



**Universidad Nacional de Mar del Plata**  
**Facultad de Ingeniería**

“Sistema de desagregación de cargas monofásicas”

**Informe final**

***Autor:***

*Eloy Caccaviello*

***Directores:***

*Dr. Marcos Funes*  
*Dr. Patricio Donato*

Agosto 2024



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



**Universidad Nacional de Mar del Plata**  
**Facultad de Ingeniería**

“Sistema de desagregación de cargas monofásicas”

**Informe final**

**Autor:** *Eloy Caccaviello*

**Directores:** *Dr. Marcos Funes*  
*Dr. Patricio Donato*

Agosto 2024

Eloy Caccaviello  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Mar del  
Plata

Director: Dr. Marcos Funes

Co-Director: Patricio Donato

## **Agradecimiento**

Al Dr. Marcos Funes y el Dr. Patricio Donato, director y codirector de este proyecto, quienes me ayudaron, brindaron su apoyo incondicional e hicieron posible la realización de este trabajo. A mi familia y pareja que siempre fueron un soporte incondicional a lo largo de toda mi formación como ingeniero.

<b>Contenido</b>	
<b>Agradecimiento</b> .....	2
<b>Contenido</b> .....	3
<b>Resumen</b> .....	5
<b>1. Introducción</b> .....	6
<b>1.1. Relevamiento de dispositivos comerciales</b> .....	9
<b>2 Anteproyecto</b> .....	12
<b>2.1 Objetivos</b> .....	12
<b>2.1.1 Objetivo general</b> .....	12
<b>2.1.2 Objetivos específicos</b> .....	12
<b>2.2 Características de diseño</b> .....	12
<b>3 Proyecto:</b> .....	15
<b>3.1 Diseño individual de los bloques</b> .....	15
<b>3.1.1 Adecuación de tensión y filtro antialiasing:</b> .....	15
<b>3.1.2 Adecuación de corriente y filtro antialiasing:</b> .....	23
<b>3.1.3 ADC-externo:</b> .....	28
<b>3.1.4 Fuentes de tensión:</b> .....	28
<b>3.1.5 ADC, procesado de señales y comunicación:</b> .....	32
<b>3.2 Diseño del PCB</b> .....	36
<b>3.3 Programación del microcontrolador ARM</b> .....	41
<b>3.4 Diseño de la interfaz de visualización y post-procesamiento de datos:</b> .....	42
<b>4 Mediciones y montaje de componentes</b> .....	44
<b>4.1 Montaje y puesta en marcha del hardware</b> .....	44
<b>4.2 Análisis firmware y datos muestreados</b> .....	48
<b>5 Conclusión</b> .....	59
<b>Bibliografía</b> .....	61
<b>Lista de figuras</b> .....	62
<b>Lista de ecuaciones</b> .....	64



## **Resumen**

Este proyecto responde a la demanda del grupo de investigación "Laboratorio de Instrumentación y Control" y consiste en el diseño e implementación de un sistema de adquisición de corriente y tensión. Con los datos adquiridos se pretende realizar una desagregación de cargas monofásicas. El objetivo de la desagregación es el de caracterizar e identificar diferentes cargas conectadas a la red doméstica a través de la dispersión armónica y los patrones de consumo generados. El sistema desarrollado consta de tres canales de adquisición analógica, uno dedicado a la adquisición de la tensión, otro para la adquisición de corriente a través de una pinza amperométrica y un tercero para monitorear la tensión de la batería (pila). Está basado en un microcontrolador ARM SAM4S, utiliza un lector de tarjetas micro SD, un puerto USB tipo B, un puerto SPI para agregar un ADC externo en caso de necesitar más resolución, dos pines para transmisión de datos serie (UART) y está diseñado para incorporar un módulo WI-FI para enviar datos en forma inalámbrica. Adicionalmente se desarrolló una interfaz en lenguaje C y C++ que permite procesar los datos adquiridos y configurar el hardware.



## 1. Introducción

Las sociedades han ido creciendo, tanto en población como necesidades de recursos primarios y energéticos. Con el devenir del tiempo, los avances tecnológicos generaron un quiebre en la forma que se consumían los recursos energéticos y su calidad. El incremento en la cantidad de recursos solicitados, especialmente los referidos a la generación de energía eléctrica, implica un fuerte aumento en la contaminación, dado que la vasta mayoría proviene de fuentes de energía no renovable. La sociedad se enfrenta a los desafíos del cambio climático, producto de los gases de efecto invernadero que provienen en su gran mayoría de las plantas de energía que utilizan combustible fósil (carbón, petróleo, gas). Es por ello que los ingenieros se encuentran en la búsqueda de alternativas que reduzcan las emisiones. De aquí surgen dos grandes planteos:

- La posibilidad de generar energía a partir de fuentes renovables no contaminantes, como es el caso de la energía eólica, que produce energía a partir de la rotación de una hélice impulsada por viento.
- Por otro lado, racionalizar el uso de energía a partir del análisis de los patrones de consumo de los usuarios y la identificación de las cargas. Los datos recolectados llevan a concientizar a los usuarios y a afrontar medidas que hagan más eficiente la distribución y el uso de la energía.

Ambos planteos o líneas de acción se encuentran abarcados por el concepto de Smart Grids (Redes eléctricas inteligentes). Entre otras cosas, estas redes incluyen el uso de Smart Meters (medidores inteligentes), que se conectan a la entrada de los hogares, para en muchos casos medir el consumo en tiempo real, a la vez que nos dan una idea de nuestra rutina en el consumo (patrones).

En la actualidad existen proyectos de investigación y desarrollos comerciales sobre sistemas de adquisición que distinguen entre diferentes artefactos (electrodomésticos) del hogar. Esta acción se denomina desagregación de cargas y sirve para conocer no solo la magnitud del consumo sino también la forma en que se hace ese consumo. Los dispositivos que realizan esta desagregación deben realizar un monitoreo no invasivo de cargas (NILM, Non-Intrusive Load monitoring) sobre la instalación de los clientes. La figura 1 muestra un ejemplo de desagregación de cargas sobre una instalación domiciliaria.

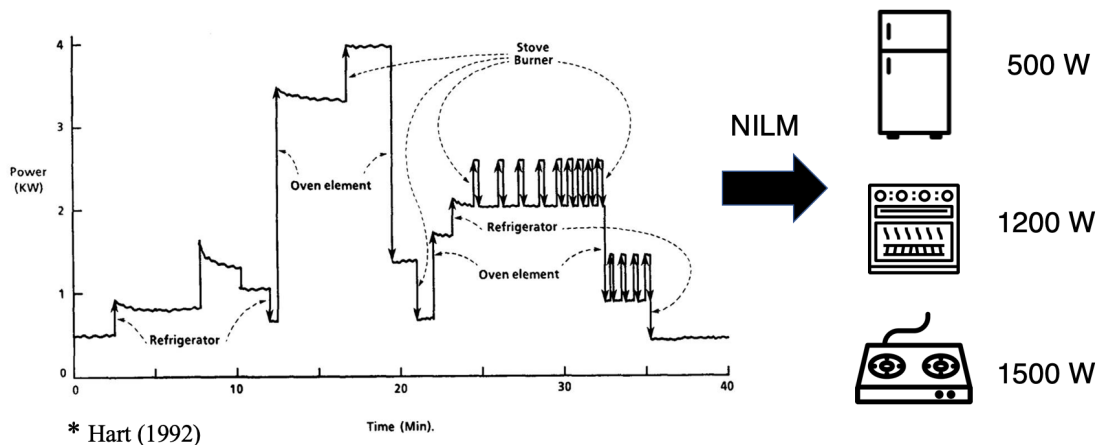


Figura 1 Valor medio de potencia consumida por diferentes electrodomésticos (Hart 1992)

Los dispositivos de desagregación deben contar con su propio hardware para la medida de tensión y corriente en la entrada de energía eléctrica al hogar. Una parte del procesamiento de los datos se realiza de forma local y la otra en la nube. En muchos casos el pre-procesamiento local se realiza para subir a la nube lo necesario y no hacer un uso excesivo del ancho de banda de la conexión a internet.

Respecto del procesamiento, una clasificación básica de los algoritmos NILM es la que los organiza en algoritmos basados en eventos y sin eventos. Los algoritmos basados en eventos funcionan a partir de la detección y clasificación de estados transitorios (eventos de encendido y apagado o cambios de estado de los dispositivos), mientras que los algoritmos que no se basan en eventos operan mediante la estimación del estado de un conjunto de artefactos en cada instante a partir de las mediciones anteriores. Otra clasificación, más útil al momento de discriminar la capacidad de desagregación y la necesidad de datos para ello, es la que se basa en la frecuencia de muestreo; por ejemplo, si se usan datos de consumo obtenidos a través de un medidor inteligente hay que considerar una tasa de muestreo menor a 1 Hz. Esto limita la capacidad de desagregación de algunos dispositivos, especialmente los de menor consumo, pero simplifica notoriamente la tarea de adquisición de datos. En caso de necesitar una mayor cantidad de muestras, por ejemplo, tasas de muestreo del orden de algunos kilohertzios, no alcanza con un medidor inteligente y es necesario instalar hardware especializado para tal fin, lo cual sin duda eleva los costos, aunque puede ayudar en la identificación de mayor cantidad de dispositivos.

Hay un compromiso entre el nivel de intrusión (no es lo mismo un medidor puntual en la acometida de la red eléctrica que varios equipos de monitoreo distribuidos en la casa/comercio) y la capacidad de desagregación, el cual está fuertemente relacionado con la frecuencia de muestreo.

En la figura 2, se muestra un diagrama en bloques donde se discriminan los diferentes métodos de desagregación de energía en función de la frecuencia de muestreo. Hacia la izquierda se hallan los algoritmos con las tasas de adquisición más bajas, del orden de los segundos (o incluso minutos), que es la que se puede obtener normalmente con cualquier tipo de medidor inteligente. Este tipo de algoritmos se basa en el análisis de la potencia activa consumida y/o las variaciones (deltas) de consumo entre dos estados estacionarios diferentes. Solo sirven para hacer una desagregación gruesa, que identifique los dispositivos de mayor consumo. Este tipo de algoritmos suele emplear criterios de optimización combinatoria, de forma tal que, conociendo los consumos individuales de los distintos elementos presentes en la instalación, se estima el valor medido eligiendo la combinación más plausible.

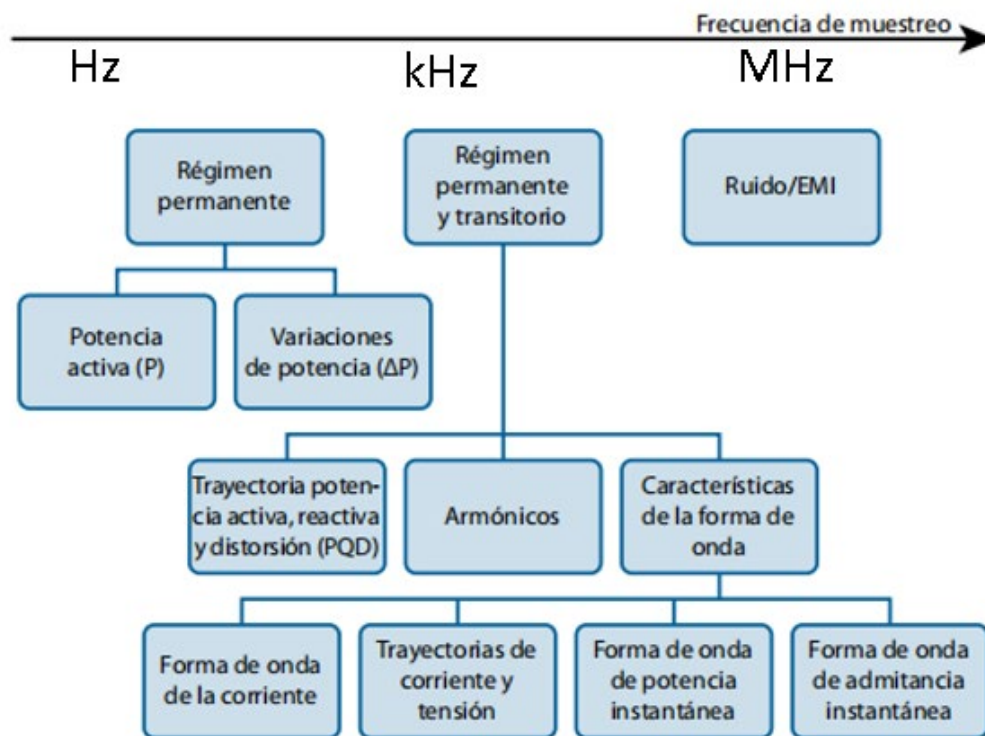


Figura 2 Clasificación básica de algoritmos NILM basada en la frecuencia de muestreo

Una frecuencia de muestreo mayor, del orden de 1 a 20 Hz, permite extraer información no solo del régimen permanente sino también de los transitorios de encendido y apagado de los artefactos conectados a la red. Dentro de este grupo de algoritmos se pueden hallar algunos basados en el análisis de trayectorias de potencia activa, reactiva y de distorsión (PQD), medición de contenido armónico y análisis de forma de onda en general. La medición de contenido armónico es

muy útil para identificar y caracterizar dispositivos no lineales. En la actualidad, la gran mayoría de los dispositivos electrónicos que se encuentran en el hogar o un comercio cuenta con fuentes de alimentación de tipo conmutada, es decir, no lineales, por lo que la medición de contenido armónico es una herramienta muy potente para estos casos. Por su parte, el análisis de forma de onda, en líneas generales, más allá del caso de la distorsión armónica pura, provee de información útil para la identificación de dispositivos individuales. Si se emplean tasas de muestreo mucho más elevadas, del orden de varias decenas de kilohertzios, la capacidad de desagregación de consumos es mucho mayor, pudiéndose incluir cargas eléctricas de consumos muy bajos, que suelen quedar enmascaradas con frecuencias de muestreo menores.

Los algoritmos que operan a esas frecuencias pueden medir la interferencia electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés) producida por las fuentes conmutadas de cada dispositivo. A mayor cantidad de información (muestras) disponible, mayor es la capacidad de identificar los dispositivos responsables del consumo. Según reportes de diferentes autores, este tipo de algoritmos puede desagregar más del 99% del consumo, permitiendo incluso discriminar entre artefactos iguales situados en diferentes habitaciones de una casa o comercio.

### 1.1. Relevamiento de dispositivos comerciales

Se realizó un relevamiento de dispositivos comerciales o hardware existente en el mercado con el fin de identificar características importantes y funcionalidades que se deberían considerar en el diseño para poder realizar la desagregación de cargas.

- **Mirubee Mirubox:** viene en presentaciones para instalaciones monofásicas y trifásicas, este hardware permite relevar datos y conocer la potencia activa, reactiva y la tensión cada 1 segundo ( $f_s=1\text{Hz}$ ). Trabaja con pinzas para medir la corriente en el orden de los 60 a 100 A y cuenta con conexión vía WI-FI. Un dato importante a resaltar es la cantidad de datos que debe enviar a la nube, unas 86400 muestras que corresponden a una muestra por segundo a lo largo de un día. Al tener una frecuencia de muestreo baja no se tiene información de lo que sucede en cada periodo de señal, esto implica más procesamiento para saber que dispositivo se conecta o desconecta de la red. Los datos no son en tiempo real, dado que la desagregación se realiza por la noche, pudiendo ver la información del día anterior. Emplea algoritmos inteligentes que deben ser entrenados para poder identificar las cargas.

- **Informetis + Tepco** son 2 empresas japonesas que trabajan en conjunto, para la instalación (Tepco) y el desarrollo del software (informetis). Desde la aplicación se pueden consultar la desagregación de energía de los electrodomésticos más usados y el histórico de los datos de consumo a nivel semanal y diario. También dispone de un chat y se pueden enviar mensajes de voz al domicilio, donde se supone que viven las personas que se quieren monitorizar a partir de su uso de las distintas cargas eléctricas. Las mediciones las realiza al sensar la corriente y a través de un algoritmo de Inteligencia artificial logra realizar la desagregación de energía. Una de las funcionalidades de este dispositivo es que permite monitorear en forma no invasiva la actividad de personas que viven solas (por ejemplo, personas mayores). Especificaciones técnicas: un dato por segundo ( $f_s = 1\text{Hz}$ ) y envío de datos cada 5 minutos a la red, medidas 17.7mm x 81.0mm x 66.6mm / 60g.
- **Howz:** empresa tecnológica que desarrolló un kit de monitoreo del hogar, este incluye un enchufe inteligente, un sensor de presencia, un sensor para la puerta de entrada y un home hub. Este dispositivo no cuenta con cámaras para mantener la privacidad de la persona, pero a través de un algoritmo, este predice el comportamiento y la rutina del usuario, el objetivo de esto es que personas mayores tengan más independencia y ante alguna urgencia (la cual determina el algoritmo cuando se realiza un cambio en la rutina) se le puede avisar a algún familiar o cuidador, a la vez que permite conocer el consumo del hogar y ayuda a reducir costos o ser más efectivos en cuanto al consumo. El fabricante no aporta información sobre especificaciones técnicas.
- **Peacefair:** ofrece un módulo que mide tensión y corriente a una frecuencia de 1Hz, envía datos a través de una interfaz TTL (RS485). Este módulo posee la posibilidad de almacenar los datos en caso se caiga la comunicación. Trabaja con los siguientes rangos, tensión: de 80V a 260V (0.1V resolución), corriente: De 0 a 100A y de 0 a 10A según el modelo (0.02A y 0.01A de resolución respectivamente), Potencia: De 0 kW a 22 kW(0.4W). Energía: De 0 kWh a 9999 kWh(1Wh), frecuencia 45Hz a 65Hz (0.1 Hz).
- **Tarjeta de adquisición “EV-ADE9153ASHIELDZ”:** tarjeta dedicada para la adquisición y medición del consumo la red eléctrica, trabaja a una frecuencia de muestreo de 4kHz, cuenta con una resistencia de shunt de 1m $\Omega$  y permite medir corrientes de hasta 10A rms, la tensión se mide a través de un divisor resistivo, permite leer valores de hasta 240 Vrms, todas estas medidas las realiza a través de 3 ADC de 24 bits cada uno. Implementa un filtro antialiasing de 10 kHz y aplica filtros digitales a la vez que incorpora filtros que eliminan los campos de radiofrecuencia según la

norma IEC 61000-4-3 para aplicaciones de medición de energía 30V/m desde los 80 MHz hasta los 10 GHz.

- **Smappee** utilizan algoritmos de desagregación para reportar la potencia consumida por cada electrodoméstico. El producto cuenta con conexión WI-FI y es interactivo con el usuario para mejorar la precisión de las predicciones. Incluye una aplicación que permite generar eventos por activación, no detectando equipos con consumos menores a 300 W. Los métodos para mejorar las predicciones incluyen cuestionarios en los que se indica cual es el equipo que se utilizó en cada momento y la posibilidad de registrar ciclos de encendido-apagado de un mismo equipo varias veces para facilitar su identificación. No aporta información sobre las características técnicas.

## **2 Anteproyecto**

### **2.1 Objetivos**

#### **2.1.1 Objetivo general**

Diseñar e implementar hardware, firmware y software necesario para una plataforma de medición de la red eléctrica monofásica, cuya función principal es analizar los parámetros que caracterizan a las distintas cargas conectadas a partir de datos de consumo de potencia y armónicos.

#### **2.1.2 Objetivos específicos**

- Realizar un estudio del equipo a implementar.
- Analizar e interpretar las variables a utilizar.
- Diseñar un esquema para la subdivisión del problema.
- Diseñar la electrónica y el software necesarios con componentes y recursos disponibles.
- Realizar el montaje y calibración del equipo.

### **2.2 Características de diseño**

El objetivo de este proyecto es diseñar un sistema de medición de tensión y corriente para redes eléctricas monofásicas. A fin de poder hacer un completo análisis de las características de diferentes cargas eléctricas, se mide la tensión y corriente de línea para poder calcular las distintas potencias involucradas, determinar cuándo se conecta un electrodoméstico y el comportamiento en el espectro que genera. El sistema debe ser capaz de calcular hasta el armónico cuarenta de la frecuencia de línea y cada una de las potencias, a fin de caracterizar la red eléctrica en todo momento y poder discernir entre distintas cargas.

Los datos adquiridos del sistema a través de los ADC se envían en tiempo real a la PC, para una posterior evaluación y por otro lado conocer en todo momento la forma de la onda de entrada. Para ello se desarrollará un osciloscopio virtual que permita observar las señales adquiridas y ver su evolución en el tiempo, que sirva a futuro para utilizar diferentes algoritmos de análisis.

En función del objetivo propuesto se proponen las siguientes especificaciones para la plataforma de medición:

- Conversor ADC de 12 bits de 2 canales, frecuencia de muestreo mayor a 250 kSPS: Al no ser canales simultáneos se pueden presentar mayores errores en la fase, cambios de amplitud y desviación de la señal senoidal ideal.

- Circuito de adecuación de señales: Debe poseer un filtro antialiasing y la capacidad de llevar los niveles de la red eléctrica (400 V), a valores que no dañen los componentes y puedan ser medidos. En el caso de sensar la corriente se utiliza una pinza amperométrica Fluke i400 (relación de conversión 1mA/A) suministrada por el demandante.
- Almacenar datos en tarjeta SD: Se requiere la posibilidad de guardar datos de las métricas más relevantes de la red eléctrica, como así también de registrar eventos.
- Interfaz USB: Para permitir depurar el código y los datos que provee el equipo.
- Interfaz SPI: Para una posible comunicación con un ADC externo de mayor resolución (16 bits), en caso de requerir mayor precisión en amplitud y discernir cambios de potencia menores.
- Interfaz serie: Para implementar diferentes módulos de comunicación, en este caso un módulo WI-FI, para enviar datos inalámbricamente.

En función de las características antes listadas se puede subdividir el diseño en 6 bloques principales (ver figura 3), los nombres y la tarea asignada a cada uno de ellos se encuentra en la siguiente lista. Se muestra un diagrama donde se puede ver cómo interactúan entre sí.

