

Universidad Tecnológica Nacional

Proyecto Final

Analizador de calidad energética con visualización remota

Autores:

- *Gareis, Matías Alejandro*
- *Orcellet, Rodrigo Gastón*

Director:

- *Jerichau, Alejandro*

*Proyecto final presentado para cumplimentar los requisitos académicos
para acceder al título de Ingeniero Electrónico*

en la

Facultad Regional Paraná

Diciembre de 2023

Declaración de autoría:

Nosotros declaramos que el Proyecto Final “Analizador de calidad energética con visualización remota” y el trabajo realizado son propios. Declaramos:

- Este trabajo fue realizado en su totalidad, o principalmente, para acceder al título de grado de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Paraná.
- Se establece claramente que el desarrollo realizado y el informe que lo acompaña no han sido previamente utilizados para acceder a otro título de grado o pre-grado.
- Siempre que se ha utilizado trabajo de otros autores, el mismo ha sido correctamente citado. El resto del trabajo es de autoría propia.
- Se ha indicado y agradecido correctamente a todos aquellos que han colaborado con el presente trabajo.
- Cuando el trabajo forma parte de un trabajo de mayores dimensiones donde han participado otras personas, se ha indicado claramente el alcance del trabajo realizado.

Firmas:

-
-
-

Fecha:

Agradecimientos:

A nuestro director de proyecto, Ing. Alejandro Jerichau, por brindarnos todas las herramientas necesarias a lo largo del proyecto. También, por gestionar y motivar la instalación de nuestro equipo en la facultad.

A nuestras familias, por su apoyo y soporte a lo largo de todos estos años brindándonos todos los recursos necesarios para poder dedicarnos de manera exclusiva a nuestro desarrollo profesional.

A nuestros amigos, por el acompañamiento y apoyo a lo largo de toda la carrera. Así como también su constante predisposición a colaborar en los aspectos que lo requeríamos.

A nuestros docentes, en especial a los ingenieros José Frund y Maximiliano Sonailon por brindarnos recomendaciones y sugerencias de gran valor durante el desarrollo del proyecto.

A la secretaría de TICs de la facultad, por suministrar una red WiFi exclusiva para el funcionamiento del equipo.

Gareis, Matías Alejandro
Orcellet, Rodrigo Gastón

Universidad Tecnológica Nacional

Abstract

Facultad Regional Paraná

Ingeniero en Electrónica

Analizador de calidad energética con visualización remota

Gareis, Matías Alejandro

Orcellet, Rodrigo Gastón

Abstract:

This article describes the development of a Three Phase Power Quality Analyzer with Remote Visualization which was our Final Year Electronic Engineering Project. It includes the design and construction of four active Rogowski coils for current measurement, implementation of Digital Signal Processing (DSP) firmware using a Cortex-M4 based STM32F411CE microcontroller for Power Quality Analysis. Remote Display was achieved using a System on a Chip Espressif ESP32 for data transmission via MQTT 3.1.1 Protocol, EMQX Serverless MQTT Broker and Human-Machine Interface (HMI) Desktop Qt Application with multiple visualization tabs. The result was an instrument with 2% measurements accuracy, and functionality on par with benchmark commercial devices. Finally, a fully operative prototype was installed on the main distribution board of the faculty building for testing.

Keywords: Digital Signal Processing– Measurement – Rogowski Coil

Resumen:

El presente informe describe el desarrollo de un analizador de calidad energética trifásico con visualización remota, el cual fue nuestro proyecto final de ingeniería electrónica. Este incluye el diseño y la construcción de cuatro bobinas Rogowski para medición de corriente y la implementación de un firmware de procesamiento digital de señales para realizar el análisis de calidad energética utilizando un microcontrolador STM32F411CE el cual posee un núcleo Cortex-M4. La visualización remota se logró utilizando un System on a Chip Espressif ESP32 para transmitir los datos mediante protocolo MQTT 3.1.1 y una aplicación de escritorio desarrollada en QT como interfaz humano-maquina. El resultado fue un instrumento con una precisión del 2% en las mediciones y con una funcionalidad a la altura de productos de marcas referentes del sector. Finalmente, un prototipo totalmente funcional fue instalado en el tablero de distribución principal del edificio de la facultad para ser testeado.

Palabras Clave: Bobina Rogowski – Medición – Procesamiento Digital de Señales

Índice

Capítulo 1: Introducción	14
Capítulo 2: Desarrollo	16
2.1 Medición de corriente	17
2.1.1 Transformador de corriente de núcleo solido.....	17
2.1.2 Transformador de corriente de núcleo partido	19
2.1.3 Bobina Rogowski	20
2.1.4 Principio de funcionamiento de las bobinas Rogowski	20
2.1.5 Diseño y construcción de las bobinas Rogowski	23
2.1.6 Ensayo de la bobina Rogowski fabricada	27
2.1.7 Construcción final	29
2.2 Medición de tensión	37
2.2.1 Distorsión de la señal debido al transformador.....	38
2.2.2 Solución planteada	39
2.3 Adaptación de señales	41
2.3.1 Circuito de adaptación de sensores de corriente.....	41
2.3.2 Circuito de adaptación de transformadores de tensión.....	41
2.3.3 Comparadores para medición de frecuencia	43
2.3.3 Referencias de tensión	46
2.4 Microcontrolador STM32F411CEU6.....	48
2.4.1 Diagrama de flujo del código desarrollado.....	49
2.4.2 Idea general del código	51
2.4.3 Muestreo de las señales	51
2.4.4 Medición de frecuencia y desfasaje.....	52
2.4.5 Procesamiento de las señales	53
2.4.6 Comunicación I ² C con ESP32	53
2.5 ESP32	55
2.5.1 Diagrama de flujo del código desarrollado.....	56
2.5.2 Idea general del código	58
2.5.3 Memoria microSD.....	59
2.5.4 Bot de Telegram.....	59
2.6 Broker MQTT.....	61
2.7 Interfaz de usuario – Dashboard	63

2.7.1 Ventana principal. Datos generales	63
2.7.2 Datos completos	65
2.7.3 Formas de onda.....	66
2.7.4 Diagramas fasoriales	68
2.7.5 Espectro frecuencial	68
2.7.6 Herramientas adicionales	70
2.7.7 Menú.....	71
2.8 Esquema final.....	73
2.8.1 Diseño circuito final y PCB.....	73
2.8.2 Testeo y calibración	76
2.8.3 Gabinete	77
2.8.4 Montaje final	78
Capítulo 3: Resultados.....	81
3.1 Valores RMS de tensión y corriente	82
3.2 Formas de onda	83
3.3 Gráfico de fasores	86
3.4 Índice de distorsión armónica.....	87
Capítulo 4: Análisis de costos	89
Capítulo 5: Discusión y conclusión	91
5.1 Resumen de objetivos planteados y resultados alcanzados	91
5.2 Análisis de la competencia	91
5.3 Conclusiones.....	93
Capítulo 6: Referencias	95

Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama en bloques del proyecto	16
Figura 2 – Transformador de corriente de núcleo sólido	18
Figura 3 - Transformador de corriente de núcleo partido	19
Figura 4 – Bobina Rogowski comercial.....	20
Figura 5 - Esquema bobina Rogowski	21
Figura 6 - Etapas de construcción de la bobina Rogowski	24
Figura 7 - Circuito integrador	25
Figura 8 - Esquema para ensayar bobina Rogowski	27
Figura 9 - Comparativa N°1 entre bobinas Rogowski	28
Figura 10 - Comparativa N°2 entre bobinas Rogowski	28
Figura 11 - Comparativa N°3 entre bobinas Rogowski	28
Figura 12 - Comparativa N°4 entre bobinas Rogowski	29
Figura 13 - Primera visita al tablero	30
Figura 14 - Esquemático del circuito para bobina Rogowski	31
Figura 15 - PCBs de Bobinas Rogowski sin componentes soldados.....	33
Figura 16 - PBC de Bobina Rogowski con componentes soldados	33
Figura 17 - Diseño 3D soporte bobina Rogowski.....	34
Figura 18 - Bobina Rogowski con soporte y PCB	35
Figura 19 - Bobinas Rogowski finalizadas	35
Figura 20 - Comparativa N°1 final de Bobinas Rogowski	36
Figura 21 - Comparativa N°2 final de Bobinas Rogowski	36
Figura 22 - Transformador HANH BV-201-0128	37
Figura 23 – Primera prueba del transformador de tensión.....	38
Figura 24 - Forma de onda debido a la saturación del núcleo del transformador	39
Figura 25 - Prueba con dos transformadores de tensión en serie	40
Figura 26 - Sumador no inversor para señales de sensores de corriente.....	41
Figura 27 - Circuito de adaptación para medición de tensiones de fase.....	42
Figura 28 - Comparador no inversor con histéresis para medición de frecuencia	44
Figura 29 - Resultados del circuito comparador con histéresis.....	46
Figura 30 - Circuito de referencias de tensión	46
Figura 31 - Placa de desarrollo Black Pill	49

Figura 32 - Diagrama de flujo correspondiente al micro STM32.....	50
Figura 33 - Representación de la configuración del ADC	52
Figura 34 - Modulo ESP-WROOM-32.....	56
Figura 35 - Placa de desarrollo DOIT Esp32 DevKit v1	56
Figura 36 - Diagrama de flujo correspondiente al ESP32	57
Figura 37 - Modulo adaptador microSD	59
Figura 38 - Esquema MQTT	61
Figura 39 - Interfaz gráfica. Ventana de inicio.....	63
Figura 40 - Interfaz gráfica. Ventana de conexión	64
Figura 41 - Interfaz gráfica. Datos generales.....	64
Figura 42 - Interfaz gráfica. Datos completos	65
Figura 43 - Interfaz gráfica. Datos completos. Neutro.....	66
Figura 44 - Interfaz gráfica. Formas de onda Fase R.	67
Figura 45 - Interfaz gráfica. Formas de onda corrientes.	67
Figura 46 - Interfaz gráfica. Diagramas fasoriales.	68
Figura 47 - Interfaz gráfica. Espectro frecuencial. Escala lineal.	69
Figura 48 - Interfaz gráfica. Espectro frecuencial. Escala logarítmica	69
Figura 49 - Interfaz gráfica. Herramientas	70
Figura 50 - Ejemplo funcionamiento Logger	70
Figura 51 – Interfaz gráfica. Consulta de datos históricos	71
Figura 52 - Interfaz gráfica. Ventada de configuración.....	72
Figura 53 - Fuente de alimentación Hi-Link	73
Figura 54 - PCB principal sin componentes (Top Layer).....	74
Figura 55 - PCB principal sin componentes (Bottom Layer)	74
Figura 56 - Identificación de etapas en PCB principal	75
Figura 57 - PCB principal.....	75
Figura 58 - Referencia LM341 / Referencia nivel medio ADC / Referencia comparador ...	76
Figura 59 - Calibración bobinas	76
Figura 60 - PCB principal montada en gabinete impreso en 3D	77
Figura 61 - Disposición de los gabinetes	78
Figura 62 - Preparación previa a la instalación.....	79
Figura 63 - Instalación térmica y bobinas	79
Figura 64 - Instalación del equipo junto al pilar.....	80
Figura 65 - Pruebas del equipo junto a un analizador comercial	81

Figura 66 - Comparativa niveles de tensión y corriente.....	82
Figura 67 - Formas de onda Fase R. Comparativa N°1.....	83
Figura 68 - Formas de onda Fase R. Comparativa N°2.....	83
Figura 69 - Formas de onda Fase S. Comparativa N°1.....	84
Figura 70 - Formas de onda Fase S. Comparativa N°2.....	84
Figura 71 - Formas de onda Fase T. Comparativa N°1.....	84
Figura 72 - Formas de onda Fase T. Comparativa N°2.....	85
Figura 73 - Formas de onda Neutro. Comparativa N°1.....	85
Figura 74 - Formas de onda Neutro. Comparativa N°2.....	85
Figura 75 – Comparativa gráfica de fasores.....	86
Figura 76 - Medición THD equipo Fluke.....	87
Figura 77 - Medición de THD equipo desarrollado (1).....	87
Figura 78 - Medición de THD equipo desarrollado (2).....	88
Figura 79 - Analizador de calidad energética de la competencia.....	92

Lista de Tablas

Tabla 1 - Comandos Bot de Telegram.....	60
Tabla 2 - Sensibilidad Bobinas Rogowski	76

Lista de Abreviaciones y Símbolos

RMS – Root Mean Square (Valor medio cuadrático)

THD – Total Harmonic Distortion (Distorsión armónica total)

W – Watt (unidad de potencia)

A – Amper (unidad de corriente)

V – Volt (unidad de voltaje)

H – Herios (unidad de inductancia)

F – Faraday (unidad de capacitancia)

Ω – Ohm (unidad de resistencia)

Hz – Herzt (unidad de frecuencia)

ADC – Analog to Digital Converter (Conversor analógico digital)

fs – Frecuencia de muestreo

USD – Símbolo representativo del dólar

FFT – Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)

FPU – Floating Point Unit (Unidad de Punto Flotante)


DSP – Digital Signal Processing (Procesamiento Digital de Señales)

SoC – System on a Chip (Sistema dentro de un circuito integrado)

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport (Transporte de telemetría de colas de mensajes)

Dedicado a:

Nuestras familias, por su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023


Capítulo 1: Introducción

Desde hace ya varias décadas el consumo eléctrico de las instalaciones domiciliarias, institucionales e industriales viene creciendo en gran medida producto del desarrollo tecnológico y el aumento en el consumo de productos eléctricos. A su vez, la masificación de la electrónica de potencia que nos ha permitido mejorar los procesos productivos y la electrónica de consumo, ha plagado las instalaciones de cargas no lineales las cuales generan armónicos no deseados en las señales de corriente. Es por estas razones que hoy más que nunca resulta fundamental realizar un control de calidad energética por parte de los medianos y grandes usuarios para proteger sus instalaciones y evitar multas por parte de las empresas proveedoras de energía.

Para poder realizar un análisis de calidad energética es necesario contar con un instrumento diseñado específicamente para ese fin, el cual debe medir tensiones y corrientes de fase y de neutro para luego analizarlas. En el mercado argentino la oferta de este tipo de instrumentos es escasa siendo en su mayoría equipos portátiles pensados para auditorias. En cuanto a instrumentos estacionarios, adecuados para hacer un control periódico del estado de la red, sus prestaciones suelen ser modestas ya que solo están pensados para visualizar valores de tensión, corriente, potencia y coseno phi (no factor de potencia). A su vez, estos últimos instrumentos poseen su interfaz de visualización en el mismo equipo por lo que es necesario dirigirse hasta el tablero donde esté instalado para poder evaluar el estado de la red.


Observando esta falta en el mercado de un instrumento estacionario con mejores prestaciones, decidimos desarrollar un analizador de calidad energética trifásico con visualización remota. El objetivo en cuanto al procesamiento de señales es obtener los siguientes parámetros:

- Tensión pico y true RMS de cada una de las fases.
- Corriente pico y true RMS de cada una de las fases y del neutro.
- Potencia activa, reactiva y aparente.
- Factor de potencia.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

- Coseno fi.
- Distorsión armónica total (THD).
- Frecuencia.
- Detección de picos de tensión y corriente.
- Energía consumida (KWh).

Con respecto a la presentación de los datos el objetivo es proporcionar una visualización remota por medio de una aplicación de escritorio, la cual además de mostrar los parámetros mencionados también incorpore el gráfico de las formas de onda, fasores y espectro de cada señal.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Capítulo 2: Desarrollo

A lo largo de todo este capítulo se abordará el desarrollo completo del proyecto realizado. Nos avocaremos a desarrollar cada una de las partes o bloques que componen al dispositivo, presentando en cada una de ellas un análisis, resultados, problemas, soluciones, etc. Para iniciar, presentamos un diagrama de bloques que resume todas las partes que constituyen al proyecto.

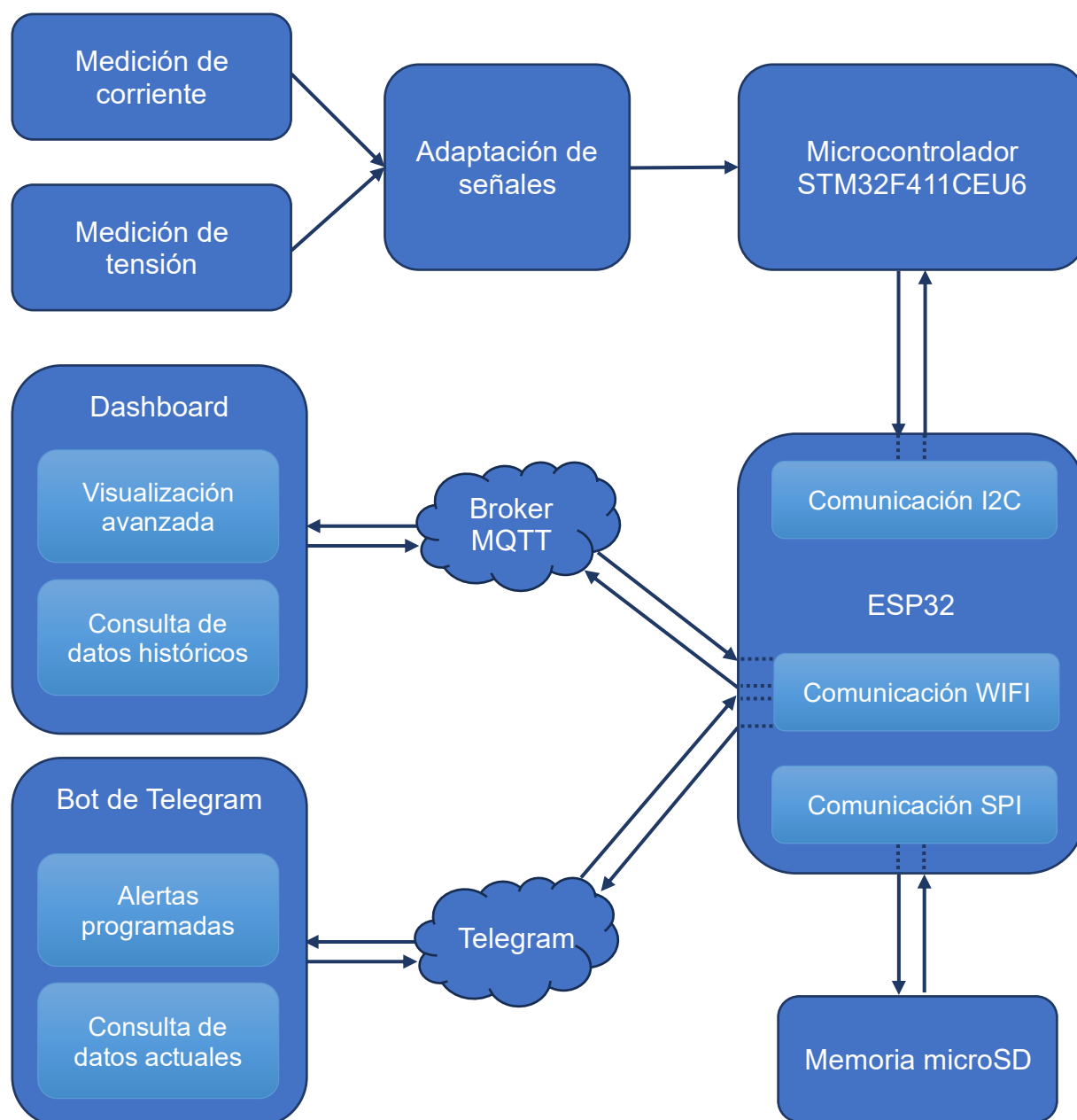



Figura 1 - Diagrama en bloques del proyecto

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.1 Medición de corriente

Conocer el valor de la corriente de cada una de las fases y del neutro es fundamental para poder realizar un análisis energético sobre el funcionamiento de la red eléctrica. Por dicha razón, nos avocamos durante gran parte del proyecto a encontrar la forma más óptima de realizar esta medición. Con óptima no solo nos referimos a buena precisión, sino también a la capacidad de medir armónicos, fácil instalación (sin necesidad de abrir la red) y bajo costo.

Además, otro aspecto crucial que debimos considerar al seleccionar el método de medición fue la capacidad máxima de corriente a medir. Dadas las condiciones del destino final de nuestro dispositivo, necesitábamos que fuera posible medir al menos hasta 150[A]. Esto implicó que muchos de los sensores convencionales, como los de efecto Hall, quedaran automáticamente descartados debido a su incapacidad para cumplir con esta característica.

Por ello y tras un período de investigación, logramos identificar varias alternativas para llevar a cabo la medición de corriente. Cada una de estas opciones tenían sus ventajas y desventajas, lo que nos llevó a realizar un análisis detallado de cada una con el fin de tomar una decisión acertada. A continuación, enumeraremos cada una de estas opciones y posteriormente las desarrollaremos:

- Transformador de corriente de núcleo sólido
- Transformador de corriente de núcleo partido
- Bobina Rogowski

2.1.1 Transformador de corriente de núcleo sólido

Al iniciar la investigación sobre los distintos métodos que son utilizados industrialmente para la medición de corriente, uno de los más utilizados son los transformadores de corriente de núcleo sólido. A continuación, se presenta una imagen a modo de ilustrativo de un transformador de corriente comercial.




Figura 2 – Transformador de corriente de núcleo sólido. Extraído de [1]

Estos dispositivos, posibilitan la conversión de una corriente alta, por ejemplo, de 300[A] a una corriente menor, como 5[A], en su secundario. Se puede aprovechar esta corriente reducida en el secundario, para introducir una resistencia de Burden o Shunt, logrando generar una variación de tensión proporcional a la corriente. Esto último, es lo que buscábamos para poder medir la corriente con un conversor analógico - digital (ADC).

No obstante, es fundamental resaltar que, para emplear este tipo de instrumento, se debe introducir el cable o la barra (por la cual circula la corriente que se pretende medir) por la abertura central del instrumento. Esto implica la necesidad de abrir el circuito eléctrico de la institución o industria donde se pretende realizar la instalación, lo que en muchas ocasiones resulta poco conveniente o incluso imposible.

Otra desventaja, que le encontramos a este tipo de instrumento es el ancho de banda que es capaz de medir. Esto se debe, principalmente, al núcleo que poseen el cual es sensible a saturarse para frecuencias superiores a los 200Hz. Por lo que no nos permitía poder medir de forma adecuada los armónicos presentes en la señal de corriente.

Respecto a los costos de adquisición, no resultan ser tan elevados en relación con las otras opciones, actualmente rondan los U\$D20 cada uno. Esto es una gran ventaja y es la principal razón de su uso tan extendido en la industria.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.1.2 Transformador de corriente de núcleo partido


Los transformadores de núcleo partido son muy similares en prestaciones y funcionamiento a los de núcleo sólido, con la importante diferencia de que su núcleo puede abrirse para colocar el cable o la barra en su interior. A continuación, se puede ver un transformador de este tipo.



Figura 3 - Transformador de corriente de núcleo partido. Extraído de [2]

De forma análoga a los transformadores de núcleo sólido es necesario colocar una resistencia de Burden en su secundario para convertir la señal de corriente a una de tensión permitiendo así convertirla con un ADC. Con respecto al ancho de banda presentan las mismas limitaciones por saturación que los transformadores de núcleo sólido por lo que no son la mejor opción si se desea estudiar el contenido armónico de las señales de corriente.

Su principal ventaja radica en la posibilidad de separar parte de su núcleo posibilitando que su montaje sea más sencillo al no ser necesario un corte de suministro a la instalación. Sin embargo, esta ventaja se ve claramente reflejada en sus precios que suelen comenzar en los U\$D100.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.1.3 Bobina Rogowski

Frente a la limitación de los transformadores con núcleo en lo que respecta a la medición de armónicos, nos encontramos en la necesidad de explorar alternativas de medición que se distingan por su capacidad para medir armónicos de manera lineal y permitan medir valores elevados de corriente. Fue en este contexto donde entraron en juego las bobinas Rogowski.

La imagen que se presenta a continuación muestra una bobina Rogowski comercial. Observando la figura, es evidente que este instrumento presenta la característica de ser abierto en uno de sus extremos, lo que posibilita la introducción del cable o la barra sobre la cual se llevará a cabo la medición sin necesidad de interrumpir el circuito eléctrico.



Figura 4 – Bobina Rogowski comercial. Extraído de [3]

En resumen, se podrían enumerar las siguientes características [3] acerca de este instrumento:

1. Diseño abierto y flexible, que permite medir sobre un conductor, sin la necesidad de desconectarlo.
2. Baja inductancia y respuesta a corrientes de rápida variación.
3. Alta linealidad, por la NO saturación de hierro.
4. Alta inmunidad a interferencia electromagnética.



Como se puede ver todas son ventajas respecto al funcionamiento y características de este dispositivo, lo que claramente se traduce en su precio que suelen comenzar en los U\$D200. Sin embargo, si se comprende su principio de funcionamiento es posible realizarlas de manera casera a un muy bajo costo. Por ello, nos dedicamos a investigar la base teórica del funcionamiento de estas bobinas.

2.1.4 Principio de funcionamiento de las bobinas Rogowski

Básicamente una bobina Rogowski es un bobinado toroidal con núcleo de aire. Este bobinado se realiza sobre un material no magnético, como puede ser un tubo de plástico. El cable se enrolla de tal forma que el punto final se lleva al punto inicial a lo largo del centro del bobinado [4]. Esto se muestra en la figura siguiente.

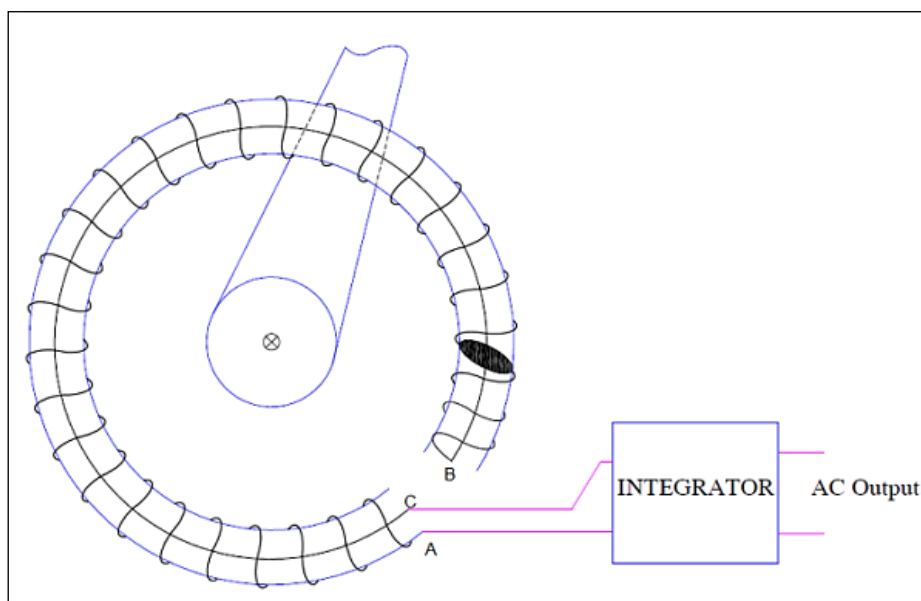



Figura 5 - Esquema bobina Rogowski. Extraído de [4]

El principio de funcionamiento de la bobina de Rogowski [4] se basa en la ley de inducción electromagnética de Faraday. Esta bobina rodea al conductor cuya corriente se va a medir. Dado que cualquier conductor que transporta corriente crea un campo magnético en su entorno, este campo se vincula con la bobina de Rogowski. Debido a este enlace, se induce una fuerza electromotriz (fem) en la bobina cuya magnitud es proporcional a la tasa de cambio de la corriente en el conductor. Es decir:

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

$$v = L \frac{di}{dt}$$

Donde v es la fem inducida y L es la inductancia de la bobina. A su vez, la inductancia de un toroide viene dada por la siguiente expresión:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N^2}{l}$$

Donde:

- μ_0 : permeabilidad magnética del aire.
- A : área transversal de la bobina. Es decir: $A = \pi r^2$
- N : número de vueltas.
- l : longitud de la bobina.


