b[samples];           // Coeficientes b_n
    de Fourier
20 double arm_i[M];             // Se guardan las
    amplitudes de los armonicos
21 double theta_i[M];          // Se guardan los
    angulos de los armonicos
22 double arm_t[M];             // Se guardan las
    amplitudes de los armonicos
23 double theta_t[M];          // Se guardan los
    angulos de los armonicos
24 double pico_i;               // Se almacena valor
    de pico de la corriente
25 double pico_t;               // Se almacena valor
    de pico de la tension
26 double rms_i[M];            // Se almacena valor
    RMS de la corriente
27 double rms_t[M];            // Se almacena valor
    RMS de la corriente
28 double P;                    // Se almacena la
    potencia media activa
29 double S;                    // Se almacena la
    potencia aparente
30 double fdp;                  // Se almacena factor
    de potencia
31 double FD;                   // Se almacena factor
    de distorsion
```

A.1.2. Declaración del Void Setup

La función AdcBooster indica al programa que debe realizar la conversión ADC con una resolución de 12 bits.

```
1 void setup() {
2
3   AdcBooster();
4   Serial.begin(2000000);
5
6 }
```

A.1. Placa de desarrollo Arduino: validación de código

A.1.3. Declaración del Void Loop

El primer bucle es el encargado de realizar la lectura analógica de las entradas A0, A1, A2 y A3 (recordando que la salida del rectificador entrega en A0 y A1 la señal de corriente, y en A2 y A3 la señal de tensión), y además les aplica el factor de conversión de 0.8057, puesto que se trabaja con un conversor de 12 bits ($\frac{3300mV}{2^{12}}$).

```
1 // LECTURA DE LAS ENTRADAS ANALOGICAS //
2
3 for (cont = 0; cont < samples; cont++){
4     corriente[cont] = (analogRead(A) - analogRead(B));
5     tension[cont] = (analogRead(C) - analogRead(D));
6 }
7
8 // FILTRO PASABAJOS PARA ATENUACION DE RUIDO //
9
10 for (cont = 1; cont < samples; cont++){
11     corriente[cont] = (0.06*corriente[cont]+(1-0.06)*
12         corriente[cont-1]);
13     tension[cont] = (0.1*tension[cont]+(0.9)*tension[cont
14         -1]);
15 }
```

Las siguientes líneas se pueden utilizar para para poder observar en el Ploter Serial de Arduino la señal que se está leyendo en tiempo real. Es una manera de tener una idea de si lo que se lee es correcto o no. Pero deben estar comentadas en funcionamiento normal del sistema, para que no llene todos los datos de cada punto relevado en el Monitor Serie.

```
1 /*
2     for (cont = 0; cont < samples; cont++){
3         Serial.println(corriente[cont]);
4     }
5 */
```

Se invoca la función FFT, encargada de realizar una transformada rápida de Fourier. Luego imprime las componentes DC de las señales, e imprime el módulo de los armónicos junto con su defasaje:

```
1 // TRANSFORMADA DE FOURIER //
2
3 FFT(corriente);
4 FFT(tension);
5
6 //Serial.print("Componente DC corriente: ");
```

Apéndice A. Código Arduino

```
7  Serial.println(arm_i[0]/2);
8  //Serial.print("Componente DC tension: ");
9  Serial.println(arm_t[0]/2);
10
11 /*
12  for (int k = 1; k < 3; k++){
13    Serial.print("A_");
14    Serial.print(k);
15    Serial.print(" = ");
16    Serial.print(arm_i[k]/1000,3);
17    Serial.print(", ");
18    Serial.print("Theta_");
19    Serial.print(k);
20    Serial.print(" = ");
21    Serial.println(PI*theta_i[k]/180,4);
22  }
23 */
```

Se invoca la función Valor_Pico, quien entrega en formato de entero el valor pico de cada una de las señales:

```
1  // DETECCION DEL VALOR DE PICO DE LA CORRIENTE //
2
3  Valor_Pico(corriente);
4  //Serial.print("Valor de pico de corriente: ");
5  Serial.println(pico_i);
6
7  Valor_Pico(tension);
8  //Serial.print("Valor de pico de tension: ");
9  Serial.println(pico_t);
```

La función RMS utiliza los armónicos calculados por la FFT y realiza un bucle para calcular los valores RMS de ambas señales:

```
1  // CALCULO DE RMS //
2  RMS(arm_i);
3  RMS(arm_t);
4
5  //Serial.print("Valor RMS de la corriente: ");
6  Serial.println(rms_i[M-1]);
7  //Serial.print("Valor RMS de la tension: ");
8  Serial.println(rms_t[M-1]);
```

Por último, la función potencia calcula la potencia activa, reactiva, aparente, entrega el factor de potencia y el factor de distorsión:

A.1. Placa de desarrollo Arduino: validación de código

```
1 // CALCULO DE POTENCIA //
2
3 potencia();
4
5 //Serial.print("Potencia activa: ");
6 Serial.println(P);
7 //Serial.print("Potencia aparente: ");
8 Serial.println(S);
9 //Serial.print("Defasaje (grados): ");
10 Serial.println(fdp);
11 //Serial.print("Factor distorsion: ");
12 Serial.println(FD);
13 Serial.println("\n");
14
15 }
```

A.1.4. Declaración de las funciones

Función potencia:

```
1 void potencia(){
2
3   for (cont = 0; cont < samples; cont++){
4     pot_inst[cont] = (tension[cont]-arm_t[0]/2)*(corriente[
5       cont]-arm_i[0]/2);
6   }
7   a[0] = pot_inst[0];
8   for (cont = 1; cont < samples; cont++){
9     a[cont] = a[cont-1] + pot_inst[cont];
10  }
11
12  P = a[samples-1]/samples;
13  S = rms_i[M-1]*rms_t[M-1];
14
15  if (P > S){
16    P = S - 0.05;
17  }
18
19  if (P < -S){
20    P = -S + 0.1;
21  }
22 }
```

Apéndice A. Código Arduino

```
23 a[0] = 0;
24 a[1] = 0;
25 for (cont = 2; cont < M; cont++){
26     a[cont] = a[cont-1] + arm_i[cont]*arm_i[cont];
27 }
28
29 FD = sqrt(a[cont-1])/arm_i[1];
30 fdp = P/S;
31 fdp = acos(fdp*sqrt(1+FD*FD))*180/PI-1;
32
33 }
```

Función RMS:

```
1 void RMS(double y[]){
2
3     rms_i[0] = 0;
4     rms_t[0] = 0;
5
6     if (y == arm_i){
7         for(int i = 1; i < M; i++){
8             rms_i[i] = rms_i[i-1] + (y[i]*y[i]);
9         }
10    rms_i[M-1] = sqrt(rms_i[M-1]/2);
11 }
12
13 if (y == arm_t){
14     for(int i = 1; i < M; i++){
15         rms_t[i] = rms_t[i-1] + (y[i]*y[i]);
16     }
17    rms_t[M-1] = sqrt(rms_t[M-1]/2);
18 }
19
20 }
```

Función Valor Pico:

```
1 void Valor_Pico(double y[]){
2
3     double pico = 0;
4     if (y == corriente){
5         for (int i = 0; i < mpp; i++){
6             if ((y[i]-arm_i[0]/2) > pico){
7                 pico = abs(y[i]-arm_i[0]/2);
8             }
9         }
10    }
11 }
```

A.1. Placa de desarrollo Arduino: validación de código

```
9     }
10    pico_i = pico;
11  }
12  if (y == tension){
13    for (int i = 0; i < mpp; i++){
14      if ((y[i]-arm_t[0]/2) > pico){
15        pico = abs(y[i]-arm_t[0]/2);
16      }
17    }
18    pico_t = pico;
19  }
20
21 }
```

Función FFT:

```
1 void FFT(double y[]){
2
3     a[0] = y[0];
4     b[0] = 0;
5
6     for (int k = 0; k < M; k++){
7
8         for (int i = 1; i < samples; i++){
9             a[i] = a[i-1] + y[i]*cos(2*PI*i*k/mpp);
10            b[i] = b[i-1] + y[i]*sin(2*PI*i*k/mpp);
11        }
12
13        if (y==corriente){
14            arm_i[k] = 2*sqrt(a[samples -1]*a[samples -1] + b[
15                samples -1]*b[samples -1])/samples;
16            theta_i[k] = atan(b[samples-1]/a[samples-1]);
17        }
18
19        if (y==tension){
20            arm_t[k] = 2*sqrt(a[samples -1]*a[samples -1] + b[
21                samples -1]*b[samples -1])/samples;
22            theta_t[k] = atan(b[samples-1]/a[samples-1]);
23        }
24    }
```

Función AdcBooster:

Apéndice A. Código Arduino

```
1 void AdcBooster(){
2
3   ADC->CTRLA.bit.ENABLE = 0;           // Disable
      ADC
4   while( ADC->STATUS.bit.SYNCBUSY == 1 ); // Wait
      for synchronization
5   ADC->CTRLB.reg = ADC_CTRLB_PRESCALER_DIV16 | // Divide
      Clock by 16.
6           ADC_CTRLB_RESSEL_12BIT;       // Result
      on 12 bits
7   ADC->AVGCTRL.reg = ADC_AVGCTRL_SAMPLENUM_1 | // 1
      sample
8           ADC_AVGCTRL_ADJRES(0x00ul); //
      Adjusting result by 0
9   ADC->SAMPCTRL.reg = 0x02;             //
      Sampling Time Length = 0
10  ADC->CTRLA.bit.ENABLE = 1;           // Enable
      ADC
11  while( ADC->STATUS.bit.SYNCBUSY == 1 ); // Wait
      for synchronization
12
13 }
```

Apéndice B

Manual de Usuario de la Caja EDM

B.1. Manual de Usuario Caja EDM

La caja de monitoreo de energía implementada en el trabajo es una adaptación de la caja EDM diseñada y fabricada por los docentes de Taller de Fourier. La misma cuenta con entrada de tensión, llave diferencial combinada, un transformador de tensión y uno de corriente, y una salida para conectar cargas. La caja adaptada cuenta con dos modos de funcionamiento distinto: el Modo Abierto y el Modo Cerrado. Ver 3.1 para mayor detalle.

- En el Modo Abierto, es posible imponer señales generadas con un generador de ondas en la entrada del circuito Acondicionador de Señales, y observar su salida, así como la salida del circuito rectificador de onda completa. A su vez, la carga se alimenta directamente de la llave diferencial.
- En el Modo Cerrado, la carga es alimentada mediante un relé comandado por la placa Arduino, y las entradas del circuito Acondicionador de Señal dejan de ser accesibles desde el exterior de la caja, y se conectan eléctricamente con las salidas de los transformadores de medida.

La caja cuenta con terminales de entrada/salida mediante la unión de los cables internos con la regleta amurada en el lateral externo.

Cada terminal se encuentra etiquetada de la siguiente manera:

1. TT1, TT2: terminales de salida del transformador de tensión
2. OUT AV: terminal de salida de tensión del A.S. Para medir la señal, se debe conectar la punta del osciloscopio en este borne, y el borne de tierra se debe conectar al terminal GND, disponible en la regleta inferior. En caso de utilizar el AD2, unir un terminal de tierra también al borne de GND.