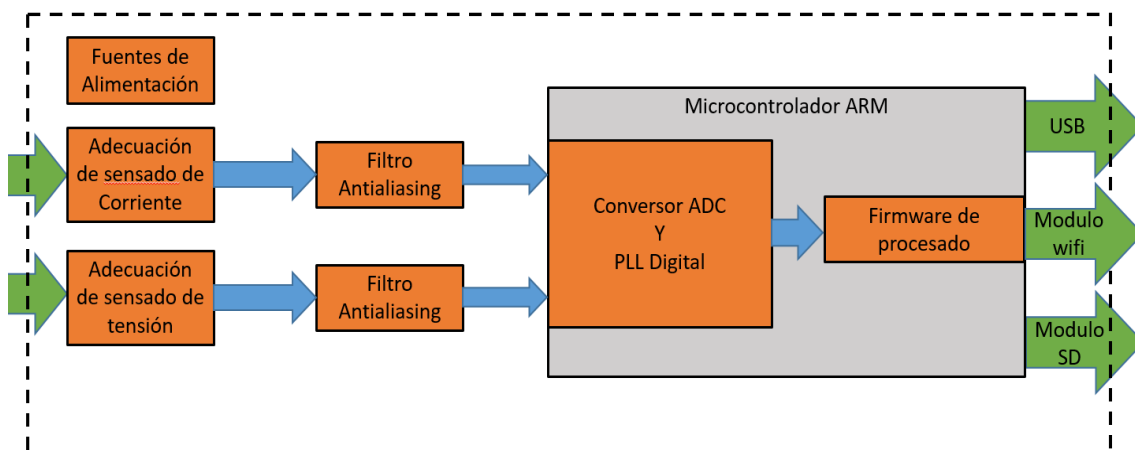


Figura 3 Diagrama en bloques proyecto



- Adecuación de sensado de tensión: se encarga de acondicionar la señal de tensión de la red eléctrica mediante amplificadores, llevando de 800Vpp a trabajar en el rango de 0 a 3V.
- Adecuación de sensado de corriente: se encarga de adecuar la señal proveniente de la pinza amperométrica de  $\pm 0.5V$  a trabajar en el rango de 0 a 3V.
- Filtros antialiasing: El bloque consiste en un filtro antialiasing con calibración de ganancia y de offset, que adecua los niveles de la señal para su posterior procesado en el ADC.
- Microcontrolador ARM y periféricos: El bloque administra todos los periféricos (puerto USB, tarjeta SD, comunicación UART y SPI), adquiere las señales analógicas y las procesa para su posterior transmisión.
- Fuentes de alimentación: Las fuentes de alimentación principales son cuatro: 3.3V, 5V, -5V y 12V; y se encargan de suministrar energía a cada bloque. La línea de 3.3V alimenta toda la parte digital, la línea de 5V alimenta los amplificadores y los reguladores de 3.3V, la línea de +12V proviene de una fuente switching que convierte los 220V de la línea en 12V y alimenta los reguladores de 5V, la fuente de -5V alimenta el circuito externo de la pinza amperométrica.

### **3 Proyecto:**

El proyecto requirió detallar cada una de las etapas minuciosamente, con el fin de seleccionar los componentes adecuados y las especificaciones mínimas que debía cubrir cada uno. Para el desarrollo del prototipo, se planteó el uso de los adquirentes del microcontrolador ARM en una primera etapa, por tener 12 bits de resolución, la posibilidad de implementar hasta 16 canales de adquisición, y tener un rango dinámico de 0 a 3V. Se consideró adicionalmente incorporar al diseño un ADC externo para poder mejorar las prestaciones en caso de ser requerido. El ADC externo seleccionado tiene una frecuencia de muestreo máxima de 1MHz, que es más que suficiente para el proyecto. En función de los valores máximos de entrada a los adquirentes, se diseñan los filtros y adecuadores de señal. Luego se procede a diseñar las fuentes de alimentación, previo estudio de los diferentes valores de tensión y corriente necesarios para cada una de las etapas.

Otro concepto importante a tener en cuenta al momento de diseñar y elegir los componentes fue el tamaño reducido que debía tener la placa lo cual condicionó el tamaño de los componentes a utilizar. Además, se adoptó un PCB de dos capas por el bajo volumen de componentes a utilizar. En cuanto a requerimiento para los componentes, se optó porque sean de montaje superficial (SMD) y cuyo tamaño más chico sea 0805 que da la posibilidad de ser soldados con un soldador convencional, y sin requerir de un banco de soldadura sofisticado.

A continuación, se describe de manera detallada el diseño de cada sección del circuito.

#### **3.1 Diseño individual de los bloques**

##### **3.1.1 Adecuación de tensión y filtro antialiasing:**

En función de las características de las señales de entrada, se optó por un filtro activo Butterworth de tercer orden, con una frecuencia de corte de 3.4kHz. Previo a su implementación en hardware se utilizó un software de simulación para calcular los parámetros y observar el comportamiento del circuito. Se elige utilizar un integrado TLV2472 que consta de 2 amplificadores en un mismo bloque de silicio, cada amplificador presenta fase lineal y amplitud constante en el espectro de aplicación del dispositivo. Además, permite separar en espacio las diferentes señales a evaluar y, al ser un mismo chip, las variaciones por temperatura o dispersiones que pueda tener afectarán de igual manera a la etapa completa.

Previo a la selección de valores de componentes del filtro, se realizó un estudio del circuito para calcular las transferencias y poder deducir las ecuaciones que gobiernan el sistema. A continuación, se detallan las ecuaciones del sistema, sus distintas transferencias y los diagramas al partir del circuito resultante (ver figura 4) que se muestra a continuación.

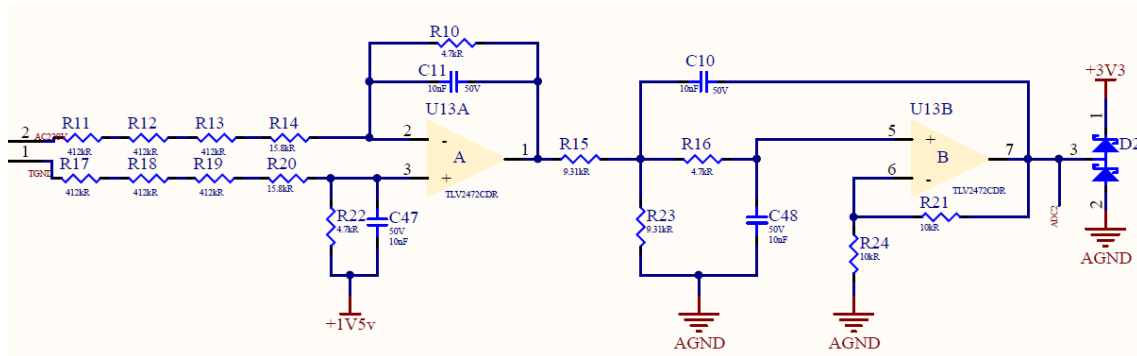


Figura 4 Filtro antialiasing y adecuador de señales de tensión

Al considerar trabajar con componentes SMD de tamaño 0805, se opta por utilizar un arreglo de cuatro resistencias en serie en vez de una sola, por las prestaciones de tensión máxima que soportan las resistencias SMD 0805, que rondan los 200V de tensión máxima.

Dichas resistencias de la entrada actúan como divisor resistivo, permitiendo trabajar con señales de hasta 400V pico. Se adoptó una guarda de seguridad del 30% del valor ideal, que surge de considerar transitorios y variaciones de la red, y de esta forma no trabajar al límite, que podría romper o deteriorar el dispositivo. Por otro lado, se utiliza una referencia de 1.5V dado que el ADC trabaja en el rango de 0 a 3V. Se alimenta el circuito integrado a través de una fuente de 5V y a la salida se coloca un conjunto de diodos zener que actúan en inversa como protección ante niveles superiores que dañen el microcontrolador.

Considerando que  $Z_{in} \rightarrow \infty$ ,  $Z_{out} \rightarrow 0$ , el circuito de la figura 4 se puede analizar como dos subcircuitos en cascada. En la figura 5 se puede ver el circuito esquemático del filtro con los valores de componentes correspondientes. A continuación, se describen las ecuaciones de diseño obtenidas a partir del análisis de la función de transferencia respecto de cada una de las entradas.

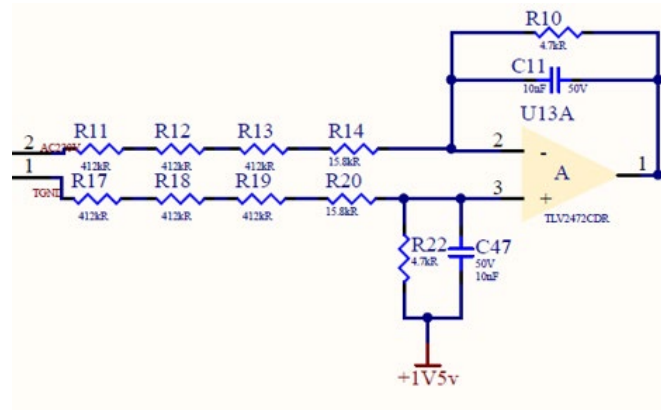


Figura 5 Primera etapa filtro y adecuador de tensión

En la figura 6 se observa la cadena de avance correspondiente a la entrada negativa, cuya transferencia en ecuaciones es:

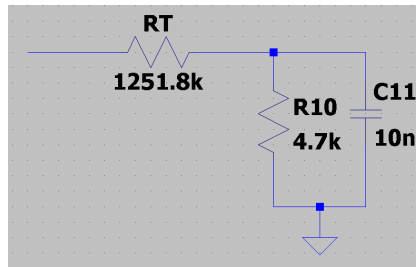


Figura 6 Análisis cadena de avance rama negativa ( $G^-$ )

$$G^- = \frac{R_{10}}{R_T + R_{10} + R_{10} * R_T * C_{11} * S} = \frac{\frac{R_{10}}{R_T + R_{10}}}{1 + \frac{R_{10} * R_T}{R_T + R_{10}} * C_{11} * S}$$

Ecuación 1 Transferencia cadena de avance rama negativa

Aplicando los valores comerciales elegidos, da como resultado:

$$G^- = \frac{0.00374}{1 + \frac{S}{21356}}$$

Ecuación 2 Transferencia cadena de avance rama negativa obtenida

En la figura 7 se observa la realimentación negativa del sistema, cuya transferencia en ecuaciones es:

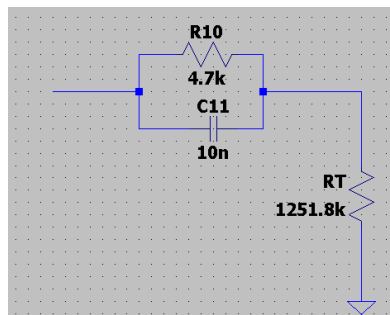


Figura 7 Análisis realimentación negativa ( $H^-$ )

$$H^- = \frac{R_T + R_T * R_{10} * C_{11} * S}{R_T + R_{10} + R_{10} * R_T * C_{11} * S} = \frac{R_T}{R_T + R_{10}} * \frac{1 + R_{10} * C_{11} * S}{1 + \frac{R_{10} * R_T}{R_T + R_{10}} * C_{11} * S}$$

Ecuación 3 Transferencia realimentación negativa

Aplicando los valores comerciales elegidos, da como resultado:

$$H^- = 0.9963 \frac{1 + \frac{S}{21276}}{1 + \frac{S}{21356}}$$

Ecuación 4 Transferencia realimentación negativa obtenida

En la figura 8 se puede observar la ganancia de la cadena de avance correspondiente a la entrada positiva, que tiene la misma transferencia que la calculada en la ecuación dos.

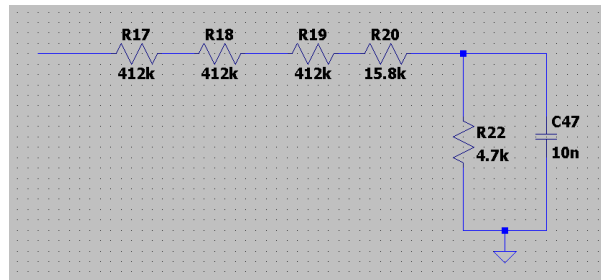


Figura 8 Ganancia cadena avance rama positiva ( $G_1^+$ )

En la figura 9 se puede observar la ganancia de la cadena de avance de la rama positiva para la señal continua de 1.5V. Como se trata de una señal de continua, la transferencia queda como  $\frac{R_T}{R_T + R_{22}}$ . Como  $R_T \gg R_{22}$  esta equivale a 1.

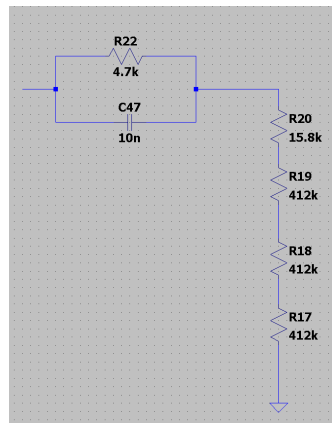


Figura 9 Ganancia cadena avance rama positiva, señal de continua ( $G_2^+$ )

Por lo mencionado anteriormente, se da el caso que  $G^- = G_1^+$  y que  $H^- = G_2^+$ . Como  $G_1^+ = G^-$  la señal alterna proveniente de la tensión de línea tiene igual aporte a la salida del sistema en cada una de sus ramas, a continuación se detallan las ecuaciones de la ganancia del sistema de la primera etapa:

$$A_v = \frac{G^-}{H^-} = \frac{G^-}{H^-} = \frac{\frac{\frac{R_{10}}{R_T + R_{10}}}{1 + \frac{R_{10} * R_T}{R_T + R_{10}} * C_{11} * S}}{\frac{R_T}{R_T + R_{10}} * \frac{1 + R_{10} * C_{11} * S}{1 + \frac{R_{10} * R_T}{R_T + R_{10}} * C_{11} * S}} = \frac{R_{10}}{R_T} * \frac{1}{1 + R_{10} * C_{11} * S}$$

Ecuación 5 Ganancia del primer Amplificador operacional

Aplicando los valores comerciales elegidos, da como resultado:

$$A_v = \frac{0.00375}{1 + \frac{S}{21276.6}}$$

Ecuación 6 Ganancia del primer Amplificador operacional obtenida

Ahora la ganancia para la señal de continua es:

$$A_v = \frac{G^-}{G_2^+} = 1$$

Ecuación 7 Ganancia del primer Amplificador operacional señal de referencia

Dicho resultado indica que el valor de continua agregado al sistema tiene ganancia unitaria, como era de esperar. Dicho valor de continua eleva la señal a un punto intermedio, en este caso 1.5V que permite obtener una excursión simétrica en función del rango de trabajo del ADC que es de 0 a 3V.

A continuación, se detalla la segunda parte del circuito, que aporta los 2 polos restantes que se requieren para obtener el filtro de tercer orden deseado.

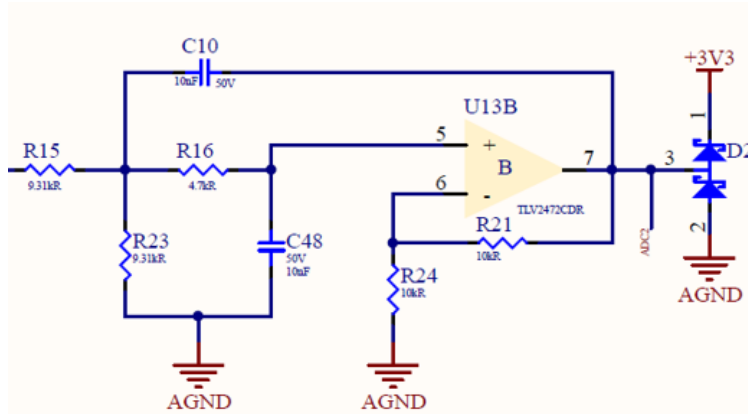


Figura 10 Segunda etapa filtro y adecuador de tensión

En el diagrama se puede observar que el sistema posee 2 realimentaciones, una positiva y una negativa, la realimentación negativa se detalla a continuación:

$$H^- = \frac{R_{24}}{R_{21} + R_{24}}$$

Ecuación 8 Transferencia realimentación negativa

Aplicando los valores comerciales elegidos, da como resultado:

$$H^- = \frac{1}{2}$$

Ecuación 9 Transferencia realimentación negativa obtenida

Por su parte el circuito de la realimentación positiva, se muestra en la figura 11:

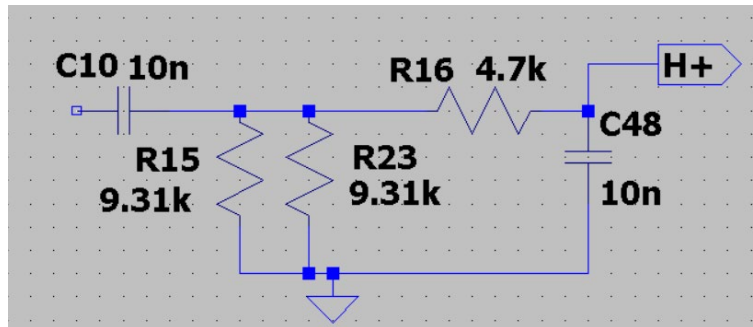


Figura 11 Análisis realimentación positiva ( $H^+$ )

Donde para simplicidad se calcula una resistencia paralelo, que es próxima a valor de  $R_{16}$  como se puede ver a continuación.

$$R_p = \frac{R_{15} * R_{23}}{R_{15} + R_{23}} = 4655 \cong R_{16}$$

Por otro lado se considera para el diseño que  $C_{10}$  debe ser igual a  $C_{48}$ . En función de las consideraciones la función de transferencia correspondiente al circuito de la figura 11 es:

$$H^+ = \frac{R_p * C_{10} * S}{1 + 3 * R_{16} * C_{48} * S + (R_{16} * C_{10} * S)^2}$$

*Ecuación 10 Transferencia realimentación positiva*

Aplicando los valores comerciales elegidos, da como resultado:

$$H^+ = \frac{S}{\frac{21277}{\left(1 + \frac{S}{8127}\right) * \left(1 + \frac{S}{55703}\right)}}$$

*Ecuación 11 Transferencia realimentación positiva obtenida*

Al poseer el sistema 2 realimentaciones, se debe realizar la suma de ambas, para calcular la realimentación total del circuito.

$$H_{total} = H^- - H^+$$

*Ecuación 12 Realimentación total*

$$H_{total} = \frac{1 + R_{16} * C_{48} * S + (R_{16} * C_{10} * S)^2}{1 + 3 * R_{16} * C_{48} * S + (R_{16} * C_{10} * S)^2} * \frac{1}{2}$$

$$H_{total} = \frac{\left(1 + \frac{S}{10638 + j18426}\right) * \left(1 + \frac{S}{-18638 - j18426}\right)}{\left(1 + \frac{S}{8127}\right) * \left(1 + \frac{S}{55703}\right)} * \frac{1}{2}$$

En la figura 12 se muestra el circuito de la cadena de avance:

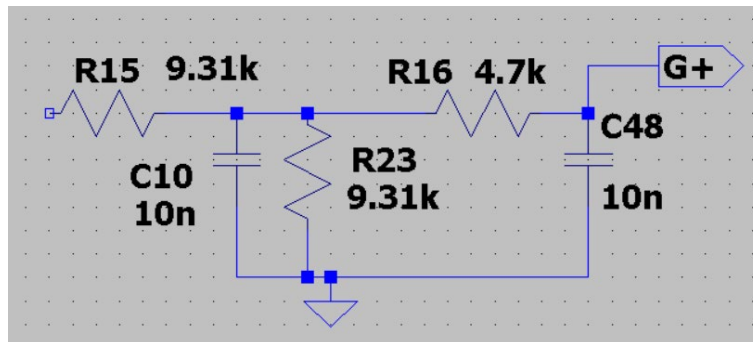


Figura 12 Análisis Cadena de avance positiva

La ecuación que representa al circuito es:

$$G^+ = \frac{1}{2 * (1 + (R_{16} + R_{23}) * C_{10} * S + (R_{16} * C_{10} * S)^2)}$$

$$G^+ = \frac{1}{2 * \left(1 + \frac{S}{8127}\right) * \left(1 + \frac{S}{55703}\right)}$$

Ecuación 13 Transferencia cadena de avance positiva

En función de lo calculado anteriormente, se obtiene la ganancia del bloque como:

$$A_v = \frac{G^+}{H_{total}} = \frac{1}{\frac{(1 + (R_{16} + R_{23}) * C_{10} * S + (R_{16} * C_{10} * S)^2) * \frac{1}{2}}{\frac{1 + R_{16} * C_{48} * S + (R_{16} * C_{10} * S)^2}{1 + 3 * R_{16} * C_{48} * S + (R_{16} * C_{10} * S)^2} * \frac{1}{2}}}$$

Ecuación 14 Ganancia segundo amplificador operacional

Aplicando los valores comerciales elegidos, da como resultado:



$$A_v = \frac{G^+}{H_{total}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{S}{10638 + j18426}\right) * \left(1 + \frac{S}{-18638 - j18426}\right)}$$

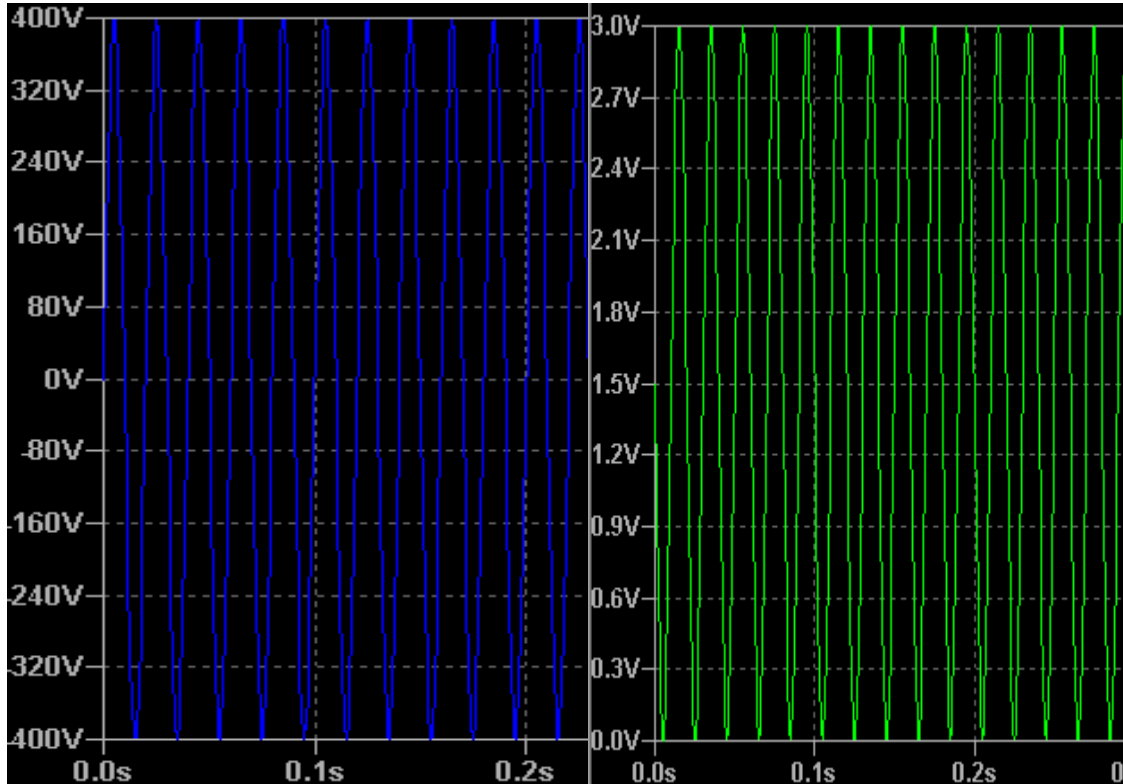
*Ecuación 15 Ganancia segundo amplificador operacional obtenida*

La transferencia total del sistema es el aporte de cada amplificador operacional por separado, que sale de multiplicar cada una:

$$A_{v-total} = \frac{0.00375}{1 + \frac{S}{21276.6}} * \frac{1}{\left(1 + \frac{S}{10638 + j18426}\right) * \left(1 + \frac{S}{-18638 - j18426}\right)}$$

*Ecuación 16 Ganancia total del sistema obtenida*

Los polos de la transferencia están expresados en radianes, que representados en Hz da como resultado 3.4kHz, a su vez se puede corroborar que para una señal de entrada de 800Vpp la salida máxima nos da 3Vpp como se puede observar en las imágenes siguientes, donde se muestra la transferencia del sistema total en dB y luego la salida esperada para una señal senoidal de 50Hz y 400V de amplitud.