Entonces, podemos reescribir la expresión de la fem inducida en función de los parámetros constructivos de la bobina.

$$v = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N^2}{l} \cdot \frac{di}{dt}$$

Como esta expresión lo demuestra, el valor de la fem inducida es directamente proporcional a la derivada de la corriente respecto al tiempo multiplicada por un factor que viene dado por los parámetros constructivos de la bobina. Por lo tanto, si desea obtener una tensión proporcional a la corriente, se debe incorporar a la salida de la bobina Rogowski un circuito integrador. Por lo que, si realizamos esto, la tensión de salida vendría dada por:

$$V_o = \int L \frac{di}{dt}$$

Como el valor de L es constante, ya que depende de los parámetros constructivos de la bobina. Entonces la tensión de salida, finalmente, viene dada por:

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

$$V_o = L \int \frac{di}{dt} = L \cdot i$$

De esta forma se logra obtener una tensión que es directamente proporcional a la corriente que circula por el conductor ubicado al centro de la bobina.

2.1.5 Diseño y construcción de las bobinas Rogowski

Como se ha visto, la construcción de estas bobinas no resulta ser de gran complejidad. Fue por esta razón que decidimos incursionar en la fabricación de nuestras propias bobinas Rogowski. Para ello, nos basamos principalmente en un artículo realizado por un grupo de ingenieros mexicanos pertenecientes al Centro Nacional de Metrología, CENAM. Se puede acceder a dicho artículo a través de la referencia número [5].

En primer lugar, según una tabla de referencia vista en el artículo [5] procedimos a realizar la construcción de la bobina. Para ello, utilizamos los siguientes materiales:

- Cable de cobre con sección de 0,45mm² (25 AWG)
- Manguera cristal de 14mm de diámetro
- Manguera cristal de 20mm de diámetro

Con estos elementos, la tarea consistió en realizar un bobinado prolijo y continuo del cable a través de la manguera de menor sección. Posterior a esto, se utilizó la manguera de mayor sección para recubrir y proteger al bobinado. En la siguiente imagen, se da cuenta de lo aquí descrito.

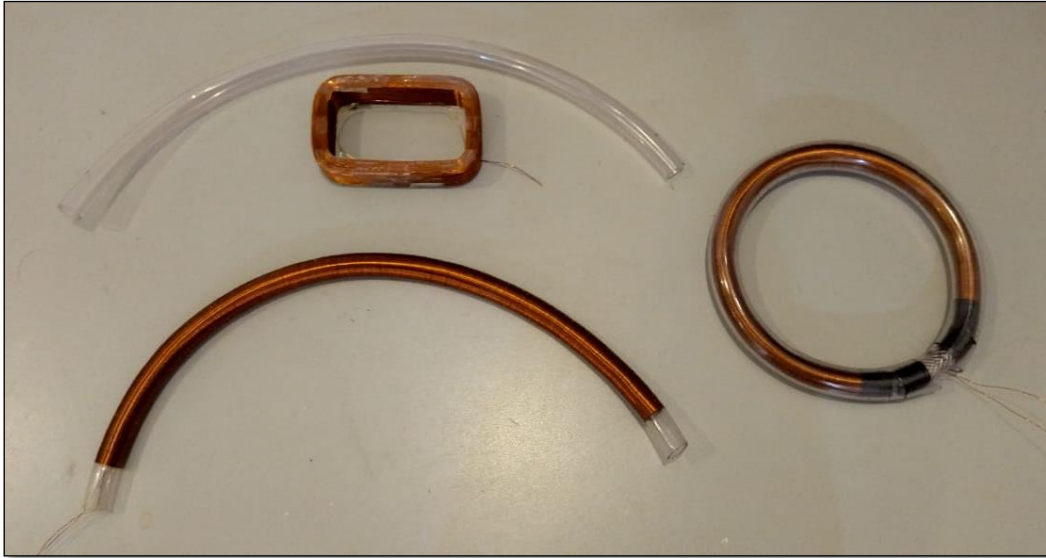


Figura 6 - Etapas de construcción de la bobina Rogowski.

Una vez finalizada la construcción, tomamos nota de las características físicas de la bobina para comenzar a realizar algunos cálculos. Las características son:

- Longitud: $l = 40[cm] = 0,4[m]$
- Diámetro de la manguera: $d_m = 14 [mm]$
- Sección transversal: $A = \pi \cdot r_m^2 = 1,54 \times 10^{-4} [m^2]$
- Número de vueltas: $N = 909$
- Permeabilidad magnética del aire. $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$

Con todos estos parámetros pudimos calcular la inductancia de la bobina tal como se vio en la sección anterior.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N^2}{l} \quad \rightarrow \quad L = 440 [nH]$$

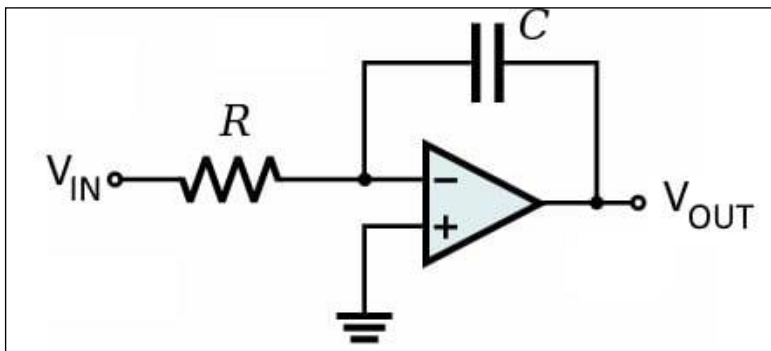
Recordando la expresión que nos daba la fem inducida por la bobina, nos daremos cuenta de que la tensión que se induce es muy baja. Del orden de los 440[nV] por Amper.



$$v = L \frac{di}{dt} \quad \rightarrow \quad v = 440 \times 10^{-9} \cdot \frac{di}{dt}$$

Por dicha razón, al momento de realizar el circuito integrador, tuvimos que tener en cuenta el hecho de incorporar una ganancia que nos permita aumentar la relación de tensión por Amper medido. A esta relación la llamamos de ahora en más sensibilidad de la medición.

El circuito integrador lo implementamos haciendo uso de un amplificador operacional, en conjunto con un capacitor y resistencia [6]. En simples cuentas el circuito a utilizar es:



$$V_{OUT} = -\frac{1}{RC} \int V_{IN}$$


Figura 7 - Circuito integrador. Extraído de [6]

Si bien la ganancia que aplica este circuito es de manera inversora, no lo tuvimos en cuenta para el análisis ya que esto se corrige simplemente conectando con la polaridad opuesta la bobina. Fue así, que aprovechamos la ganancia que aplica este circuito para aumentar la sensibilidad de la medición.

Entonces, si consideramos que ingresamos al circuito integrador con la fem inducida por la bobina la tensión de salida vendrá dada por la siguiente expresión:

$$V_{OUT} = \frac{L}{RC} \int \frac{di}{dt} \quad \rightarrow \quad V_{OUT} = \frac{L}{RC} \cdot i$$

Finalmente, podemos apreciar como por medio de este circuito fuimos capaces de obtener una tensión que es directamente proporcional a la corriente que se desea medir. Viendo la expresión podemos determinar que la sensibilidad vendrá dada por:

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

$$S = \frac{L}{RC}$$

El valor de L ya se encuentra dado por los parámetros constructivos de la bobina. Por su parte, el valor R y C lo determinamos para tener una sensibilidad acorde a nuestras necesidades. Esta decisión vino dada por la corriente máxima que se pretendíamos medir y la tensión máxima que queríamos tener a la salida del integrador.

Debido a que la señal que aquí se genere será posteriormente leída con un ADC de un microcontrolador de 3,3[V]. Requeríamos, entonces, que la señal que se genere no supere los +/- 1,65[V]. Por su parte la corriente máxima que se desea medir es de hasta unos 210[A] RMS o lo que es equivalente a 300[A] pico. Por lo que la sensibilidad deseada es:


$$S = \frac{1,65 [V]}{300 [A]} = 5,5 \left[\frac{mV}{A} \right]$$

Haciendo algunas cuentas y buscando valores comerciales de resistencias y capacitores, decidimos utilizar una resistencia de 8,2[KΩ] y un capacitor de 10[nF]. Obteniendo así los siguientes resultados:

$$S = \frac{L}{RC} \quad \rightarrow \quad S = 5,36 \left[\frac{mV}{A} \right]$$

Finalmente, para concluir esta sección, daremos lugar a la expresión de la tensión de salida del circuito integrador respecto a la corriente que se está queriendo medir.

$$V_{OUT} = 5,36 \left[\frac{mV}{A} \right] \cdot i$$

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.1.6 Ensayo de la bobina Rogowski fabricada

En esta sección mostraremos los ensayos que se realizaron sobre la bobina construida y el circuito integrador planteado en la sección anterior. Para las pruebas se hizo una comparativa entre la bobina fabricada y una comercial de la marca Amprobe (Fluke). En la siguiente imagen se puede ver el esquema construido para las pruebas:



Figura 8 - Esquema para ensayar bobina Rogowski

Para simular una corriente elevada se enrolló un cable con aproximadamente 20 vueltas. De esta forma, con una carga que consuma unos 3[A] logramos simular un consumo de 60[A]. Para hacer la comparativa, observamos en el osciloscopio la forma de onda que nos presentaban ambos sensores.

En las siguientes imágenes, se presentan los resultados obtenidos de estas comparaciones. En amarillo se presenta la señal proveniente de la bobina Rogowski comercial, mientras que en rojo se muestra la señal proveniente de la bobina fabricada de manera casera.

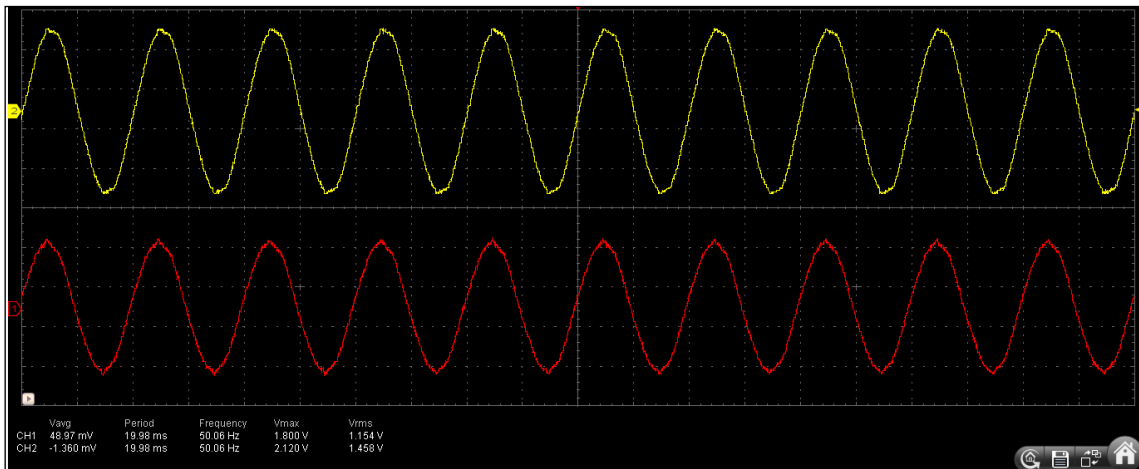


Figura 9 - Comparativa N°1 entre bobinas Rogowski

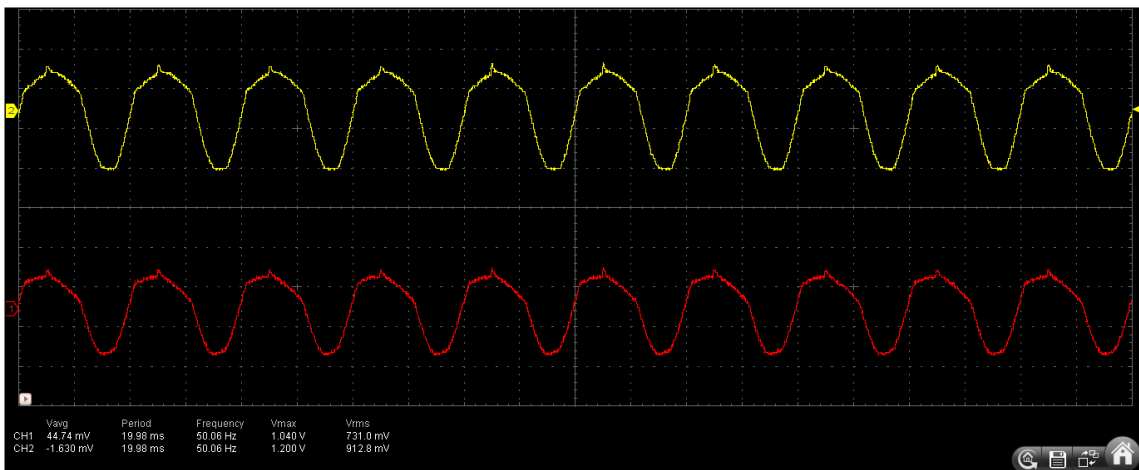


Figura 10 - Comparativa N°2 entre bobinas Rogowski

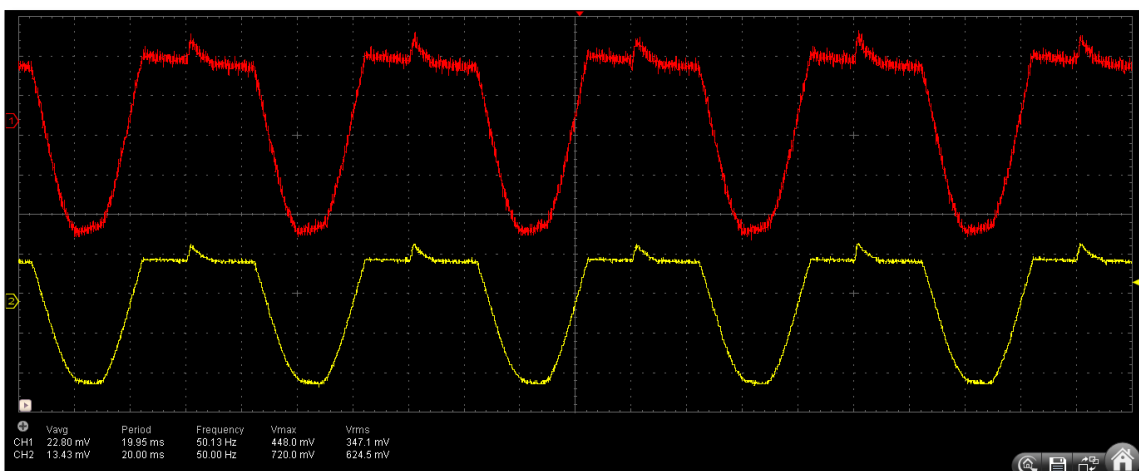


Figura 11 - Comparativa N°3 entre bobinas Rogowski

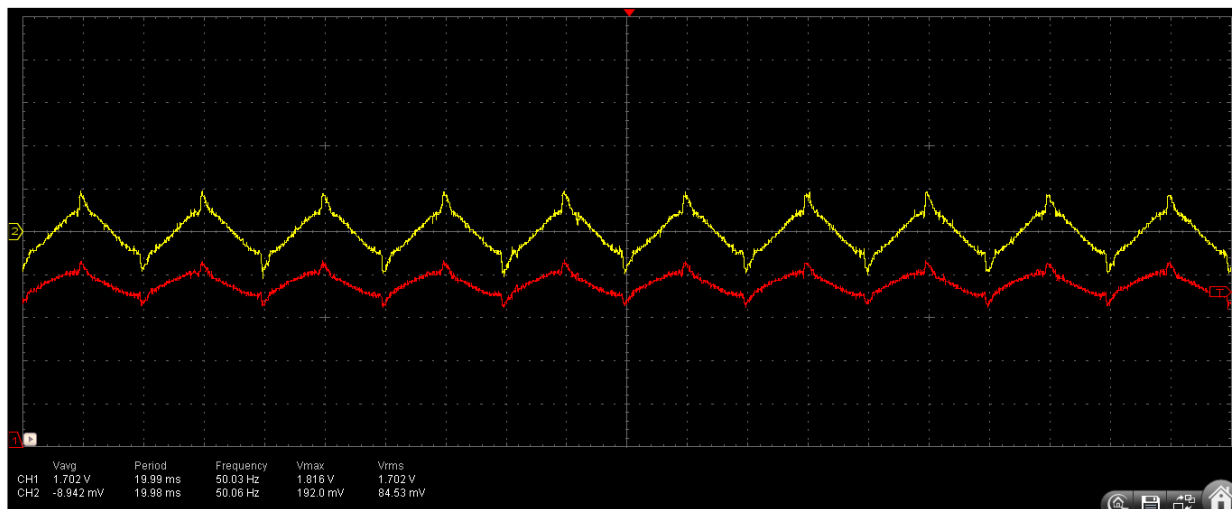


Figura 12 - Comparativa N°4 entre bobinas Rogowski

Tal como se puede ver, los resultados obtenidos son muy positivos. Por un lado, las formas de onda son prácticamente iguales, se logran apreciar cómo hasta los más mínimos detalles están presentes en ambas señales. Por otro lado, ambas señales se encuentran en fase, lo que nos indica que tanto nuestra bobina como nuestro circuito no provocan efectos de desfasaje en la señal.

Aunque inicialmente podría parecer que la señal procedente de nuestra bobina es más ruidosa, es importante subrayar que, durante las pruebas, el circuito estaba montado en una protoboard. Claramente, el uso de una protoboard no es la elección más adecuada para trabajar con señales de tan baja amplitud como las generadas por la bobina Rogowski.

Estas pruebas también nos sirvieron para poder determinar cuál era la sensibilidad real de nuestro circuito de medición. Tras repetitivas pruebas, logramos medir una sensibilidad de $5,4[\text{mV}/\text{A}]$, lo que se encuentra muy cercano al valor teórico antes calculado.

2.1.7 Construcción final

Una vez hechas todas las pruebas y ya satisfechos con los resultados, procedimos al diseño y construcción de todo lo relacionado a esta bobina. Para ello decidimos, en primer lugar, visitar el tablero donde iba a ser instalado nuestro dispositivo para así tomar algunas decisiones. A continuación, se presenta una foto de dicho tablero.



Figura 13 - Primera visita al tablero

Después de la visita, identificamos dos razones por las cuales no resultaba factible ni recomendable instalar nuestro equipo dentro del tablero. A continuación, se detallan estos motivos:

- 1- Por un lado, debemos tener en cuenta que nuestro proyecto tiene como objetivo la visualización remota de los datos y para ello hace uso de la conexión a una red WiFi. Por el otro lado, que el tablero se encuentra dentro de un gabinete metálico que, claramente, actúa como una jaula de Faraday. Por lo que estos dos aspectos resultan ser incompatibles.
- 2- El otro motivo viene dado, simplemente, por el poco espacio físico que había dentro del tablero como para incorporar un nuevo elemento.

Ante estos inconvenientes, se tomó la decisión de ubicar el equipo en una caja estanca fuera de dicho gabinete. Como consecuencia, surgió la necesidad de extender cables desde



las bobinas Rogowski, que se colocarían sobre los conductores en la parte superior del tablero, hacia nuestro equipo situado fuera del tablero. Según las mediciones realizadas ese día, la longitud mínima requerida para estos cables sería de al menos 3 metros.

Si recordamos lo visto en la sección 2.1.5, la tensión inducida en la bobina es del orden de los 440[nV] por Amper que, claramente, tiene una notable sensibilidad a las interferencias de ruido electromagnético. Por dicha razón, era prácticamente inviable hacer un tendido tan extenso desde la bobina hasta el circuito integrador/amplificador.

Por esta razón, se decidió colocar el circuito integrador en proximidad a la bobina Rogowski. De este modo, la señal débil generada por la bobina es amplificada e integrada de manera inmediata en su salida. Posteriormente, esta señal de mayor amplitud era transportada de manera admisible hacia el circuito principal.

Fue entonces, que para cada una de las bobinas se realizó una PCB que contenía el circuito integrador y algunos elementos más como se pueden ver en el siguiente esquemático.

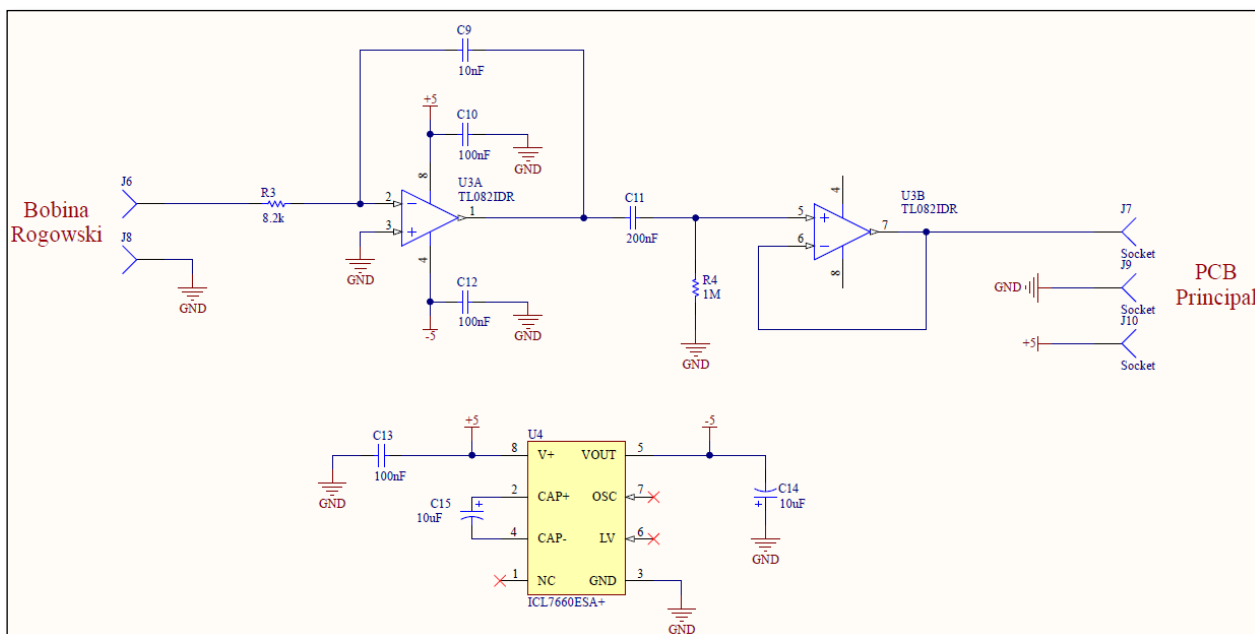



Figura 14 - Esquemático del circuito para bobina Rogowski

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

En el esquemático se puede ver la implementación del circuito integrador, realizado con un TL082 junto a la resistencia y capacitor antes calculados. A la salida de este circuito podemos encontrar un filtro RC pasa altos, calculado para una frecuencia de corte de menos de 1[Hz]. El principal objetivo de este filtro es eliminar cualquier nivel de continua que nos pueda introducir el circuito integrador. Finalmente, se cuenta con otro amplificador operacional actuando en modo de seguidor de tensión o buffer. Su objetivo es simplemente adaptar impedancias entre la salida del filtro RC y la siguiente etapa ubicada en la PCB principal.

La conexión con la PCB principal se estableció mediante un cable estero mallado que consta de dos conductores principales y una malla. En este contexto, se utilizó uno de los conductores para suministrar una alimentación de 5V al circuito, mientras que el otro se destinó a transmitir la señal resultante de la medición de corriente. Además, la malla se empleó para interconectar las tierras de ambos circuitos además de actuar como una barrera frente a interferencias electromagnéticas.

Debido a que las señales con las que trabajamos cuentan con polaridad positiva y negativa, resultó de necesidad tener que alimentar a los amplificadores operacionales con fuente partida. Es por este motivo, que se incorporó un circuito integrado llamado ICL7660 el cual se conoce comúnmente como inversor capacitivo. Este integrado, con una sencilla configuración de tres capacitores, es capaz de generar en el pin VOUT una tensión de polaridad opuesta a la que se introduce en el pin V+. Si bien la capacidad de corriente es limitada (60mA) es más que suficiente para el uso al cual fue destinado.

Ya presentado el esquemático, se muestran algunas fotos de las PCBs realizadas.