3. OUT PGA: terminal de salida de corriente del A.S. Se debe proceder de igual manera con la referencia de GND que el borne anterior.

Apéndice B. Manual de Usuario de la Caja EDM



Figura B.1: Lateral de la caja EDM con las entradas y salidas

4. IN PGA+ , IN PGA-: terminales de entrada de corriente del A.S
5. IN AV+ , IN AV-: terminales de entrada de tensión del A.S
6. TI1, TI2: terminales de salida del transformador de corriente
7. SC AV+ , SC AV-: terminales de salida de lo semi ciclos positivo y negativo de tensión respectivamente. Se debe referenciar con el borne de GND
8. SC PGA+ , SC PGA-: terminales de salida de lo semi ciclos positivo y negativo de corriente respectivamente. Se debe referenciar con el borne de GND
9. GND: referencia de tierra. La regleta cuenta con 3 terminales para poder realizar varias medidas al mismo tiempo.

Los bornes de salida TT1, TT2, OUT AV, OUT PGA, TI1, TI2, SC AV+, SC AV-, SC PGA+, SC PGA- se encuentran siempre disponibles (conectados hacia el exterior), tanto en el modo abierto como en el modo cerrado. Los bornes de entrada IN AV+, IN AV-, IN PGA+, IN PGA- se encuentran disponibles desde el exterior de la caja en el Modo Abierto. Cuando se cambia a modo cerrado, las mismas dejan de ser accesibles desde afuera y son conectados directamente a la salida de los transformadores de medida.

Para cambiar entre los diferentes modos, se encuentra disponible una llave de 3 posiciones en el lateral externo de la caja, como muestra la figura B.2. La misma cumple con dos funciones:

B.1. Manual de Usuario Caja EDM

- Cambiar el modo en que se alimenta la carga, pasando de estar directamente conectada a la salida de la llave diferencial, a conectarse a través del relé comandado por la placa Arduino.
- Cambiar el estado del bloque de 4 relés del modo normal cerrado al normal abierto, para generar la conexión entre los transformadores de medida y la entrada del circuito Acondicionador de Señales.



Figura B.2: Llave de 3 posiciones con modos MA, OFF, MC

El esquemático de la figura B.3 muestra la implementación del bloque de 4 relés y su accionamiento mediante la llave de 3 posiciones.

Apéndice B. Manual de Usuario de la Caja EDM

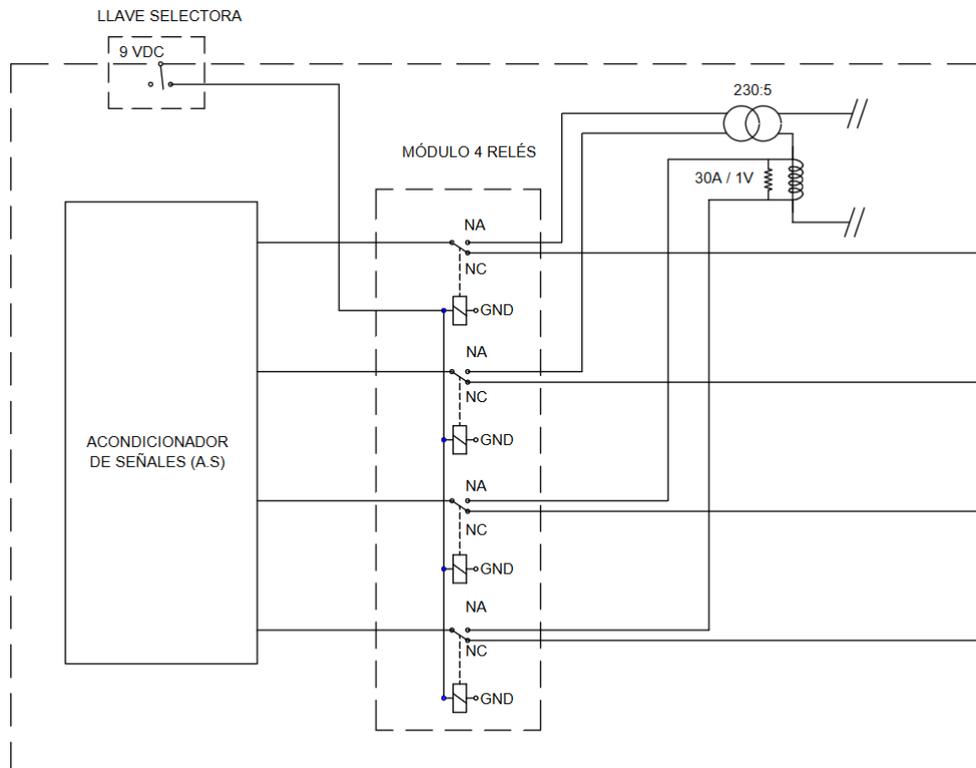


Figura B.3: Esquemático del bloque de 4 relés para comandar conectar los bornes 4 y 5 con la caja exterior o con los bornes 1 y 2

B.1.1. Modo Abierto

Posicionar la llave de 3 posiciones (fig. B.2) en el modo etiquetado por “M.A”. La misma se encarga de alimentar la carga directamente desde la salida de la llave diferencial, y direcciona las entradas del circuito A.S hacia el exterior de la caja.

Para trabajar con el Acondicionador de Señales:

1. Imponer en los terminales IN PGA+, IN PGA-, IN AV+, IN AV- las señales a acondicionar.
2. Observar las salidas con el osciloscopio, colocando una punta en OUT PGA (salida corriente) y OUT AV (salida tensión) y la referencia de tensión en GND. Si se utiliza el AD2, conectar un cable de GND de la misma al GND de la caja, para tener la misma referencia de tierra.

Para observar las salidas de los transformadores de señal:

1. Conectar los cables de osciloscopio del AD2 en los bornes de salida de los transformadores de medida. Se debe conectar los positivos de cada canal a los bornes TT1 y TI1, y los bornes negativos a TT2 y TI2.

Para trabajar con el rectificador de onda completa:

1. Conectar los terminales positivos de los canales del osciloscopio a los bornes SC AV+ y SC AV- (ó SC PGA+ y SC PGA-) y los terminales negativos a GND.
2. Conectar una terminal GND del AD2 al GND de la caja.

B.1.2. Modo Cerrado

Posicionar la llave de 3 posiciones en el modo etiquetado por “M.C” (fig. B.2). En este caso, la carga se conecta mediante el relé, y a su vez se alimenta el circuito que da tensión a una placa con 4 relés (fig. B.3), encargados de cambiar la posición de la conexión de los bornes 4 y 5 hacia los bornes 1 y 2.

El relé es comandado mediante el GND y el +5V de la placa Arduino para poder alimentar la carga. En caso de querer programar encendidos y apagados, se debe cambiar el positivo de la alimentación de relé de +5V hacia una de las salidas digitales de Arduino, y luego imponer en el código que dicha salida esté en estado alto o bajo.

Para observar las señales de salida del Acondicionador de Señales y del circuito rectificador, se procede de igual forma que con la arquitectura anterior.

Apéndice B. Manual de Usuario de la Caja EDM

Para trabajar con la base de datos:

Requisitos previos: descargar el Software HeidiSQL, disponible en la página oficial de forma gratuita.

1. Conectar el cable USB a la placa Arduino como se ve en la figura B.4.
2. Ejecutar el programa de Python “conector.py”.
3. Abrir el administrador de sesiones de BD HeidiSQL y acceder a la base de datos de GestDem. (ver la sección 4.2 para más detalles).
4. Seleccionar “recarga automática”(ver figura B.5) dentro del menú de HeidiSQL para que los datos que se van enviando mediante el conector de Python sean desplegados en tiempo real.



Figura B.4: Conexión USB con Arduino desde el exterior de la caja

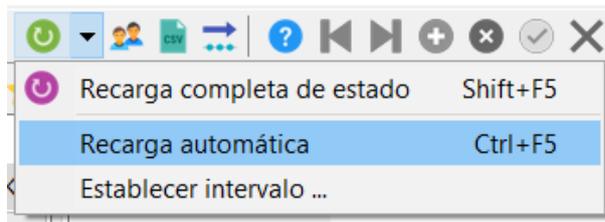


Figura B.5: Seleccionar “Recarga Automática” dentro del menú de Herramientas

Bibliografía

- [1] Fred C. Schweppe. *Frequency Adaptive Power-Energy Re-Scheduler*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass: United States Patent, 1982.
- [2] Hadi Saadat. *Power System Analysis*. Nueva York: McGraw-Hill Series in Electrical y Computer Engineering, 1999.
- [3] IMPO. *Reglamento General del Marco Regulatorio del Sistema Eléctrico Nacional*. Montevideo: UTE, 2002.
- [4] M. H. Albadi y E. F. El-Saadany. *Demand Response in Electricity Markets: An Overview*. Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [5] David G. Infield Joe A. Short y Leon L. Freris. “Stabilization of Grid Frequency Through Dynamic Demand Control”. En: *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 22, NO. 3, AUGUST 2007* (2007).
- [6] S. A. Khaparde R. M. Shereef V. S. K. Murthy Balijepalli Vedanta Pradhan. *Review of Demand Response under Smart Grid Paradigm*. India: 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2011.