*Figura 13 Señal de entrada 800VPP (imagen izquierda) y salida de 0 a 3V (imagen derecha)*

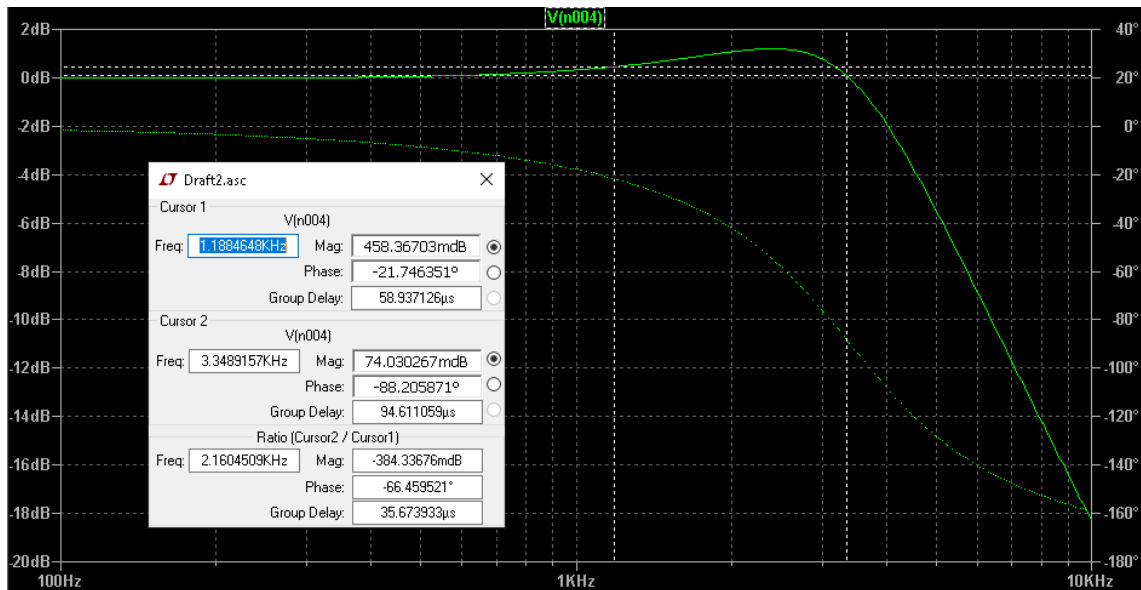


Figura 14 Transferencia sistema completo

### 3.1.2 Adecuación de corriente y filtro antialiasing:

Al trabajar con tensión y corriente de la red eléctrica se busca obtener diferencia de fase nula entre ambas señales, para lo cual se implementa la misma idea de un filtro activo Butterworth de tercer orden de frecuencia de corte deseada de 3.4kHz. Se calculan las transferencias del sistema, se seleccionan los componentes en función de valores comerciales, se dibujan diagramas de bode en función de la frecuencia y fase. Se utiliza un programa de simulación para observar la frecuencia de corte resultante. Para la selección de amplificadores operacionales se decidió utilizar también el TLV472 que consta de 2 amplificadores en un mismo bloque de silicio. A continuación, se detallan las ecuaciones del sistema, sus distintas transferencias y los diagramas.

En la figura 15 se observa el circuito completo:

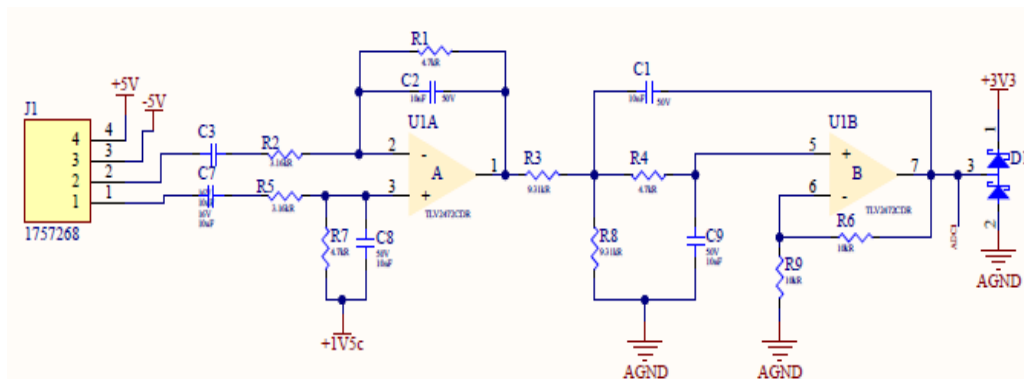


Figura 15 Filtro y adecuador de corriente

Se analiza el circuito y asumiendo amplificadores operacionales ideales en el rango de trabajo, se puede separar el circuito en dos etapas. La primera adecua las señales para el ingreso de señales (ver figura 16), agregando un valor de continua y filtrando la componente de continua proveniente de la pinza amperométrica. La segunda etapa fue estudiada cuando se adecuó la señal de tensión (ver sección 3.1.1.).

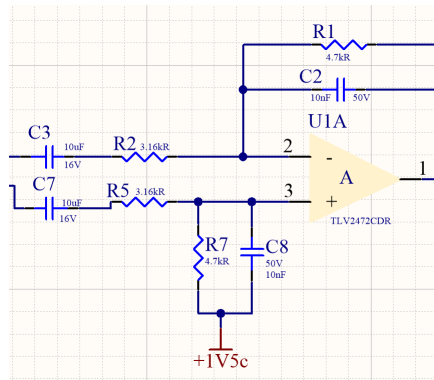


Figura 16 Circuito primer amplificador operacional de corriente

Se plantean ecuaciones y transferencias para caracterizar el sistema, se muestra la cadena de avance negativa y su respectiva transferencia (ver figura 17):

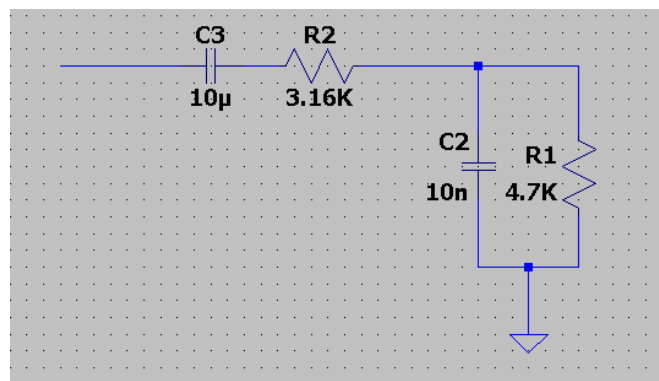


Figura 17 Análisis cadena de avance de la entrada negativa

Cuyas ecuaciones son:

$$G^- = \frac{R_1 * C_3 * S}{1 + ((R_1 + R_2) * C_3 + R_1 * C_2) * S + R_1 * R_2 * C_2 * C_3 * S^2}$$

*Ecuación 17 Transferencia cadena de avance negativa*

Aplicando los valores comerciales elegidos, da como resultado:

$$G^- = \frac{\frac{S}{21.277}}{\left(1 + \frac{S}{12.7}\right) * \left(1 + \frac{S}{52941}\right)}$$

Ecuación 18 Transferencia cadena de avance negativa obtenida

Por otro lado, se calcula la transferencia del circuito de realimentación negativa (ver figura 18):

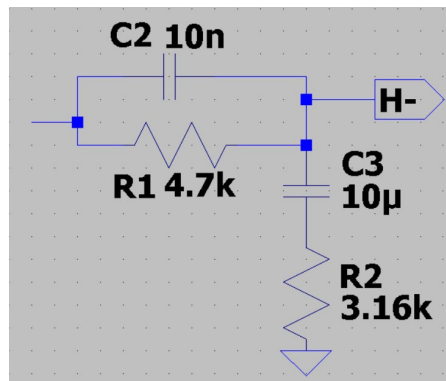


Figura 18 Análisis realimentación negativa

$$H^- = \frac{(1 + R_2 * C_3 * S) * (1 + R_1 * C_2 * S)}{1 + ((R_1 + R_2) * C_3 + R_1 * C_2) * S + R_1 * R_2 * C_2 * C_3 * S^2}$$

Ecuación 19 Transferencia realimentación negativa

Aplicando los valores comerciales elegidos, da como resultado:

$$H^- = \frac{\left(1 + \frac{S}{31.65}\right) \left(1 + \frac{S}{21276}\right)}{\left(1 + \frac{S}{12.7}\right) * \left(1 + \frac{S}{52941}\right)}$$

Ecuación 20 Transferencia realimentación negativa obtenida

A continuación se ilustran los circuitos correspondientes a la transferencia de las ramas positivas,  $G_1^+$  (figura 19) que representa la transferencia respecto de la señal proveniente de la sonda de corriente, y  $G_2^+$  (figura 20) que representa la ganancia de la señal de continua.

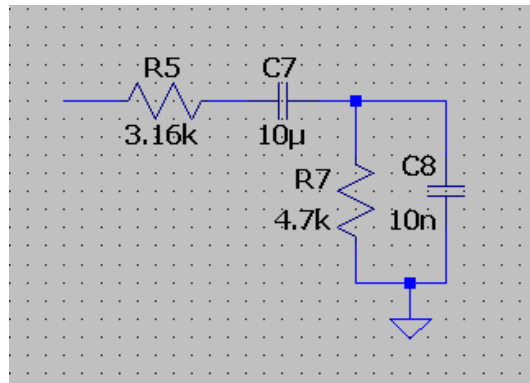


Figura 19 Transferencia cadena de avance rama positiva ( $G_1^+$ )

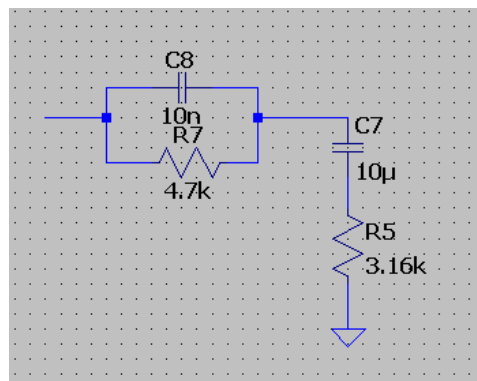


Figura 20 Transferencia cadena de avance rama positiva señal continua ( $G_2^+$ )

Observando los circuitos, se encuentra que se da el caso que  $H^- = G_1^+$  y que  $G^- = G_2^+$ . Como  $G_1^+ = G^-$  la señal alterna proveniente de la sonda de corriente gana igual para cada una de las ramas, luego la transferencia para la señal de continua de 1.5V es igual a 1 y la transferencia para una señal alterna da:

$$A_V = \frac{G^-}{H^-} = \frac{R_1 * C_3 * S}{1 + ((R_1 + R_2) * C_3 + R_1 * C_2) * S + R_1 * R_2 * C_2 * C_3 * S^2} = \frac{(1 + R_2 * C_3 * S) * (1 + R_1 * C_2 * S)}{1 + ((R_1 + R_2) * C_3 + R_1 * C_2) * S + R_1 * R_2 * C_2 * C_3 * S^2}$$

$$A_V = \frac{G^-}{H^-} = \frac{R_1 * C_3 * S}{(1 + R_2 * C_3 * S) * (1 + R_1 * C_2 * S)}$$

Ecuación 21 Ganancia primer amplificador operacional

Aplicando los valores comerciales elegidos, da como resultado:

$$A_V = \frac{G^-}{H^-} = \frac{S}{21.277} \frac{1}{(1 + \frac{S}{31.65})(1 + \frac{S}{21276})}$$

Ecuación 22 Ganancia primer amplificador operacional obtenida

En la ganancia del sistema se puede observar un polo y un cero en baja frecuencia que filtran la continua, que a su vez se cancelan sin afectar al sistema en la frecuencia de interés que es 50Hz.

Luego la ganancia total del sistema está dada por:

$$A_{v-total} = \frac{S}{21.277} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{S}{31.65}\right)\left(1 + \frac{S}{21276}\right)} * \frac{1}{\left(1 + \frac{S}{10638 + j18426}\right) * \left(1 + \frac{S}{-18638 - j18426}\right)}$$

*Ecuación 23 Ganancia total filtro y adecuador de corriente*

Como se puede apreciar en las figuras siguientes (21 y 22), para una entrada de  $\pm 1V$  máximo, salida con excursión de 0 a 3V y la transferencia total del sistema:

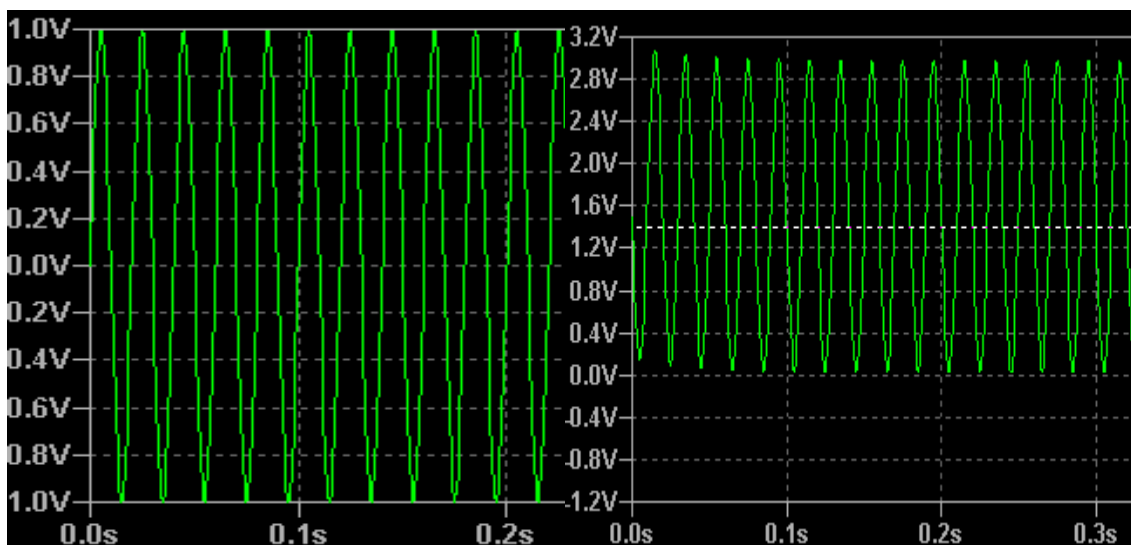


Figura 21 Entrada  $\pm 1V$  (imagen izquierda) salida 0 a 3V (imagen derecha)

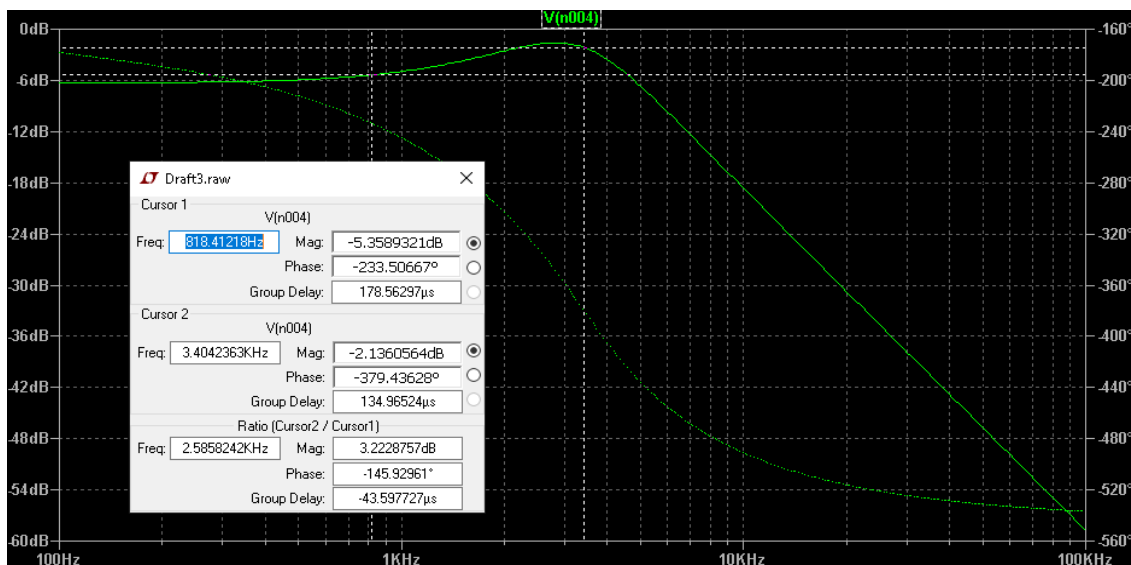


Figura 22 Transferencia completa del sistema

### 3.1.3 ADC-externo:

El diagrama en bloques solo presenta un sistema adquirente, integrado en el propio microcontrolador, pero se realizó un relevamiento de dispositivos propicios para el proyecto en caso de necesitar mayor resolución, al considerar tiempos de entrega, disponibilidad del componente y características mínimas que debía tener para poder incorporarlo al proyecto en caso de ser necesario. Entre las características más importantes están la necesidad de contar con 2 canales, que el rango de señales sea de 0 a 3V para que funcionase con el mismo circuito acondicionador de señales, mayor cantidad de bits de resolución y al menos una frecuencia de muestreo similar a la del microcontrolador. Se seleccionó el ADS1174IPAPT que cumple con los requerimientos y posee comunicación SPI con una tasa de transferencia de datos aceptables. Dicho integrado sobrepasa los requerimientos necesarios del sistema.

Cantidad de bits	16 bits
Número de canales	4 canales
Protocolo comunicación	SPI
Frecuencia muestreo	52 kS/s
SNR	97dB
Arquitectura	Sigma delta

### 3.1.4 Fuentes de tensión:

En función del circuito y los componentes seleccionados se determinó la diversidad de tensiones con las que debe contar el equipo para su correcto funcionamiento. Se segmentó el problema y a partir de los componentes esenciales del sistema, se procede a diseñar cada una de las fuentes requeridas.

#### Selección fuente 220V a 12V

La fuente de 220AC a 12V se elige en función del requerimiento de consumo del circuito total que se establece en un máximo de 1A con el fin de no perturbar la señal de entrada que se quiere medir. Se determinó utilizar la fuente AC-DC VOF-10B-S12 por su reducido tamaño y la posibilidad de entregar 1A, presenta una curva de eficiencia aceptable y el consumo es de apenas 0.3A máximo, valor que sería despreciable frente a los consumos de uso doméstico. Por otro parte, si se desea agregar un módulo WI-FI, se debe sumar 500mA pico cuando la demanda de tráfico sea muy alta y constante en el tiempo.

A continuación, se muestra el esquemático, ver figura 23:

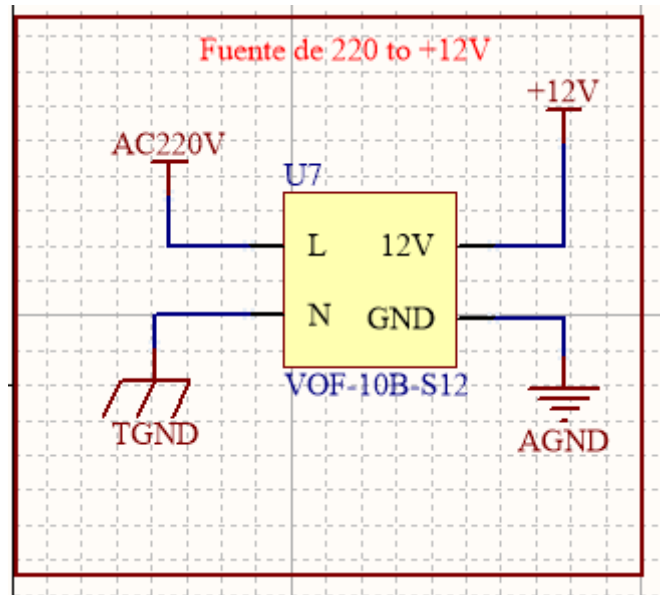


Figura 23 Circuito fuente switching

## Diseño fuente 5V

El LM1117MP-5 es un regulador lineal capaz de entregar 800mA máximo, permite una  $V_{max}$  de 15V y una salida que puede presentar una desviación de hasta 2%. Se utilizan capacitores cerámicos de 10uF según indicación del fabricante para filtrar la alta frecuencia y mantener el valor estable, al salir de un convertidor como es la fuente de 220V a 12V.

La utilización de 2 convertidores, permite aislar el sistema en 2 partes, uno para el circuito general y otro relacionado con el modulo WI-FI, que tiene consumos picos de 500mA y con un solo chip, debería disipar mucha potencia. Además de que estaría al límite en corriente, lo que provocaría cortes en el peor de los casos o pérdidas de paquetes.

A continuación, se muestra el esquemático, ver figura 24:



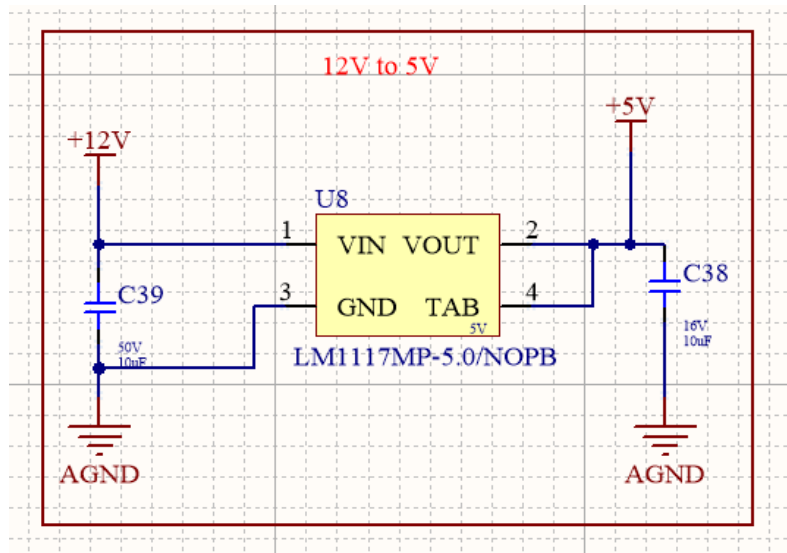


Figura 24 Circuito regulador lineal 5V

### Diseño fuente 3V3

El LM1117MP-3 es un regulador lineal capaz de entregar 800mA (máximo), permite una entrada máxima de 15V y una salida que puede presentar una desviación de hasta 2%. Se utilizan capacitores cerámicos de 10uF según indicación del fabricante para filtrar la alta frecuencia. Se requiere un regulador de 3V3 para poder alimentar la parte digital que no admite mayor tensión.

A continuación, se muestra el esquemático, ver figura 25:

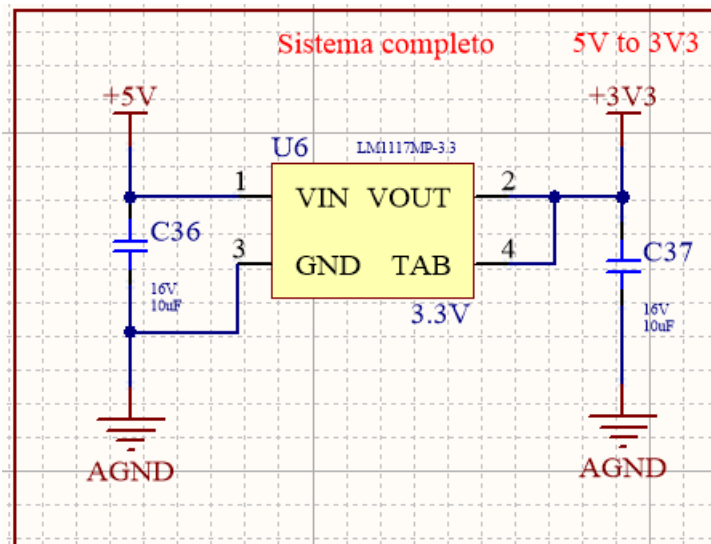


Figura 25 Circuito regulador lineal 3V3

En ambos casos se utilizan 2 fuentes de 5V y 3V en cascada para mitigar las perturbaciones en la alimentación que proviene de la fuente switching, en donde los ripples pueden generar alteraciones en las mediciones o fallos en la parte digital.