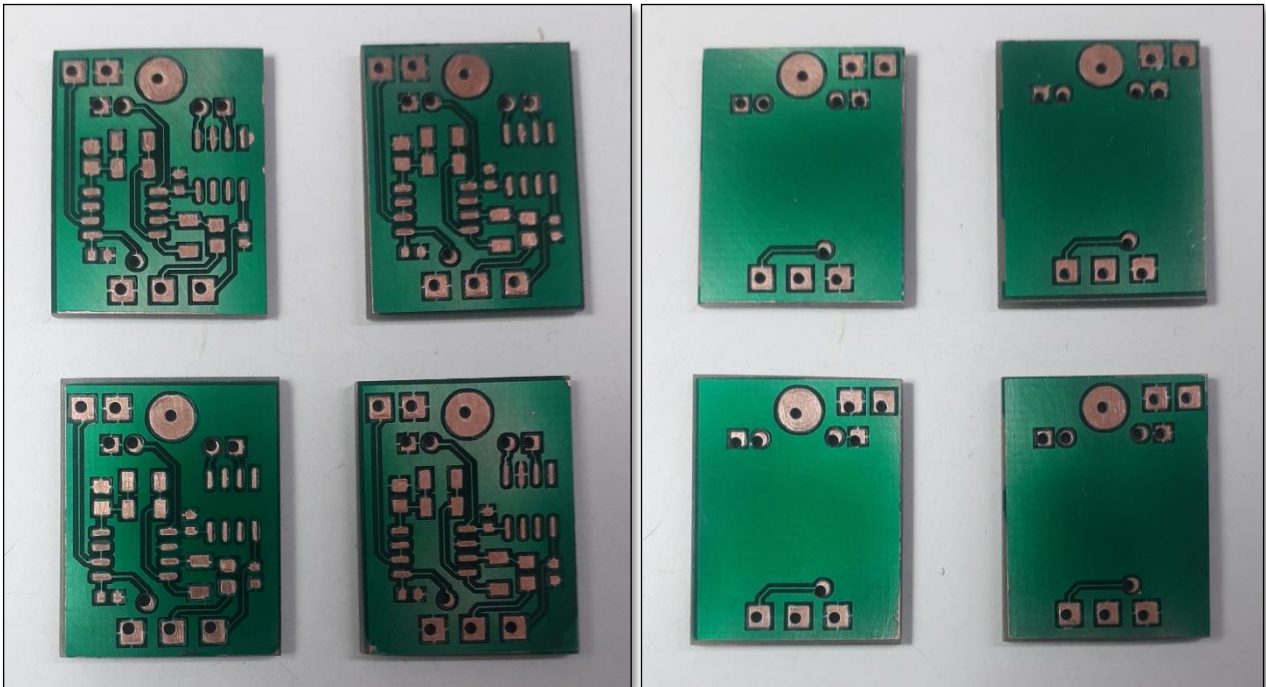


Figura 15 - PCBs de Bobinas Rogowski sin componentes soldados

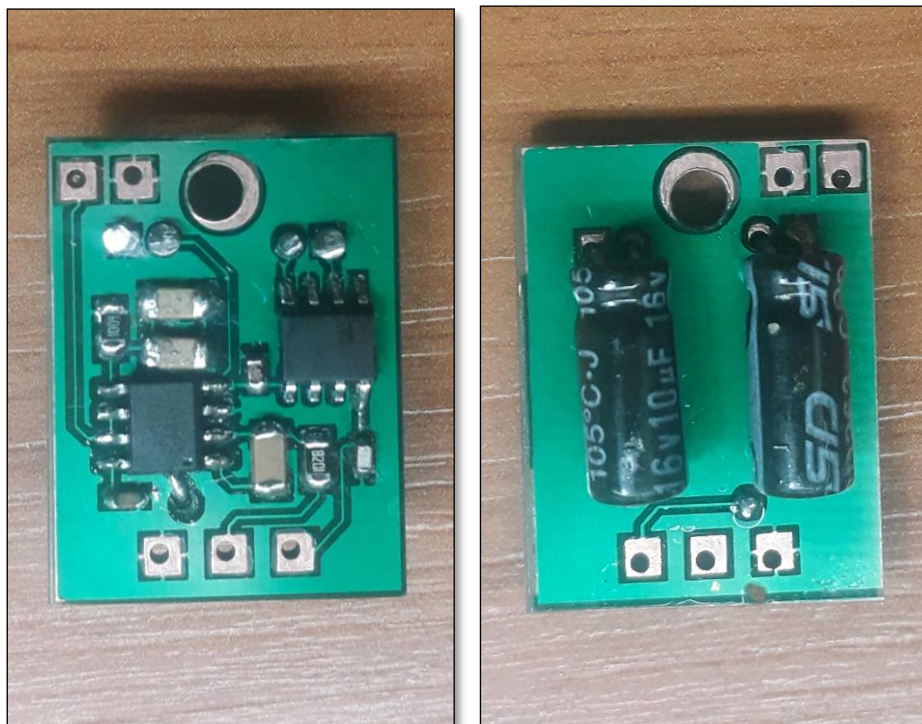


Figura 16 - PCB de Bobina Rogowski con componentes soldados



Después de llevar a cabo estos pasos, nos enfrentamos a la necesidad de encontrar un método para montar la PCB junto a la bobina. Asimismo, requeríamos un mecanismo que permitiera darle una terminación final a la bobina Rogowski y posibilitara su fácil apertura o cierre. Ante estos requisitos, iniciamos el diseño de un modelo 3D que pudiera cumplir con estas funciones, con la intención de imprimirlo posteriormente. A continuación, se muestra una imagen del diseño que desarrollamos para satisfacer estas necesidades.

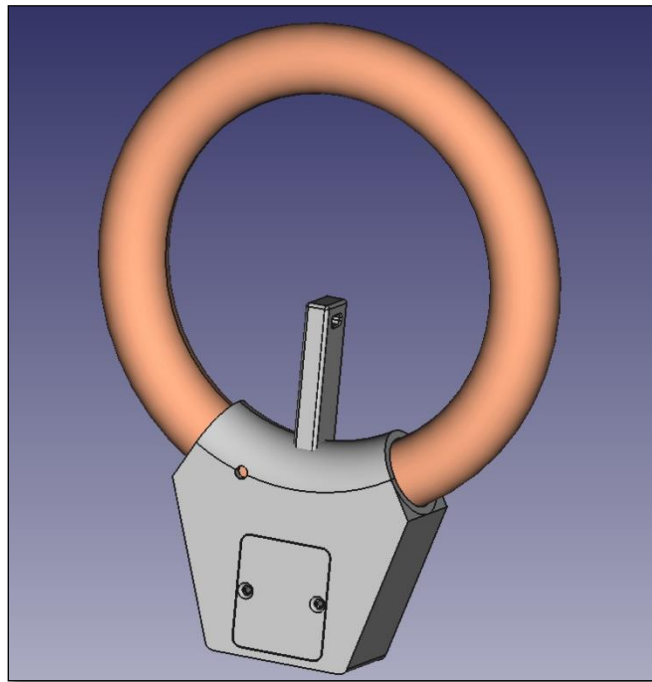


Figura 17 - Diseño 3D soporte bobina Rogowski

Como se puede observar, el diseño se elaboró de manera que la bobina pueda fijarse en uno de sus extremos, permitiendo la apertura y cierre en el otro para facilitar su colocación sobre el conductor donde se desee medir corriente. Además, se incluyó un soporte destinado a posicionar el conductor en el centro de la bobina. Por último, se incorporó un compartimiento específico para alojar la PCB con el circuito previamente mencionado. En las siguientes imágenes, se aprecia el resultado final de este diseño junto a la bobina.



Figura 18 - Bobina Rogowski con soporte y PCB



Figura 19 - Bobinas Rogowski finalizadas

Finalizado todo este proceso, procedimos a realizar nuevamente la comparación en el funcionamiento de estas bobinas respecto a la comercial de marca Amprobe (Fluke). Los resultados obtenidos fueron realmente satisfactorios y se presentan en las siguientes imágenes. En amarillo se presenta la señal proveniente de la bobina Rogowski comercial,



mientras que en rojo se muestra la señal proveniente de la bobina fabricada de manera casera.

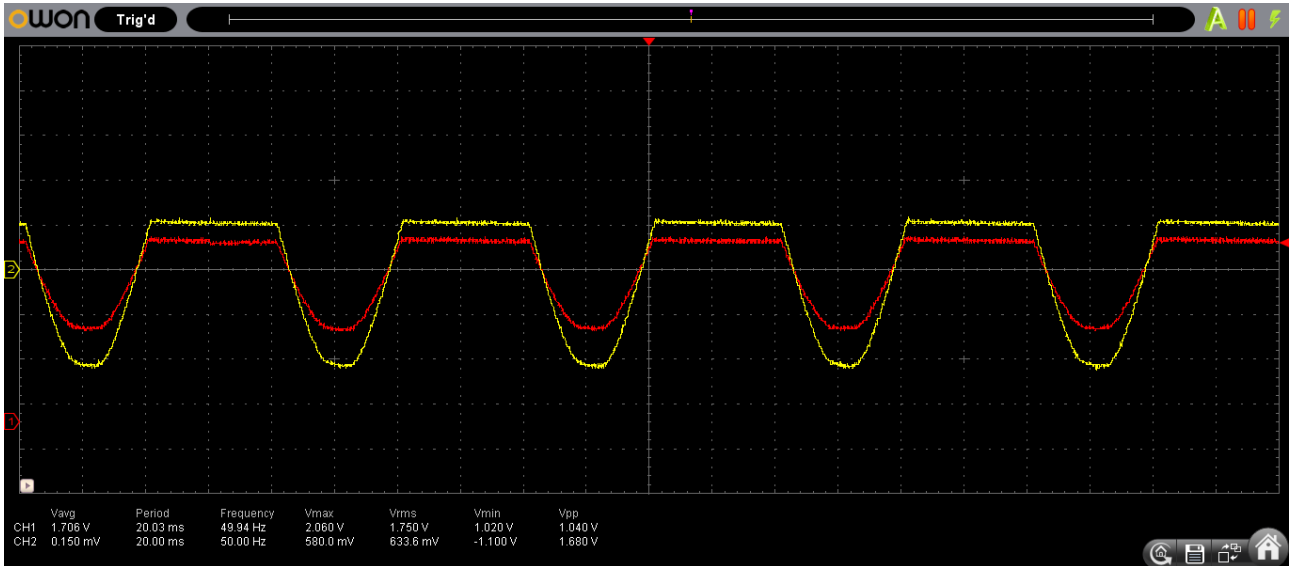


Figura 20 - Comparativa N°1 final de Bobinas Rogowski

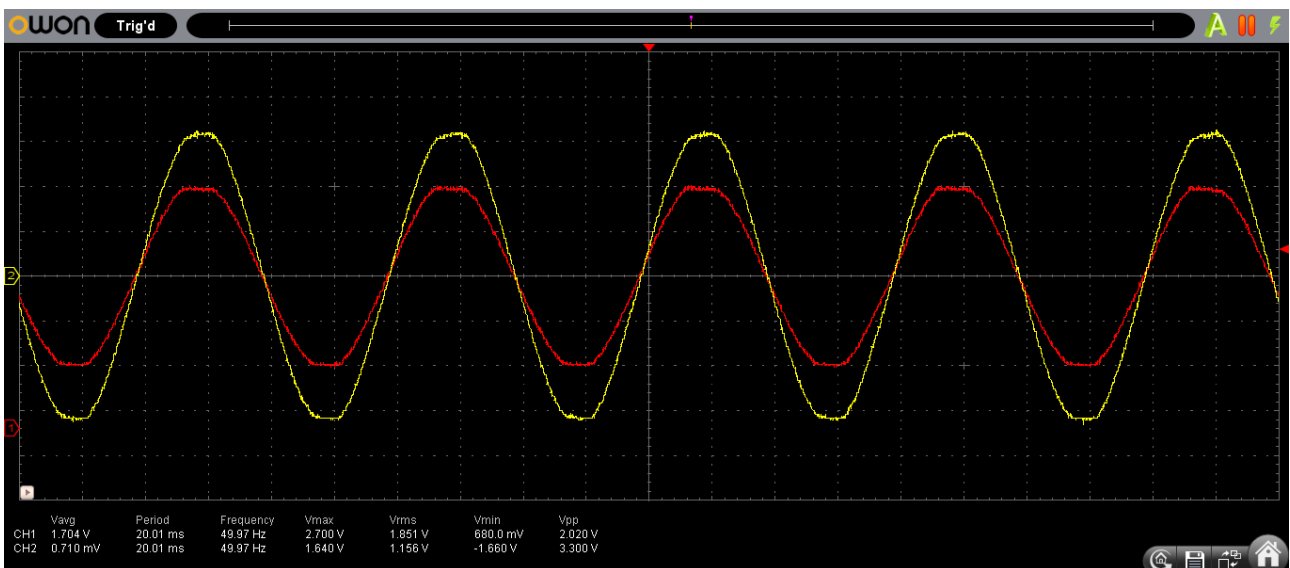



Figura 21 - Comparativa N°2 final de Bobinas Rogowski

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.2 Medición de tensión

La medición de la tensión en cada fase representa un aspecto fundamental e imprescindible en un analizador de calidad energética. En este sentido, nos enfocamos en realizar una medición segura, procurando aislar las tensiones de línea del resto del circuito. Para ello, recurrimos al tradicional método de aislación que nos provee un transformador.

Por dicha razón, nos avocamos a buscar algún transformador que nos permita reducir la tensión desde los 220[V] hasta no más de 24[V], que es el límite de tensión de lo considerado como sin riesgo eléctrico [7]. Así mismo, no necesitábamos de un transformador de gran potencia ya que el uso estaba simplemente destinado a medir las tensiones de línea.

Basándonos en lo mencionado anteriormente, nos dedicamos a la búsqueda de un transformador compacto que cumpliera con las características previamente mencionadas. Como resultado, logramos adquirir transformadores de la marca HANH, específicamente del modelo BV-201-0128 [8]. En la siguiente imagen se puede ver una foto de este transformador junto a sus características técnicas.

Order No.	Primary voltage V	Secondary voltage V	Current sec. mA	No-load voltage V	Output Power ta 70 °C/B
BV 201 0128	230	1 x 6	58	1 x 10.0	0.35 VA

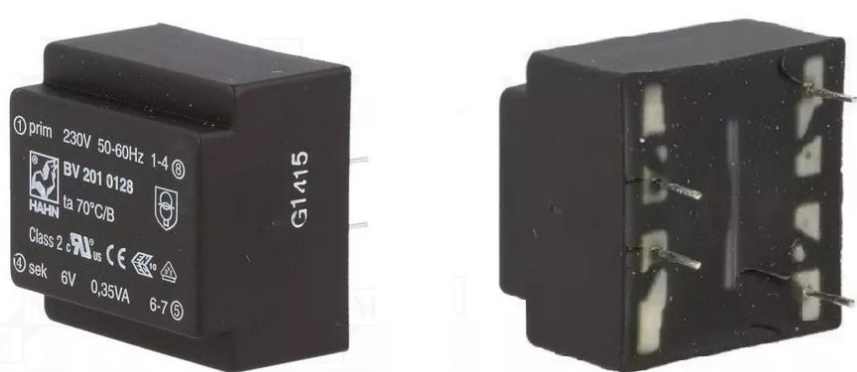


Figura 22 - Transformador HANH BV-201-0128. Extraído de [8]



Las dimensiones del transformador son de 22.6x21.7x15mm lo que hace que sea ideal para ser incorporado directamente a la PCB del equipo. Ya seleccionado el transformador procedimos a realizar algunas pruebas, donde nos encontramos con un problema que debíamos solucionar. A continuación, realizamos un análisis de este problema y su solución.

2.2.1 Distorsión de la señal debido al transformador

Para iniciar las pruebas de este transformador, conectamos directamente el primario a la línea de 220V. Tras esto, obtuvimos los resultados que se muestran en la siguiente imagen. En amarillo se aprecia la señal (atenuada) introducida en el primario del transformador, mientras que en rojo se observa la señal obtenida en el secundario.

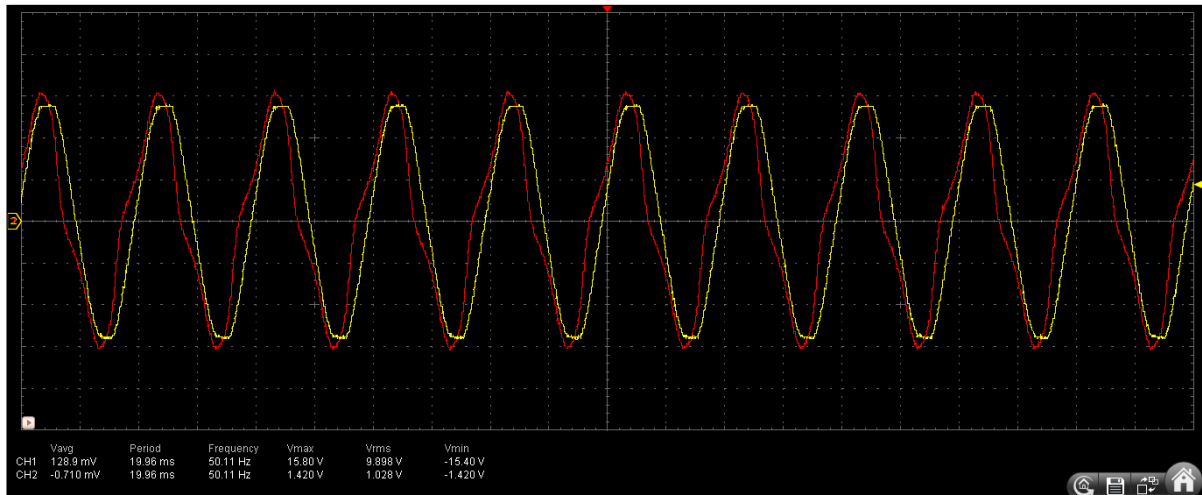


Figura 23 – Primera prueba del transformador de tensión

Como claramente se observa en la imagen, existe una importante distorsión en la forma de onda presente en el secundario del transformador. Debido a esto, nos dispusimos a investigar porque se daba este fenómeno. Tras leer diversos artículos, encontramos uno que hablaba acerca de la distorsión en la forma de onda de las señales debido a la saturación del núcleo de los transformadores [9]. Allí presentaban la siguiente imagen:

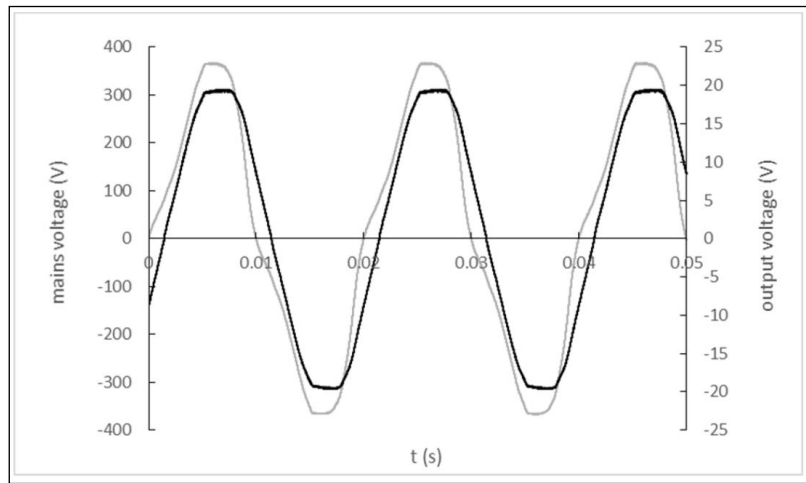


Figura 24 - Forma de onda debido a la saturación del núcleo del transformador. Extraído de [9]

Como se evidencia en la imagen, el problema que estábamos teniendo era una saturación en el núcleo del transformador. Esto sucedía sin importar la carga que se conecte en el secundario, parecía ser una característica intrínseca de este transformador. Esto, claramente, no era admisible si queríamos realizar una medición fiel de la tensión.

2.2.2 Solución planteada

Para subsanar este problema, en primera instancia, pensamos en cambiar estos transformadores por otros que estén disponible en el mercado. Sin embargo, nada nos aseguraría que no se repita este problema.

Tras algunos días realizando pruebas y gracias al consejo de un profesor, llegamos a construir una configuración que nos permitía eliminar prácticamente por completo la distorsión que se generaba en la forma de onda del secundario. Esta configuración, consistía en poner dos de estos transformadores en serie.

De esta forma, cada uno tendría en el primario una tensión de 110[V] lo que ayuda a reducir notablemente el problema de la saturación. En la siguiente imagen, se puede apreciar cómo se elimina prácticamente por completo el problema de la saturación. En amarillo se muestra la señal en el primario y en rojo la señal en el secundario.

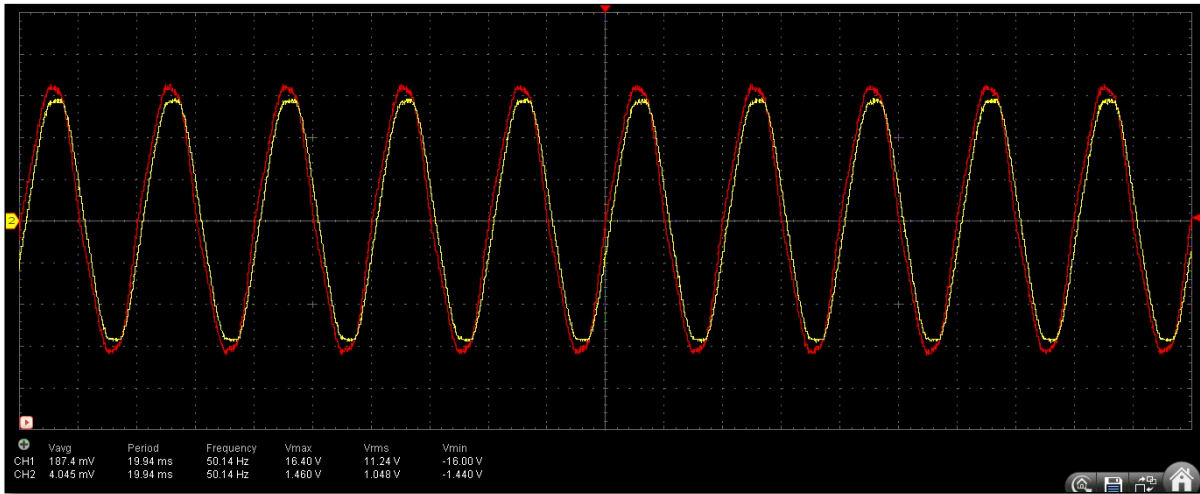


Figura 25 - Prueba con dos transformadores de tensión en serie

El detalle que se puede llegar a observar es que existe un ligero desfase entre la señal del secundario respecto a la del primario. Sin embargo, esto es fácil de compensar a nivel de firmware.



2.3 Adaptación de señales

Una vez establecidos los métodos para medir tensión y corriente era necesario diseñar circuitos que nos permitieran adaptar las señales a valores de tensión adecuados para ser procesados por el ADC de nuestro microcontrolador. Dichos valores de tensión debían estar en el rango de 0 a +3,3[V].

2.3.1 Circuito de adaptación de sensores de corriente

Como se mencionó en la sección 2.1.7 la señal proveniente de los sensores de corriente se encuentra en el rango de -1,65[V] a +1,65[V], por lo que su valor pico a pico ya es de 3,3[V]. Como nuestro microcontrolador solo admite tensiones positivas es necesario sumarle un offset de +1,65[V] para establecerla en el rango necesario. Para ello decidimos emplear el circuito sumador no inversor basado en el amplificador operacional que se puede ver la siguiente figura.

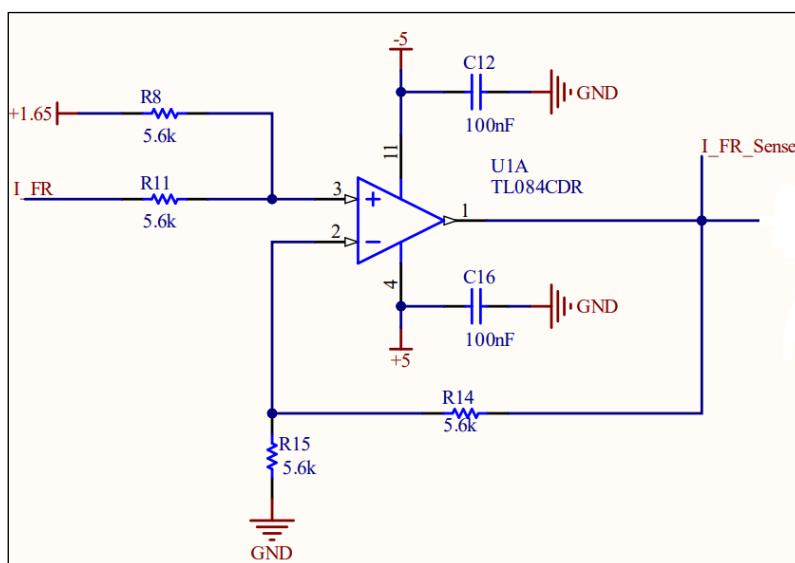


Figura 26 - Sumador no inversor para señales de sensores de corriente

2.3.2 Circuito de adaptación de transformadores de tensión

En la sección 2.2 se estableció que la medición de tensión se realizará utilizando dos transformadores en serie, es específico el modelo HAHN BV-201-0128. En su hoja de datos [8] se indica que con una tensión de 230[Vrms] en el primario tendremos 10[Vrms] en el secundario si el mismo se encuentra sin carga, que es la condición de uso que nos interesa.



Según las pruebas que realizamos con nuestros transformadores, con 230,6[Vrms] en el primario la tensión en el secundario en realidad es de 11,25[Vrms] lo que se traduce en un factor de transformación de 20,5. Es este último valor que utilizamos como punto de partida para diseñar nuestro circuito de adaptación el cual se presenta en la siguiente figura.

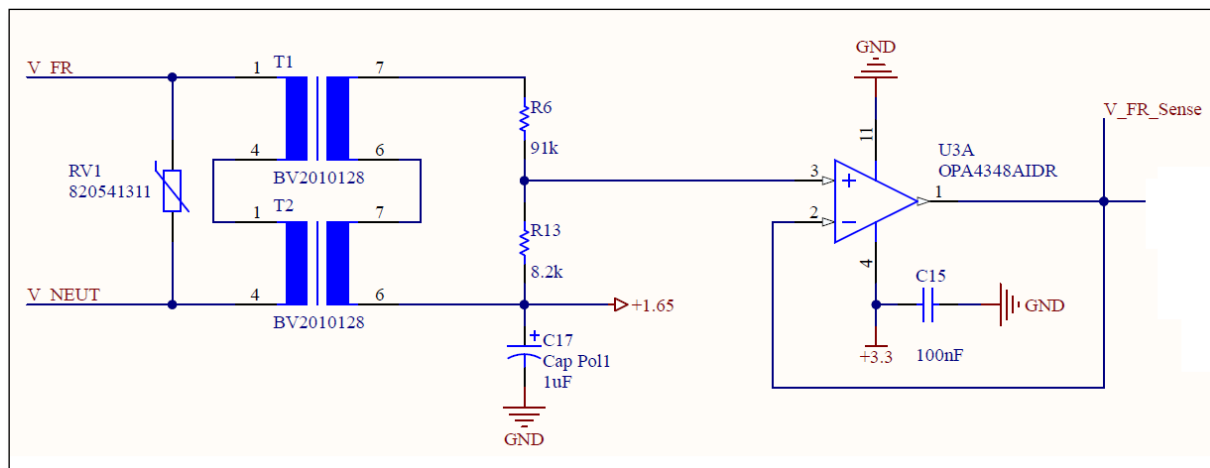


Figura 27 - Circuito de adaptación para medición de tensiones de fase

En primera instancia, calculamos el atenuador resistivo que se conecta entre los bornes secundarios de los transformadores teniendo como objetivo una tensión máxima pico de 1,65[V] a la tensión máxima de fase que pretendemos medir que establecimos en 290[Vrms]. Matemáticamente esto se puede hallar de la siguiente forma:


$$At = \frac{290[V_{rm}]}{R_t \cdot \frac{1,65[V_p]}{\sqrt{2}}}$$

$$At = \frac{290[V_{rm}]}{20,5 \cdot \frac{1,65[V_p]}{\sqrt{2}}}$$

$$At = 12,12$$

Donde:

- At: atenuación del divisor resistivo.
- Rt: relación de transformación del transformador.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Para lograr una atenuación práctica que se aproxime al valor calculado utilizamos una resistencia de 91[kΩ] para el lado alto y de 8,2[kΩ] para el bajo del divisor resistivo lo que termina por dar una atenuación de 12,1.

Una vez atenuada la señal solo restaba sumar un offset para llevar la salida del atenuador a valores positivos de tensión. Para ello lo que hicimos fue simplemente referenciar uno de los bornes del secundario de los transformadores a +1,65[V] logrando así que la variación de potencial del otro borne, y por consiguiente de la salida del atenuador resistivo, se centre en este valor de continua. Adicionalmente, en el punto de conexión de esta referencia colocamos un capacitor de 1[μF] con el objetivo de filtrar ruido que se pueda inducir.

Por último, a la salida del atenuador resistivo se colocó un seguidor de tensión para evitar que la impedancia de entrada del ADC de nuestro microcontrolador modifique el valor de atenuación calculado. A su vez, cabe destacar la adición de protección contra sobretensiones utilizando varistores de 250[Vrms] en paralelo al primario de cada par de transformadores junto con un fusible en serie con cada fase.

2.3.3 Comparadores para medición de frecuencia

Aunque en las subsecciones anteriores se detalló cómo se adaptaron las señales de tensión y corriente para ser convertidas por un ADC, y podría pensarse que esto es suficiente para llevar a cabo un análisis completo, en la práctica, la medición de frecuencia presentaba ciertas limitaciones cuando intentamos realizarla utilizando la señal muestreada.