- [7] Divulgación Escolar UTE. *Cuaderno de la Energía*. Montevideo: UTE, 2015.
- [8] Juan Korenko, Diego Acuña y Lucía Korenko. *EnerHomGy Gestión de la demanda eléctrica domiciliaria*. Montevideo, Uruguay: Facultad de Ingeniería de la UdelaR, 2016.
- [9] P. Laureiro. *Determinantes del consumo de energía eléctrica del sector residencial en Uruguay*. Montevideo: Instituto de Economía, Facultad de Ciencias Económicas y Administración, Universidad de la República, página 21., 2018.
- [10] Qingxin Shi et al. “Dynamic demand control for system frequency regulation: Concept review, algorithm comparison, and future vision”. En: *Electric Power Systems Research* (2018).
- [11] UTE. *Mapa de la red eléctrica de Trasmisión*. Montevideo: UTE, 2018.

Bibliografía

- [12] Yingmeng Xiang et al. *IoT and Edge Computing Based Direct Load Control for Fast Adaptive Frequency Regulation*. China: State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing, Jiangsu, China, 2019.
- [13] Fernando Berruti. *Presentación de la materia Transporte de Energía Eléctrica: Introducción a los Sistemas de Potencia*. Montevideo: Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, 2020.
- [14] Fernando Berruti. *Presentación de la materia Transporte de Energía Eléctrica: Regulación frecuencia y estabilidad*. Montevideo: Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, 2020.
- [15] Alvaro Gómez et al. *Household Appliances Identification: An integrative workshop for the Electrical Engineering degree*. Montevideo, Uruguay: Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, 2020.
- [16] Pablo Ledesma. *Análisis dinámico y control de sistemas eléctricos*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2020.
- [17] Energía y Minería Ministerio de Industria. *Balance energético 2021*. Montevideo: Dirección Nacional de Energía, 2021.
- [18] UTE. *UTE en cifras, 2021, Gerencia Planificación*. Montevideo: UTE, 2021.
- [19] UTE. *Pliego Tarifario UTE 01/01/2023*. Uruguay: UTE, 2023.
- [20] *Analog Discovery 2TM Reference Manual*.
- [21] *Ejercicios 13 y 14 del Práctico 5 del curso Sistemas Lineales 2 de la Facultad de Ingeniería - UdelaR*.
- [22] *Hoja de Datos de SAMD21* <https://store.arduino.cc/products/arduino-mkr-nb-1500>.
- [23] *Hoja de Datos de SARA-R4* <https://www.u-blox.com/en/product/sara-r4-series>.
- [24] *Hoja de datos del Multímetro SDM3045X*: <https://www.siglenteu.com/resources/documents/digital-multimeter/>.
- [25] *Hoja de datos del transformador de corriente YHDC*.
- [26] *Hoja de datos SICA del interruptor SCPD FUS 63A*.
- [27] <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/angle.html>.
- [28] <https://portal.ute.com.uy/noticias/de-gestionar-los-apagones-la-revolucion-energetica>.
- [29] <https://www.ute.com.uy/modelo-timer-ute>.
- [30] *ICL7660 DATASHEET*.

- [31] *Manual de usuario de Shelly S.*
- [32] *Página de Arduino* <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mkr-nb-1500?selectedStore=us>.
- [33] *Página principal del ADME:* <https://adme.com.uy/index.php>.