## Diseño fuente -5V

La sonda de corriente utilizada requiere una alimentación bipolar, por lo cual es necesario diseñar una fuente de -5V para funcionar. Se selecciona el LM2660MX/NOPB. El integrado es un convertidor de voltaje que proporciona 100mA de corriente de salida, presenta un tamaño pequeño y bajo ruido EMI a diferencia de otros convertidores o fuentes.

A continuación, se muestra el esquemático, ver figura 26:

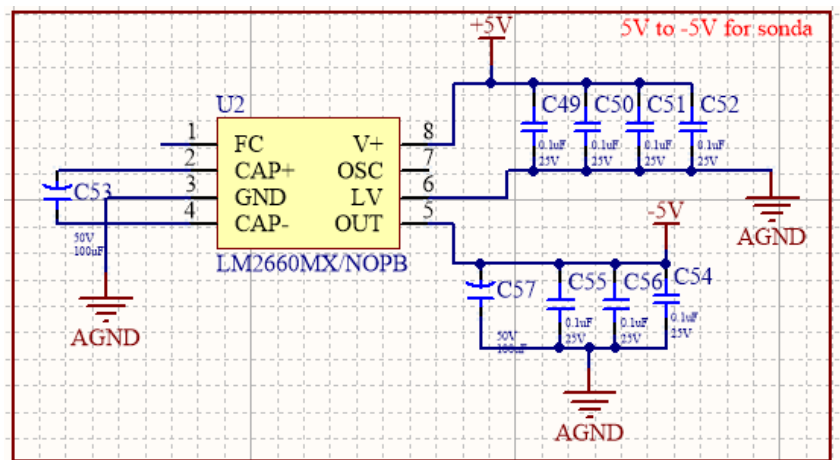


Figura 26 Circuito convertidor -5V

En función de las fuentes detalladas y diseñadas anteriormente, se procede a listar a que componente o integrado deben ir conectados con el fin de poder posicionarlos lo más próximo posible, al momento de diseñar el PCB.

### Fuente de 5V:

- ADC-EXTERNO
- Amplificador operacional TLV2472(2 integrados)
- Referencia 1.5V LM1117MP-ADJ (2 integrados)
- Regulador 3.3V LM1117MP-3.3 (2 integrados)
- Regulador 1.8V LM1117MP-1.8 para ADC-EXTERNO
- Alimentación pinza amperométrica
- Generador -5V para pinza amperométrica LM2660MX

### Fuente de 3.3V:

- ADC-EXTERNO

- Referencia de 3V ISL21010CFH330Z-TK
- Módulo WI-FI
- Tarjeta de memoria
- Led encendido placa

#### **Convertidor 220AC a 12V:**

- Fuente conmutada VOF-10B-S12

#### **Fuente 12V:**

- Regulador 5V LM1117MP-5.5 (2 integrados)

### **3.1.5 ADC, procesamiento de señales y comunicación:**

Se utiliza un microcontrolador ARM de la familia Atmel que tiene las siguientes prestaciones entre otras:

- Puerto USB
- 2 UARTS
- 3 SPI
- 12Bit ADC, 16 Canales y 1Msps
- HSMCI para comunicación con memoria SD (protocolo FAT)
- Alimentación 3.3V

Las características de este microcontrolador satisfacen ampliamente los requisitos del proyecto. Se podría haber utilizado un microcontrolador con menores prestaciones, pero se optó por éste por su gran versatilidad, buena velocidad de escritura de la tarjeta SD y por la posibilidad de utilizarlo para hacer cálculos básicos de la red eléctrica y trabajar de manera autónoma sin la necesidad de utilizar el ADC externo.

En función de las recomendaciones del fabricante, se diseñan y definen los puertos y distintas configuraciones del dispositivo, sus alimentaciones y consideraciones de diseño, para evitar problemas de ruido, problemas en alimentación por consumo excesivo donde las fuentes no soporten la demanda. El microcontrolador requiere de 3.3V para funcionar, esta alimentación debe ir en los pines denominados VDDIO (7,8,45,58). Se decidió alimentar de 2 fuentes independientes, la regulable que fue caracterizada antes y luego una pila que funciona en caso de posibles cortes, de esta forma se mantiene alimentado el chip para culminar correctamente el proceso. El fabricante recomienda colocar capacitores de 0.1uF y de 10uF en paralelo para estabilizar la alimentación

cuando se producen picos de consumo. Para independizar las alimentaciones se utilizaron diodos en directa para evitar cortocircuitos entre las fuentes por diferencias de potencial.

El microcontrolador utiliza otra alimentación para los periféricos y memorias internas denominada VDDCORE (12,24,54). Esta tensión debe estar en el rango de 1.08V y 1.32V y es generada internamente, cuya salida es VDDOUT (8). VDDOUT debe tener capacitores de 10uF y 0.1uF en paralelo para estabilizar la alimentación. El circuito de alimentación también debe poseer un filtro con un inductor y 2 capacitores en paralelo para alimentar el pin denominado VDDPLL que se encarga de dar energía a los PLL internos y al reloj principal.

A continuación, se muestra el esquemático (ver figura 27):

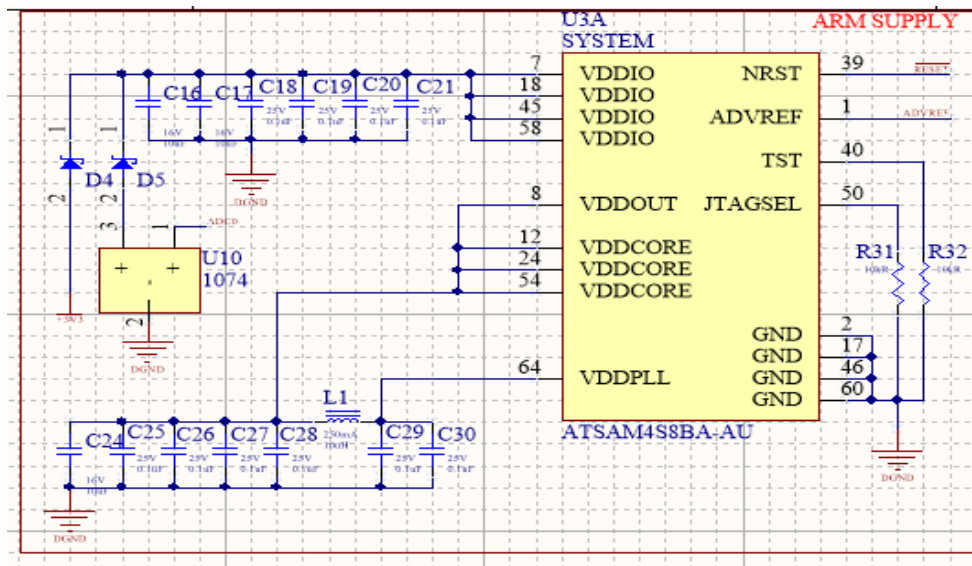


Figura 23 Circuito alimentación microcontrolador ARM

Se utiliza un reloj asociado a la comunicación USB que requiere de un cristal de 32.768kHz entre los pines 31 y 32 con un capacitor de 15pF a masa en cada uno. Por otro lado, se utiliza un cristal de 12MHz en los pines 61 y 62 con un capacitor en cada pin de 15pF para estabilizar el reloj principal. La selección de los capacitores del reloj viene definida por los fabricantes de los cristales que estipulan valores a los cuales, dicho material oscila a la frecuencia estimada. Por conveniencia se optó por analizar al chip en 2 partes, según los puertos de cada uno, dado que internamente el chip está direccionado. Dicha separación además de ser por puertos analógicos y digitales o por puertos de alimentación, está limitada a que cada pin tiene un controlador independiente y un reloj asociado, en este caso en 2 partes, denominadas A (figura 28) y B (figura 29).

Parte A:

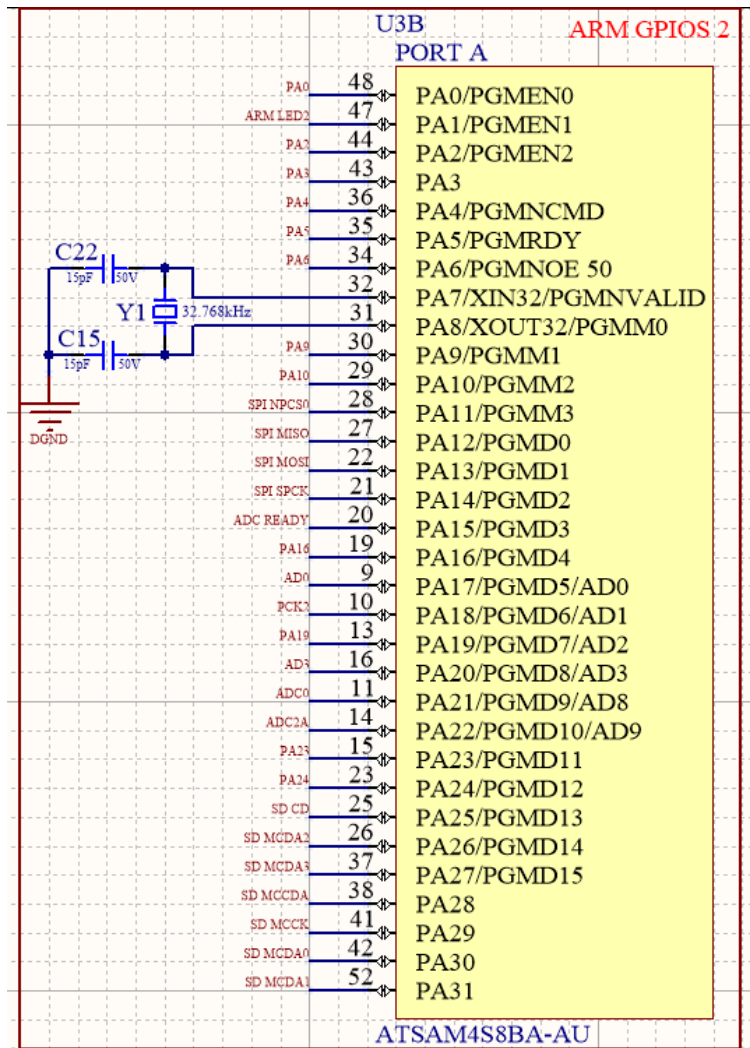


Figura 24 Circuito configuración pines PORT A microcontrolador ARM

Parte B:

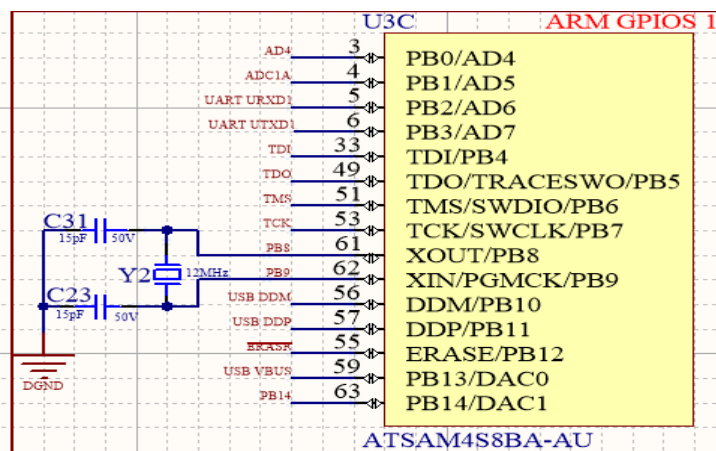


Figura 25 Circuito configuración pines PORT B microcontrolador ARM

Como se puede ver en la figura 30, el conector de tarjetas SD se conecta al módulo HSMCI (High Speed Memory Card Interface) del ARM. Este puerto se comunica con el protocolo estándar SD con 4 canales de datos (D0, D1, D2 y D3), un reloj y una línea de comandos.

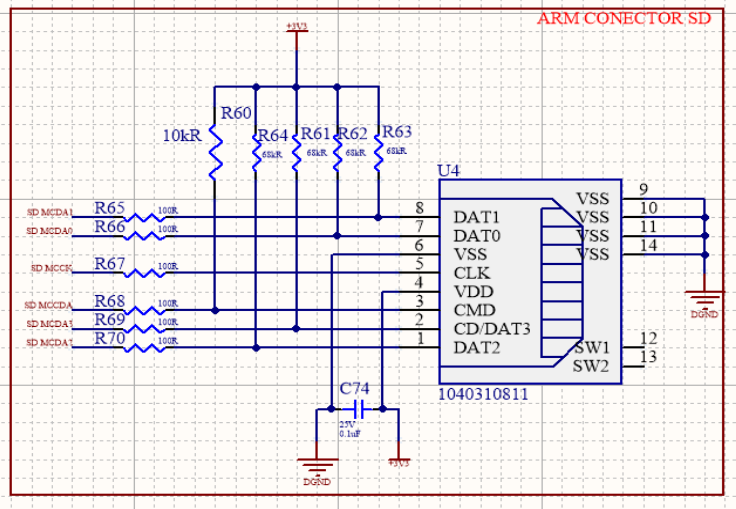


Figura 26 Circuito memoria SSD

El puerto Mini-USB tiene un divisor resistivo para detectar los 5V del Host, dicho puerto se implementa sobre la base de un puerto serie, se agregan librerías propias de ARM que permiten emular un puerto serie por USB en la PC. Al detectar los 5V se activa una interrupción que reconoce un dispositivo conectado y realiza el protocolo de identificación. De esta forma se ahorran recursos del microcontrolador cuando no hay nada conectado. A continuación, se muestra el esquemático (figura 31):

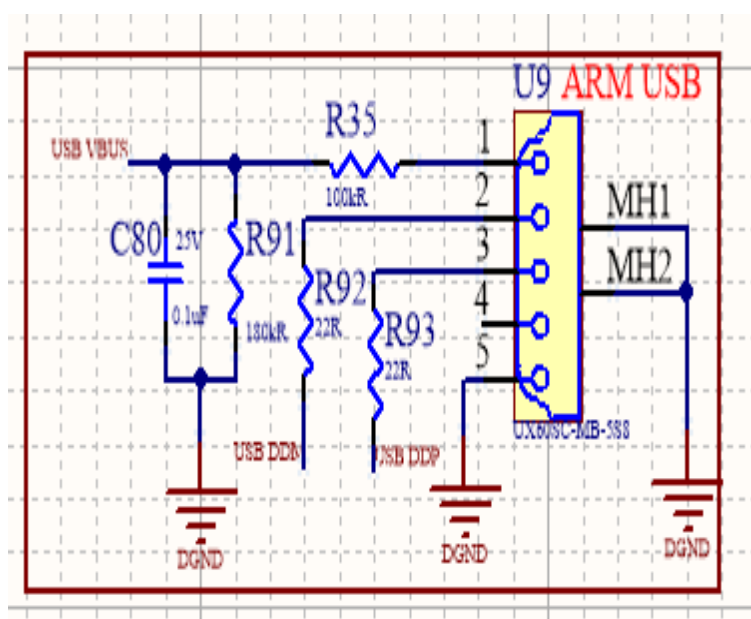


Figura 27 Circuito puerto USB

Se utiliza un conector JTAG de 10 pines para programar y depurar el código del microcontrolador (figura 32). Dicho conector permite depurar en tiempo real el código de forma más eficiente.

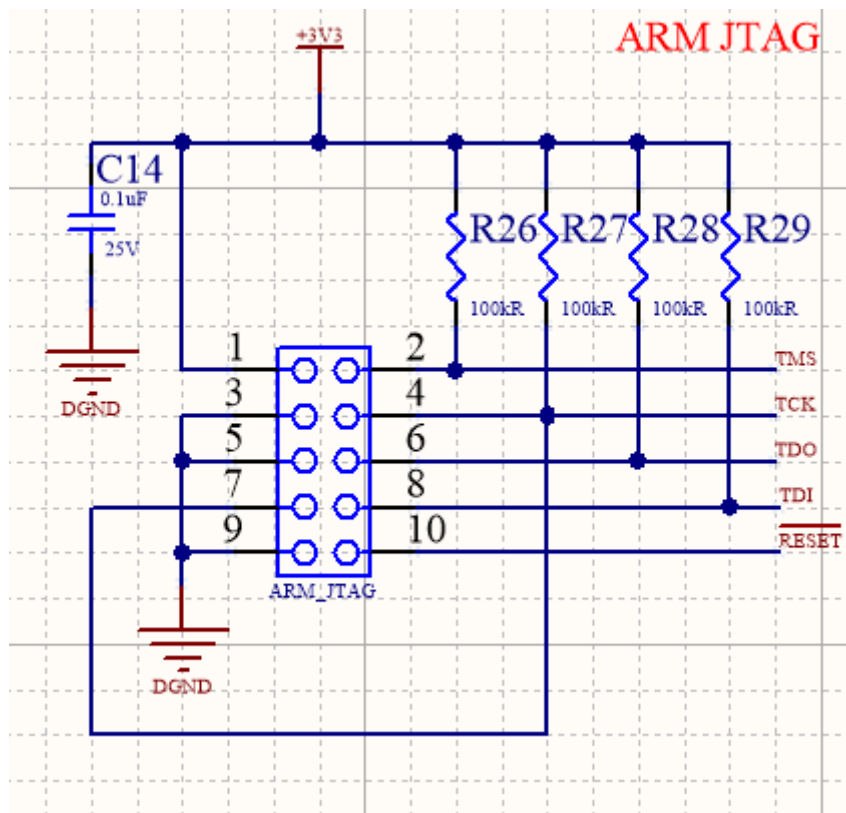


Figura 28 Circuito conector JTAG para programación y debug

### 3.2 Diseño del PCB

El diseño del PCB se realizó con el software Altium Designer 19.15. El programa permite realizar el esquemático, hacer interconexiones entre los diferentes componentes, diseñar componentes en función de sus pines o conexiones y luego diseñar el footprint que será utilizado en el PCB. También permite definir el tamaño de la plaqueta, la cantidad de layers que tendrá, los materiales para su construcción (cobre, tipo de dieléctrico, etc.), al igual que otros parámetros según requerimientos como son mínimos pad y/o mínima diferencia entre trazos que serán definidos por el fabricante que da características mínimas con las que puede cumplir. Con el esquemático armado, se colocan los componentes sobre la placa, se realiza el enrutamiento y por último se chequea que cumpla con las reglas antes mencionadas.

Se realizaron los esquemáticos de cada una de las etapas por separado. Segmentar el problema permite analizar cada uno de los requerimientos por separado, obteniendo un mejor entendimiento del proyecto.

El estudio de dispositivos comerciales y encapsulados, permite definir un tamaño del PCB adecuado para que el equipo pueda alojarse en una caja de conexión dentro del hogar mediante un riel DIN. Conocido el tamaño máximo que permiten las cajas contenedoras en el mercado y dada la complejidad del ruteo se optó por utilizar una placa de 2 capas únicamente. Se definió la ubicación de los componentes principales, que quedarán fijos durante el diseño, como son las borneras que deben permitir ser conectadas y de fácil acceso cuando se coloque en una caja, la tarjeta SD y el diodo led, que debe ser visible para el usuario. Establecidos los lugares en la placa se bosqueja una primera distribución de los componentes. Se decidió separar las entradas de tensión y corriente dada la diferencia en niveles de señal, para que las señales no se interfirieran. Se agrupó las fuentes en dos conjuntos, uno denominado caliente, dado que los integrados disipan energía durante la conversión a otros niveles como es el paso de 12V a 5v, y otro denominado frío, que refiere a las señales digitales y analógicas. Por otro lado, se considera agrupar y mantener trazos de ruteo cortos en las comunicaciones digitales, para evitar diferencias en las longitudes de caminos y ruido de crosstalk entre otros.

En la figura 33 se puede ver como se ubicaron cada uno de los bloques y su interconexión. Además, se diagramó el esquema de los diferentes planos de masa aislados, en este caso solo 2 planos unidos en un único punto, un plano referenciado a las señales analógicas nombrado como AGND y uno para las señales digitales señalado como DGND. Se utilizó esta metodología de masas separadas para evitar ruido entre las distintas referencias a tierra, al no utilizar opto-aisladores para separar la parte de alta tensión de la de baja, se unieron las masas en un único punto para poder tener la misma referencia de conversión. La decisión sale de utilizar el convertor analógico digital que tiene el microcontrolador, cuya referencia es de 3V provista por un integrado, y la de DGND que debe ser igual a AGND para coincidir la medición, dado que, cuando ingresa por los amplificadores operacionales toda conversión de niveles y demás está asociado a AGND.

Al posicionar los componentes, se trabajó en bloques, agrupando los componentes asociados a cada elemento lo más cercano posible. De esta forma se logra visualizar como deberían ir conectados. Para el ruteo se procede a enrutar primero el microcontrolador, cuyo encapsulado presenta más pines y, por ende, el más complejo de trabajar.

Por otro lado, se analizó el posicionamiento óptimo, al tener en cuenta aspectos como los posibles trazados y los planos de masa. Básicamente, se trató de minimizar la longitud de los trazos, disminuir la inductancia de dispersión (considerando los retornos de las señales), minimizar la cantidad de trazos que corten el plano de masa, evitar loops de señales, posicionar los capacitores de desacople lo más cercano posible a la alimentación de los circuitos integrados y de ser necesario, colocar choques de RF cerca de la alimentación de aquellos dispositivos susceptibles a interferencias.



Si bien la fuente switching conmuta y genera ruido por fuera de la banda de interés de trabajo (10Hz a 2000Hz), se decidió no colocar componentes por debajo de la fuente. En su lugar se colocó un plano de masa para mitigar el ruido EMI que pueda inducir, y que este no ingrese a las fuentes de alimentación o el microcontrolador, cuyo chip si funciona en el rango de interferencia.

En la figura 33 se puede observar la versión final del diseño del PCB de dos capas.

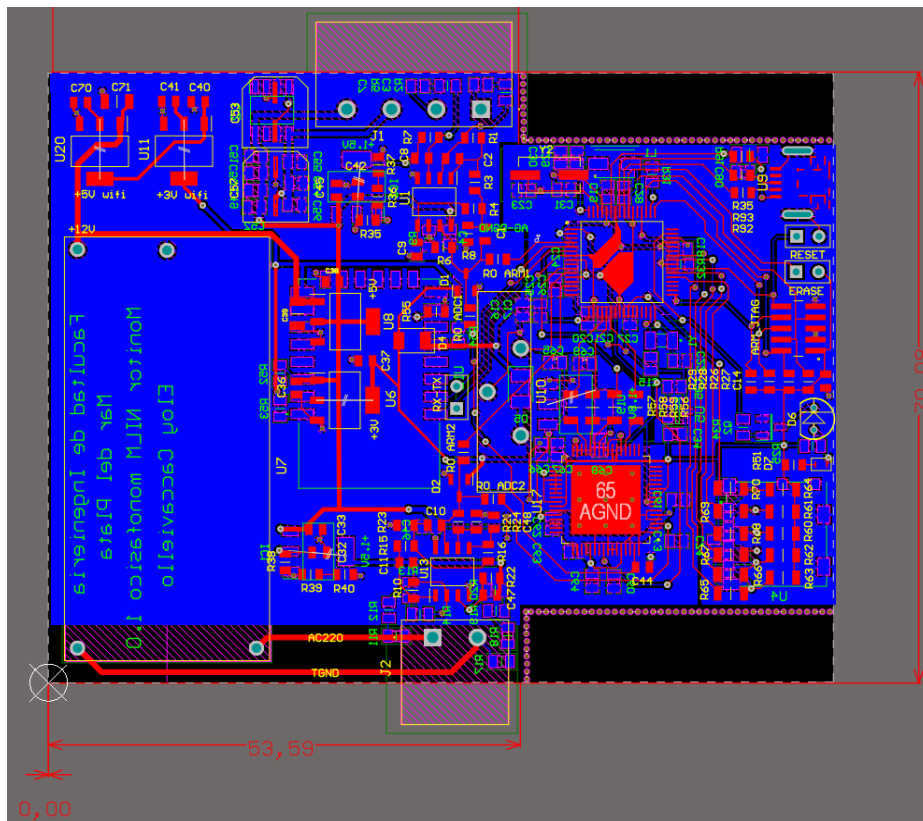


Figura 29 PCB 2 layers

En la capa superior (de color rojo) se trazaron la mayoría de los caminos que transportan señales y las líneas de las fuentes de alimentación (figura 34).