El principal problema de utilizar este método para medir frecuencia resulta ser que para tener una buena resolución necesitábamos utilizar una frecuencia de muestreo(fs) lo más alta posible debido a que la resolución práctica de nuestra medición será 1/fs. Si bien era posible lograr frecuencias de muestreo altas con el ADC que incorpora nuestro microcontrolador, esto implicaría que para muestrear señales “lentas” como las de 50[Hz] los vectores de datos tenderán a hacerse muy grandes lo que no es tolerable debido a que la memoria RAM disponible era bastante limitada. Además, utilizar una frecuencia de



muestreo alta en relación con nuestra frecuencia objetivo (50[Hz]) era contraproducente a la hora de ejecutar algoritmos de Transformada Rápida de Fourier (FFT) por lo que no era una buena alternativa para nuestro proyecto.

Para solventar este inconveniente decidimos utilizar comparadores para convertir la señal de salida de los circuitos de adaptación en una señal cuadrada de igual frecuencia. Luego, esta señal cuadrada se ingresa a un pin de entrada del microcontrolador, en el cual se configura una interrupción externa por flanco de subida. Una vez detectados dos flacos consecutivos se proceden a restar los tiempos de ejecución en los que sucedieron y con ello se obtiene el periodo de la señal. En la siguiente figura se muestra el circuito comparador utilizado, el cual se conecta a la salida de los circuitos de adaptación que se explicaron en las subsecciones anteriores.

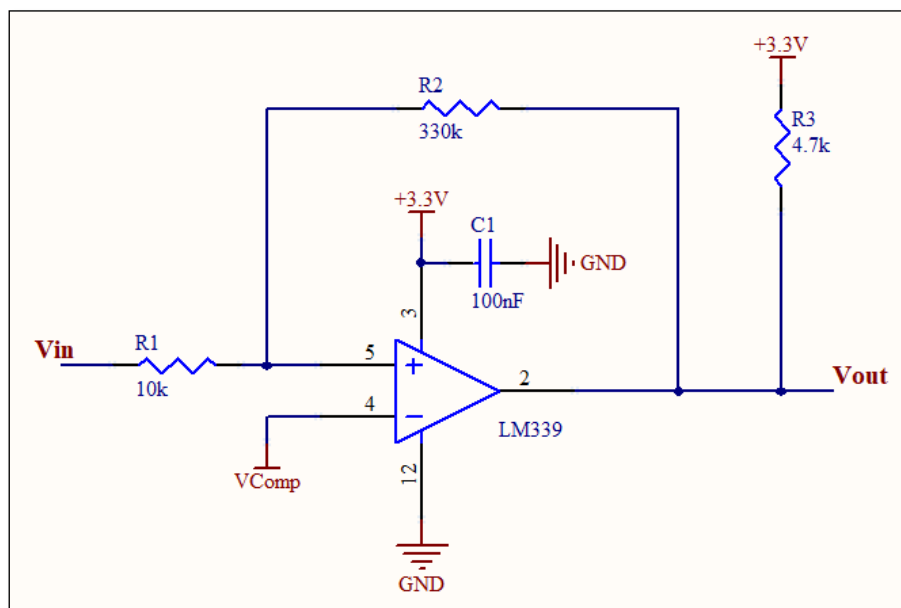



Figura 28 - Comparador no inversor con histéresis para medición de frecuencia

Este circuito es un comparador no inversor que a su vez cuenta con un nivel de histéresis para evitar cambios de nivel por ruido. Para su diseño nos basamos en una nota de aplicación de Texas Instruments [10] en la que se detallaba el procedimiento de cálculo que, en resumen, consistía en fijar las condiciones de trabajo y los valores de R2 y R3 para así hallar la R1 que nos entregue el comportamiento deseado. En nuestro caso establecimos las siguientes condiciones:

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

- $V_{HYS} = 100[mV]$ (histéresis)
- $V_H = 1,65[V]$ (tensión de entrada en la que la salida pasara de bajo a alto)
- $V_L = V_H - V_{HYS} = 1,55[V]$ (tensión de entrada en la que la salida pasara de alto a bajo)
- $R_3 = 4,7[k\Omega]$ (resistencia de pull-up de salida)
- $R_2 = 330[k\Omega]$ (resistencia de realimentación positiva)

Una vez fijadas estas condiciones, para hallar el valor de R_1 debíamos resolver la siguiente ecuación:

$$0 = (3,3[V]) \cdot R_1^2 + [3,3[V] \cdot R_2 + V_L \cdot (R_2 + R_3) - V_H \cdot R_2] \cdot R_1 + (V_L - V_H) \cdot (R_2^2 + R_2 \cdot R_3)$$

Reemplazando por los valores mencionando anteriormente y resolviendo la ecuación llegamos a que la misma se verifica para un valor de $R_1 = 10072,8[\Omega]$ por lo que decidimos utilizar una resistencia de $10[k\Omega]$. A su vez la tensión de referencia V_{Comp} que debíamos conectar al pin inversor del comparador se puede hallar con la siguiente expresión:

$$V_{Comp} = V_H \left(\frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) = 1,601[V]$$

De esta forma hemos resuelto la medición de frecuencia de todas las señales de tensión y corriente que medimos. A continuación, se puede ver una captura de osciloscopio donde se pueden observar la señal de entrada y salida del comparador, a la vez que los cursores marcan los niveles a los que la salida conmuta y la histéresis.

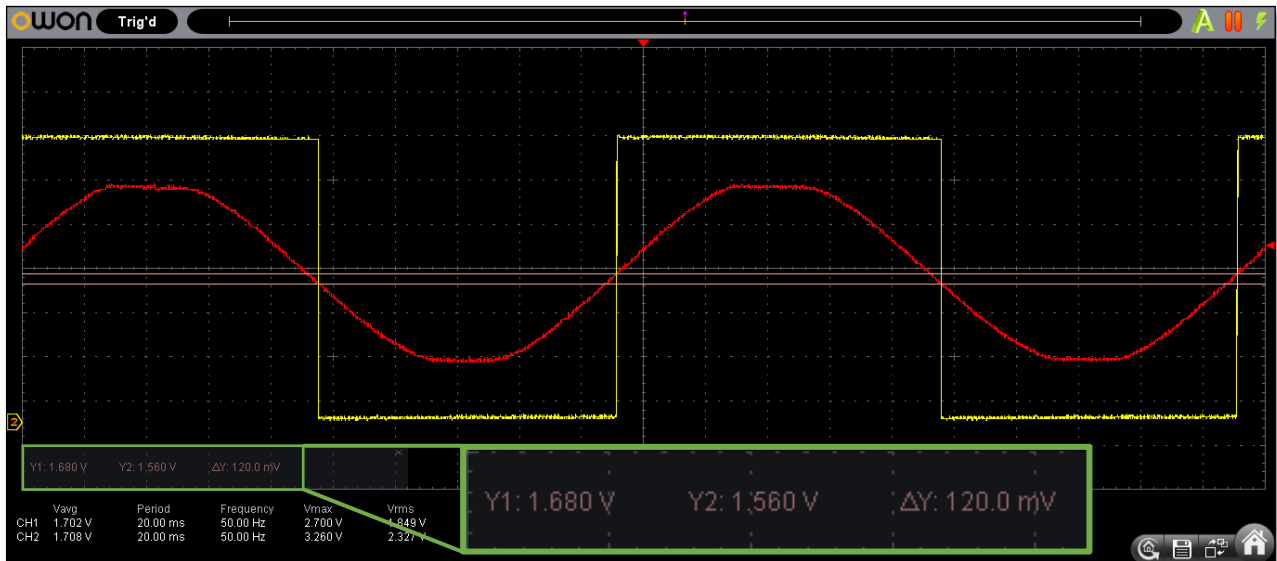


Figura 29 - Resultados del circuito comparador con histéresis

Cabe destacar que también utilizamos las señales de salida de los comparadores para medir el desfase entre la tensión y la corriente de cada fase. Este último punto resulta clave debido que a través de este desfase podemos calcular directamente el coseno phi y este luego formará parte del cálculo del factor de potencia.

2.3.3 Referencias de tensión

Para finalizar esta sección describiremos el circuito que diseñamos para proveer al resto de los circuitos de referencias de tensión. En la siguiente figura se puede ver el circuito en cuestión.

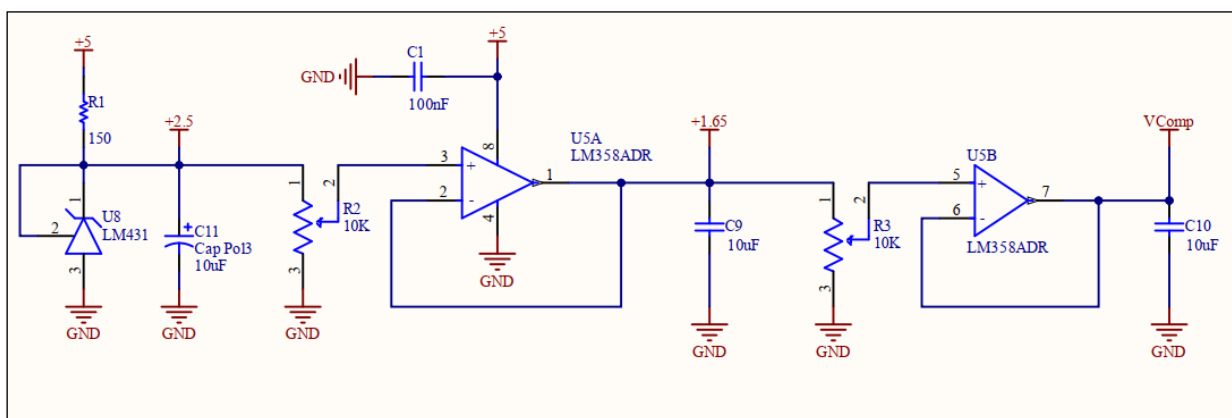




Figura 30 - Circuito de referencias de tensión

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Este circuito se basa en una referencia de precisión LM431 la cual se utiliza de forma análoga a un diodo Zener y nos provee una tensión de 2,5[V] muy estable para un rango amplio de temperaturas (típicamente una variación de 8[mV] en el rango de 0°C a 70°C). En su salida colocamos un capacitor de filtro de 10[uF] y luego un trimmer multivuelta Cermet de 10[kΩ] para lograr un ajuste fino que nos permita tener una tensión de 1,65[V] en su punto medio y una buena estabilidad gracias a las bajas derivas térmicas propias de este tipo de trimmers. Esta tensión de salida se pasa a través de un seguidor de tensión para evitar que los circuitos a los que se conecte afecten su impedancia.

Luego, la referencia de 1,65[V] se conecta a otro trimmer multivuelta Cermet para lograr reducir esta tensión y así lograr la referencia VComp necesaria para el funcionamiento de los comparadores con histéresis. Finalmente, al igual que la referencia de 1,65[V], esta tensión también se pasa por un seguidor de tensión.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023


2.4 Microcontrolador STM32F411CEU6

Concluida la fase relacionada con la medición de tensión y corriente, que incluyó la implementación de los circuitos de adaptación de señales, nos focalizamos en la selección del microcontrolador más adecuado para lograr los objetivos planteados. Este microcontrolador debía contar, como mínimo, con 7 canales de conversión analógica-digital (ADC), asignando uno para cada señal. Además, se requería que permitiera el manejo de interrupciones externas, cuente con timers, tuviera al menos una interfaz de comunicación y, sobre todo, dispusiera de la capacidad necesaria para llevar a cabo un procesamiento digital de las señales muestreadas.

Por todos los aspectos antes mencionados fue que elegimos trabajar con el microcontrolador STM32F411CEU6 el cual posee un núcleo de la familia Cortex-M4. A continuación, listamos algunas características de este microcontrolador [11].

- Frecuencia de CPU hasta 100MHz.
- 512 KB de memoria Flash.
- 128 KB de memoria RAM.
- 1 ADC de 12-bits con 16 canales.
- 11 timers. 6 de 16-bits, 2 de 32-bits, 2 watchdog y 1 SysTick timer.
- 36 entradas y salidas, donde todas admiten interrupciones.
- Interfaces de comunicación tales como UART, I²C, SPI y USB.
- Unidad de punto flotante (FPU) e instrucciones específicas para el procesamiento digital de señales (DSP).

Como claramente se puede apreciar, cumple con todas las especificaciones que buscábamos para nuestro microcontrolador. Además, en el mercado es posible conseguir una placa de desarrollo que contiene a este microcontrolador. Esto era muy útil para llevar a cabo el desarrollo y todas las pruebas que respectan al mismo. Comúnmente se conoce a esta placa de desarrollo con “Black Pill” y en la siguiente imagen se puede ver una foto de esta [12].

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

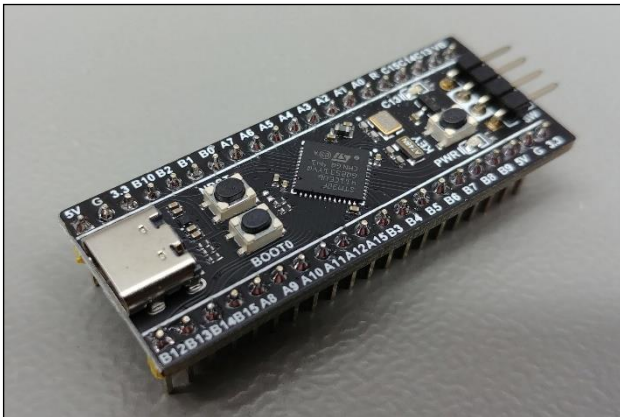


Figura 31 - Placa de desarrollo Black Pill. Extraída de [12]

Como se detalla en las especificaciones, la característica más destacada de este microcontrolador radica en la inclusión de una Unidad de Punto Flotante (FPU) y un conjunto de instrucciones de Procesamiento Digital de Señales (DSP). La FPU proporciona una eficiente capacidad para llevar a cabo operaciones aritméticas, tales como sumas, restas, multiplicaciones y divisiones, utilizando números de punto flotante. Por otro lado, la funcionalidad DSP está vinculada a la presencia de un conjunto de instrucciones optimizadas, especialmente diseñado para realizar operaciones matemáticas y lógicas esenciales en el procesamiento de señales, como la ejecución eficiente de una Transformada Rápida de Fourier (FFT).

2.4.1 Diagrama de flujo del código desarrollado

Después de haber explorado las diversas características de este microcontrolador, procederemos a desarrollar una descripción del código implementado. Iniciaremos este proceso a partir de un diagrama de flujo para así dar una visión clara de las diferentes etapas que componen al código. Este diagrama proporciona una representación visual de cómo se estructuran y relacionan las diversas partes del código, facilitando la comprensión de este. Posteriormente, haremos hincapié en las partes más importantes desarrollándolas.

A continuación, presentamos el diagrama de flujos:

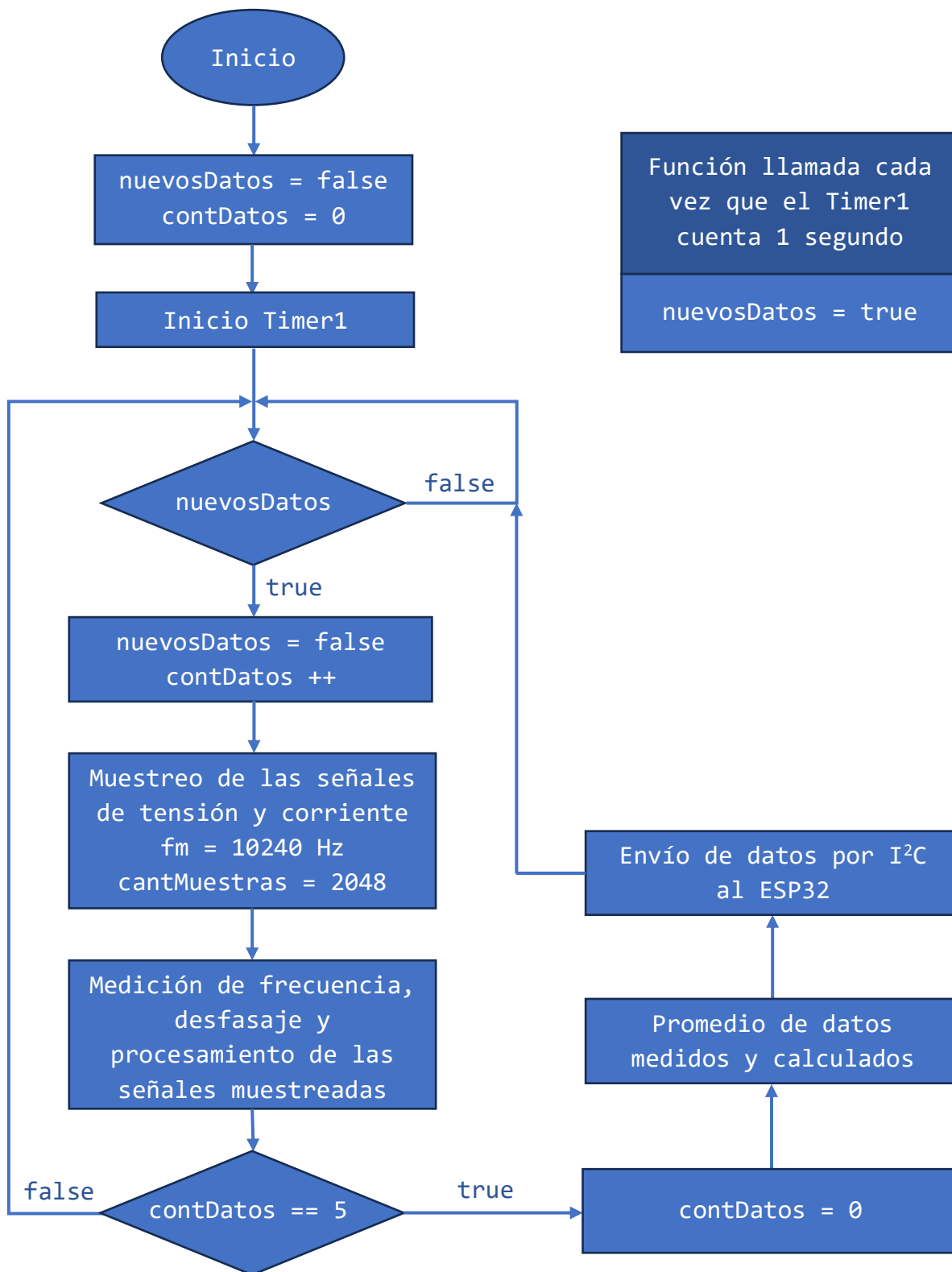



Figura 32 - Diagrama de flujo correspondiente al micro STM32

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.4.2 Idea general del código


Según lo indica el diagrama de flujo, la tarea principal del microcontrolador STM32 consiste en tomar muestras de las tres señales de tensión y las cuatro de corriente, para luego llevar a cabo un procesamiento de dichas señales. Además, como evidencia el diagrama, este procesamiento se realiza en intervalos de 1 segundo. No obstante, la transmisión de esta información ocurre cada 5 segundos, promediando todos los datos adquiridos a lo largo de este periodo.

La idea de enviar los datos en un periodo de tiempo superior al intervalo con el que son muestreados y procesados viene dado por la limitación en la capacidad del tráfico de información que nos brinda el servidor MQTT utilizado (esto se verá con más detalle en la sección 2.6). Simultáneamente, la elección de muestrear y procesar la información en intervalos más cortos se basó principalmente en la necesidad de evitar el "aliasing" durante la recopilación de datos. Con esto, nos estamos refiriendo a la incapacidad de detectar consumos de energía de corta duración (por ejemplo, el funcionamiento de un ascensor) si se realizará el procesamiento en intervalos temporales extensos.

2.4.3 Muestreo de las señales

Tal como se ha comentado al inicio de esta sección, este microcontrolador cuenta con un único ADC de 12-bits con capacidad de hasta 16 canales. Por tal motivo, para poder muestrear las 7 señales que nos son de interés tuvimos que utilizar 7 canales. Adicionalmente, utilizamos otro canal para leer una referencia externa de precisión de 2.5[V] implementada con un LM431. Esto último resultó de gran importancia para luego, a nivel de firmware, poder hacer la conversión del valor arrojado por el ADC a su equivalente en tensión con una mejor precisión.

Por su parte, el ADC fue configurado para muestrear a una frecuencia de 10240[Hz] y con una cantidad de 2048 muestras por señal. La decisión de estos valores vino principalmente dada por la resolución buscada en la FFT, ya que esta frecuencia nos posibilita alcanzar una resolución de 5[Hz] y medir hasta el armónico 31 sin problemas. Ahora, en la siguiente figura, se detalla de forma gráfica la configuración realizada del ADC.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

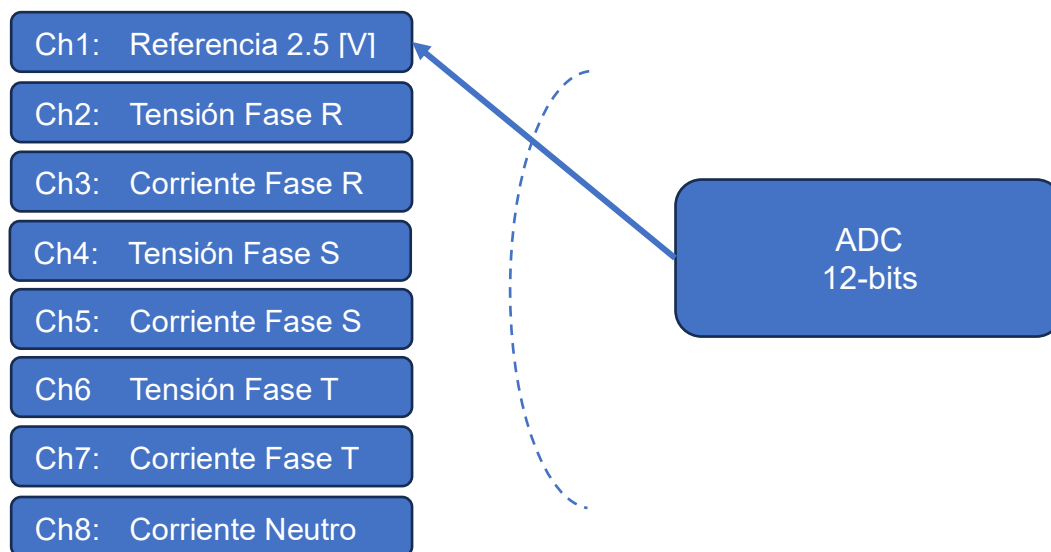



Figura 33 - Representación de la configuración del ADC

El disparo para comenzar la conversión de todos los canales es dado por un timer configurado para que las conversiones se realicen a la frecuencia de muestreo establecida. A pesar de contar con un único ADC, que impide el muestreo simultáneo de todas las señales, el tiempo que el ADC tarda en convertir un canal y pasar al siguiente resulta insignificante en comparación con la frecuencia de la señal que se intenta muestrear.

2.4.4 Medición de frecuencia y desfasaje

Una vez finalizado el muestreo de todas las señales, se procede a medir la frecuencia de cada una de ellas y el desfasaje que existe entre la tensión y la corriente de cada fase. Tal como se habló en la sección 2.3.3 la señal cuadrada proveniente de los comparadores se ingresa a pines de entrada del microcontrolador, en los cuales se configuran interrupciones externas por flanco de subida.

De esta forma, una vez detectados dos flacos consecutivos (de la misma señal) se proceden a restar los tiempos de ejecución en los que sucedieron y con ello se obtiene el periodo de la señal y de allí la frecuencia. Por otro lado, para poder medir el desfasaje entre la señal de tensión y corriente nos avocamos a detectar un flanco de subida de cada una de estas señales. Nuevamente restando los tiempos en los cuales se dieron estas detecciones, podemos conocer el desfasaje temporal entre las señales. Luego, con una simple operación matemática podemos conocer el desfasaje en grados o radianes.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.4.5 Procesamiento de las señales

Una vez muestreadas todas las señales y también obtenido el valor de frecuencia y desfase entre ellas, procedemos a realizar un procesamiento digital de estas señales. Para el cálculo de la mayoría de los parámetros se aprovecharon las funciones de DSP que incorpora este microcontrolador. Los parámetros calculados para cada una de las señales se enumeran a continuación:

1. Valor máximo, mínimo, pico a pico y medio
2. Valor true RMS
3. Módulo y fase de la FFT
4. Distorsión armónica total (THD)


Combinando los valores propios de la señal de tensión y corriente de cada fase también se calcula:

1. Potencia activa, reactiva, aparente y de deformación
2. Coseno phi y factor de potencia
3. Energía consumida

Como ya se ha mencionado, este procesamiento se realiza cada vez que muestrea un nuevo bloque de datos, es decir, cada 1 segundo. Los bloques se promedian con los subsiguientes para así, al cabo de 15 segundos enviar la información por el puerto I²C hacia el ESP32.

2.4.6 Comunicación I²C con ESP32

Los datos recopilados y procesados son enviados por medio de un puerto a I²C hacia el ESP32. Como se verá en la siguiente sección, este es el encargado de comunicar esta información hacia los distintos servicios que así lo requieran. Un dato no menor e importante para destacar, es que al momento de realizar el envío de los datos se buscó optimizar de la mejor manera el tamaño del bloque de información a enviar.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Para entender porque surge la necesidad de optimizar el tamaño de la información a enviar, debemos recordar uno de los objetivos planteados que hacía referencia a la posibilidad de visualizar en la interfaz gráfica las formas de onda de las señales de tensión y corriente. Esto implicaba tener que enviar los bloques de datos resultante del muestreo, que se traduce en 7 vectores de 2048 valores del tipo float cada uno o lo que es lo mismo 58KB de información solo en lo que respecta a los puntos de las señales.


Este tamaño de datos era demasiado elevado teniendo en cuenta las limitaciones en el tráfico de información que poseemos con el broker MQTT (esto se detalla en la sección 2.6). Por ello, es que debíamos buscar una manera de comprimir esta información. Fue así, que recordamos los principios de la serie de Fourier para señales discretas la cual nos expresa una forma de reconstruir una señal a partir del valor complejo de sus armónicos, o lo que es lo mismo a partir del módulo y fase de cada armónico. Esto se logra con la siguiente expresión:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} \cdot \cos(\varphi_0) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n \cdot \omega_1 \cdot t + \varphi_n)$$

Donde:

- $x(t)$ Señal en el dominio temporal
- a_n Módulo del armónico n
- φ_n Fase del armónico n
- ω_1 Frecuencia fundamental

Como otro de nuestros objetivos era realizar una representación gráfica de los primeros 31 armónicos de cada señal, ya contábamos con la necesidad de enviar información sobre estos. Además, esta información es de mucho menor tamaño ya que está compuesta por 32 valores para el módulo y 32 valores para la fase. De esta manera y con la expresión ya vista, pudimos fácilmente reconstruir la señal en la interfaz gráfica para su posterior visualización. De esta forma se logró reducir de manera notable el tamaño de la información a enviar. Pasando ahora a ser de 2,5KB el bloque completo de información.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.5 ESP32

Tal y como lo indica el título de nuestro proyecto la visualización de los datos no se realiza en el punto de adquisición, sino que de forma remota. Para ello necesitábamos transmitir la información generada por el microcontrolador STM32F411CEU6 a través de algún medio físico. Si bien esto se podía lograr usando diferentes tecnologías, en línea con el actual paradigma de la Industria 4.0 decidimos dotar a nuestro equipo de acceso a Internet mediante conexión inalámbrica WiFi.