- [34] Lidio Braga Pedro Curto-Risso Alvaro Fernandez. *Motores de combustión Interna*. Montevideo, Uruguay: NSTITUTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y PRODUCCIÓN INDUSTRIAL FACULTAD DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA.
- [35] *Presentación de la Unidad Curricular: Taller de Fourier de la Facultad de Ingeniería UdelaR.*
- [36] Gonzalo Casaravilla. *¿Qué es nuestro Ciclo Combinado?* Montevideo, Uruguay: <https://portal.ute.com.uy/noticias/ciclo-combinado-respaldo-menor-cost>, Noviembre 2019.
- [37] URSEA. *Texto Ordenado de Resoluciones de URSEA*. Montevideo, Uruguay: www.ursea.gub.uy, enero 2019.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de tablas

3.1. Componentes que forman la caja EDM	30
3.2. Valores de las resistencias y capacitores	38
3.3. Resumen de ganancias y frecuencias de corte de los circuitos utilizados	54
3.4. Valores eficaces de las señales de salida del PGA y del TI, y cálculo de la corriente.	61
4.1. Valores RMS de Waveforms y calculado por Arduino	69
4.2. Factores de distorsión armónica	69
4.3. Valores calculados por Arduino y por Matlab	71
4.4. Valores de corriente RMS calculada en Matlab	74

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de figuras

1.1. Esquemático general del trabajo	3
1.2. Esquema de montaje de la caja EDM diseñada	4
1.3. Esquemático modo abierto	5
1.4. Esquemático modo cerrado	6
2.1. Esquema básico de un SEP. Fuente [7]	9
2.2. Tablero de control del Despacho Nacional de Cargas [28]	11
2.3. Red nacional de transmisión. Figura realizada a partir del Mapa de la red eléctrica de Transmisión de UTE actualizado al 16/04/2021	12
2.4. Caption for LOF	14
2.5. Demanda por categoría. Gráfica de elaboración propia en base a datos de UTE en Cifras, 2021 [18]	14
2.6. Demanda residencial por tipo de carga. Gráfica de elaboración propia en base a datos de Cuaderno de la Energía de UTE, 2015 [7]	15
2.7. Generación por fuente. Gráfica de elaboración propia en base a datos de generación de ADME [33]	16
2.8. Pares aplicados al eje de un generador síncrono	17
2.9. Sistema de control asociado a una central de generación	19
2.10. Función de transferencia del generador síncrono	20
2.11. Efecto de la frecuencia sobre la demanda	21
2.12. Efecto del coeficiente D en la frecuencia	21
2.13. Caption for LOF	22
2.14. Caption for LOF	24
2.15. Caption for LOF	27
3.1. Caja EDM vista de arriba	31
3.2. Caja EDM diseñada. A: alimentación, llave de protección, TT, TI y circuitos de procesamiento de señal. B: Vista lateral, conexión hacia la carga. C: Vista lateral con llave de 3 posiciones. D: Vista lateral con entradas y salidas de señal y entrada USB	31
3.3. Señales relevadas del TT con el SIGLENT	34
3.4. Circuito inversor de voltaje implementado con el integrado ICL7660	36
3.5. Circuitos implicados en la medición de tensión y corriente de un electrodoméstico	37
3.6. Circuito Acondicionador de Señales	38

Índice de figuras

3.7. Circuito acondicionador de tensión	39
3.8. Diagrama de Bode del filtro acondicionador de tensión	40
3.9. Señales de entrada y salida de una senoide de 1 V de amplitud y 50 Hz	41
3.10. Señales de entrada y salida de una senoide de 1 V de amplitud y 3.8 Hz	41