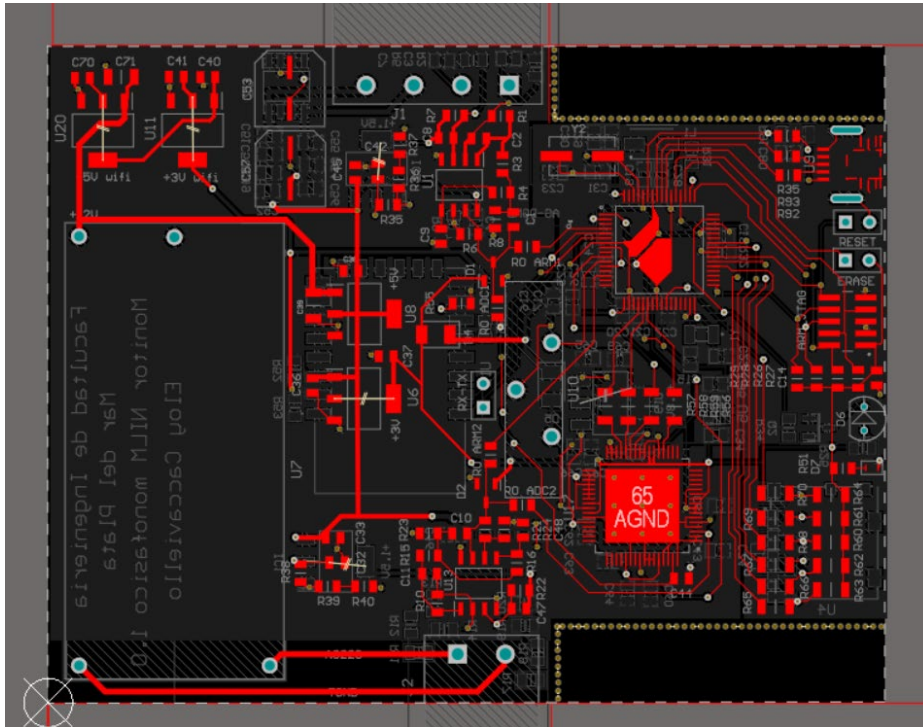


Figura 30 PCB top layer

Mientras que en la capa inferior (color azul) se implementaron los planos de masa y los pequeños trazos que se utilizaron de puente (figura 35).

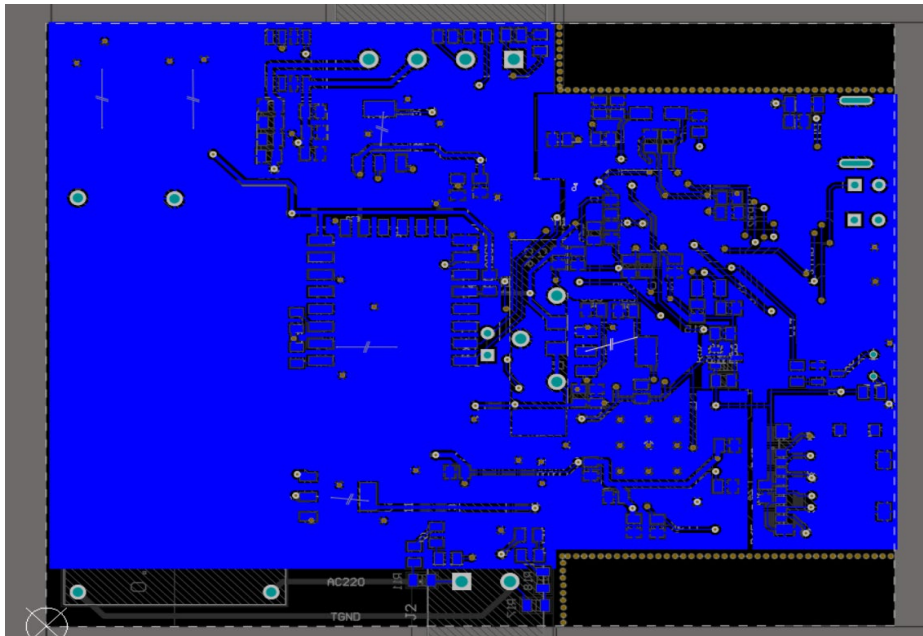


Figura 31 PCB bottom layer

En las figuras 36 y 37 se puede ver en un diseño 3D la distribución de los componentes. Como se observa, se ha logrado una buena densidad de componentes a pesar de utilizar solo 2 layers.

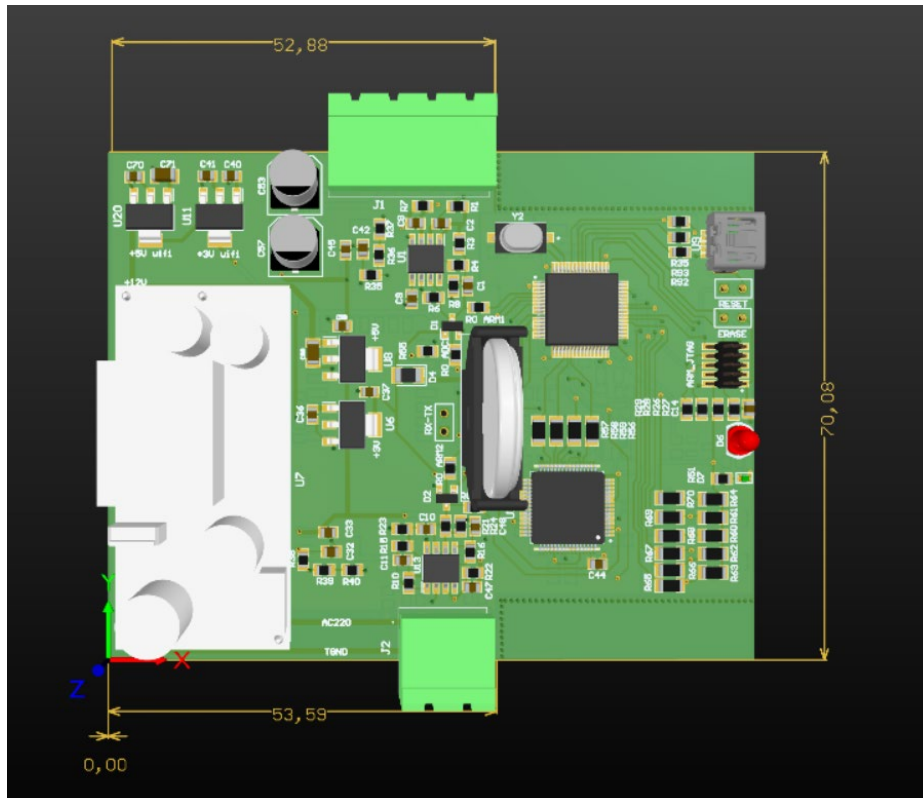


Figura 32 PCB vista 3D superior

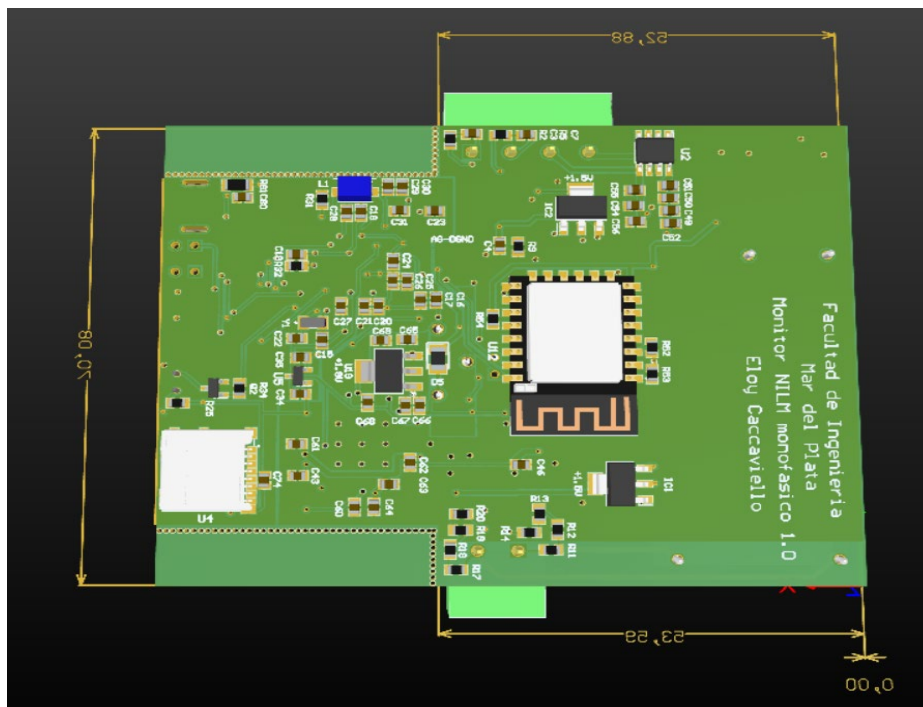


Figura 33 PCB vista 3D parte inferior

Finalizado el diseño, se procede a una inspección final del proyecto, se controlan planos de masas y conexiones para luego ser enviado a fabricar.

### 3.3 Programación del microcontrolador ARM

El microcontrolador ARM SAM4S se encarga de las siguientes tareas:

1. Adquirir los datos del ADC: La comunicación entre el microcontrolador y los ADC es interna. Se configuran los canales de adquisición, que surgen a partir del diseño del PCB y los pines elegidos para tal función y que lugar de memoria almacenan las muestras instantáneas. Se deben definir tiempos de conversión, tiempo que mantiene la muestra e interrupción para cumplir con la frecuencia de muestreo de 6400Hz. Este valor se obtiene de tomar al menos 2 veces la frecuencia más alta de interés (armónico 40) y de considerar en función del tamaño de la FFT que se realizará, un múltiplo de la frecuencia de línea, para no tener error en los cálculos. Para tal fin se ajusta el trigger de disparo mediante una interrupción interna, en donde, dada una cierta cantidad de ciclos de reloj principal se ejecuta la conversión de los 3 canales, uno referido a la tensión, otro a la corriente y uno para la medición de la batería o alimentación del microcontrolador. Se configura la referencia del adquirente en 3V y la resolución a utilizar en 12 bits para poder discriminar ante variaciones leves en la potencia.
2. Almacenar los datos en la tarjeta SD: El microcontrolador carga unos drivers proporcionados por ATMEL para poder inicializar la tarjeta SD, la librería implementa un protocolo estándar SD de 4 bits. Las funciones básicas que se utilizan son: montar una tarjeta SD con formato FAT32, generar un archivo .txt y almacenar los datos suministrados por los ADC, Por tratarse de FAT32 la memoria máxima permitida es de 4GB, (queda pendiente para una futura actualización de firmware la implementación de esta función).
3. Atender los periféricos de interfaz de usuario: Un diodo led parpadea e indica el microcontrolador está funcionando. En una primera instancia se lo configura para parpadear cuando existe comunicación y envío de datos entre la placa y la PC. Pero es de gran utilidad, dado que a futuro puede proporcionar información acerca del estado del equipo, como el estado de la batería, entre otros.
4. Interactuar con la PC por medio del puerto USB: Se pretende utilizar el puerto serie a la máxima velocidad posible para enviar los datos al PC y poder recolectarlos a la vez que se visualizan para una mejor depuración del código y un post-procesamiento de ser necesario. Se configura el puerto a una velocidad de 921600 baudios, 8 bits de datos, 1 bit de stop y sin paridad. Debido a que los datos están definidos por el ADC(12bits), se opta por convertir los datos en 2 paquete de 8 bits para luego ser re

ensamblados en la PC, se define una cabecera que permita distinguir el inicio y fin de un paquete para poder procesarlo. A su vez el microcontrolador es capaz de recibir comandos para configurar parámetros que puedan alterar las mediciones sin necesidad de volver a programar el equipo, de esta forma se acortan los procesos de depuración. A partir del firmware desarrollado, se puede modificar la frecuencia de muestreo, activar un PLL digital (que ajusta los parámetros de los algoritmos y la frecuencia de muestro en función de la frecuencia de línea para disminuir el error en los cálculos), que tipo de paquete se envía a la PC, (desde los armónicos hasta la muestra pura), que cantidad de armónicos se envían, setear y calibrar el equipo, entre otros.

5. Procesamiento de los datos: Los datos recolectados del ADC son almacenados en arreglos de 128 datos, con una DFFT se calcula la parte imaginaria y real del contenido armónico de la señal para terminar de calcular la magnitud. Se normaliza la magnitud de los armónicos en función de la longitud máxima del arreglo, en una primera instancia se trabaja con números en punto fijo para evitar errores de redondeo y acarrear decimales, a la vez que implicaría un incremento en el ancho de banda requerido para enviar la misma cantidad de datos solicitada.
6. PLL digital: Se parte de un diagrama en bloques de un PLL, se calculan las transferencias y parámetros en función de la frecuencia de muestreo deseada, en este caso 6400Hz, se calcula el algoritmo y se aplica a cada una de las señales de línea (tensión y corriente), se obtiene una fase propia de cada señal de entrada y se las compara para obtener la relación de fase entre señales. Ésta se requiere para los cálculos de potencia activa, reactiva y aparente.
7. Generar paquetes de datos: Actualmente se diseña la comunicación serie para enviar datos sobre USB, pero puede ser implementada por otro puerto serial de comunicación para enviar los datos por diferentes medios, como es el caso de un módulo WI-FI, para enviar datos a través del protocolo MQTT a un servidor en la red y descargar los datos de forma más segura y eficiente, dado que se pretende en alguna etapa posterior no requerir de la PC al lado de la placa.

### **3.4 Diseño de la interfaz de visualización y post-procesamiento de datos:**

Dada la versatilidad del puerto USB, se programó una interfaz gráfica para conocer en todo momento que sucede con la tensión y corriente de la red eléctrica, para ello se implementa una comunicación serie con el microcontrolador, se almacenan los datos, se visualizan en pantalla 128 muestras y se calculan los mismos parámetros que en el microcontrolador, de

esta forma se obtiene una mejor apreciación de lo que sucede internamente en el microcontrolador, se puede observar el comportamiento de las cargas individuales y así definir criterios para discernir entre cargas conectadas a la red. Una primera aproximación es el valor medio de la potencia consumida y el comportamiento en el consumo, es decir, el comportamiento en el tiempo, mediante los flancos de consumo, conexión y desconexión de equipos, lo cual, sumado a conocer la dispersión armónica permitiría identificar de forma unívoca cada dispositivo conectado.

El software debe ser capaz de:

1. Abrir un puerto serie en la PC a una velocidad de 921600 baudios con 8 bits, sin paridad y 1 bit de stop.
2. Identificar inicio y fin de paquete, procesar el paquete, convertirlo en valores numéricos, y agrupar los datos, según la información que se recibió.
3. Los datos recolectados de cada canal deben ser mostrados en una gráfica que represente en tiempo real que sucede con las señales, a modo de osciloscopio digital para tener información de ambos dominios, el temporal y el de frecuencia.
4. Procesar los datos de cada canal para obtener los respectivos armónicos.
5. Implementar 2 PLL digitales para sincronizarse a cada una de las señales y calcular su relación de fase, que luego servirá para calcular otros parámetros de la señal.
6. Calcular y graficar la potencia activa, reactiva y aparente de la señal.

## 4 Mediciones y montaje de componentes

### 4.1 Montaje y puesta en marcha del hardware

En esta instancia se diagramaron los pasos a seguir para poder realizar mediciones sobre la red eléctrica de forma segura y lo más precisas posibles, teniendo en cuenta las posibles alteraciones propias de la red. Al tratarse de un primer prototipo, se deben determinar las prestaciones mínimas que puede ofrecer, en función de los errores en la medición. Estos errores pueden ser causados por los amplificadores operacionales, los adquisidores con resolución de 12 bits y/o las fuentes de referencia.

En una primera instancia se montan sobre el PCB las fuentes de tensión y los reguladores. Se sueldan los componentes con un soldador de 35W y estaño con plomo por tener un punto de fundición más bajo y poder soldar de una forma más simple. Si se tratase de un producto comercial, se debería pensar en utilizar estaño sin plomo por normativas internacionales, para evitar la contaminación del medio ambiente.

Con ambas fuentes de 5V soldadas y sus respectivos capacitores, se procede a inyectar una tensión de 12V en la placa y medir la tensión de salida. Se realiza el mismo procedimiento para la fuente de 3V3.

Se monta el circuito conversor de -5V y el integrado de referencia de 3V, se realizan mediciones con resultados según lo esperado.

Todo lo anterior, se realiza con una fuente de corriente continua y en un ambiente controlado, evitando por el momento colocar la fuente swiching y tener tensión de línea (220V) en la placa y que sea riesgoso manipularla en una instancia temprana. Probadas las alimentaciones se procede a soldar la etapa digital, es decir, todo aquello asociado al microcontrolador, los capacitores de alimentación y los 2 cristales, uno concerniente a la frecuencia de reloj principal y el otro para asegurar estabilidad en la transferencia por USB. Por otra parte, se colocan los capacitores y los inductores que establecen y filtran la alimentación hacia el chip. Se programa el microcontrolador enviando y recibiendo comandos por USB, a través de un puerto virtual COM generado en la PC para corroborar las soldaduras del integrado y del puerto USB, todo esto, previo a controlar las soldaduras con un microscopio digital.

Al estar separados los caminos de las señales analógicas hacia el ADC por unas resistencias de  $0\Omega$ , se procede al armado y montaje de los amplificadores operacionales y las fuentes de 1V5 regulables que cumplen la función de montar en continua las señales de entrada y tener una excursión simétrica, dado que el ADC del microcontrolador, únicamente convierte señales de 0 a 3V en el modo elegido. Si bien el sistema permite trabajar en modo diferencial se optó por esta configuración por la cantidad de pines que requería hacia el chip, y, por otro lado, si se requiriera utilizar un ADC de más resolución no implicará el agregado de gran cantidad de componentes.



Se mide la fuente de 1.5V para establecer su dispersión respecto del valor nominal, y, por otro lado, se cortocircuita la entrada de los operacionales y se debe observar a la salida, la misma tensión que se aplicó a la entrada, de esta forma, se constata que el sistema funciona como se estableció y no tiene ganancia en continua.

Con todos los componentes montados, exceptuando la fuente de 220 a 12V, se coloca una resistencia shunt en serie con la fuente externa de 12V y se procede a medir el consumo. Se encuentran valores similares a los esperados en cálculos previos.

Previo a la colocación del convertidor en el PCB, se procede a medirlo de forma externa, se alimenta con 220V y se observan a la salida los 12V esperados, de esta forma se evita dañar los componentes y poner en riesgo la placa.

Se procede a medir la sensibilidad y la fiabilidad del sistema adecuador de tensión, para ello, se alimenta con una fuente de continua de 12V de manera externa al circuito y luego como señal de entrada de tensión al amplificador operacional se utiliza un variac. Un variac es un autotransformador que permite ingresar con la tensión de la red eléctrica y con la ayuda de un control se varían los niveles que entrega al sistema.

Colocado el variac y la fuente externa, con la ayuda de un osciloscopio y unas puntas aisladas, se procede a medir la tensión de entrada. Se comienza con valores del orden de los 10V hasta la tensión de línea. Para constatar el correcto funcionamiento, en función de simulaciones en LTSpice y con las mediciones obtenida con el osciloscopio, se encuentra que el sistema responde según lo esperado. Además, se midió la frecuencia de corte de los filtros antialiasing y se corroboró que el filtro no aporta un error apreciable de fase y de amplitud para la máxima frecuencia de interés (3kHz).

Por otra parte, se realizan mediciones con el microcontrolador (figura 39) y se las compara con las obtenidas con el osciloscopio (figura 38), encontrando valores similares.

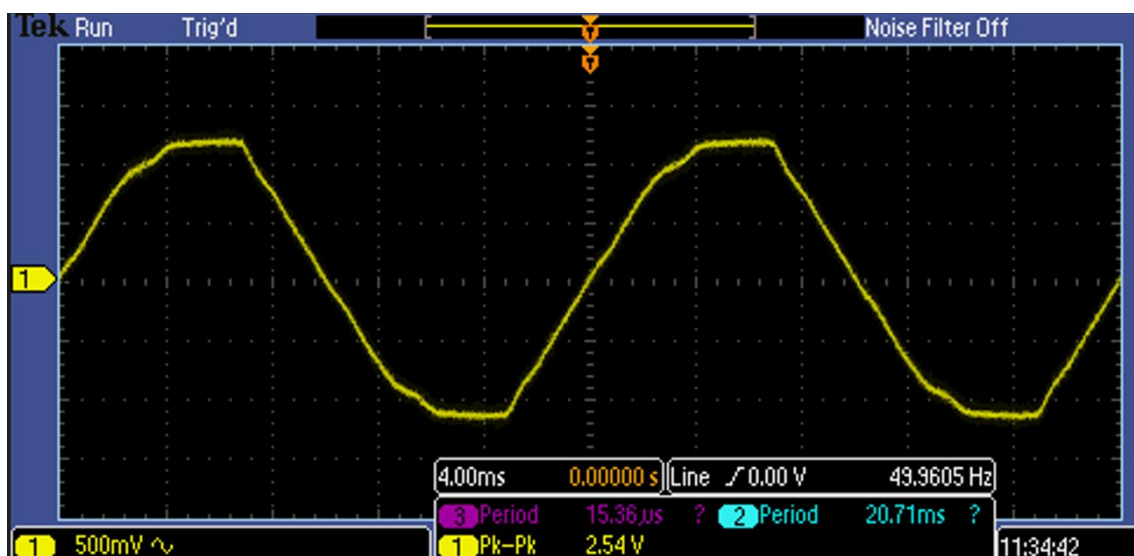




Figura 34 Medición tensión red eléctrica con osciloscopio

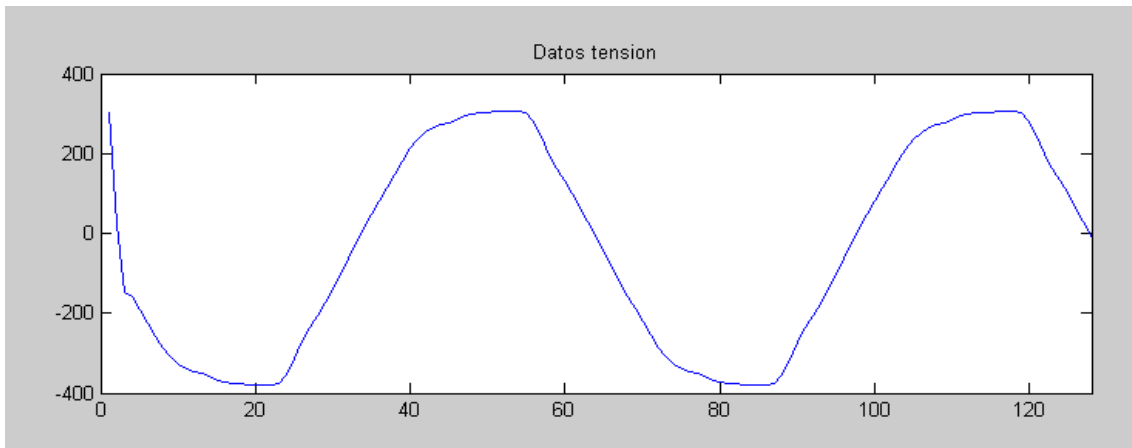


Figura 35 Medición tensión red eléctrica con Desagregador de cargas monofásicas

Se procede a realizar una prueba similar, pero en este caso con el sensor de corriente. Para lo que concierne a este proyecto se utilizaron sondas de corriente que necesitan adaptar la señal mediante un integrador para tener una relación proporcional entre las variaciones de corriente y la tensión entregada por el sensor. La pinza suministrada por el demandante trabaja en el rango de 0 a 400A, dado que se pretende utilizar para medir cargas domésticas no podrá utilizar todo el rango dinámico que dispone el equipo. Por ello, se decidió multiplicar la magnitud de la corriente medida mediante un arrollamiento con N vueltas, esto implica que la corriente medida, será N veces la corriente real. Cabe mencionar que se trata de un cable bipolar (vivo y neutro), por ambos circula la misma corriente, pero con sentido opuesto, por ende, únicamente se debe utilizar uno de los dos para medir, caso contrario y de utilizar tanto la fase como el neutro, se medirá corriente nula.