Para lograr este cometido utilizamos el System On a Chip Espressif Systems ESP32, muy utilizado de hace varios años en la industria de dispositivos IoT(Internet of Things) gracias a su potencia, versatilidad y bajo costo. A continuación, se listan algunas de sus características más destacadas [13]:

- CPU Tensilica Xtensa LX6 con frecuencia de 160MHz.
- 512KiB de memoria RAM.
- Conectividad WiFi 802.11 b/g/n (2,4GHz).
- Conectividad Bluetooth 4.2.
- Interfaces de comunicación: SPI, I²C, I²S, CAN, Ethernet.
- Periféricos como ADC de 12bits, DAC de 8 bits, timers de 64bits, RTC interno, entre otros.
- 34 pines de entrada/salida.
- Modos de bajo consumo para implementaciones con baterías.

Si bien este chip puede adquirirse individualmente, lo más usual es utilizar un módulo comercializado por el mismo fabricante denominado ESP-WROOM-32 el cual incorpora además del SoC una antena en PCB, cristal oscilador y una memoria flash de 8MB o 16MB. A continuación, se puede ver una fotografía de dicho modulo.



Figura 34 - Módulo ESP-WROOM-32. Extraída de [14]

A su vez, este módulo suele montarse en una gran variedad de placas de desarrollo que hacen el proceso de prototipado mucho más ágil y práctico. Una de estas placas fue la elegida para este desarrollo, en particular el DOIT Esp32 DevKit v1, el cual puede verse en la siguiente fotografía.

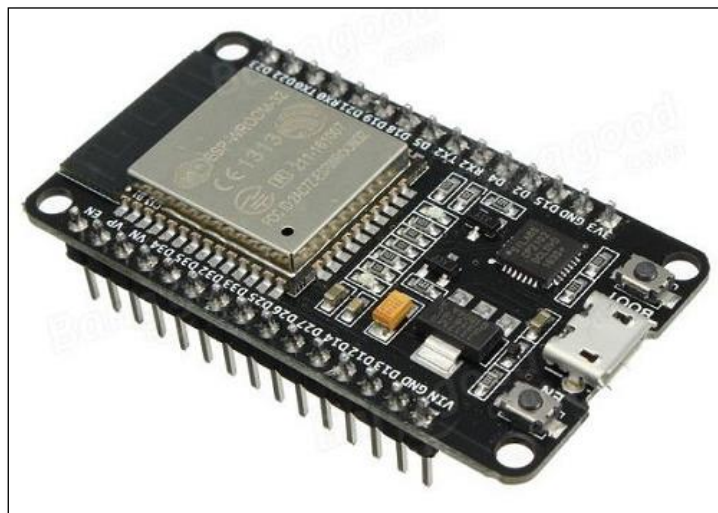


Figura 35 - Placa de desarrollo DOIT Esp32 DevKit v1. Extraída de [15]

2.5.1 Diagrama de flujo del código desarrollado

En nuestra implementación el SoC ESP32 es una parte fundamental debido a que es el nexo necesario entre la electrónica que adquiere y procesa los datos y la interfaz de usuario que los exhibe. El conjunto de tareas que realiza en nuestro proyecto se representa a través del diagrama de flujo de la Figura 36.

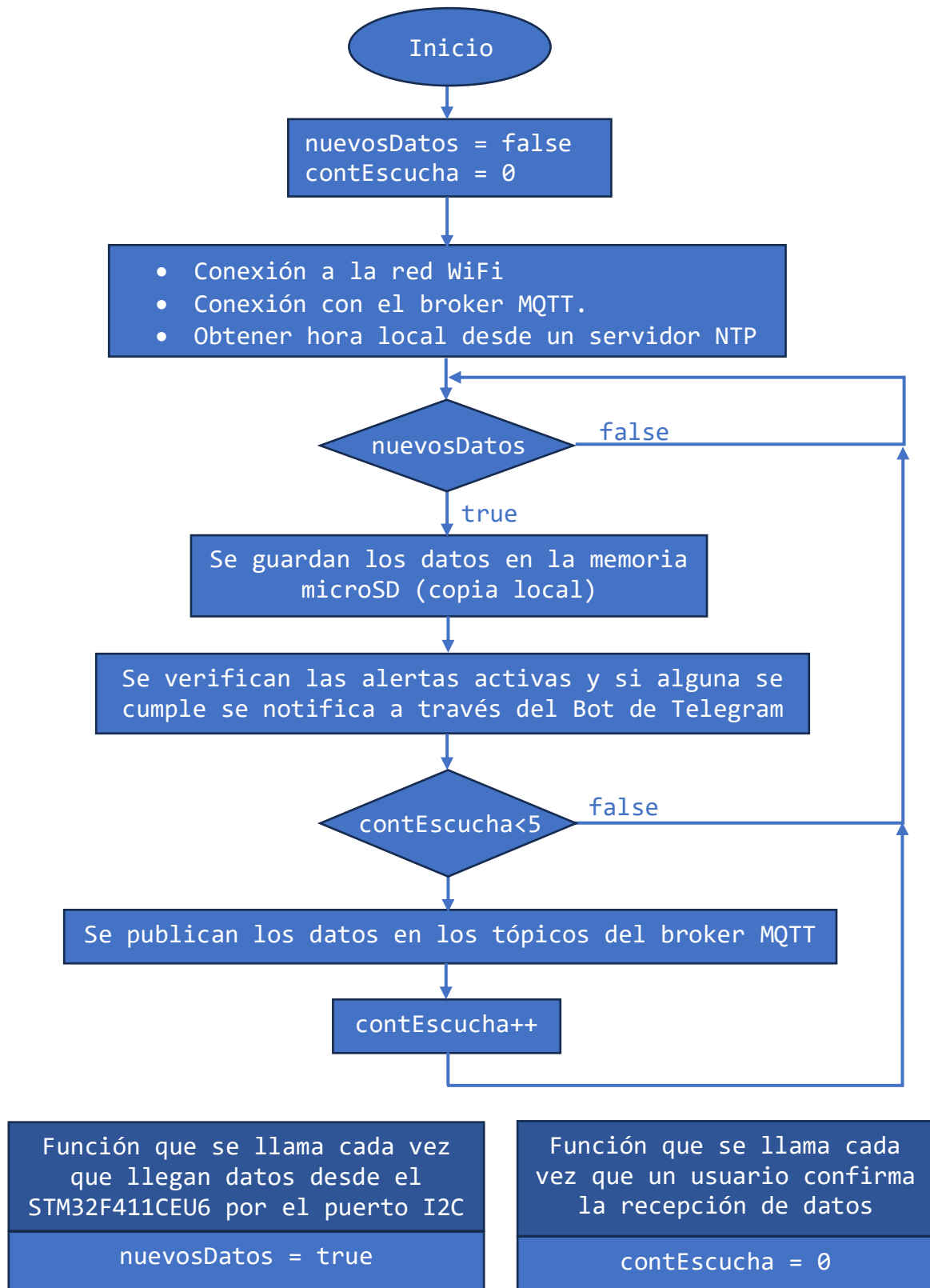



Figura 36 - Diagrama de flujo correspondiente al ESP32

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023


2.5.2 Idea general del código

Como se dijo anteriormente, el ESP32 es el nexo entre la obtención de los datos y la interfaz de usuario. Si bien en el diagrama de flujo presentado antes se puede ver cuál es la secuencia que realiza el SoC, a continuación, la repetiremos con mayor detalle:

1. Recibe los datos desde el STM32F411CEU6 a través de un puerto I²C utilizando el mismo formato de estructuras de C que el STM32. Esto último con la idea de evitar la serialización de la información que implica pérdida de cifras significativas en variables de punto flotante y un mayor tamaño del mensaje.
2. Realiza una copia local los datos recibidos en una memoria no volátil de tipo microSD (ver sección 2.5.3).
3. Verifica si alguna de las alertas activas se cumple y de ser así lo notifica utilizando un Bot de Telegram (ver sección 2.5.4).
4. Publica los datos en los tópicos del broker MQTT solo si algún usuario tiene abierto un Dashboard. De lo contrario no envía nada para evitar consumir la cuota de tráfico gratuita del broker (ver sección 2.6).

Además de estas tareas secuenciales, el ESP32 también se encarga de gestionar otras funciones del Bot de Telegram como la consulta de datos en tiempo real y la lista de contactos a los que deben enviar las alertas. A su vez, realiza algunas funciones en conjunto con el Dashboard como lo es la consulta de datos históricos que será explicada más adelante.

Por último, cabe mencionar que a la hora de programar el ESP32 optamos por utilizar Visual Studio Code con el Plugin PlatformIO que está específicamente diseñado para el desarrollo de sistemas embebidos. A su vez el código fue escrito utilizando el lenguaje Arduino, el cual está basado en C lo que le confiere una gran versatilidad. Además, al usar Arduino tenemos acceso a una gran cantidad de librerías que agilizan en gran medida el desarrollo con el ESP32.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.5.3 Memoria microSD

Una de las funciones más importantes que realiza el ESP32 es la de almacenar los datos que recibe del STM32F411CEU6 en una memoria no volátil de tipo microSD. Esto se realizó con la idea de generar una copia local de los datos que se obtienen, independientemente de lo que pase con la conexión a Internet. Para ello se utilizó el módulo adaptador para microSD que se puede ver en la Figura 37, el cual se comunica con el ESP32 a través de un puerto SPI (Serial Peripheral Interface).

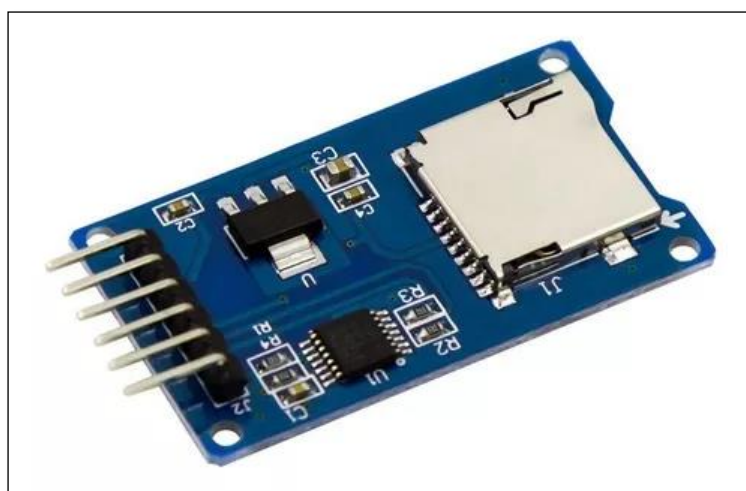



Figura 37 - Modulo adaptador microSD. Extraída de [16]

Esta copia local puede ser de utilidad si se quiere estudiar el estado de la red eléctrica en un periodo en específico, así como también obtener el valor de la energía consumida en dicho periodo. Para ello, los datos son guardados en la memoria microSD en archivos individuales para cada mes utilizando formato csv (valores separados por comas) con una estampa de tiempo a su lado. Esto último hace que la información pueda ser importada de forma sencilla a Excel para su posterior análisis.

2.5.4 Bot de Telegram

Otra de las partes gestionadas por el ESP32 es un Bot de Telegram que es usado con dos funciones principales:

- Enviar alertas cuando se dan condiciones extremas programadas por el usuario. Estas alertas son recibidas por todos los usuarios de Telegram que hayan pedido

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023


ser añadidos a la lista de notificados, la cual es almacenada en memoria no volátil por el ESP32.

- Enviar el ultimo bloque de datos recibido por el ESP32 cuando un usuario lo solicita. Esta modalidad se implementó con la idea de tener una alternativa de consulta de datos cuando no se dispone de una computadora para ejecutar el Dashboard.

Para poder interactuar con este Bot se crearon una serie de comandos que se detallan en la Tabla 1.

Comando	Función
Help	Devuelve la lista de comandos disponibles.
Info	Devuelve información del estado actual de la red.
Alertame	Añade al usuario a la lista de alertas.
NoAlertame	Quita al usuario de la lista de alertas.
EstadoAlertas	Devuelve información sobre el estado de las alertas.

Tabla 1 - Comandos Bot de Telegram

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.6 Broker MQTT

El broker MQTT es otra de las partes fundamentales de este proyecto debido a que es el que nos posibilita conectarnos a Internet para transmitir nuestros datos. Para entender que función cumple el broker primeramente debemos introducir que es el protocolo MQTT.

MQTT es un protocolo de bajo peso desarrollado para ser utilizado en dispositivos IoT, el cual utiliza un modelo de publicación y suscripción. Esto quiere decir que no se envían mensajes directamente entre dispositivos, sino que el remitente publica un mensaje en un tópico y los destinatarios son todos los dispositivos que estén suscriptos a ese tópico. En este esquema el broker cumple la función de intermediario por lo que se encarga de recibir los mensajes que se publican en los tópicos y enviárselos a los dispositivos que estén suscriptos a ellos. Esto se puede ejemplificar con la Figura 38.

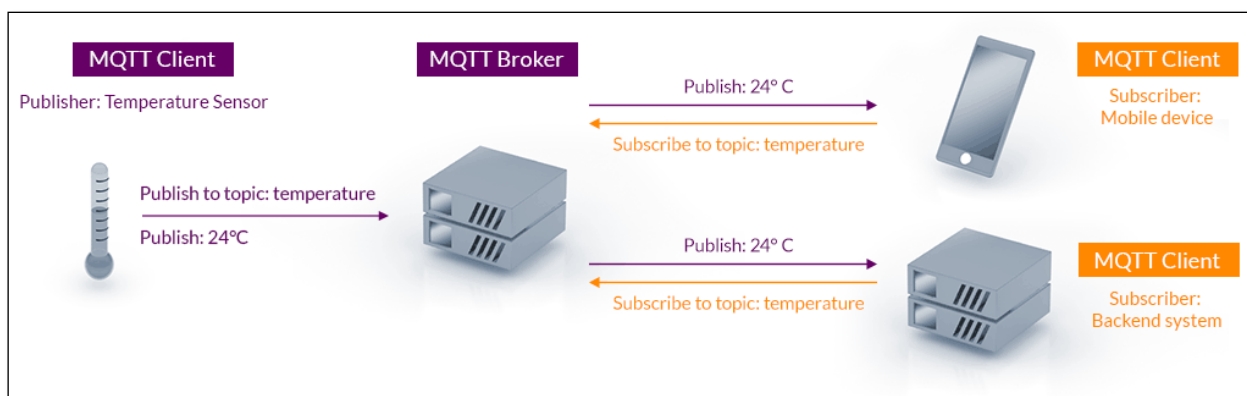



Figura 38 - Esquema MQTT. Extraída de [17]

Cada dispositivo (generalmente conocido como cliente) posee un identificador que es utilizado por el broker para filtrar los mensajes que recibe en los tópicos y enviárselos si están suscriptos a ellos. Para comunicarse con el broker los dispositivos lo hace utilizando el protocolo TCP/IP lo que le da robustez al sistema ya que le aporta corrección de errores y garantiza que los paquetes lleguen en orden. A su vez, en nuestro caso decidimos sumar encriptación TLS (Seguridad de la capa de transporte) para aumentar la seguridad de las conexiones.


A la hora de implementar un broker MQTT existen dos caminos principales. El primero es alojar nosotros mismos un broker open source como Mosquitto, lo que implica que

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

necesitamos hardware dedicado y si queremos que nuestro esquema funcione más allá de una red LAN (red de área local) necesitamos una IP pública. El segundo es utilizar alguna de las opciones de brokers cloud, lo que quiere decir que nosotros no tenemos que alojar el servicio y al ser cloud no estamos restringidos a una red LAN si no tenemos una IP pública. Si bien esta última opción es más práctica, su uso tiene un costo mensual que depende del proveedor.

Luego de investigar diversas opciones decidimos utilizar un servicio que fue lanzado a principios de 2023 por la empresa EMQX que se denomina “Serverless MQTT Broker”, el cual es un broker cloud que está pensado para desarrollos de IoT en sus etapas iniciales. La principal ventaja que encontramos es que posee una cuota gratuita de 1 millón de minutos y 1GB de tráfico que se renuevan mensualmente, lo que significa que obtenemos todo lo bueno de un broker cloud a costo cero. A su vez EMQX nos provee de una interfaz con la que podemos administrar completamente el broker tal y como si lo estuviéramos alojando nosotros. Aquí podemos añadir usuarios con contraseña y a la hora de conectarse al broker el mismo realiza el control de acceso.

Cabe destacar que a la hora de diseñar nuestro proyecto tuvimos en cuenta que el dispositivo pueda funcionar utilizando la cuota de tráfico gratuita que nos ofrece EMQX. Esto se realizó así debido a que el prototipo desarrollado fue instalado en el edificio de nuestra facultad y la idea es que fuese libre de mantenimiento.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.7 Interfaz de usuario – Dashboard

La interfaz gráfica de usuario fue desarrollada en su totalidad haciendo uso de Qt Creator. El principal motivo de esta elección era la experiencia previa que poseíamos en el uso de este framework. A su vez, conocíamos de varias herramientas que nos fueron útiles para el desarrollo de la interfaz.

Esta sección se centrará en la presentación de las diversas ventanas que componen la interfaz. No se realizará un desarrollo detallado de diagramas de flujo, ya que resulta complicado resumir el funcionamiento mediante un diagrama de este tipo. Ya que, en resumen, la interfaz se encarga de recibir los datos procedentes del ESP32 y los exhibe en la pantalla, como se detallará a continuación.


2.7.1 Ventana principal. Datos generales

Al iniciar la interfaz nos encontramos con la ventana que se muestra en la siguiente imagen:



Figura 39 - Interfaz gráfica. Ventana de inicio

Aquí podemos observar la pantalla de inicio de la interfaz. Al no encontrarnos conectados al broker se encuentran deshabilitadas todas las funcionalidades y claramente no contamos con ningún tipo de dato en pantalla. Para conectarnos a dicho broker debemos

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

realizar un click sobre el botón ubicado arriba a la derecha. Si realizamos esto, se nos abre la siguiente ventana:

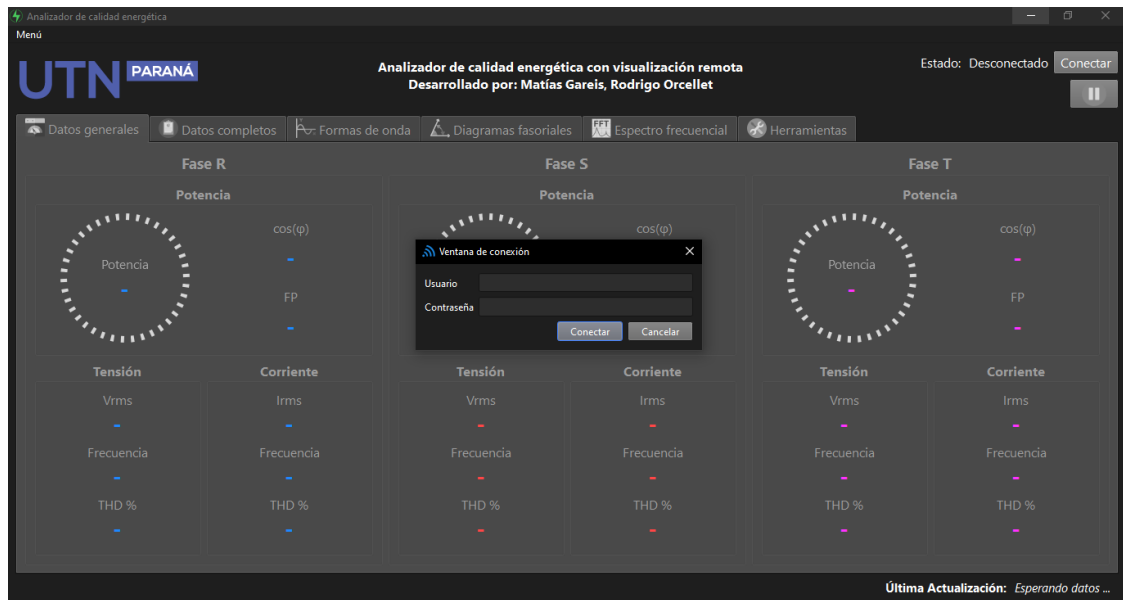


Figura 40 - Interfaz gráfica. Ventana de conexión

Aquí se pide un usuario y contraseña para poder ingresar. Los usuarios con acceso son asignados y configurados por nosotros desde la interfaz del broker EMQX. Una vez que el usuario ingresa de manera correcta, se habilitan las funcionalidades y empiezan a llegar los datos. Esto se puede ver en la próxima imagen:

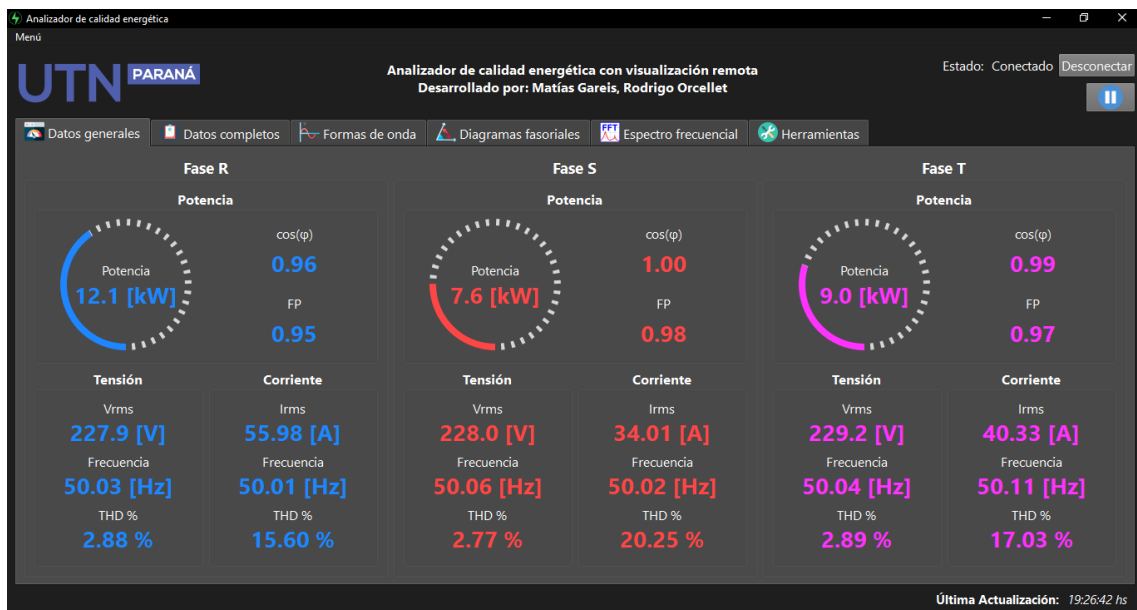



Figura 41 - Interfaz gráfica. Datos generales

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Aquí en la pestaña de datos generales podremos encontrar la información de mayor interés en lo que respecta a un análisis de consumo de la red. A su vez, en la esquina inferior derecha podemos encontrar la hora, minutos y segundos de la última actualización, para así poder darnos cuenta si la información se está refrescando de manera correcta (cada 5 segundos).


Asimismo, debajo del antiguo botón de Conectar (ahora Desconectar) podemos encontrar un botón que nos sirve para pausar la actualización de información. Esto es de gran utilidad para poder hacer un análisis minucioso sin actualizaciones constantes de información.

2.7.2 Datos completos

La información presentada en la pestaña anterior es un resumen de todos los datos que son medidos y analizados de cada una de las señales. Es por ello, que surgió la necesidad de realizar una nueva pestaña donde se presente toda la información correspondiente a cada una de las fases y del neutro. En la próxima imagen se muestra una captura de pantalla de esta pestaña.



Figura 42 - Interfaz gráfica. Datos completos

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Como se puede apreciar en la imagen existe un menú desplegable (marcado en rojo) para seleccionar la fase de la cual se desea obtener información. Luego de la selección de alguna de la fase se brindará información sobre la tensión, corriente y otros datos generales que provienen de la combinación de los dos anteriores. En caso de seleccionar el neutro solamente tendremos información de la corriente, tal como se ve en la siguiente imagen:

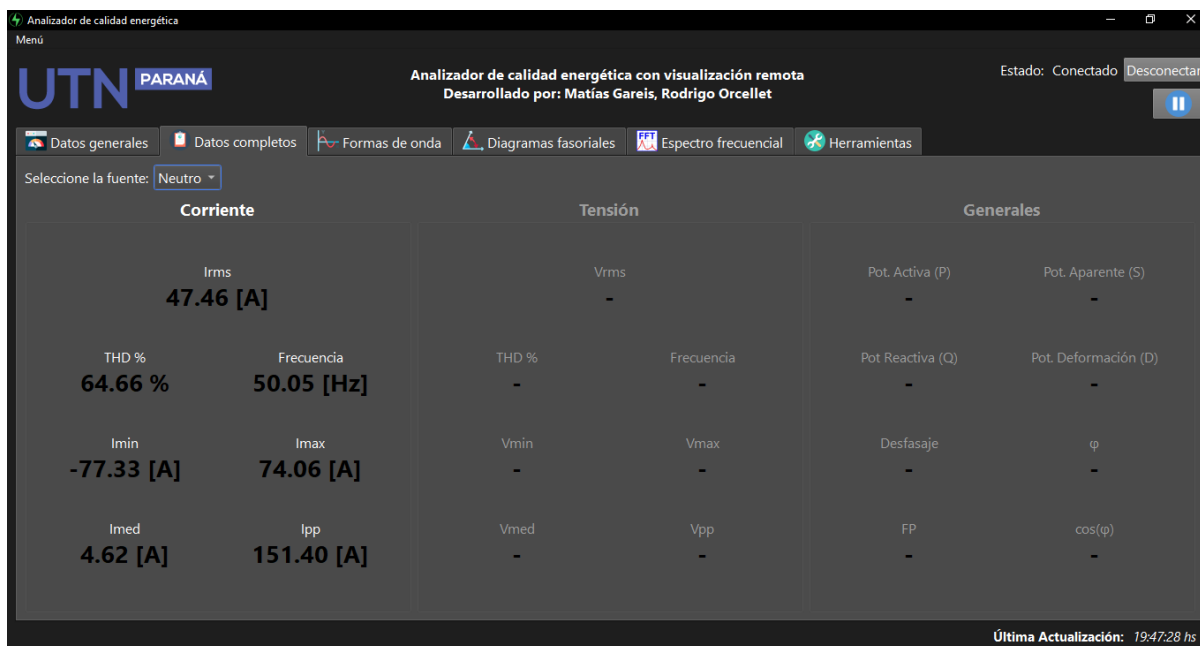


Figura 43 - Interfaz gráfica. Datos completos. Neutro

2.7.3 Formas de onda

Un aspecto que nos resultaba interesante y útil que posea nuestro equipo era la visualización de las formas de onda de las señales de tensión y corriente. De esta manera, se desarrolló una pestaña para cumplir con este objetivo. En dicha pestaña el usuario puede seleccionar a elección la o las formas de ondas que desee visualizar, tal como si fuese un osciloscopio.

Aquí cabe recalcar lo mencionado en la sección 2.4.6 donde se comentó que las formas de onda que se grafican son el resultado de una reconstrucción de la señal a partir de sus armónicos y haciendo uso de la Serie de Fourier. En las próximas imágenes se presentan algunas de las formas de onda graficadas.