3.11. Señales de entrada y salida de una senoide de 1 V de amplitud y 1973 Hz	42
3.12. Circuito PGA	43
3.13. Circuito atenuador de DC	44
3.14. Diagrama de Bode del circuito PGA	46
3.15. Señales de entrada y salida de una senoide de 100 mV de amplitud y 50 Hz	46
3.16. Señales de entrada y salida de una senoide de 100 mV de amplitud y 1965 Hz	47
3.17. Señales de entrada continua de offset 1V y salida atenuada del A.S	47
3.18. Ganancia de 0 dB a una frecuencia de 28 kHz	48
3.19. Configuración de diodo ideal [21]	49
3.20. Configuración rectificador de onda completa ideal [21]	49
3.21. Rectificador de onda completa utilizado en el trabajo	50
3.22. Señales de entrada y salida del circuito implementado, simulación LT Spice	51
3.23. Esquema eléctrico del rectificador de onda completa	52
3.24. Montaje del circuito utilizado para la implementación del nodo	53
3.25. Señales relevadas con el AD2 de la salida del TT y del A.S	54
3.26. Señales relevadas con el AD2 de la salida del A.S y la rectificación	55
3.27. Señales relevadas con el AD2 de tensión y corriente de una carga tipo cargador de PC	56
3.28. Señal de salida del PGA rectificada	56
3.29. Señales relevadas con el AD2 de tensión y corriente de una carga tipo cargador de celular. La figura superior son las señales sin acondicionar, y la figura inferior son las acondicionadas	57
3.30. Señal rectificada	57
3.31. Señales relevadas (sin acondicionar) del calventilador en 3 modos: solo frío, calor nivel medio y calor nivel máximo	58
3.32. Señal de salida del PGA rectificada en modo calor máximo	59
3.33. Señales relevadas con el AD2 de tensión y corriente de una carga tipo estufa	59
3.34. Señal de salida del filtro PGA rectificada	60
3.35. Señales relevadas con el AD2 de tensión y corriente de una carga tipo calefón	60
3.36. Señal de salida del filtro PGA rectificada	61
3.37. Señal de potencia instantánea para cargador de PC y de celular	62
4.1. Bucle de la forma de trabajo del código Arduino	64
4.2. Pinout de la placa Arduino MKR NB 1500 [32]	65

4.3. Conexiones entre la placa y Arduino	65
4.4. Cálculo de la frecuencia de muestreo de Arduino	66
4.5. Peso ponderado de cada armónico de la señal de prueba 1	67
4.6. Salida del Monitor Serie de Arduino	68
4.7. Grafica generada y calculada por Arduino	69
4.8. Señales de corriente, voltaje y potencia instantánea	70
4.9. Salida del monitor serial de Arduino	71
4.10. Armónicos calculados por el código Arduino	73
4.11. Tensión y corriente utilizando como entrada los armónicos calculados por Arduino	74
4.12. Diagrama de flujo de la implementación de la BD	76
4.13. Servidor Xampp y Heidi	78
4.14. Envío de datos del monitor serial a la BD	79
B.1. Lateral de la caja EDM con las entradas y salidas	92
B.2. Llave de 3 posiciones con modos MA, OFF, MC	93
B.3. Esquemático del bloque de 4 relés para comandar conectar los bornes 4 y 5 con la caja exterior o con los bornes 1 y 2	94
B.4. Conexión USB con Arduino desde el exterior de la caja	96
B.5. Seleccionar “Recarga Automática” dentro del menú de Herramientas	96

Esta es la última página.
Compilado el jueves 17 agosto, 2023.
<http://iie.fing.edu.uy/>