Se utilizó un calventor de 1kW que proporciona una corriente que es apreciable por la pinza. En la figura 40 se observa la medición realizada con el osciloscopio y en la figura 41 la realizada con el hardware desarrollado.

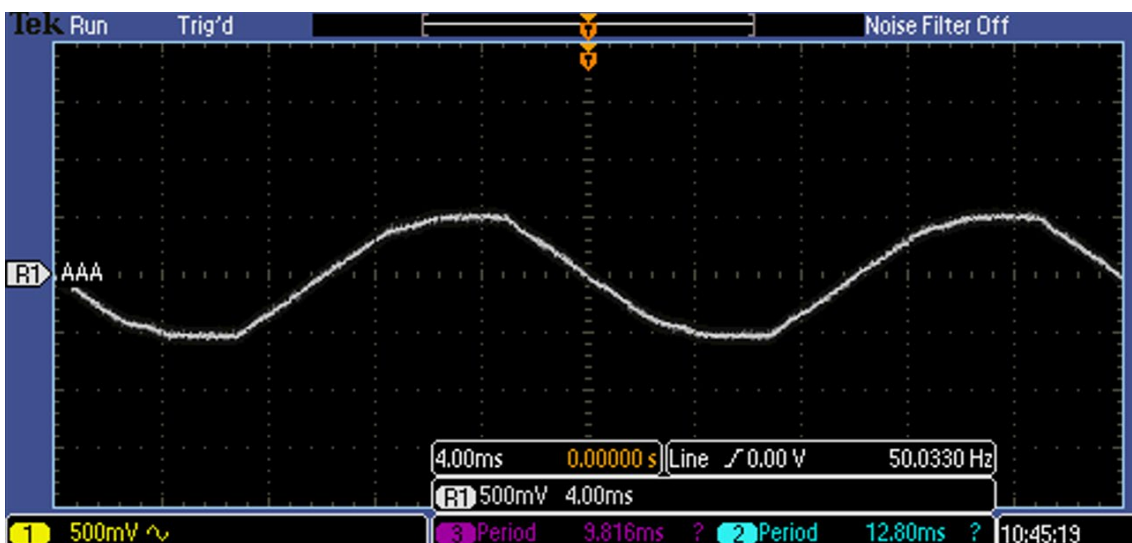


Figura 36 Medición consumo corriente carga resistiva con osciloscopio

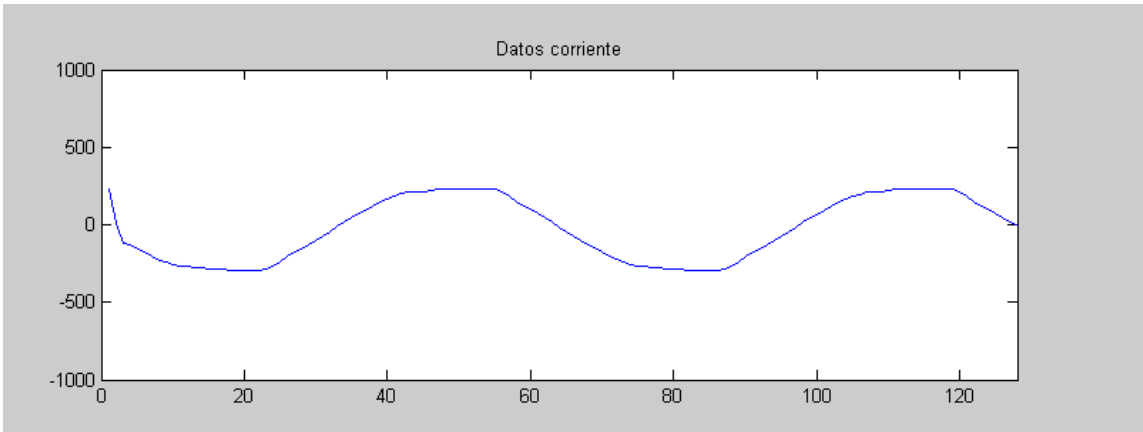


Figura 37 Medición consumo corriente carga resistiva con Desagregador de cargas monofásicas

Con todo lo anteriormente mencionado, se procede a colocar el convertidor de 220V a 12V en la placa y se vuelve a corroborar el correcto funcionamiento de cada una de las etapas. En las figuras 42 y 43 se muestra la placa completa.

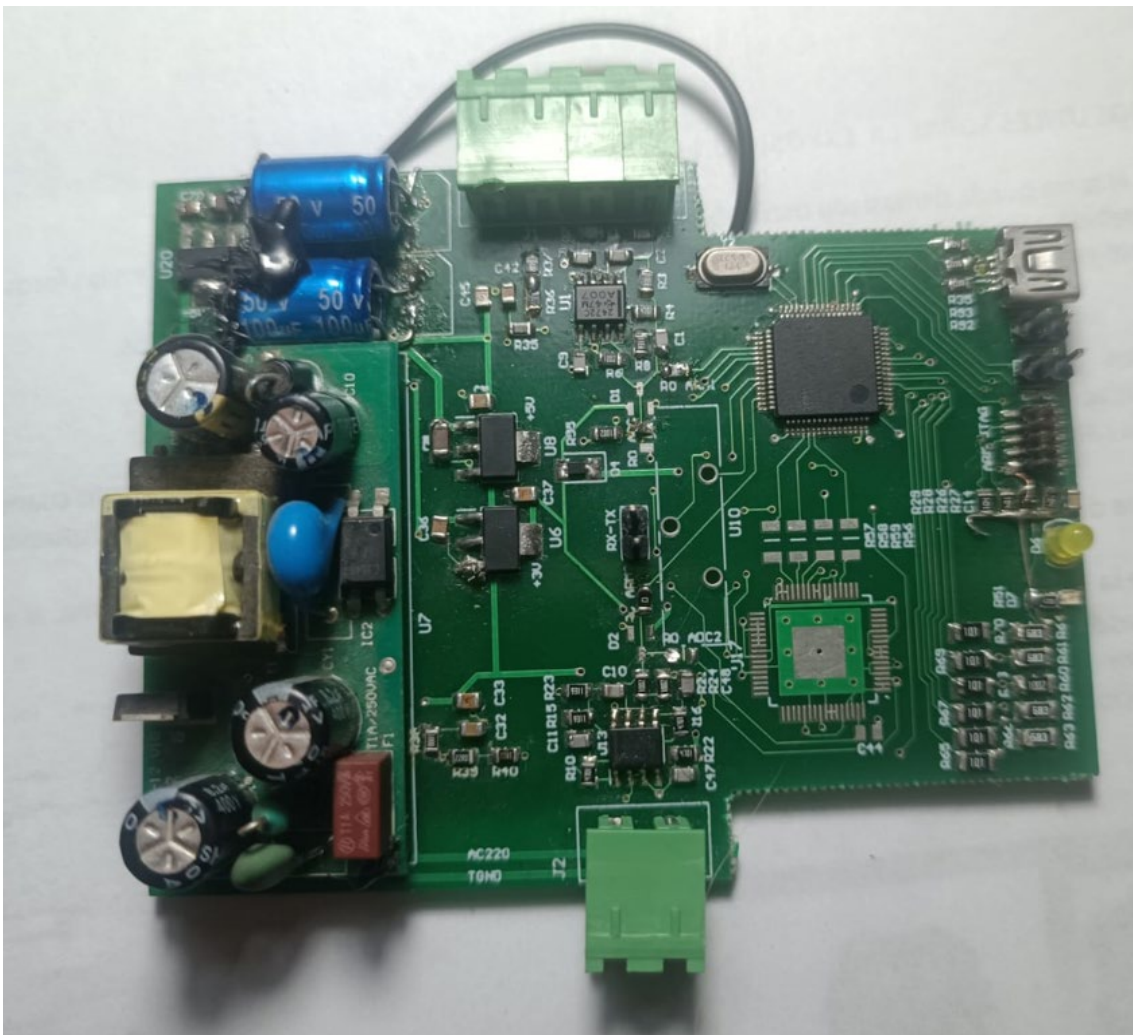


Figura 38 Equipo completo parte superior (top)

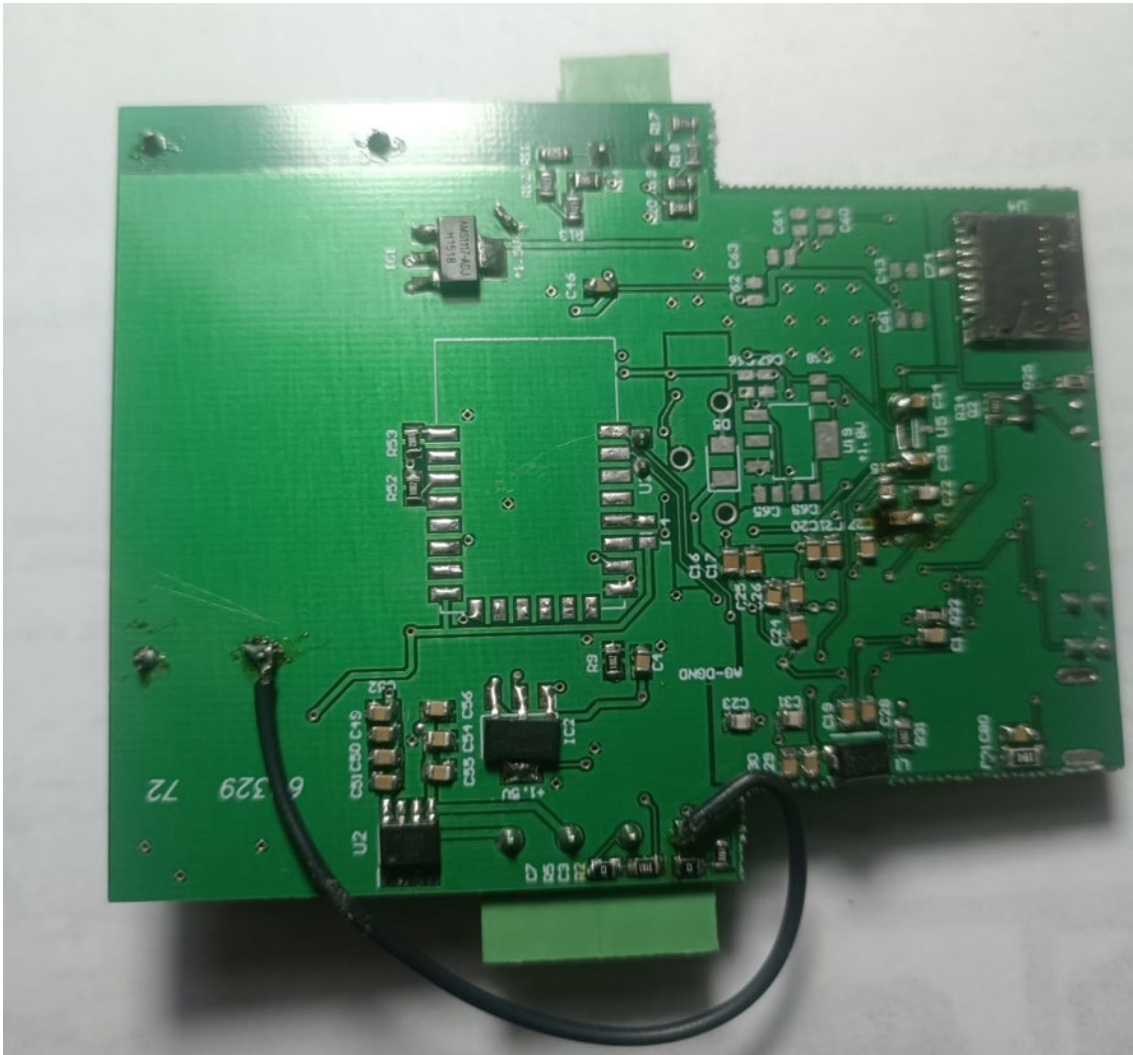


Figura 39 Equipo completo parte inferior (bottom)

## 4.2 Análisis firmware y datos muestreados

En esta sección se detalla el programa desarrollado para monitorear en tiempo real lo que sucede en la línea y el mecanismo para analizar los datos recolectados. Para ello se almacenan los datos en un archivo de texto y se le da la capacidad de poder configurar el chip de forma remota a través de comandos y evitar reprogramar constantemente, mientras se busca desarrollar una versión estable del sistema completo.

Se optó por una primera configuración, con una frecuencia de muestreo de 6400Hz, a través del firmware se calibra el valor de continua, y se procede a recibir hasta el armónico 40 de la señal.

Se realizan pruebas con dos dispositivos diferentes que permitan medir y realizar pruebas, el primero de ellos una pava eléctrica o hervidor, cuya respuesta se espera sea puramente resistiva, por tratarse de una resistencia calefactora, y por otro lado la utilización de una agujereadora con potencia variable, que presenta un comportamiento a lineal. El software permite observar en tiempo real las muestras recolectadas y los armónicos que calcula el microcontrolador, al

realizar varias pruebas se observan armónicos tanto en la tensión como en la corriente. Siendo estos últimos, los que se analizarán en detalle. Otra observación que se rescata de las pruebas es la necesidad de determinar eventos en la red, para poder darle sentido a lo que se visualiza en pantalla. Con eventos nos referimos a la conexión y desconexión de artefactos, que generan variaciones en el valor medio de la corriente, como se observará más adelante. Se reprocesan los datos guardados en el archivo de texto con la ayuda de MatLAB y se calcula la potencia consumida. De esta forma se logra diferenciar el problema únicamente cuando ocurre un evento, esto sería indicativo que se conectó una nueva carga al sistema, y por tratarse de cargas en paralelo, sería equivalente a una suma de potencias.

En un primer ensayo se procede a conectar una pava eléctrica para medir su comportamiento tanto en consumo medio como en el campo espectral.

En la figura 44 se representa en coordenadas Y la corriente media (amperes) y en X el número del paquete recibido, en un estado inicial se observa potencia consumida 0, luego en la zona 1 se observa un flanco ascendente que se condice con el inicio de consumo sobre la carga, para luego continuar con consumo constante, y en la zona 2 se observa un flanco descendente indicativo de desconexión de la carga.

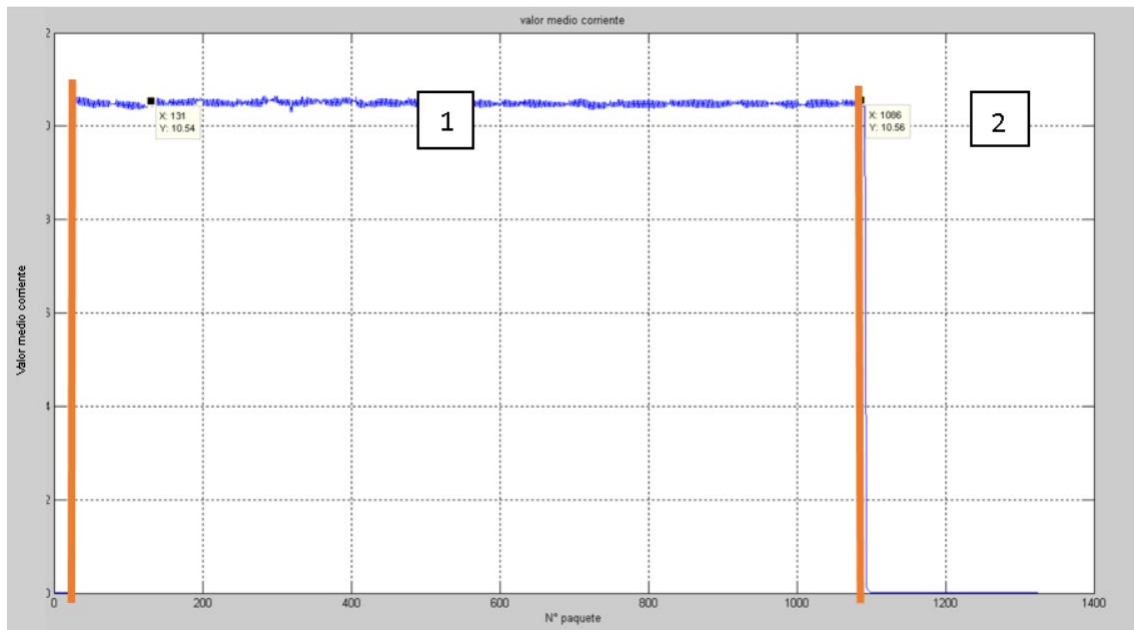


Figura 40 Potencia media medida en pava eléctrica

La figura 45 es una representación en frecuencia del paso desde consumo cero (imagen 45.a) hasta el encendido de la pava eléctrica, llegando a consumo constante, pasando por un transitorio en la imagen 45.b. Luego de la imagen 45.c se obtiene el valor del primer, tercer y quinto armónico que corresponde al sistema en régimen de operación normal.

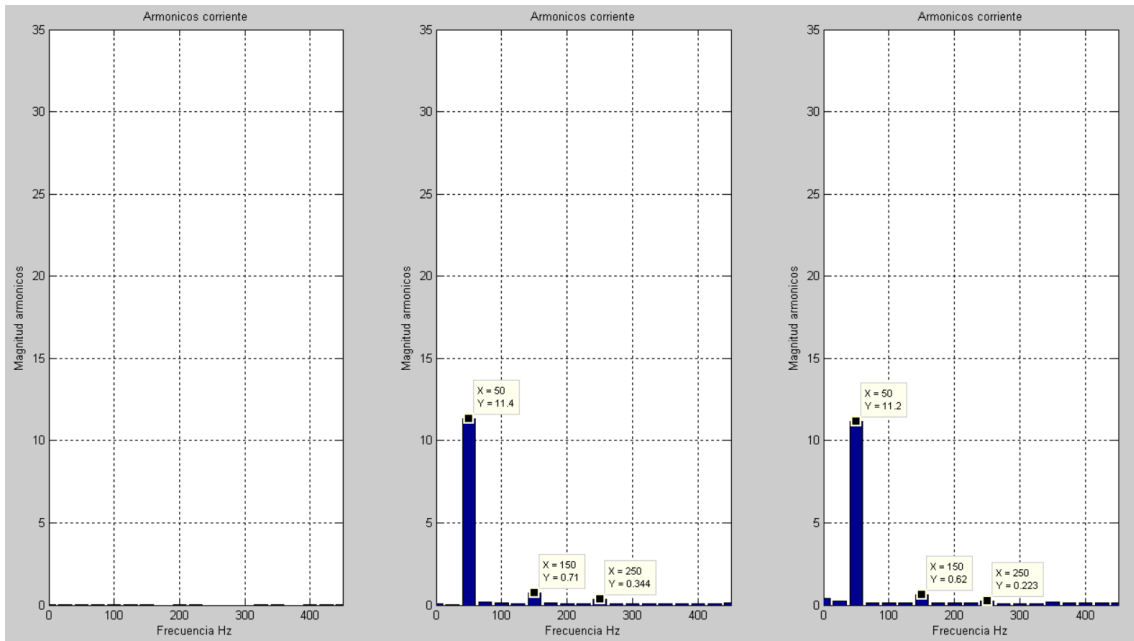


Figura 41 Armónicos encendido pava eléctrica desde consumo cero (imagen a-b-c)

Para un segundo ensayo se utilizó una agujereadora de velocidad variable, en la figura 46 se puede observar que en la zona 1 que no hay consumo, luego en la zona 2 se observa la conexión de la agujereadora, que a diferencia de la pava eléctrica tiene un sobre pico de consumo inicial, producto de la fuerza inicial que debe realizar el equipo para ponerse en funcionamiento. Llegado a un estado de funcionamiento nominal se produce un consumo constante sin alteraciones, por último, en la zona 3 se observa la desconexión del equipo con el flanco descendente y consumo nulo.

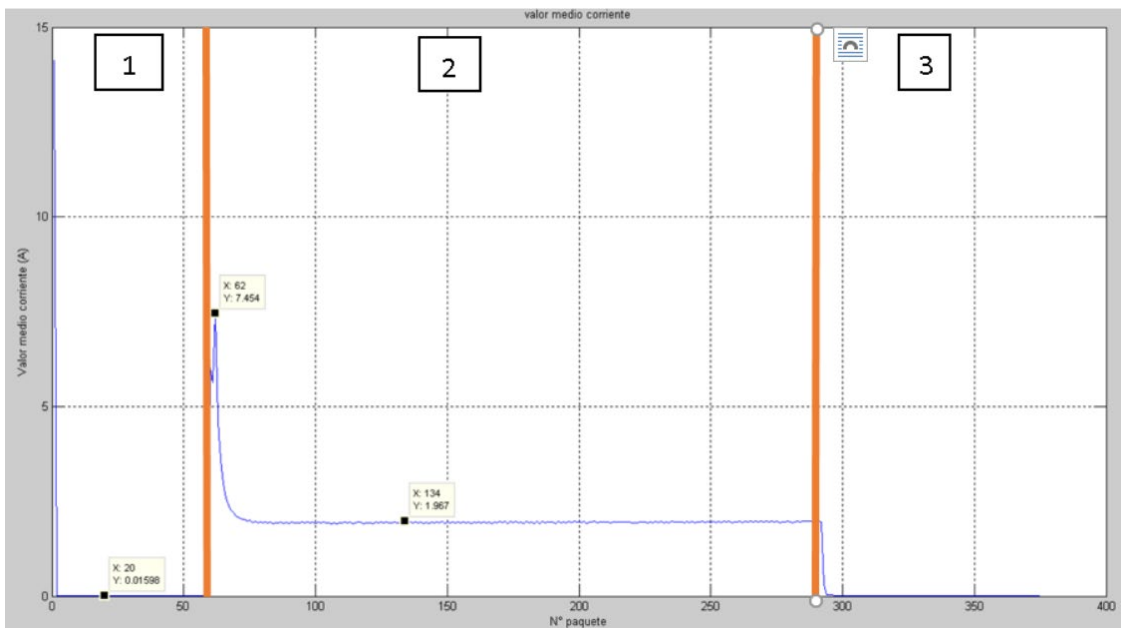


Figura 42 Potencia media medida en agujereadora



En la imagen 47.a se observa un estado inicial apagado, la imagen 47.b es sola una imagen de las varias que componen el transitorio, dado que lleva varios ciclos hasta que entra en modo normal de operación como se puede observar luego en la imagen 47.c.