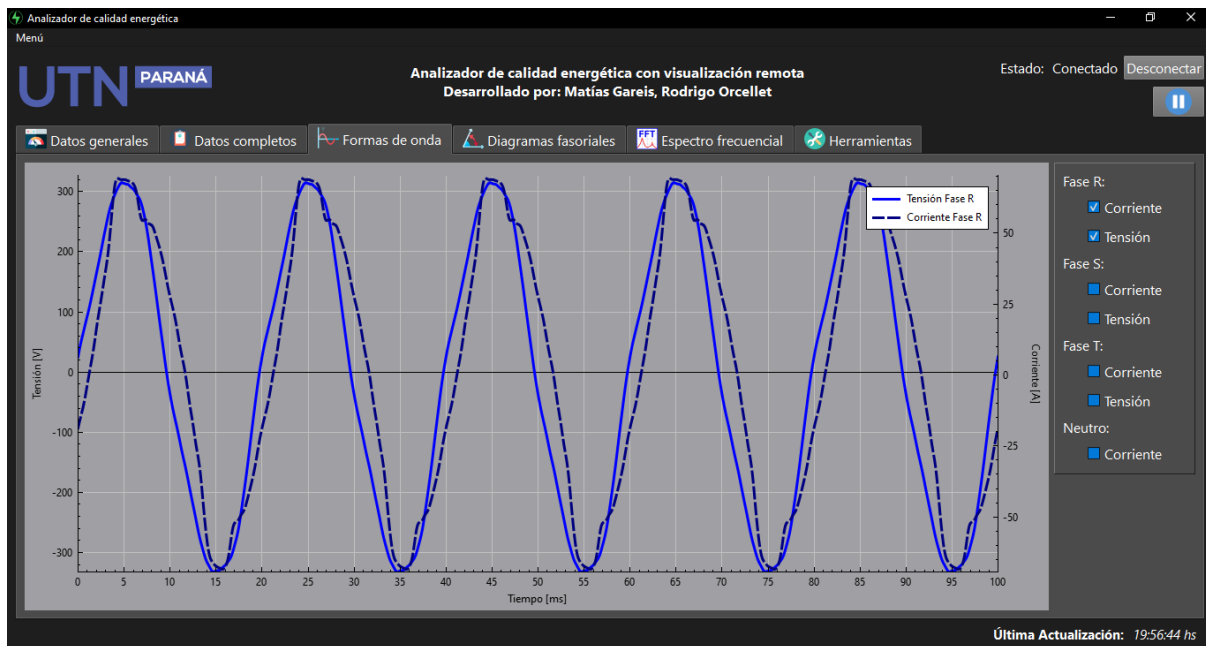


Figura 44 - Interfaz gráfica. Formas de onda Fase R.

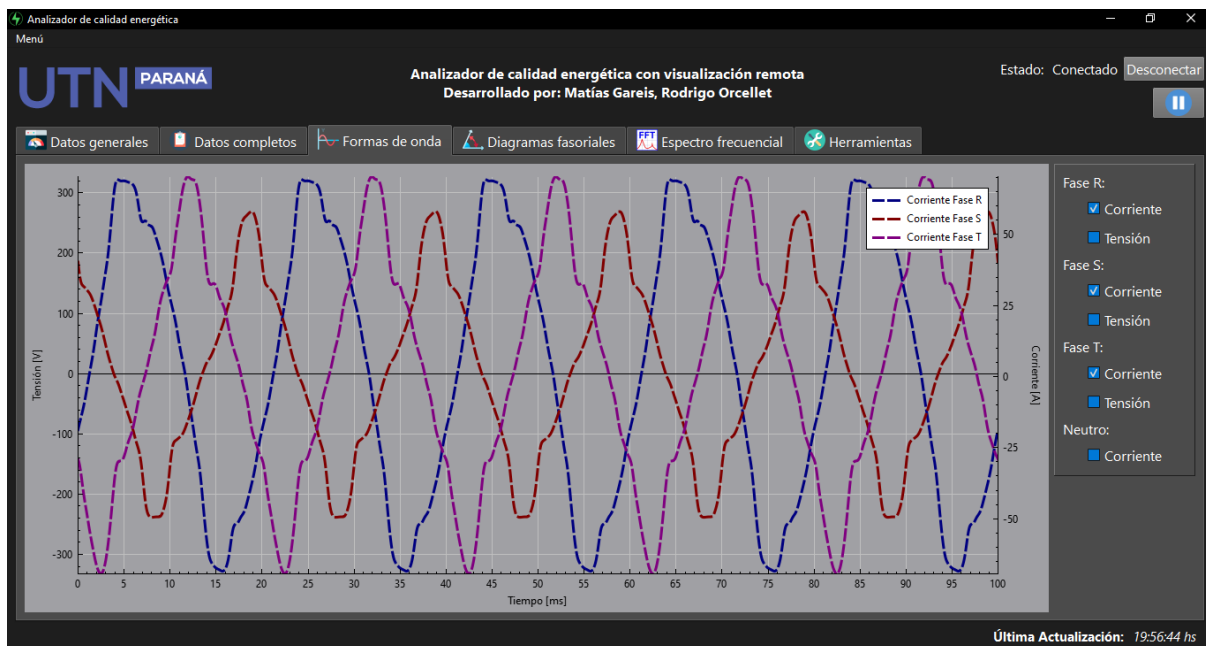



Figura 45 - Interfaz gráfica. Formas de onda corrientes.

Como se puede ver en las imágenes, las formas de onda se logran visualizar de forma adecuada. Luego en la sección de Resultados, se analizará con más detalle si las formas representadas en esta interfaz son realmente un reflejo de la realidad.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.7.4 Diagramas fasoriales

Algo que también resulta de gran utilidad para quien se encuentra encargado de gestionar una red eléctrica, es poder visualizar el diagrama fasorial de dicha instalación. Es por ello, que también nos avocamos a la realización de este. La pestaña desarrollada se muestra en la siguiente imagen:



Figura 46 - Interfaz gráfica. Diagramas fasoriales.

Como se puede ver, en el diagrama se encuentran representadas las tensiones y corrientes de cada una de las fases. A su vez, en el lado izquierdo encontramos información de interés que complementa a este diagrama, destacándose la presentación del desfase angular entre los fasores de tensión y corriente de cada fase.

2.7.5 Espectro frecuencial

Como se ha mencionado a lo largo del informe, un aspecto que consideramos desde el primer momento era que nuestro equipo tenga la posibilidad de realizar mediciones de armónicos para las señales de tensión y corriente. Esto fue posible y por ello añadimos una pestaña a la interfaz donde se puede visualizar el espectro frecuencial de cada una de las señales. En la próxima imagen, se presenta la visualización de esta pestaña.

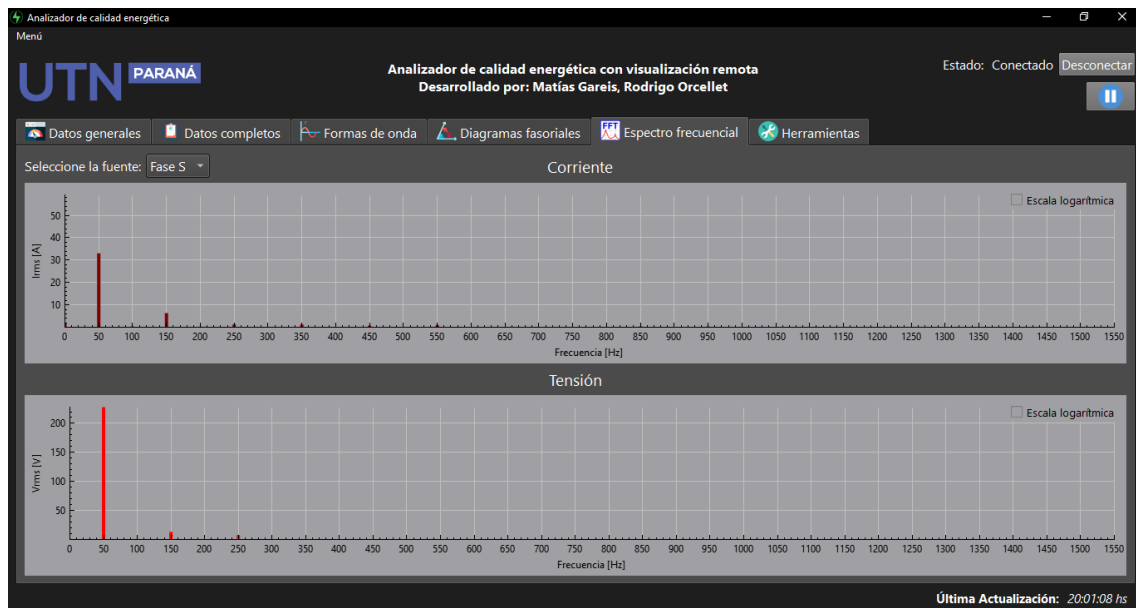


Figura 47 - Interfaz gráfica. Espectro frecuencial. Escala lineal.

De la misma forma que para la pestaña de “Datos completos” se añadió un menú desplegable donde se puede seleccionar de que fase se desea obtener la representación del espectro. Asimismo, otra funcionalidad que fue incorporada es la posibilidad de visualizar el espectro en escala logarítmica. Para ello se debe seleccionar la opción que figura en la esquina superior derecha de cada gráfica. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de esto:

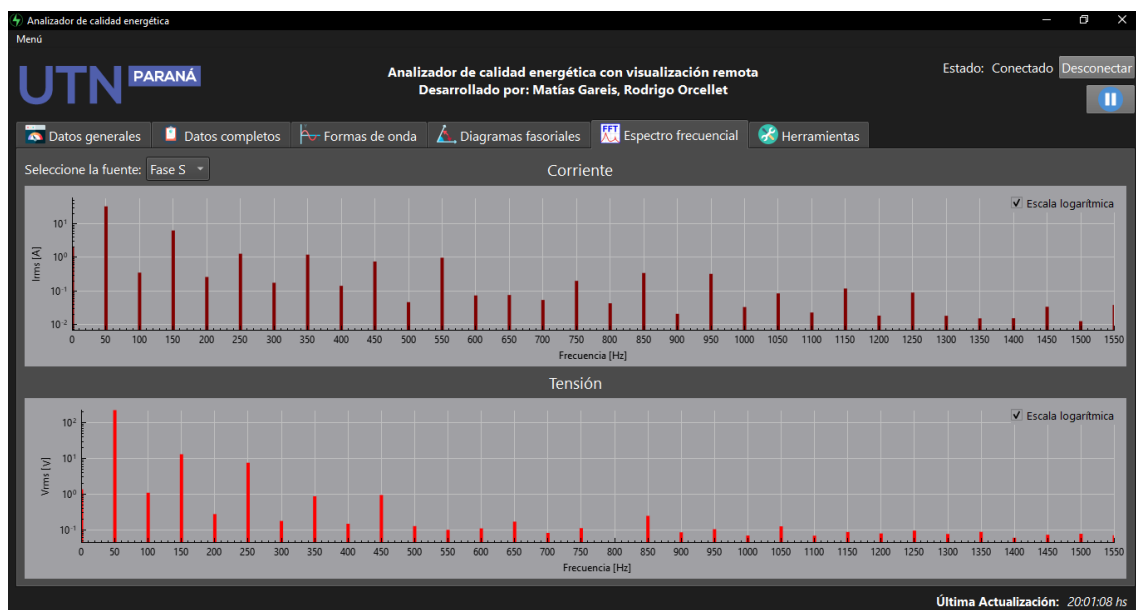


Figura 48 - Interfaz gráfica. Espectro frecuencial. Escala logarítmica



2.7.6 Herramientas adicionales

La última pestaña desarrollada se titula “Herramientas” y posee dos funcionalidades importantes. Antes de entrar en detalle se presenta una captura de pantalla de dicha pestaña:

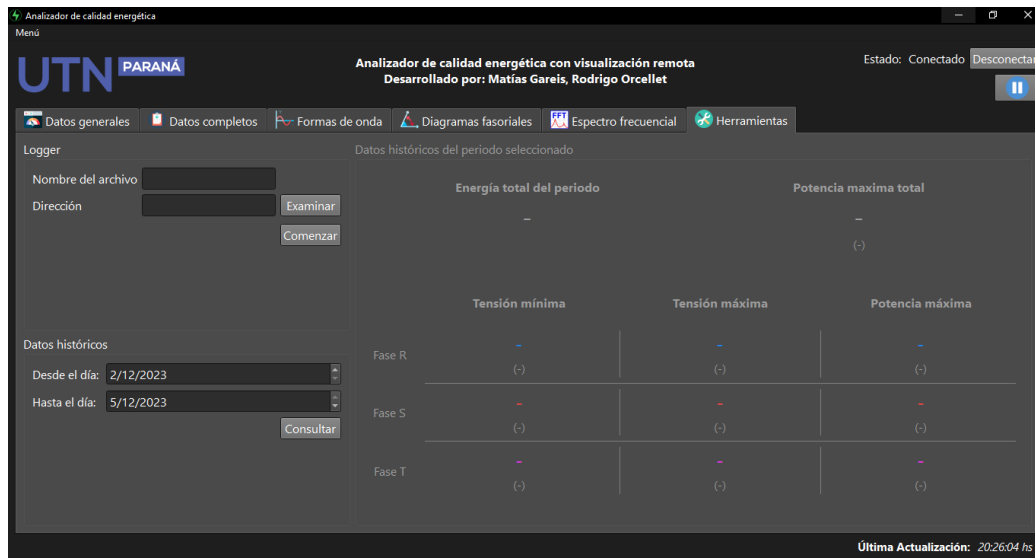


Figura 49 - Interfaz gráfica. Herramientas

En primer lugar, encontramos una sección titulada “Logger”. Aquí se puede inicializar un registro de datos que serán almacenados en la PC en un archivo de formato .csv para un posterior análisis en alguna planilla de cálculos (Excel, por ejemplo). La siguiente imagen, ilustra eso último.

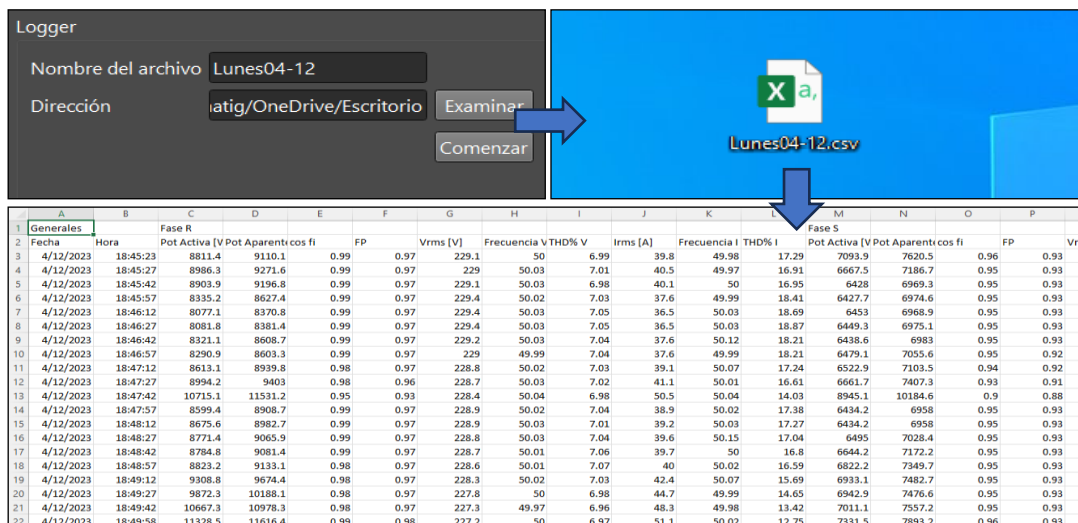



Figura 50 - Ejemplo funcionamiento Logger

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

La otra funcionalidad es la consulta de datos históricos al ESP32. Para esto debemos indicar el periodo del cual se desea conocer el registro histórico. En función de ello el ESP32 accederá a la memoria microSD recopilando toda la información solicitada. A continuación, se presenta un ejemplo.

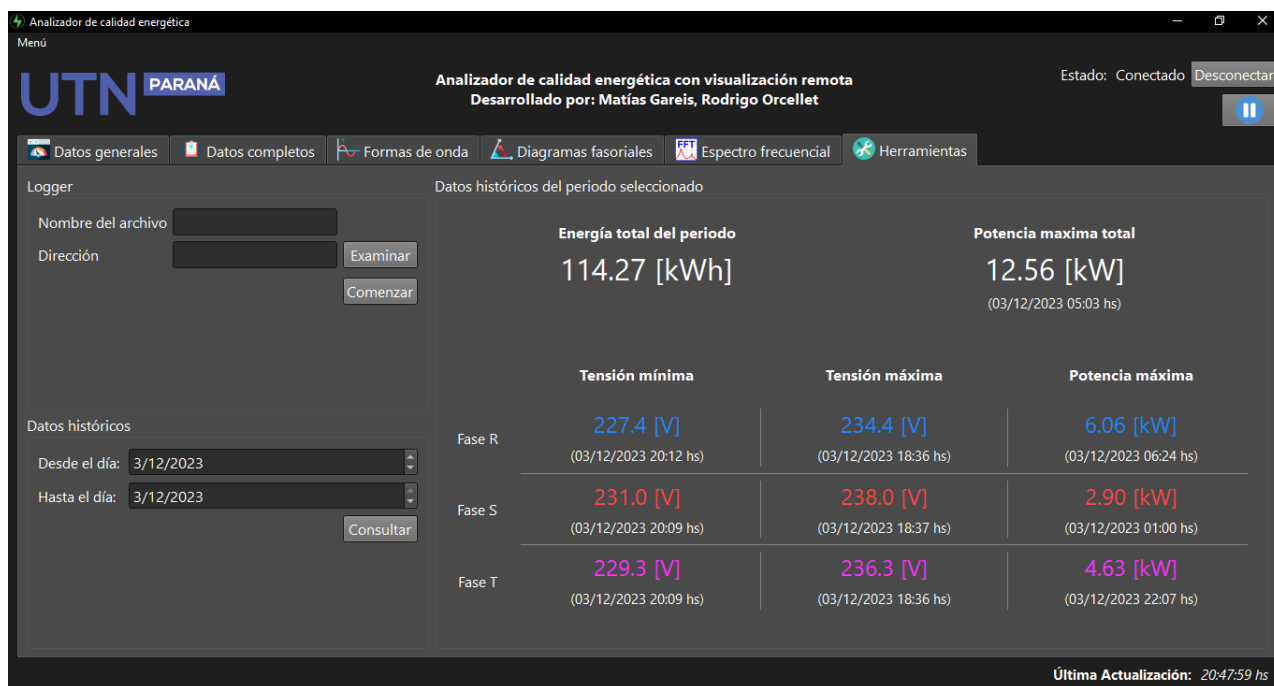


Figura 51 – Interfaz gráfica. Consulta de datos históricos

Aquí lo que se muestra es la consulta de los datos respecto al domingo 3/12/2023. Los datos que se presentan incluyen la energía consumida en el periodo junto a otros valores extremos (mínimos o máximos) junto a la fecha y hora de su ocurrencia.

2.7.7 Menú

El último punto a resaltar de esta interfaz es la existencia de una ventana denominada Menú ubicada en la esquina superior derecha de la interfaz. Dentro de este menú se pueden encontrar algunas configuraciones tanto de la interfaz como del funcionamiento general del equipo. En la siguiente figura se muestra esta ventana.

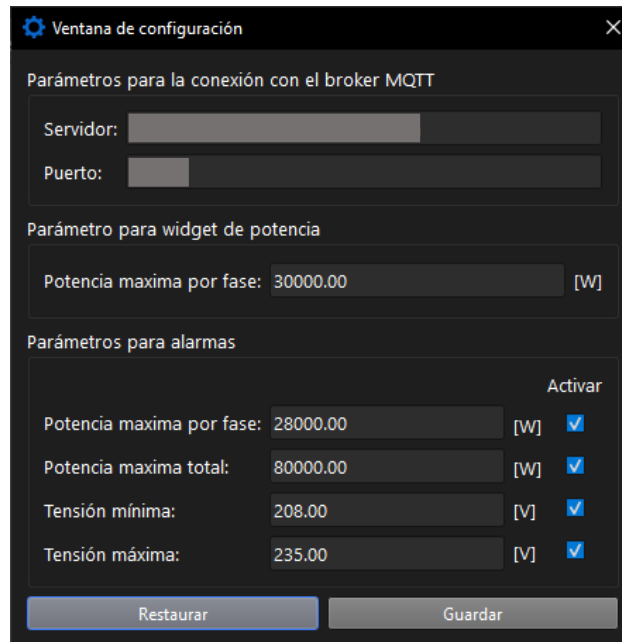



Figura 52 - Interfaz gráfica. Ventana de configuración

Desde esta pestaña se puede configurar las credenciales del broker MQTT, facilitando así una transición a otro broker si lo fuese necesario. Por otro lado, se puede configurar el nivel máximo del widget de potencia de la ventana Datos generales. Por último, se puede establecer los umbrales de potencia y tensión que dispararían la alarma vía Telegram.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.8 Esquema final

Una vez completado el desarrollo y las pruebas de todas las secciones descriptas en ese capítulo, iniciamos con la construcción del esquema final de nuestro proyecto. Este proceso abarcó diversos aspectos, como el diseño de la PCB, la elección de un gabinete apropiado y la posterior instalación en el tablero principal de la facultad. A continuación, iremos describiendo cada uno de estos aspectos.

2.8.1 Diseño circuito final y PCB

Ya habiendo desarrollado todas las etapas presentadas, el diseño del circuito final se basó simplemente en unificar todas ellas en un único esquemático. Solamente como aspecto adicional a lo ya presentado, se añadió al esquema una fuente de alimentación AC-DC marca Hi-Link de 5V 1A. Esta se puede ver en la siguiente imagen.



Figura 53 - Fuente de alimentación Hi-Link. Extraída de [18]

Para alimentar a esta fuente se aprovecha la tensión obtenida entre la fase R y el Neutro. Por otro lado, para el diseño de la PCB se tomaron las precauciones correspondientes para mantener en todo momento la aislación entre la tensión de línea y la tensión DC usada para alimentar las distintas etapas de la PCB. Asimismo, como criterio de diseño se decidió utilizar en todos los puntos que era posible componentes SMD para optimizar el espacio utilizado. También la utilización de una PCB doble cara facilitó el trazado de las pistas y permitió generar un gran plano de masa que ayuda a reducir la ocurrencia de interferencias electromagnéticas.



En las siguientes imágenes se presenta la PCB diseñada e implementada.

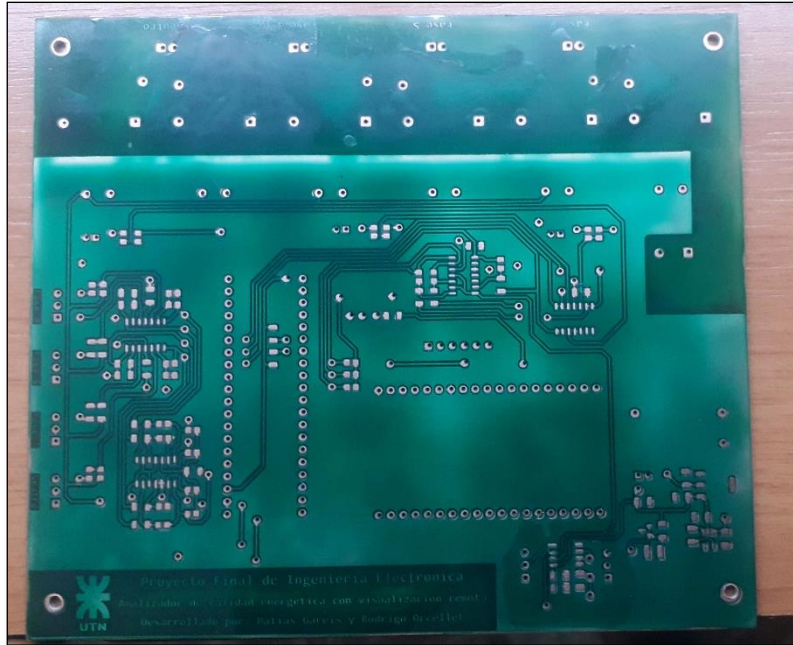


Figura 54 - PCB principal sin componentes (Top Layer)

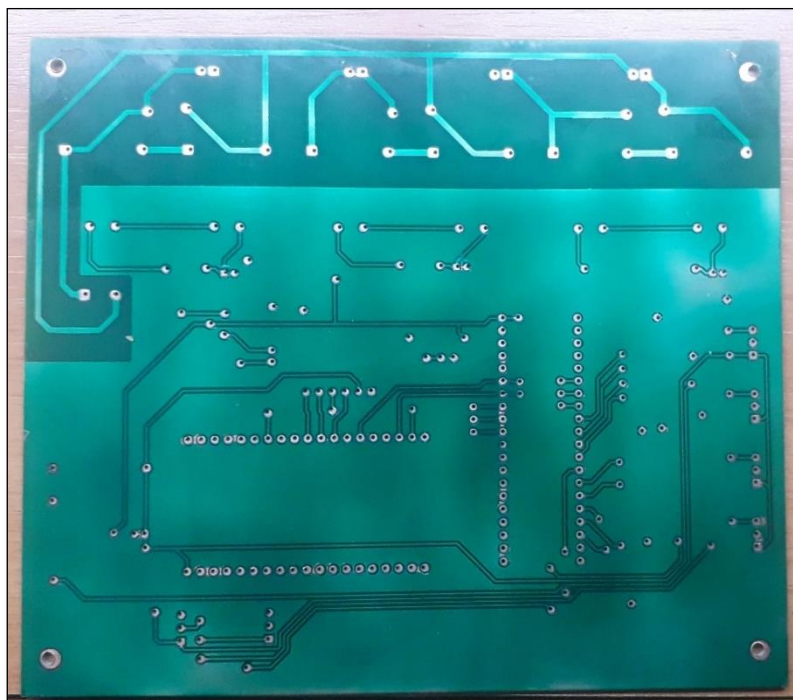
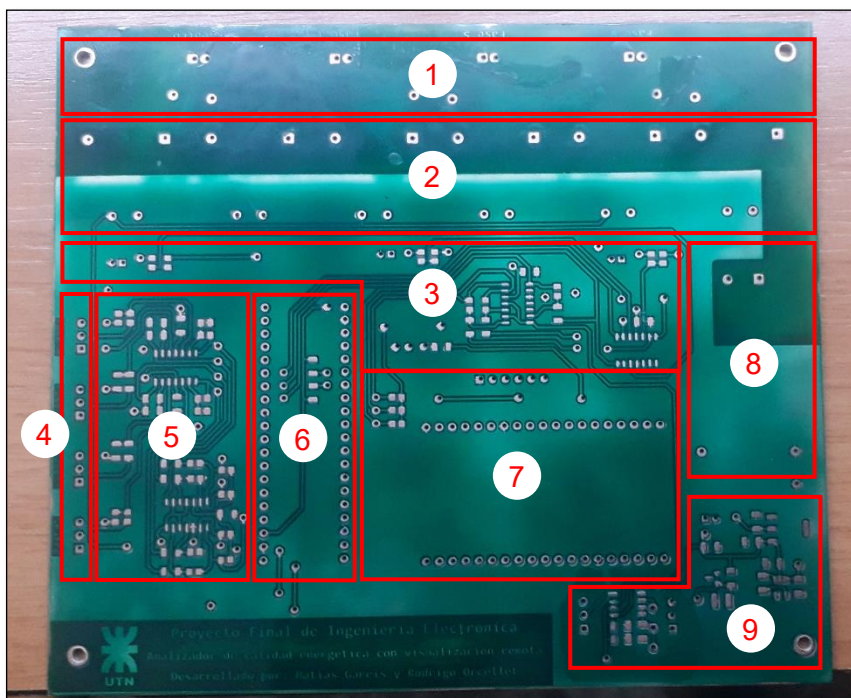


Figura 55 - PCB principal sin componentes (Bottom Layer)

Luego de esto, procedimos a llevar a cabo la soldadura de los componentes de manera progresiva, etapa por etapa. De esta manera, conforme avanzábamos en la



construcción de la PCB, realizábamos pruebas en los diferentes puntos del circuito para asegurar su correcto funcionamiento. En las siguientes imágenes, se identifican las distintas etapas en la PCB y se muestra el resultado final.