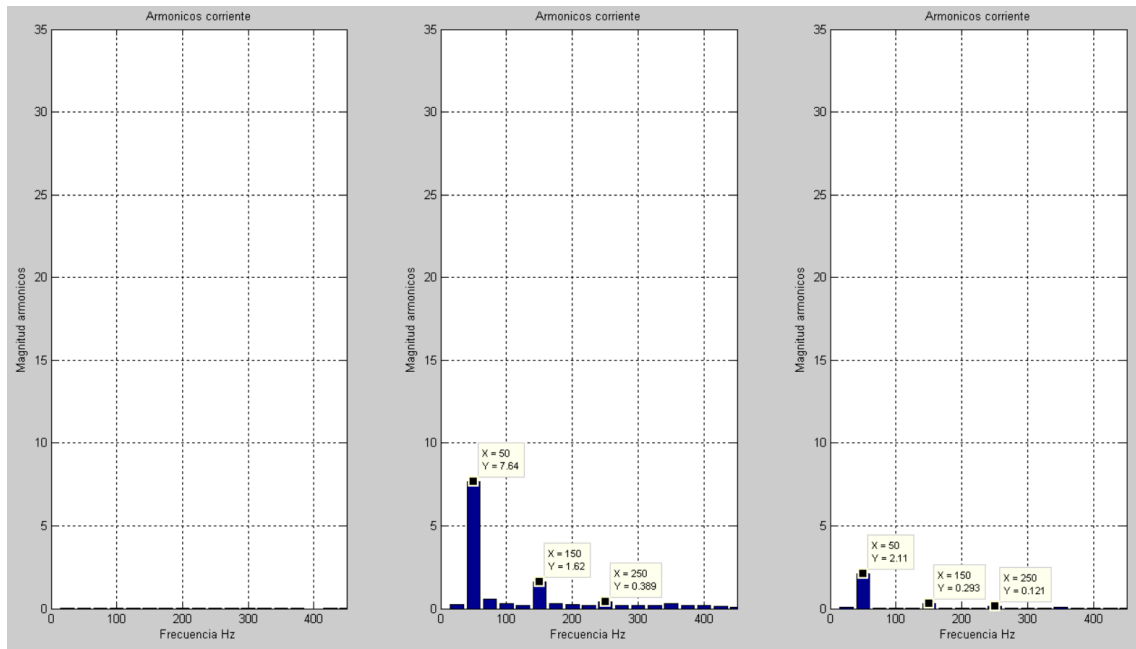


Figura 43 Armónicos encendido agujereadora desde consumo cero (imagen a-b-c)

Por último, se procede a desarrollar un ensayo en donde se utilizará la pava eléctrica y la agujereadora de manera alternada y por momentos en simultaneo, para contrastar los comportamientos individuales analizados en ensayos anteriores. Para un mejor entendimiento de la desagregación de cargas monofásicas se puede observar en la figura 48 una representación de un consumo típico del hogar, en este caso, con solo 2 cargas.

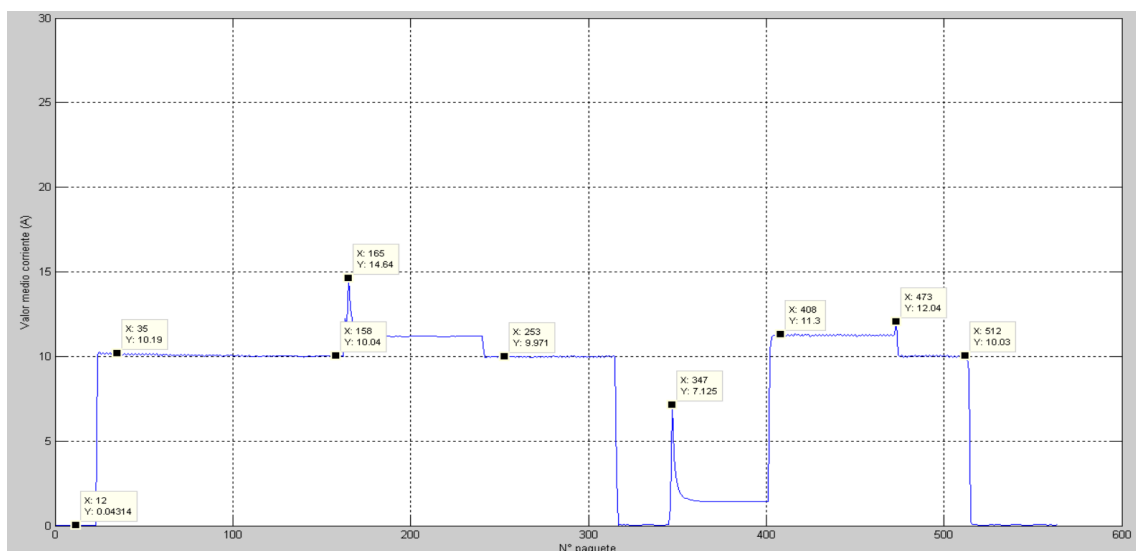


Figura 44 Potencia media medida, agujereadora y pava eléctrica

En la figura 49 se trazan líneas para marcar detalles importantes a observar en la grafica.

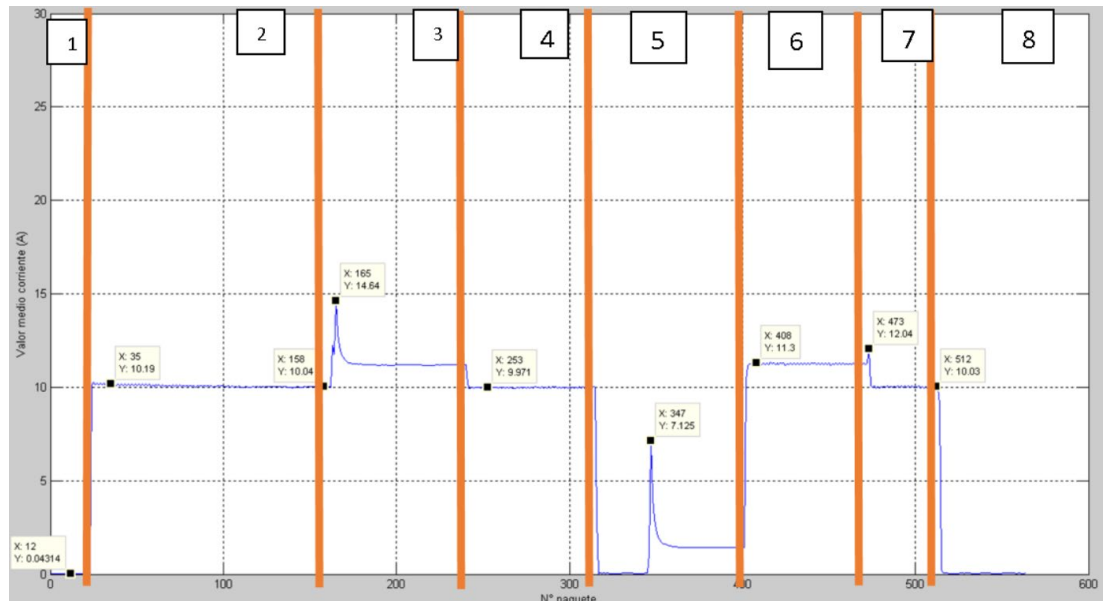


Figura 45 On y Off de agujereadora y pava eléctrica alternados

En la zona 1, estadio inicial sin carga, en la zona 2 con un flanco ascendente podemos ver la conexión de la pava eléctrica. En la zona 3 se produce el agregado de la agujereadora al consumo, se puede distinguir por el exceso de consumo inicial. En la zona 4 se produce el apagado de la agujereadora, para en un estadio 5 apagar la pava eléctrica y tiempo después encender la agujereadora. En la etapa 6 se vuelve a encender la pava eléctrica. Si se lo compara con el estadio 3, se observa el mismo consumo de potencia para un estado normal de consumo. En la instancia 7 se apaga la agujereadora, para luego en la 8 apagar el sistema completo y finalizar con la prueba.

A continuación, se complementan los cambios de consumo generados en el tiempo, visualizado en la figura 49 con su respectivo comportamiento en frecuencia.

- Zona 1(figura 50)

Para el análisis de la zona 1 se capturaron tres paquetes, uno antes del evento (encendido pava eléctrica imagen 50.a), uno en el transitorio (imagen 50.b) y el ultimo en modo normal (imagen 50.c). Se observan los armónicos involucrados y su magnitud, donde se destaca el primer, tercer y quinto armónico.

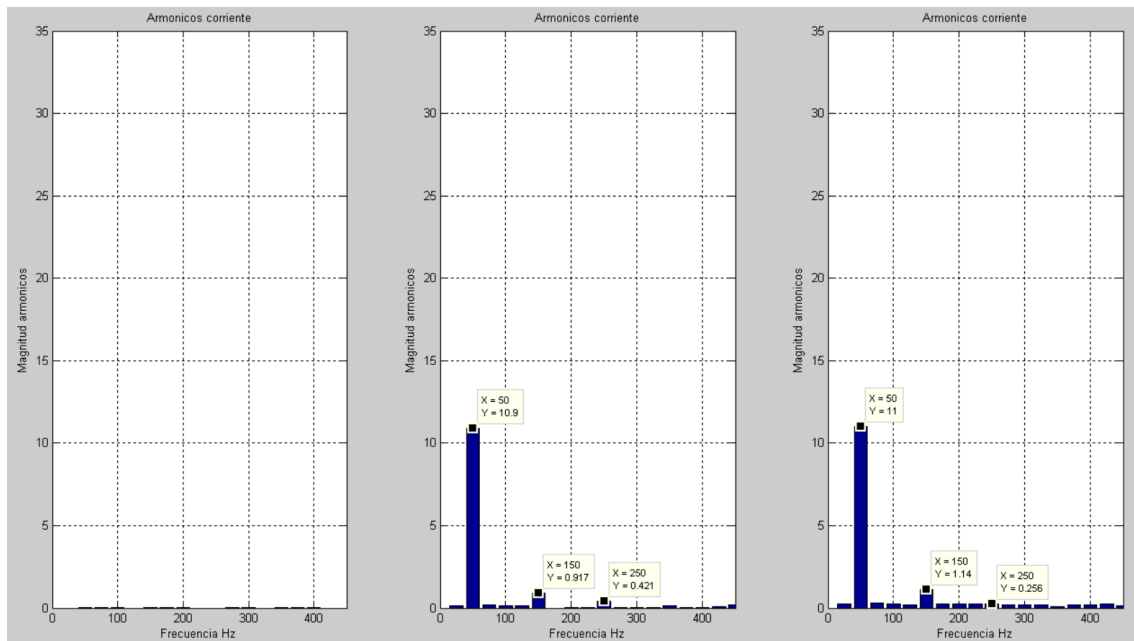


Figura 46 Paso de cero a encendido pava eléctrica (imágenes a-b-c)

- Zona 2 (figura 51 y 52)

Para un mejor análisis, dado el sobrepico que genera el encendido de la agujereadora, se analizan varios paquetes, que van desde un estadio anterior al encendido (imagen 51.a), el transitorio (imágenes 51.b,51.c y 52.d) y en estado normal de operación (imágenes 52.e y 52.f). Dado que la agujereadora es de velocidad variable y que en el arranque debe generar un mayor torque para mover el rotor de la máquina, este no se comporta como una resistencia pura generando un batido en frecuencia como se observa en las imágenes 51.b y 51.c. Llegando a un estado normal de operación, se puede realizar una comparación entre la imagen 51.a y la 52.f. Al observar la magnitud de cada armónico (primero, tercero y quinto), se encuentra el aporte que produce la agujereadora y el consumo normal de operación de la pava eléctrica.

Para el caso de la pava eléctrica:

Primer armónico	10.8A
Tercer armónico	0.851A
Quinto armónico	0.322A

Para el caso de la agujereadora:

Primer armónico	1.3A
Tercer armónico	0.189A
Quinto armónico	0.148A



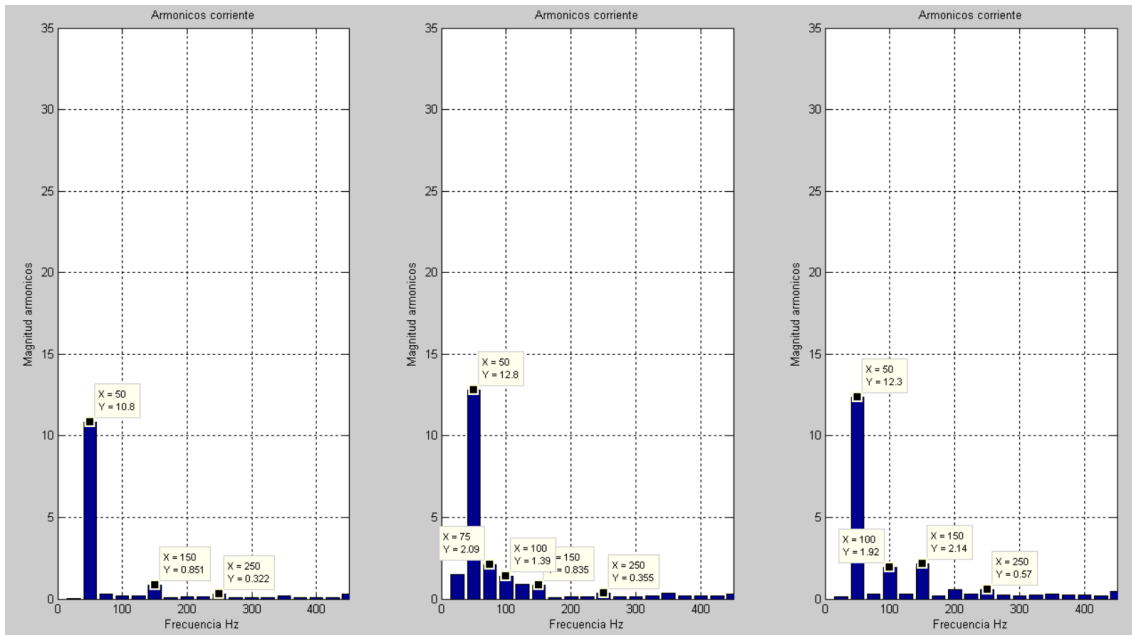


Figura 47 Pava eléctrica + encendido agujereadora (imágenes a-b-c)

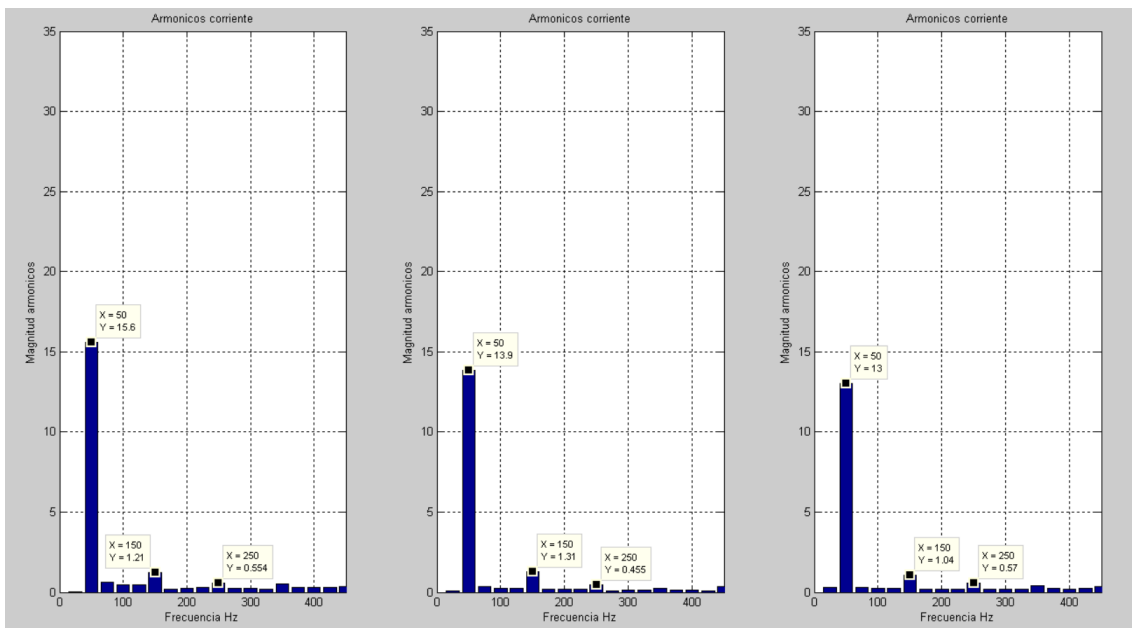


Figura 48 Agujereadora + pava eléctrica (imágenes d-e-f)

- Zona 3 (figura 53)

En la imagen 53.a se encuentra en estado normal de operación, en la imagen 53.b el transitorio y en la imagen 53.c el estado normal de operación. Comparando los valores de los armónicos en la imagen 53.c con el consumo calculado de la figura 52, encontramos la misma amplitud de los armónicos, algo que era de esperarse.

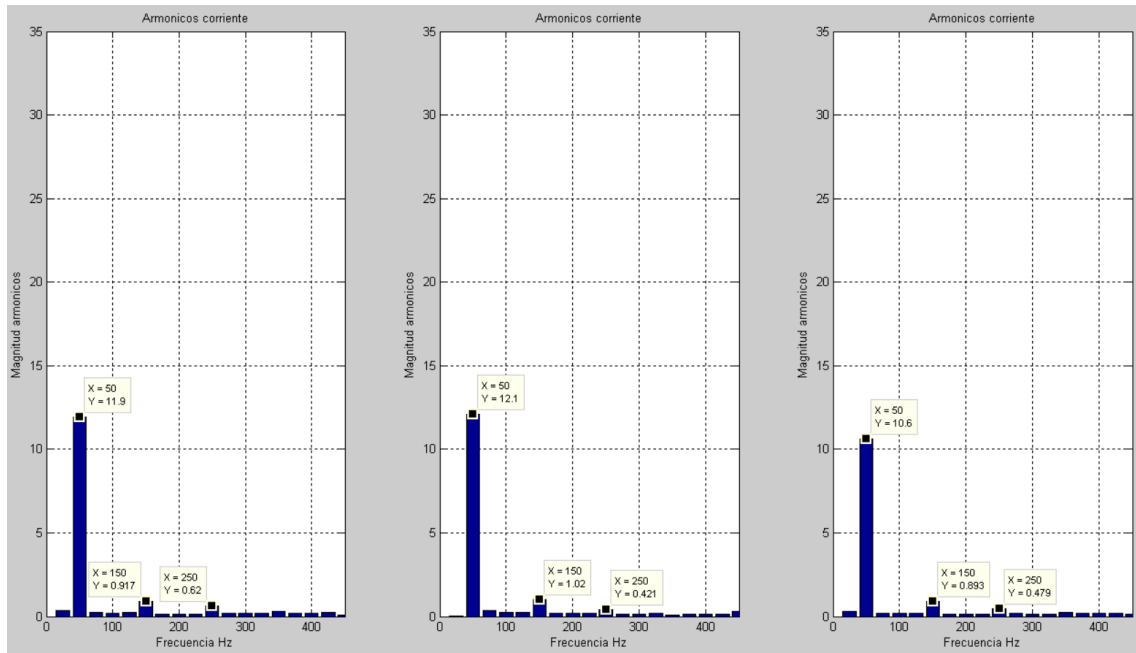


Figura 49 Apagado agujereadora, pava eléctrica encendida (imágenes a-b-c)

- Zona 4 (figura 54)

Se observa en la imagen 54.a, un estado normal de operación, en la imagen 54.b el transitorio que genera varios armónicos y en la imagen 54.c el sistema apagado.

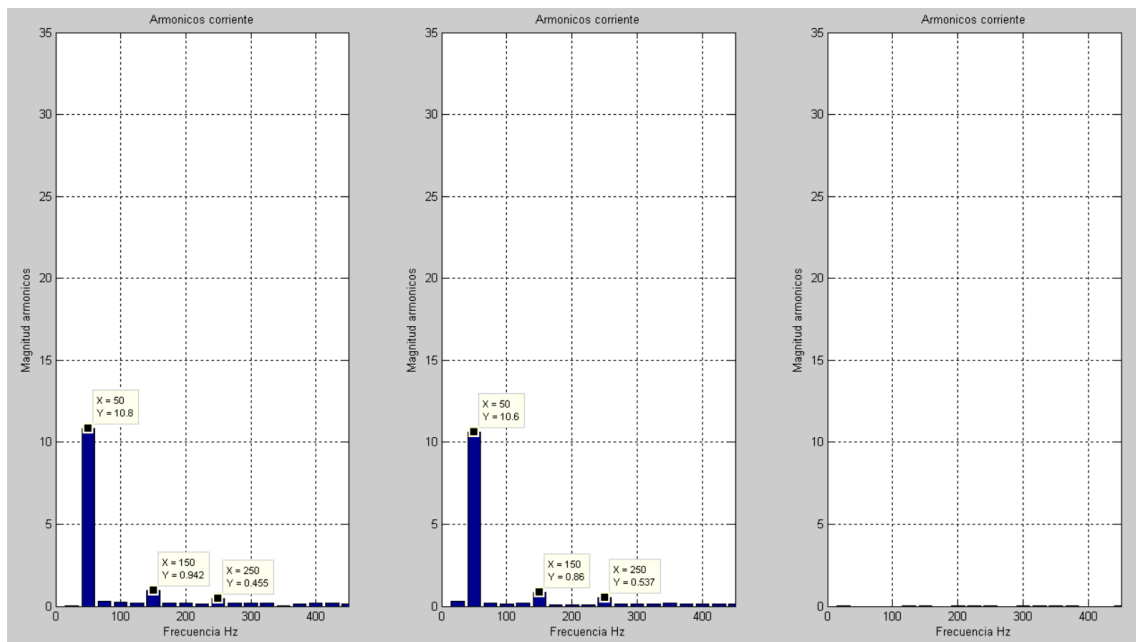


Figura 50 Apagado pava eléctrica, consumo cero (imágenes a-b-c)

- Zona 5 (figura 55 y 56)

En la imagen 55.a tenemos un estado inicial de apagado, en la imagen 55.b un transitorio, para luego desde la imagen 55.c hasta la 56.g una estabilización del

consumo de la agujereadora, disminuyendo el valor de los armónicos. Esto representa un mayor consumo de corriente al inicio para mover el rotor, y luego este decae hasta un estado normal de operación.