- (1) Entrada de las señales de tensión junto a su varistor.
- (2) Transformadores de tensión.
- (3) Etapa de adaptación de señales para tensión.
- (4) Entrada de las señales de corriente.
- (5) Etapa de adaptación de señales para corriente.
- (6) Placa de desarrollo SMT32.
- (7) Placa de desarrollo ESP32 junto al adaptador de memoria microSD y led de estado.
- (8) Fuente de alimentación.
- (9) Adaptación de tensiones para alimentación y referencias.

Figura 56 - Identificación de etapas en PCB principal

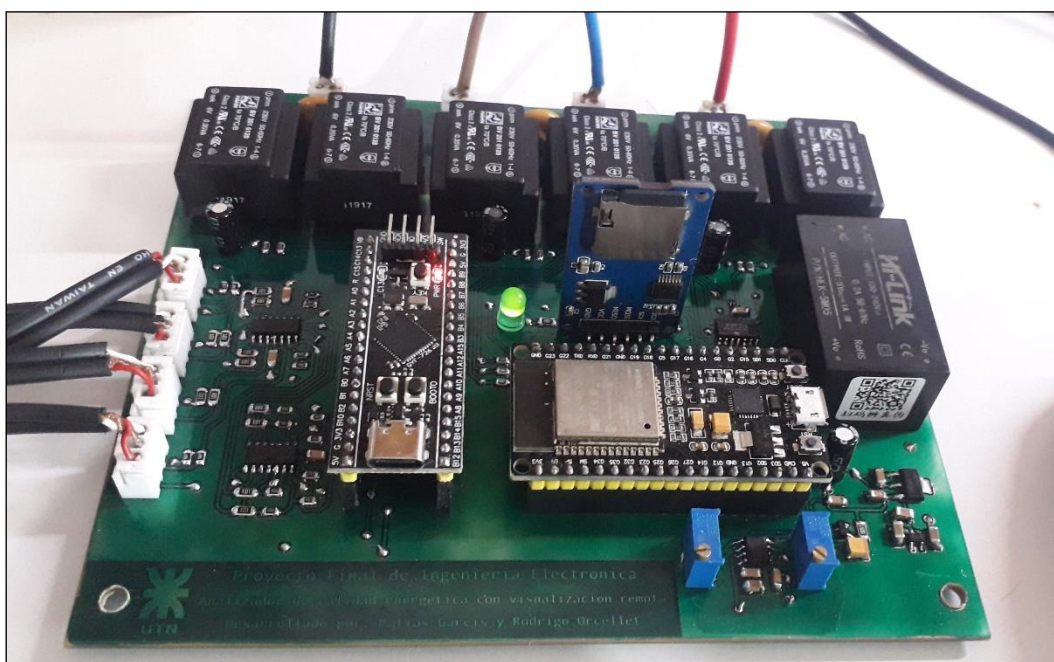


Figura 57 - PCB principal



2.8.2 Testeo y calibración

Una vez soldados todos los componentes en la PCB, se procedió a medir y calibrar las tensiones que son utilizadas como referencias para las distintas etapas del circuito. Los resultados obtenidos fueron los deseados y se presentan en las siguientes imágenes.

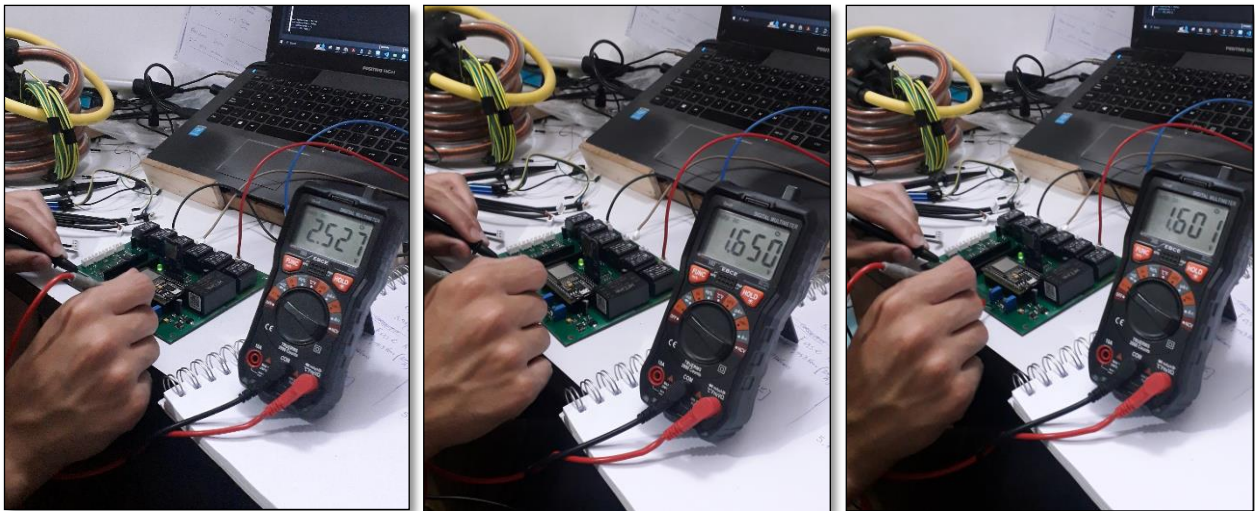


Figura 58 - Referencia LM341 / Referencia nivel medio ADC / Referencia comparador

Por su parte, se procedió a realizar una primera calibración de las bobinas tomando como referencia a la ya mencionada bobina Rogowski de marca Amprobe. Para esto se utilizó la configuración que se muestra en la Figura 59.

El testeo consistió en ir comparando la señal entregada por cada una de las bobinas caseras respecto a la de referencia. De esta forma se pudo determinar la sensibilidad real de cada una de ellas. Los resultados fueron:

Fase R	Fase S	Fase T	Neutro
4,65 $\left[\frac{mV}{A} \right]$	5 $\left[\frac{mV}{A} \right]$	5,46 $\left[\frac{mV}{A} \right]$	5,28 $\left[\frac{mV}{A} \right]$

Tabla 2 - Sensibilidad Bobinas Rogowski

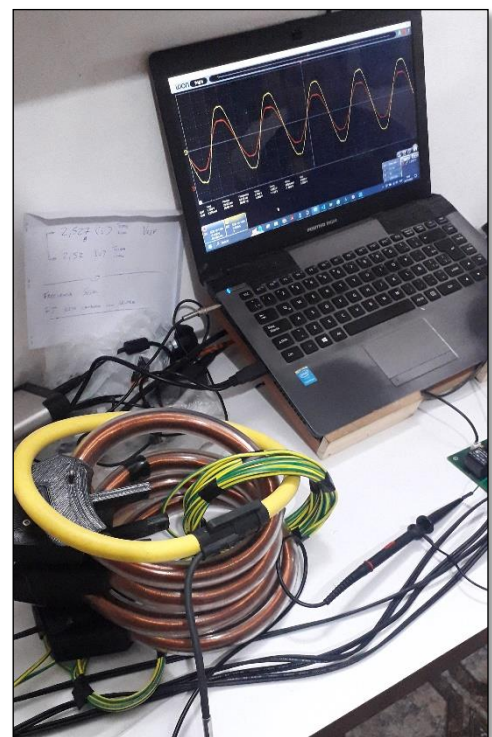



Figura 59 - Calibración bobinas

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

2.8.3 Gabinete


Tal como hemos ido mencionando a lo largo de este informe, la ubicación final del equipo es en el pilar de entrada de la facultad. Por tal motivo, al encontrarse a la intemperie es muy importante tomar ciertas consideraciones sobre el gabinete a utilizar, buscando la mayor estanqueidad posible. En este contexto, la PCB se ha instalado dentro de dos gabinetes: uno de ellos fabricado mediante impresión 3D para facilitar su montaje al gabinete principal, mientras que el segundo (el principal) es de tipo estanco y cumple con la normativa IP65.

En la siguiente imagen, se puede ver el gabinete impreso en 3D con la placa montada en su interior. A su vez, se puede apreciar en el lado izquierdo la disposición de dos prensa-cables por donde ingresan, justamente, los cables de tensión y corriente.



Figura 60 - PCB principal montada en gabinete impreso en 3D

En la foto también se puede ver que el gabinete cuenta con dos orificios en su base, los cuales fueron colocados para facilitar el montaje de este al gabinete principal. En la

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

próxima imagen se presenta dicho montaje, donde a la caja impresa en 3D se le ha colocado su tapa.



Figura 61 - Disposición de los gabinetes

Como se puede apreciar en la parte inferior del gabinete estanco, se encuentra una unión caja-caño para acoplarle un caño de luz de 25mm de diámetro por donde se conducen los cables desde el pilar de luz. Esto se presentará con más detalle en la próxima sección.

2.8.4 Montaje final

Para poder llevar a cabo la instalación final de nuestro equipo fue necesario coordinar por medio de nuestro docente director un corte de luz programado en la facultad. Esto último fue necesario para poder tomar tensión directamente desde las barras de cobre que se ubican en el pilar. A su vez, el corte permitió que toda la instalación se pueda hacer sin ningún peligro de electrocución.

En la siguiente imagen se muestra la preparación de todos los elementos necesarios para la instalación.



Figura 62 - Preparación previa a la instalación

Tras esto, se procedió a realizar el corte de electricidad abriendo el seccionador principal ubicado aguas arriba a las barras. Allí se instaló en primera instancia una llave termomagnética con dos objetivos, uno de ellos para permitir cortar la energía del equipo cuando se lo desee manipular mientras que el otro para que actúe como protección ante sobre corrientes.

Luego de ello, se ubicaron las bobinas Rogowski con su correspondiente orientación en los conductores de cada una de las fases y el neutro. Allí se sujetaron todas ellas por medio de precintos a los conductores.

En la Figura 63 se puede apreciar a la derecha del gabinete la ubicación de la llave termomagnética y en los conductores el posicionamiento de las bobinas.

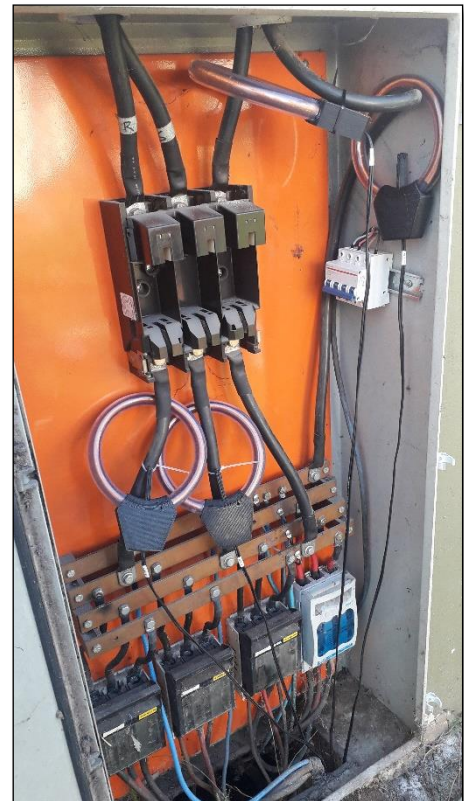


Figura 63 - Instalación térmica y bobinas



Una vez completado esto, el siguiente paso fue la instalación del gabinete de nuestro equipo. Esto también implicó la colocación de un caño de luz para poder conducir los diversos cables desde el pilar al equipo. En las siguientes imágenes se puede visualizar el trabajo realizado.



Figura 64 - Instalación del equipo junto al pilar

Terminado todo esto, se energizó el equipo y se verificó que todo funcione de acuerdo con lo esperado.



Capítulo 3: Resultados

Para poder determinar los resultados finales, se realizaron pruebas del equipo junto a un analizador energético comercial de la marca Fluke, más específicamente el modelo “Fluke 434 Power Quality Analyzer”. En la siguiente imagen se puede ver la disposición armada para estas pruebas.



Figura 65 - Pruebas del equipo junto a un analizador comercial

A continuación, iremos describiendo las distintas pruebas que fuimos realizando para determinar el correcto funcionamiento de nuestro equipo.



3.1 Valores RMS de tensión y corriente

Para realizar estas pruebas colocamos la interfaz gráfica funcionando al lado de la pantalla del analizador Fluke. De esta forma, podíamos ver los parámetros medidos por ambos instrumentos en tiempo real. A continuación, se muestra una imagen a modo ilustrativo donde se puede ver esto que se menciona.

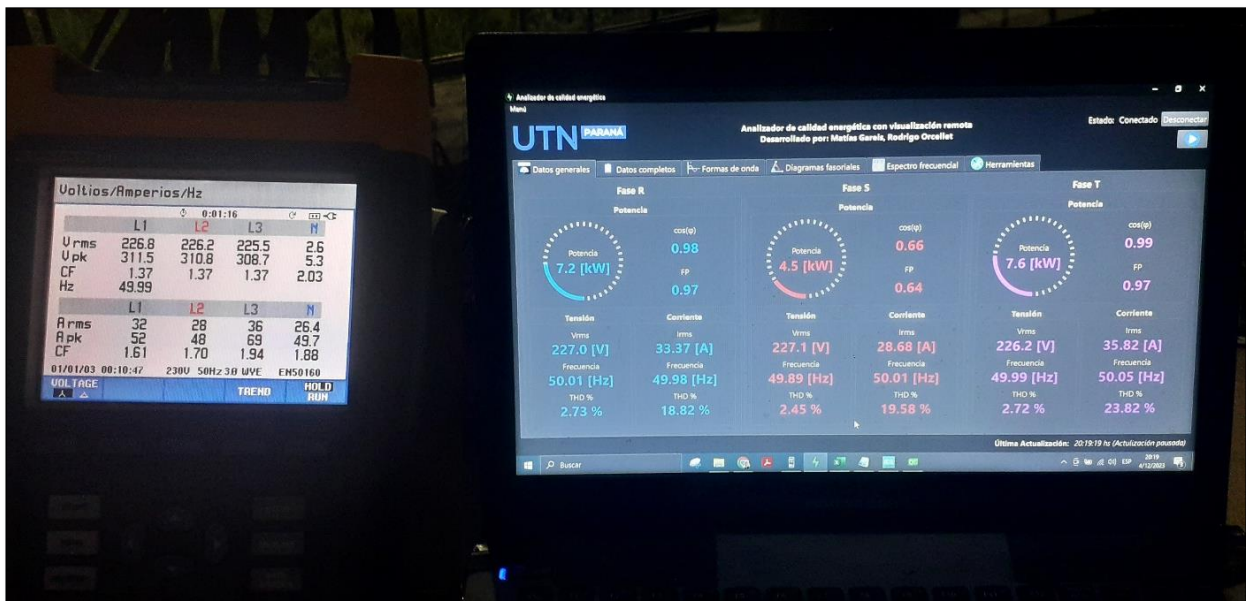


Figura 66 - Comparativa niveles de tensión y corriente

Este proceso fue repetido durante un cierto tiempo pudiendo tomar nota de los siguientes puntos:

- Cuando la corriente se encuentra por encima de los 15[A_{rms}] la precisión, en general, respecto al instrumento patrón es de +/- 1% llegándose a notar en alguna instancia un error de hasta el 2%. Por su parte, cuando la corriente se encuentra por debajo del umbral indicado la precisión decrece debido a que la señal proveniente de las bobinas es de muy baja amplitud.
- Por su parte, en la medición de tensión se ha observado un error máximo de 3[V] respecto al instrumento patrón. Lo que se traduce en un error aproximado del 1.5%.

Es relevante señalar que el instrumento comercial presenta una tasa de actualización de la información superior a la de nuestro equipo. En consecuencia, en determinadas



situaciones, es posible observar diferencias más notables. La razón principal radica en la presencia de cargas que generan un consumo esporádico y de muy corta duración, lo que provoca que en ciertas situaciones un equipo lo detecte mientras que el otro no.

3.2 Formas de onda

Se realizó una comparación entre las formas de onda que presenta la interfaz desarrollada por nosotros respecto a las formas de onda del equipo Fluke. Este ensayo se repitió en dos momentos distintos del día donde los consumos presentaban cierta variación. Los resultados obtenidos fueron muy buenos y se presentan a continuación:

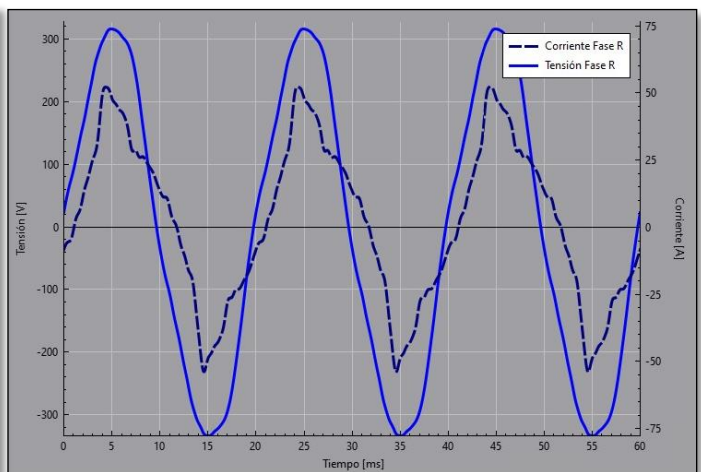


Figura 67 - Formas de onda Fase R. Comparativa N°1

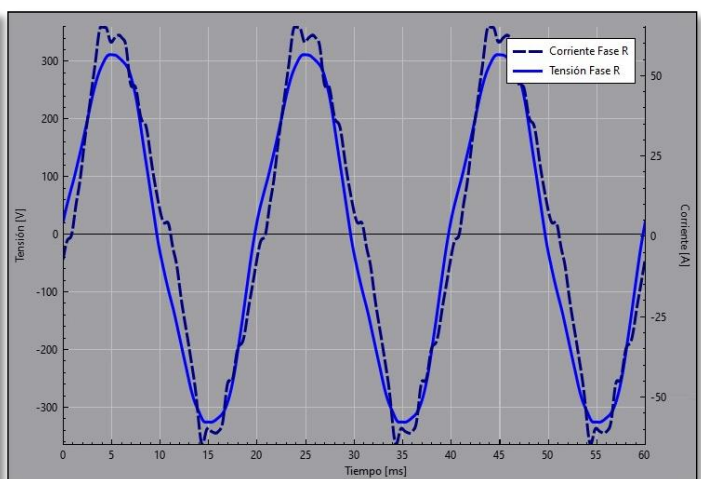
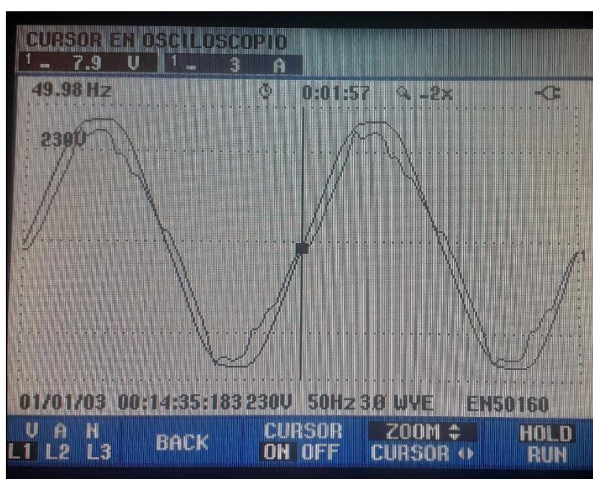


Figura 68 - Formas de onda Fase R. Comparativa N°2

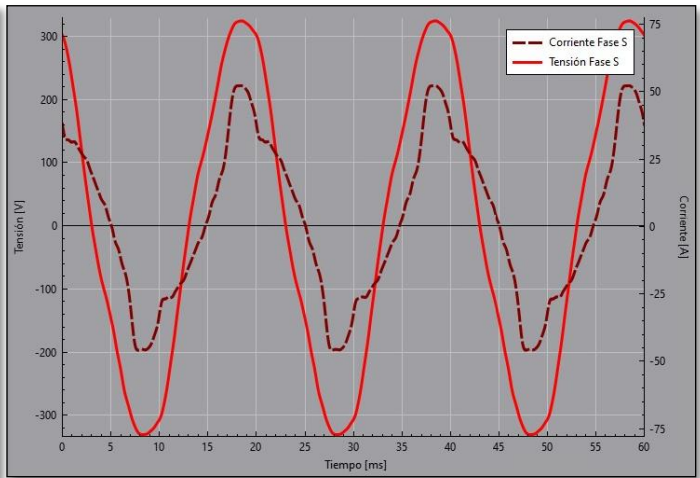
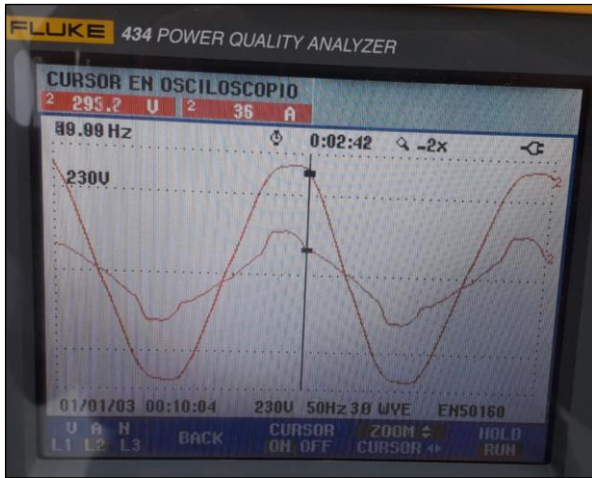


Figura 69 - Formas de onda Fase S. Comparativa N°1

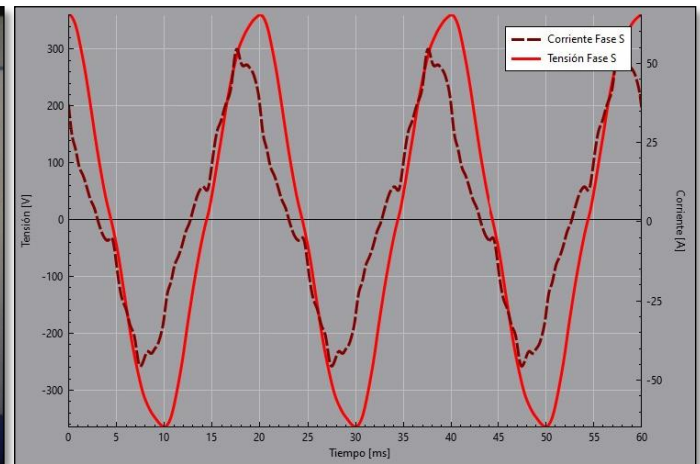
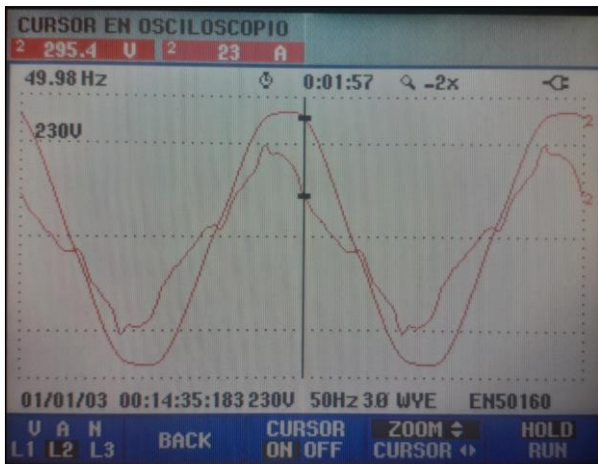


Figura 70 - Formas de onda Fase S. Comparativa N°2

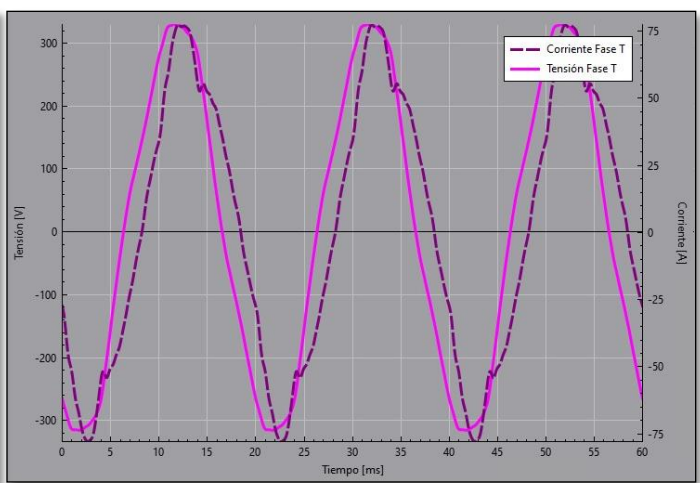
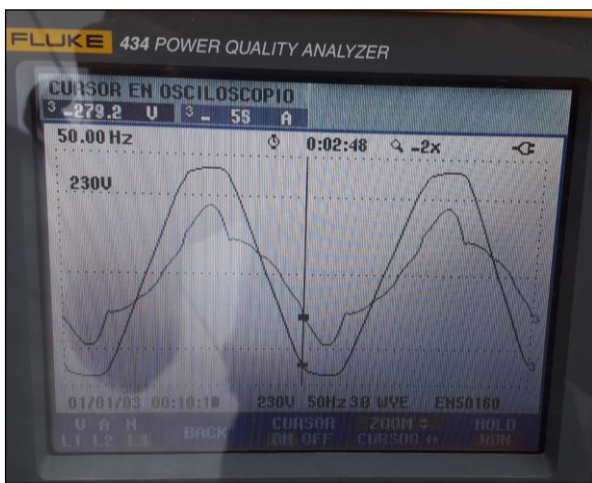


Figura 71 - Formas de onda Fase T. Comparativa N°1

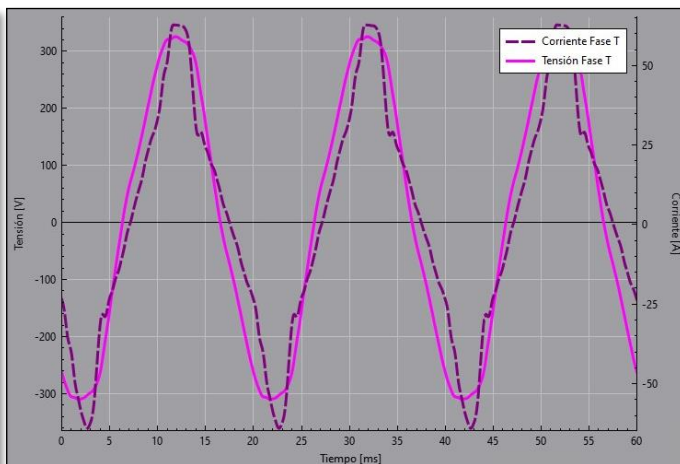
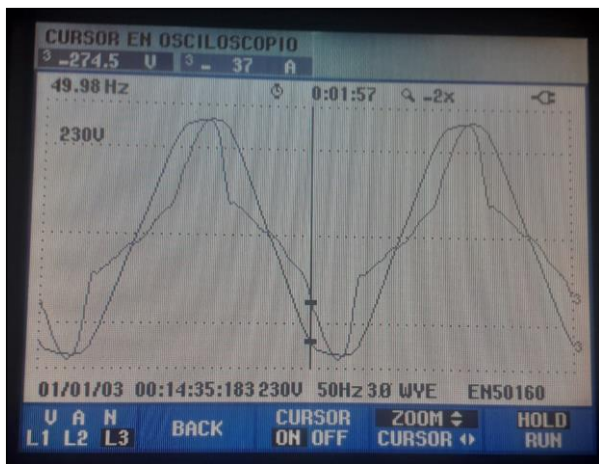


Figura 72 - Formas de onda Fase T. Comparativa N°2

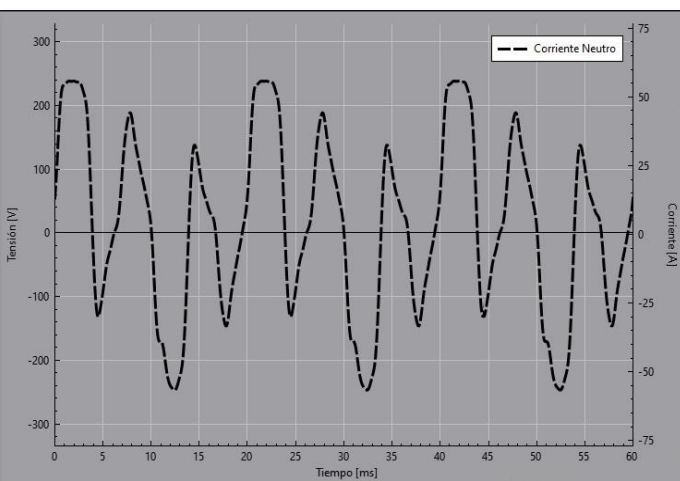
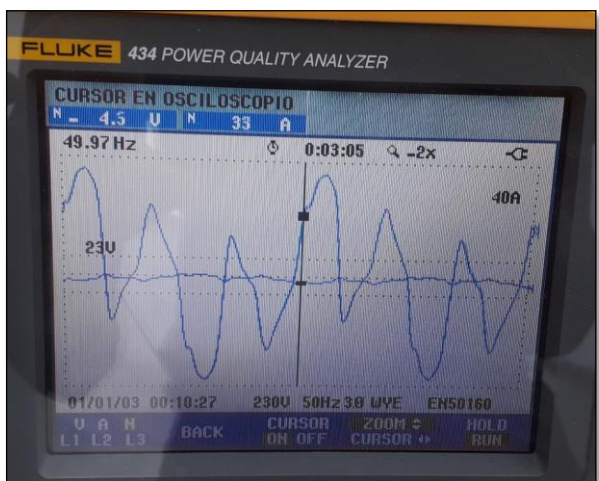


Figura 73 - Formas de onda Neutro. Comparativa N°1

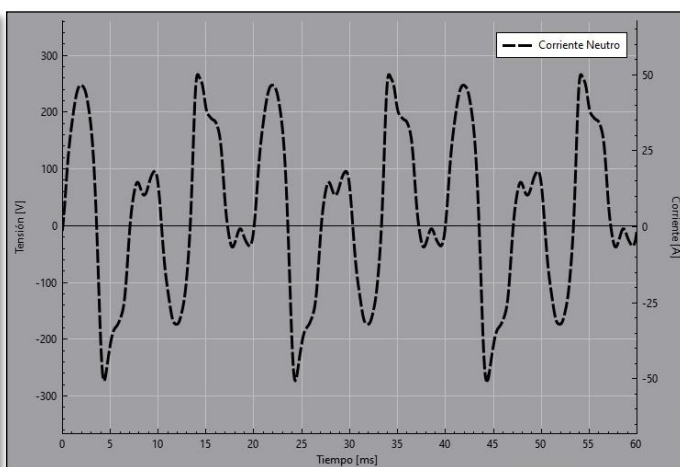
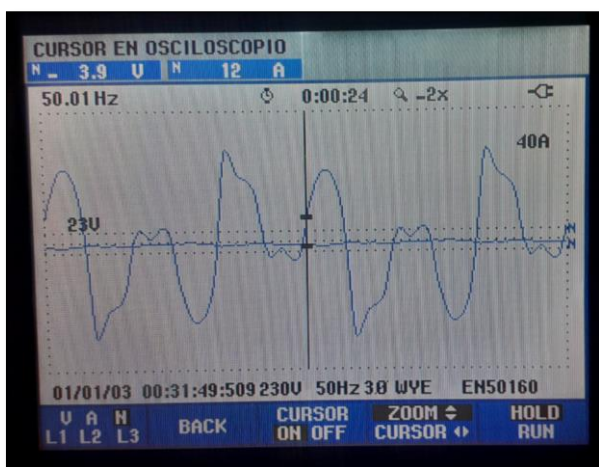



Figura 74 - Formas de onda Neutro. Comparativa N°2

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Tal como se puede apreciar en cada una de las comparativas, las formas de onda presentadas por cada instrumento presentan una enorme semejanza. Se logra notar como hasta los más mínimos detalles son representados por ambas interfaces. Como conclusión de esta sección se puede decir que se ha logrado una muy buena representación de las formas de onda.

Algo importante a destacar, es que el equipo Fluke el grafico de las formas de onda lo realiza (muy posiblemente) directamente con los puntos que ha muestreado de la señal. En cambio, como ya lo comentamos en la sección 4.2.6 nuestra forma de realizar la representación de la señal es por medio de la reconstrucción de esta haciendo uso de los armónicos y de la Serie de Fourier. Estos buenos resultados, también, nos dan un indicio de que la medición de armónicos es muy buena.

3.3 Gráfico de fasores

Otra de las características de medición que presentan ambos equipos, es la representación fasorial de la tensión y corriente de cada una de las tres fases. En la siguiente imagen se puede ver una comparativa realizada ese mismo día, donde se logra apreciar la gran semejanza existente en la representación fasorial.

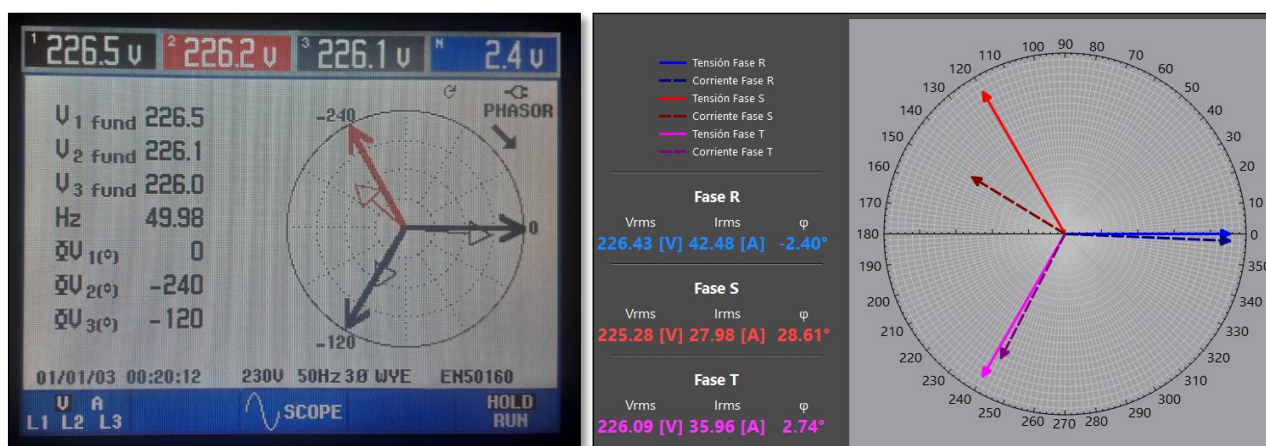


Figura 75 – Comparativa gráfica de fasores.



3.4 Índice de distorsión armónica

Otro parámetro que medimos es el THD porcentual de cada una de las señales de tensión y corriente. También fue motivo de testeo este índice, logrando resultados satisfactorios. En las próximas imágenes podremos ver, en primer lugar, el índice medido por el equipo Fluke para cada señal de corriente y tensión. Posteriormente, se presentan los valores medidos por nuestro equipo.

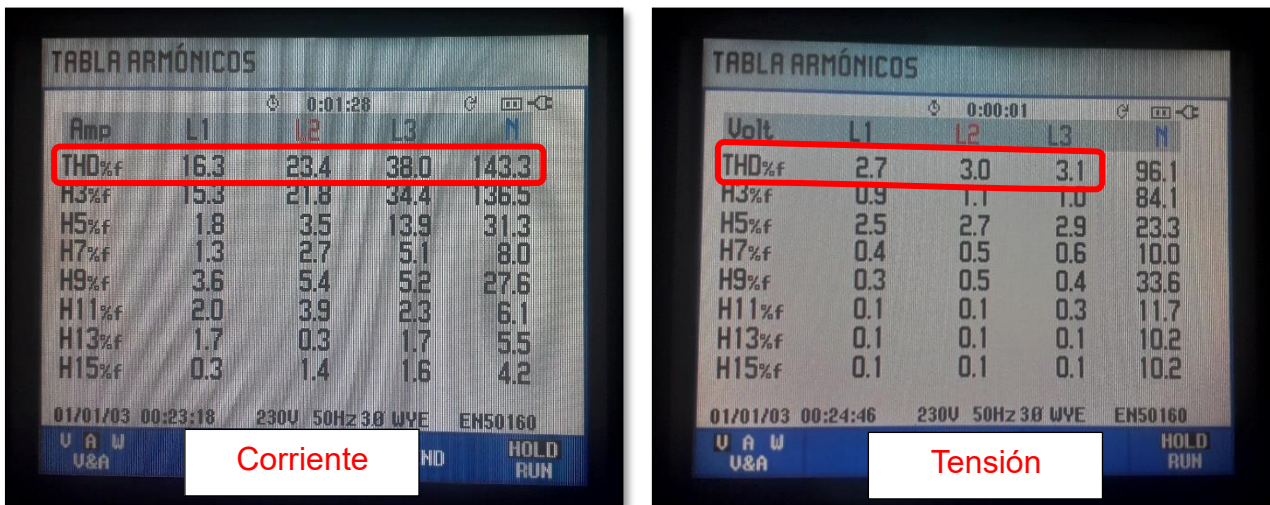


Figura 76 - Medición THD equipo Fluke

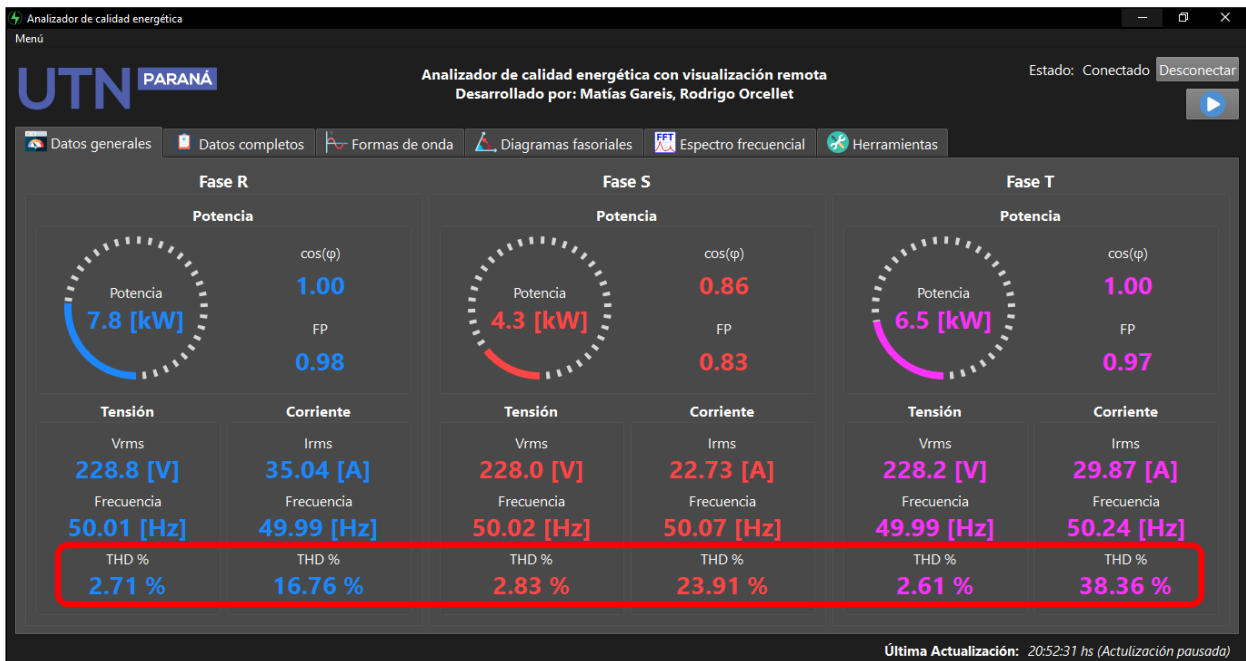


Figura 77 - Medición de THD equipo desarrollado (1)

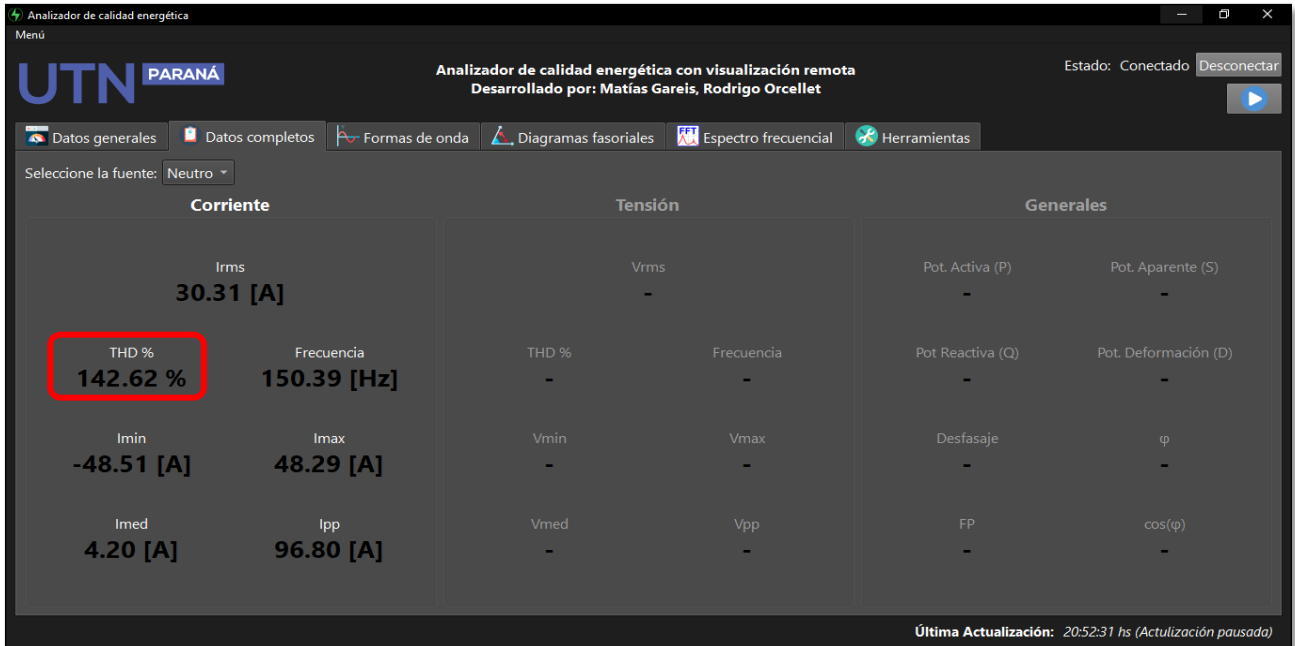



Figura 78 - Medición de THD equipo desarrollado (2)


Como se pudo ver, aquí los resultados obtenidos también fueron realmente acordes a lo esperado. Estos resultados se traducen en que se está pudiendo realizar una buena detección de armónicos, lo que previamente también fue verificado por las formas de onda.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Capítulo 4: Análisis de costos


Para poder realizar un análisis de costos, en primer lugar, debemos conocer el presupuesto del proyecto. El mismo se encuentra expresado en dólares para así darle vigencia a lo largo del tiempo.

Descripción	Cantidad	Precio por unidad (U\$D)	Precio Total (U\$D)
Bobinas Rogowski			
Manguera cristal 20mm por metro	3	0.5	1.5
Manguera cristal 14mm por metro	3	0.5	1.5
Cable de cobre con sección de 0,45mm ² por 100m	1.6	4.6	7.36
Cable stereo mallado por metro	16	0.6	9.6
Impresión en 3D del soporte y tapa	4	1.5	6
Fabricación de PCB	4	1.2	4.8
TL082	4	1.5	6
ICL7660	4	2.4	9.6
Resistencias SMD	8	0.1	0.8
Capacitores SMD	20	0.1	2
Subtotal	-	-	49.2
Analizador (PCB + componentes + gabinete)			
Transformadores HANH BV-201-0128	6	3.2	19.2
Fuente Aislada 5[V]	1	7.5	7.5
Placa de desarrollo STM32F411CEU6	1	38	38
Inversor capacitivo Tps60403	1	3	3
Amplificador operacional TL084	1	1.9	1.9
Amplificador operacional OPA4348	1	3	3
Amplificador operacional LM358	1	1.5	1.5
Comparador LM339	2	0.6	1.2
Tira de 40 pines Hembra	1	1.5	1.5
Preset Cermet 10K	2	0.7	1.4
Regulador AMS1117 3.3V	1	1.2	1.2
Referencia 2.5V LM431	1	1.4	1.4
Resistencias SMD	48	0.1	4.8
Capacitores SMD	20	0.1	2
PCB Virgen 15x15cm	1	4.5	4.5
Fabricación de PCB	1	20	20
Memoria micro SD 16GB	1	4.7	4.7
Adaptador memoria micro SD	1	2.5	2.5

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Conectores Micro JST x 10 unidades	1	4.4	4.4
Impresión caja en 3D	1	5	5
Gabinete estanco 30x20 cm	1	16	16
Subtotal	-	-	144.7
Total			193.9

Este precio representa los costos totales del proyecto. Respecto a las horas hombre invertidas, estimamos unas 400 horas por cada uno. Esto es el tiempo invertido en todo lo que respecta a investigación, desarrollo, producción, testeo e instalación. Como se detallará en la siguiente sección, el costo del producto es altamente competitivo en comparación con alternativas disponibles en el mercado, incluso siendo competentes frente a productos con características y utilidades inferiores.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Capítulo 5: Discusión y conclusión

5.1 Resumen de objetivos planteados y resultados alcanzados

El objetivo planteado cuando comenzamos el proyecto en cuanto al procesamiento de señales era obtener los siguientes parámetros:


- Tensión pico y true RMS de cada una de las fases.
- Corriente pico y true RMS de cada una de las fases y del neutro.
- Potencia activa, reactiva y aparente.
- Factor de potencia.
- Coseno fi.
- Distorsión armónica total (THD).
- Frecuencia.
- Detección de picos de tensión y corriente.
- Energía consumida (KWh).

Por su parte, el objetivo con respecto a la presentación de los datos era proporcionar una visualización remota por medio de una aplicación de escritorio, la cual además de mostrar los parámetros mencionados también incorpore el gráfico de las formas de onda, fasores y espectro de cada señal.

Todos estos objetivos fueron logrados con creces pudiendo evidenciarse esto en el Capítulo 3 a la hora de comparar nuestro prototipo con un analizador comercial de primera línea Fluke 434, obteniendo un resultado muy satisfactorio. Al mismo tiempo también se añadieron algunas funcionalidades extra a la aplicación como son data log, consulta de datos históricos y alertas que son notificadas por medio de un bot de Telegram.

5.2 Análisis de la competencia

Luego de una minuciosa búsqueda a través de algunos sitios web de venta online tales como MercadoLibre pudimos constatar que en el mercado local existen diversos tipos de analizadores de calidad energética. Sin embargo, no encontramos alguno que presente las características y prestaciones que hemos logrado en nuestro equipo.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023


La mayoría de los analizadores para tablero (no portátiles) existentes en el mercado se limitan a brindar información sobre las tensiones y corriente de cada fase, potencia activa, reactiva y aparente y el valor del coseno de fi (no factor de potencia). Estos valores lo presentan en un pequeño display y no poseen la opción de almacenarlos para futuras revisiones.

A pesar de esto, logramos encontrar un producto que se asemeja, en cuanto a prestaciones, a lo que hemos realizado. Al mismo su vendedor lo publica como *Medidor Y Analizador De Energía Trifásico Completo* y nos presenta la siguiente imagen:



Figura 79 - Analizador de calidad energética de la competencia. Extraído de [19]

La descripción que se nos brinda del producto es la siguiente: “El medidor de calidad de energía mide las corrientes y los voltajes e informa los valores true RMS en tiempo real para todas las fases y el neutro. Además, el medidor calcula la potencia activa, reactiva y aparente, el factor de potencia, el coseno fi, energía activa, reactiva y aparente, ITHD, VTHD, hasta el armónico 31 y más de 250 parámetros eléctricos. Posee memoria microSD de 1GB (ampliable a 4GB) que permiten guardar todos los parámetros eléctricos medidos por más de 1 año para realizar auditorías de eventos y eficiencia energética (se guardan en formato CVS (puede abrirse en Excel)”. Siendo el precio de este producto de U\$D578.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Como se puede ver, las características de este producto son muy similares a las que hemos alcanzado con nuestro desarrollo. Sin embargo, nuestro proyecto también abarca otros aspectos que lo distinguen y le aportan valor agregado. Entre ellos podemos mencionar:


- Abarca la posibilidad de medir y analizar la corriente de neutro. Algo que es de gran importancia para instalaciones que poseen un consumo mayormente monofásico, como es el caso de la facultad.
- Se incorpora una aplicación de PC con conexión remota que permite la visualización de todos los parámetros en tiempo real como de tiempos pasados.
- Se brinda la posibilidad de programar alarmas para dar aviso en caso de la ocurrencia de estos sucesos.

5.3 Conclusiones


De esta manera, podemos concluir este proyecto, el cual hemos obtenido resultados que están a la altura de los estándares de un equipo de primera línea como el Fluke 434. Además, es relevante destacar que todo el proceso de trabajo se llevó a cabo utilizando componentes disponibles en el país, incluso empleando sensores de fabricación propia.

Finalmente podemos mencionar algunas posibles mejoras que se podrían incorporar a una nueva versión del equipo, ellas son:

- Reemplazar la etapa de medición de tensión con transformadores reductores por una que utilice amplificadores operaciones aislados. Esto evitaría en gran medida la distorsión que producen los transformadores a la vez que mantendría la aislación y reduciría el espacio que ocupa esta etapa. Las principales desventajas de este método, y el porqué de no utilizarlos para este desarrollo, son su costo y que no son integrados fáciles de encontrar en nuestro país.
- Añadir una base de datos SQL como cliente del broker MQTT para realizar un almacenamiento de los datos que procesa el analizador y que esta se pueda acceder para revisar el comportamiento de la red en tiempos pasados. Esto


 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

evitaría la necesidad de retirar la tarjeta microSD del equipo para realizar consultas de este tipo. La desventaja de este método frente a la microSD es que si el equipo pierde la conexión a internet la base de datos no se actualizará.

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

Capítulo 6: Referencias

- [1] Graf, «Transformador de corriente,» [En línea]. Available: <https://www.gralf.com.ar/producto/transformador-de-corriente-con-relacion-100a-5a-39.html>. [Último acceso: 8 Noviembre 2023].
- [2] Promelsa, «Transformador de corriente núcleo partido,» [En línea]. Available: <https://www.promelsa.com.pe/1010830-transformador-de-corriente-nucleo-partido-1000-5a-15va.html>. [Último acceso: 8 Noviembre 2023].
- [3] C. Soporte, «Bobina Rogowski,» [En línea]. Available: <https://soporte-cordoba.blogspot.com/2020/03/lazos-o-bobinas-rogowski-que-son-y-como.html>. [Último acceso: 9 Noviembre 2023].
- [4] E. Concepts, «Concept of Rogowski Coil and its Working,» [En línea]. Available: https://electricalbaba.com/rogowski-coil-working/#google_vignette. [Último acceso: 9 Noviembre 2023].
- [5] S. A. C. Montiel, R. D. C. L. Padilla y A. G. Parada, «Bobina Rogowski como sensor de corriente para monitoreo de transformadores de distribución,» [En línea]. Available: https://www.cenam.mx/dme/pdf/EXT_T1-Jue-2.pdf. [Último acceso: 9 Noviembre 2023].
- [6] «Integrator Op-Amp circuit,» [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/video-tutorials/op-amp-applications-integrator/>. [Último acceso: 9 Noviembre 2023].
- [7] ENRE, «Reglamentacion sobre instalaciones electricas,» [En línea]. Available: <https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/30000-34999/32030/dto351-1979-anexo6.htm>. [Último acceso: 10 Noviembre 2023].
- [8] HANH, «Datasheet transformador HANH,» [En línea]. Available: <https://www.tme.com/Document/412ff82a0d9ae839d6b24853d8f56596/Hahn-E.pdf>. [Último acceso: 10 Noviembre 2023].
- [9] M. Havrlík, M. Libra, V. Poulek y P. Kouřím, «Analysis of Output Signal Distortion of Galvanic Isolation Circuits for Monitoring the Mains Voltage Waveform,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/364419051_Analysis_of_Output_Signal_Distortion_of_Galvanic_Isolation_Circuits_for_Monitoring_the_Mains_Voltage_Waveform. [Último acceso: 10 Noviembre 2023].
- [10] T. Instruments, «Non-Inverting Comparator with Hysteresis Circuit,» 2018. [En línea]. Available:

 UTN Regional Paraná	Analizador de calidad energética con visualización remota
Ingeniería en Electrónica	Diciembre de 2023

https://www.ti.com/lit/an/sboa313a/sboa313a.pdf?ts=1699889586927&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Último acceso: 13 Noviembre 2023].

- [11] ST, «STM32F411CE,» [En línea]. Available: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f411ce.html>. [Último acceso: 14 Noviembre 2023].
- [12] «STM32-base,» [En línea]. Available: <https://stm32-base.org/boards/STM32F411CEU6-WeAct-Black-Pill-V2.0>. [Último acceso: 14 Noviembre 2023].
- [13] E. Systems, «ESP32 Datasheet,» 2023. [En línea]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [14] Nubbeo, «Modulo Wifi Bluetooth Espressif ESP32 16MB Flash Wroom lot Arduino Nubbeo,» [En línea]. Available: <https://www.nubbeo.com.ar/productos/modulo-wifi-bluetooth-espressif-esp32-16mb-flash-wroom-iot-arduino-nubbeo/>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [15] M. Advisor, «Banggood - DOIT ESP32 DEVKIT V1 Board (Wi-Fi and Bluetooth),» [En línea]. Available: <https://makeradvisor.com/tools/esp32-dev-board-wi-fi-bluetooth/>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [16] Hobbytronica, «Modulo Lector Memorias Micro Sd Arduino 5v Hobbytronica,» [En línea]. Available: https://www.hobbytronica.com.ar/MLA-905429694-modulo-lector-memorias-micro-sd-arduino-5v-hobbytronica-_JM. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [17] MQTT, «MQTT: The Standard for IoT Messaging,» [En línea]. Available: <https://mqtt.org/>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [18] «Hi-Link,» [En línea]. Available: <https://www.hlktech.net/index.php?id=115>. [Último acceso: 1 Diciembre 2023].
- [19] «MercadoLibre,» 7 Diciembre 2023. [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-878411248-medidor-y-analizador-de-energia-trifasico-completo-3000a-_JM#position=6&search_layout=stack&type=item&tracking_id=23688eb8-2d9c-4eae-a012-ac6e4237664d.