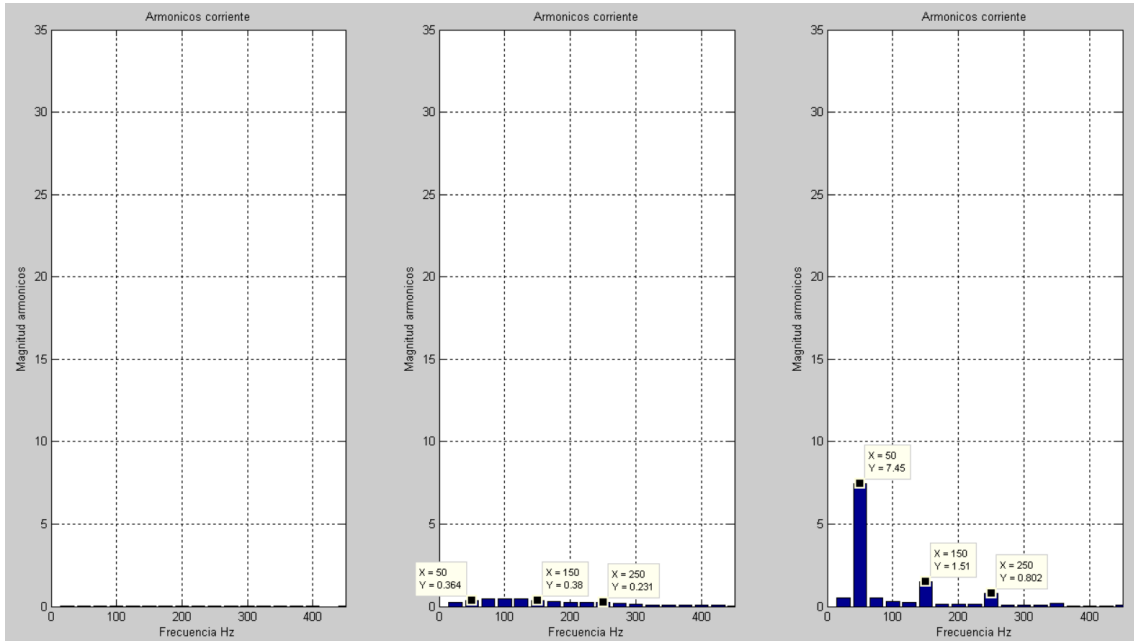


Figura 51 Encendido agujereadora, desde consumo cero (imágenes a-b-c)

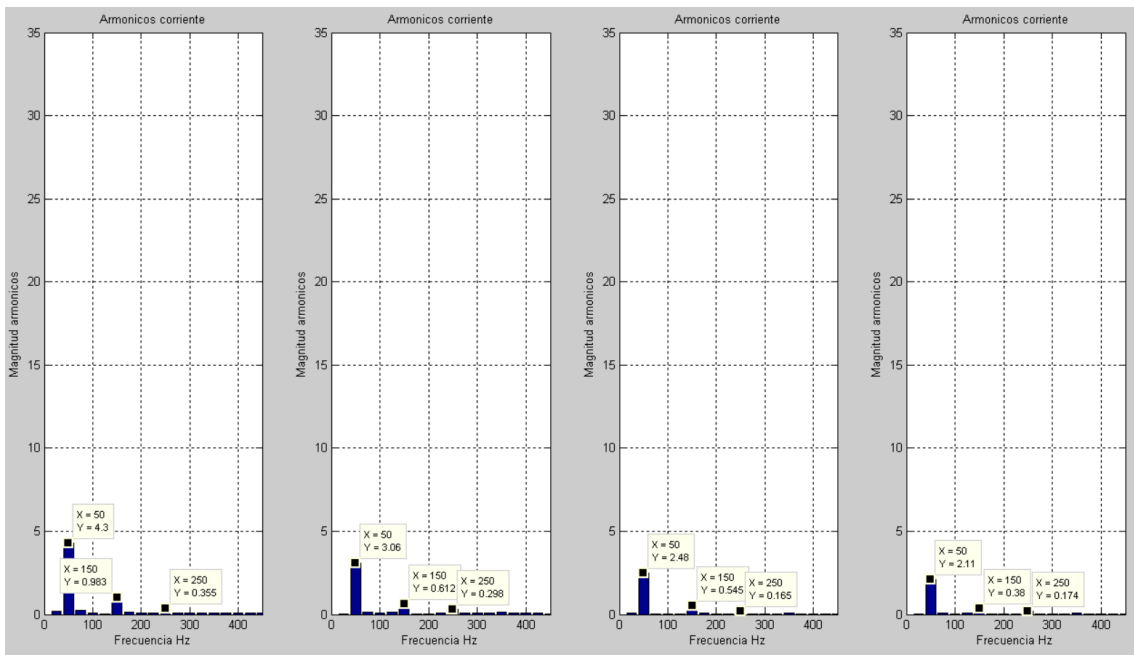


Figura 52 Agujereadora estabilización de consumo (imágenes d-e-f-g)

- Zona 6 (figura 57)

Se observa imagen 57.a estado normal de operación agujereadora, en la imagen 57.b el transitorio de agregar el consumo de la pava eléctrica, y en la imagen 57.c el modo normal de operación, es de notar que condice el consumo de ambos equipos con lo observado en la figura 53.c.

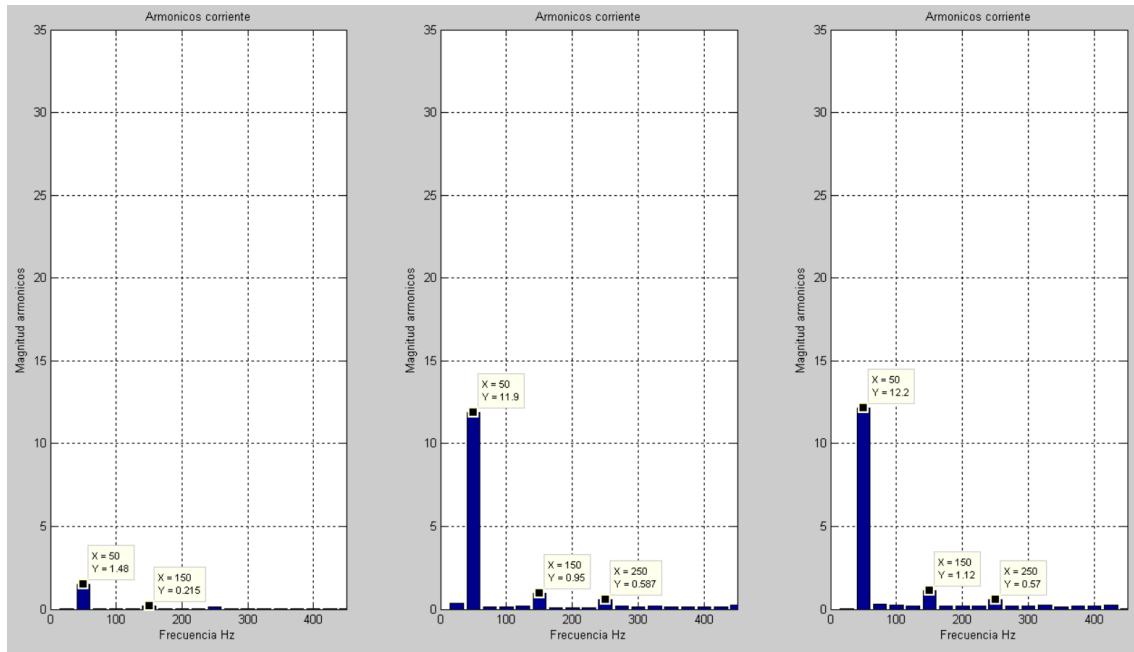


Figura 53 Agujereadora + encendido pava eléctrica (imágenes a-b-c)

- Zona 7 (figura 58)

Se observa en la imagen 58.a estado normal de operación de la agujereadora y la pava eléctrica, en imagen 58.b el transitorio, y en la imagen 58.c el consumo normal de operación de la pava eléctrica. Se vuelven a calcular los consumos para ambos equipos, antes y después de la desconexión, sin contemplar el transitorio.

- Para el caso de la pava eléctrica:

Primer armónico	10.9A
Tercer armónico	0.967A
Quinto armónico	0.512A

- Para el caso de la agujereadora:

Primer armónico	1.3A
Tercer armónico	0.203A
Quinto armónico	0.108A

- Del cuadro se desprende que la pava eléctrica mantiene su valor del primer armónico, pero a medida que ésta eleva su temperatura, aumentan el tercer y quinto armónico. Por otro lado, la agujereadora al ser de velocidad variable, esta cambia su consumo al variar la velocidad, cuanto mayor la velocidad, menor es el consumo, dado que la fricción disminuye.

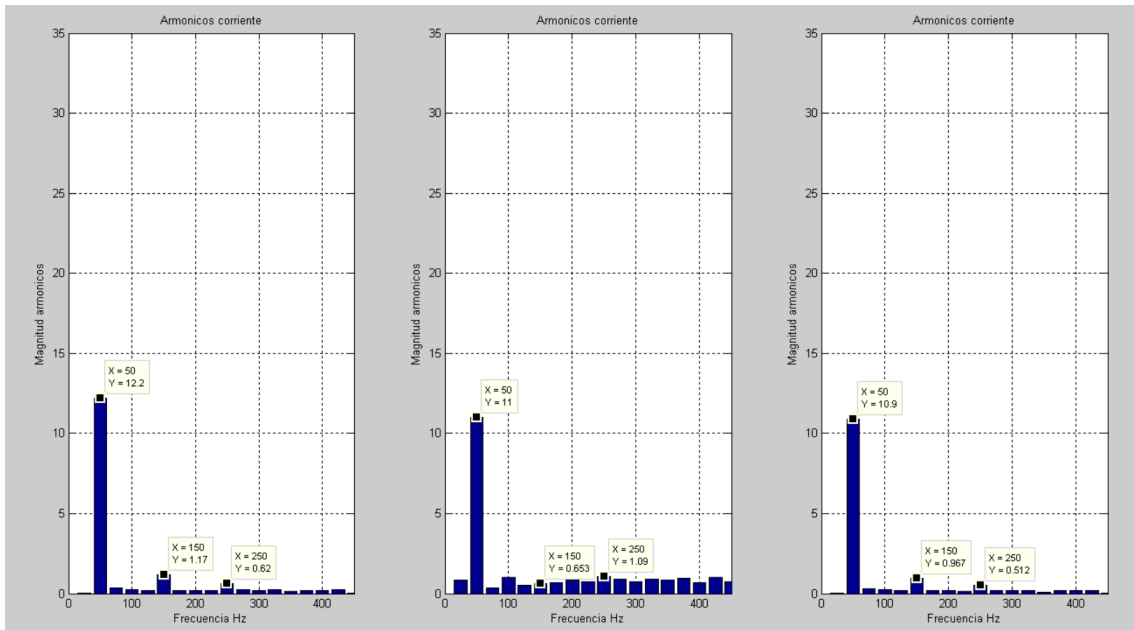


Figura 54 Desconexión agujereadora (imágenes a-b-c)

- Zona 8 (figura 59)

En la imagen 59.a se observa el estado normal funcionamiento pava eléctrica, en la imagen 59.b el transitorio y luego en la imagen 59.c en estado apagado.

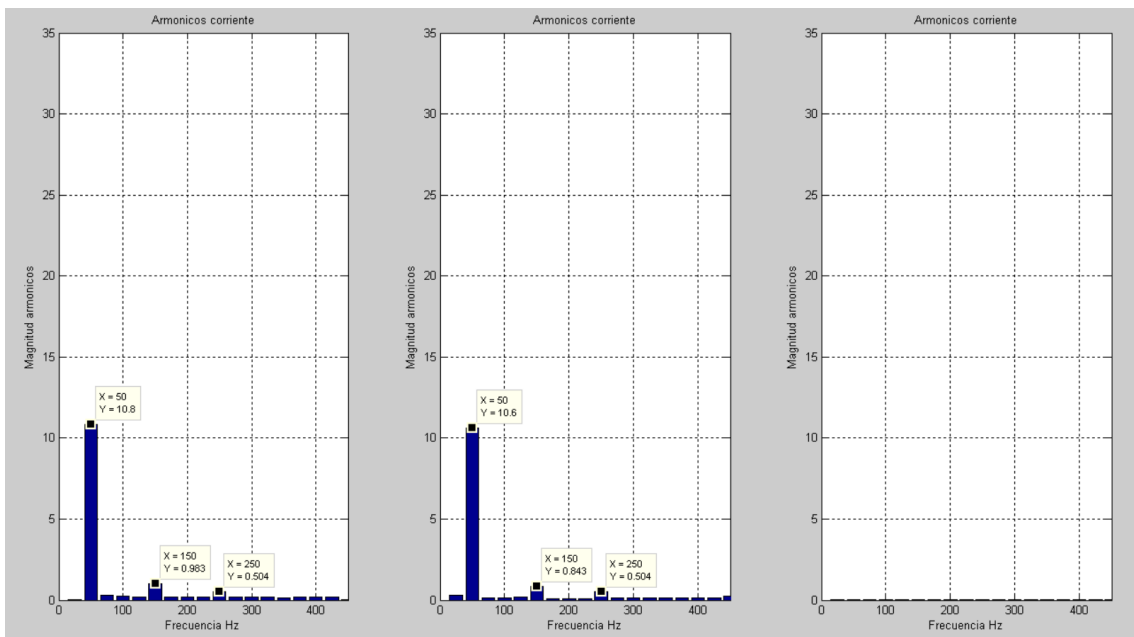


Figura 55 Desconexión pava eléctrica, hacia consumo cero (imágenes a-b-c)

## 5 Conclusión

El sistema desarrollado logro cubrir las necesidades y expectativas previas, en este contexto las mediciones realizadas fueron interesantes y destacan la potencialidad del equipo, dado que permite analizar los dispositivos en frecuencia y no solo en el tiempo. Esto permitirá planificar nuevos algoritmos que realicen comparaciones duales entre la potencia consumida, que es analizada en el tiempo, y el comportamiento en frecuencia que deviene de trabajar con cargas que no son puramente resistivas, como es el caso de la agujereadora, donde el motor es resistivo, pero al variar la velocidad, el contacto con los carbones y el rotor genera perturbaciones que son apreciables.

El adquisidor puede caracterizar la red eléctrica monofásica con una precisión similar a la de otros dispositivos comerciales, pero cuenta con una tasa de muestreo más elevada, lo cual amplía el rango de aplicaciones posibles. Además, es un sistema modular con posibilidades de ampliación de prestaciones. Esto ofrece al laboratorio un sistema muy versátil donde se lo puede utilizar en diversos proyectos relacionados con la calidad de energía. Las características funcionales que se desprenden luego de las pruebas son:

- Sensor de tensión hasta 400V, con una resolución de 0.1953V en función del ADC actual.
- Sensor de corriente de 0 a 400A máximo, con una resolución de 0.1953A en función del ADC actual.
- Frecuencia de muestreo 6400Hz.

Considerando los resultados obtenidos y las diferentes problemáticas que surgieron a lo largo de la implementación, se identificaron algunas cuestiones que podrían mejorarse en caso de diseñarse un nuevo prototipo:

- Implementación de una fuente switching con tamaño más reducido.
- En cuanto al regulador de -5V se podría utilizar un convertidor que pueda entregar más corriente para utilizar otros tipos de pinza.
- En lugar de utilizar una fuente de 3V3 y un regulador de 3V para la referencia del ARM, se podría implementar todo con una buena fuente de precisión.
- Se utilizaron 2 reguladores para generar la referencia de 1.5V de los amplificadores operacionales, con un único componente era suficiente para suplir el requerimiento.
- Agregar fuentes y chips de protección como opto-aisladores para proteger al usuario final.

Muchas de las decisiones se tomaron en función de los recursos que había en su momento, cabe mencionar el proyecto comenzó apenas finalizada la pandemia y los componentes disponibles eran escasos.

Quedaron por desarrollar algunas características:

- Grabar los datos en una tarjeta de memoria SSD, se encuentra implementado el hardware y el firmware, pero no se llegó a resultados óptimos, queda por depurar el sistema y realizar más pruebas.
- Envío de datos a través del módulo WI-FI. Los módulos comerciales trabajan a través de puerto serie, al igual que la comunicación USB que se implementa actualmente, queda pendiente el agregado de librería con comandos hacía el modulo, se debería modificar la trama del paquete, para trabajar con MQTT, uno de los protocolos en auge en lo que concierne a los dispositivos inteligentes, pero al no ser encriptado no posee seguridad frente a los que se transmite.

Al final del proyecto se logró obtener conocimiento sobre el diseño de PCB, adquisición de señales de la red, tipos de comportamientos de distintas cargas, perturbaciones que se generan en la red, propias de los dispositivos y otras por cómo es generada y distribuida la energía en la red eléctrica.

## Bibliografía

- Math H. J. Bollen and Irene Yu-hua Gu “Signal processing of power quality disturbances”
- Analog Devices MT-101 “Decoupling Techniques”
- Analog Devices MT-031 “Grounding Data Converters and Solving the Mystery of ‘AGND’ and ‘DGND’”
- <https://www.casadomo.com/2019/01/10/edf-energy-howz-unen-dar-servicio-monitorizacion-personas-mayores> (Howz)
- <https://wibeee.com/wibeee-home-shop/> (Wibee)
- <https://www.informetis.com/en/enterprise/energy-disaggregation/> (informetis)
- Tesis de grado “Monitoreo no intrusivo de cargas electricas (NILM)” universidad del uruguay (Franco Marchesoni, Camilo Mariño, Elias Masquil)
- ESPproMon Smart Meter & Control App – Really smart IOT Energy Meters with Peacefair Pzem-004T and ESP8266 (peacefairapp.com) (peacefair)
- PZEM-004T-Datasheet-user-manual (innovators-guru.com) (hardware peacefair)
- Donato et al, Revista Ingeniería Eléctrica marzo 2020



## Lista de figuras

Figura 1 Valor medio de potencia consumida por diferentes electrodomésticos (Hart 1992).....	7
Figura 2 Clasificación básica de algoritmos NILM basada en la frecuencia de muestreo .....	8
Figura 3 Diagrama en bloques proyecto.....	13
Figura 4 Filtro antialiasing y adecuador de señales de tensión .....	16
Figura 5 Primera etapa filtro y adecuador de tensión.....	16
Figura 6 Análisis cadena de avance rama negativa ( $G-$ ) .....	17
Figura 7 Análisis realimentación negativa ( $H-$ ) .....	17
Figura 8 Ganancia cadena avance rama positiva ( $G1+$ ).....	18
Figura 9 Ganancia cadena avance rama positiva, señal de continua ( $G2+$ ) .....	18
Figura 10 Segunda etapa filtro y adecuador de tensión.....	19
Figura 11 Análisis realimentación positiva ( $H+$ ).....	20
Figura 12 Análisis Cadena de avance positiva .....	21
Figura 13 Señal de entrada 800VPP (imagen izquierda) y salida de 0 a 3V (imagen derecha).....	22
Figura 14 Transferencia sistema completo .....	23
Figura 15 Filtro y adecuador de corriente.....	23
Figura 16 Circuito primer amplificador operacional de corriente .....	24
Figura 17 Análisis cadena de avance de la entrada negativa.....	24
Figura 18 Análisis realimentación negativa.....	25
Figura 19 Transferencia cadena de avance rama positiva ( $G1+$ ).....	26
Figura 20 Transferencia cadena de avance rama positiva señal continua ( $G2+$ ).....	26
Figura 21 Entrada $\pm 1V$ (imagen izquierda) salida 0 a 3V (imagen derecha).....	27
Figura 22 Transferencia completa del sistema.....	27
Figura 27 Circuito alimentación microcontrolador ARM.....	33
Figura 28 Circuito configuración pines PORT A microcontrolador ARM .....	34
Figura 29 Circuito configuración pines PORT B microcontrolador ARM .....	34
Figura 30 Circuito memoria SSD .....	35
Figura 31 Circuito puerto USB.....	35
Figura 32 Circuito conector JTAG para programación y debug.....	36
Figura 33 PCB 2 layers .....	38
Figura 34 PCB top layer .....	39
Figura 35 PCB botton layer.....	39
Figura 36 PCB vista 3D superior.....	40
Figura 37 PCB vista 3D parte inferior.....	40
Figura 38 Medición tensión red eléctrica con osciloscopio.....	46
Figura 39 Medición tensión red eléctrica con Desagregador de cargas monofásicas..	46
Figura 40 Medición consumo corriente carga resistiva con osciloscopio.....	46
Figura 41 Medición consumo corriente carga resistiva con Desagregador de cargas monofásicas .....	47
Figura 42 Equipo completo parte superior (top).....	47
Figura 43 Equipo completo parte inferior (bottom).....	48
Figura 44 Potencia media medida en pava eléctrica .....	49
Figura 45 Armónicos encendido pava eléctrica desde consumo cero (imagen a-b-c)..	50
Figura 46 Potencia media medida en agujereadora.....	50

Figura 47 Armónicos encendido agujereadora desde consumo cero (imagen a-b-c)...	51
Figura 48 Potencia media medida, agujereadora y pava eléctrica.....	51
Figura 49 On y Off de agujereadora y pava eléctrica alternados .....	52
Figura 50 Paso de cero a encendido pava eléctrica (imágenes a-b-c).....	53
Figura 51 Pava eléctrica + encendido agujereadora (imágenes a-b-c).....	54
Figura 52 Agujereadora + pava eléctrica (imágenes d-e-f) .....	54
Figura 53 Apagado agujereadora, pava eléctrica encendida (imágenes a-b-c).....	55
Figura 54 Apagado pava eléctrica, consumo cero (imágenes a-b-c).....	55
Figura 55 Encendido agujereadora, desde consumo cero (imágenes a-b-c).....	56
Figura 56 Agujereadora estabilización de consumo (imágenes d-e-f-g).....	56
Figura 57 Agujereadora + encendido pava eléctrica (imágenes a-b-c).....	57
Figura 58 Desconexión agujereadora (imágenes a-b-c).....	58
Figura 59 Desconexión pava eléctrica, hacia consumo cero (imágenes a-b-c).....	58

## Lista de ecuaciones

Ecuación 1 Transferencia cadena de avance rama negativa .....	17
Ecuación 2 Transferencia cadena de avance rama negativa obtenida .....	17
Ecuación 3 Transferencia realimentación negativa .....	17
Ecuación 4 Transferencia realimentación negativa obtenida.....	17
Ecuación 5 Ganancia del primer Amplificador operacional .....	18
Ecuación 6 Ganancia del primer Amplificador operacional obtenida.....	19
Ecuación 7 Ganancia del primer Amplificador operacional señal de referencia .....	19
Ecuación 8 Transferencia realimentación negativa .....	19
Ecuación 9 Transferencia realimentación negativa obtenida.....	19
Ecuación 10 Transferencia realimentación positiva.....	20
Ecuación 11 Transferencia realimentación positiva obtenida .....	20
Ecuación 12 Realimentación total.....	20
Ecuación 13 Transferencia cadena de avance positiva .....	21
Ecuación 14 Ganancia segundo amplificador operacional.....	21
Ecuación 15 Ganancia segundo amplificador operacional obtenida .....	22
Ecuación 16 Ganancia total del sistema obtenida .....	22
Ecuación 18 Transferencia cadena de avance negativa .....	24
Ecuación 19 Transferencia cadena de avance negativa obtenida .....	25
Ecuación 20 Transferencia realimentación negativa .....	25
Ecuación 21 Transferencia realimentación negativa obtenida.....	25
Ecuación 22 Ganancia primer amplificador operacional.....	26
Ecuación 23 Ganancia primer amplificador operacional obtenida .....	26
Ecuación 24 Ganancia total filtro y adecuador de corriente .....	27