

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Memoria de Título

Diseño de Medidor de Potencia basado en Unidades PMIC para Dispositivos IOT

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil Electrónico

Alumno
Diego Ignacio Allende Labra

Profesor Guía
Dr. Christian Rojas Monrroy

Profesor Co-Referente
Dr. Marcelo Pérez Leiva

6 de Mayo, 2021, Valparaíso, Chile

*Ask not what your country can do for you,
ask what you can do for your country
-John F. Kennedy's Inaugural Address*

Dedicado a mi familia y Yeraldy, quienes siempre me han apoyado a seguir

AGRADECIMIENTOS

TENGO que partir agradeciendo en primera instancia a Yeraldy. Si no fuera por ella no habría terminado esta carrera. Gracias por aparecer en mi vida en el momento indicado, justo cuando te necesitaba, justo cuando nos necesitábamos. Ambos pudimos salir victoriosos, incluso cuando estábamos cuesta arriba cuando empezamos. Por esto y mucho más, gracias.

Agradezco a mi familia, mi mamá, mi papá, mis hermanas y mis abuelos. Todo ustedes formaron un papel fundamental en mi formación. Gracias mamá y papá por apoyarme y criarme con los valores que tengo. Gracias hermanas por su apoyo y preocupación en tiempos difíciles. Gracias abuelos por orientarme en esta vida, en especial a mi abuelo José quien me introdujo en la ingeniería del pobre, la de saber todo un poco, la del curioso, la del maestro chasquilla.

Le agradezco profundamente a mi profesor guía Christian Rojas por su dedicación y compromiso por mi trabajo. Un excelente profesional pero por sobre todo, una excelente persona. Por lejos, el mejor profesor que conocí en la Universidad Técnica Federico Santa María. Su dedicación y enseñanza hacia los estudiantes es remarcable. Muchas gracias por esto, por sus consejos y mucho más.

También quiero agradecer el aporte entregado por los proyectos ANID/FONDECYT/1210757, AC3E ANID-Basal Project FB0008 y SERC ANID-Fondap Project 15110019, con los cuales se pudieron comprar los componentes de esta memoria de titulación.

Por último, quiero agradecer nuevamente a mi madre Patricia, mi padre Jaime y mi hermana Valentina por ayudarme a revisar y corregir la redacción de este documento.

Diego Ignacio Allende Labra

RESUMEN

DURANTE las últimas décadas, los circuitos integrados han alcanzado gran popularidad debido a su pequeño tamaño y a lo económico de su producción. Es aquí donde nacen los circuitos integrados de gestión de energía (PMIC). En este trabajo de memoria se diseña e implementa un medidor de potencia basado en estas unidades PMIC, con el objetivo de poder transmitir esta información con un dispositivo Internet of Things (IoT).

El dispositivo PMIC seleccionado, para realizar este trabajo, entrega una gran variedad de mediciones de potencia, tales como, voltaje, corriente, potencias y anomalías de la red. Además, es capaz de calcular los valores Root Mean Square (RMS) y fundamentales de todas estas mediciones.

El objetivo de este trabajo de memoria es poder desarrollar una alternativa de calidad pero a un costo menor de lo ofrecido en el mercado. Por lo mismo, se analiza la opción de utilizar un circuito integrado para obtener los datos eléctricos de una red trifásica y llegar a una conclusión técnica en base a las pruebas que se realicen al diseño final.

Se presenta un estado del arte de los IC y, específicamente, de los PMIC detallando los distintos modelos capaces de medir redes trifásicas. Luego, se realiza una tabla comparativa para conocer las ventajas y desventajas de cada uno de estos. Una vez hecho eso, se estudian las características del PMIC utilizado en el diseño final y se explican las configuraciones que se deben hacer para obtener la información de la red a través del PMIC.

Finalmente, se presentan las conclusiones en base al trabajo experimental, desde el diseño y fabricación del medidor, hasta los resultados experimentales obtenidos en las pruebas de laboratorio.

Palabras Claves

Circuito integrado de gestión de energía, Analizador de Potencia, Circuito Impreso.

ABSTRACT

DURING the last decades, integrated circuits has achieved great popularity because its small size and cheap production. Here is where the Power Management Integrated Circuits (PMIC) are born. The purpose of this study is to design and implement a power meter based in a PMIC unit. The data is recovered from the integrated circuit and sent to the internet through an Internet of Things device.

The selected PMIC is able to provide a variety of measurements, such as, voltage, current, active and reactive power and anomalies. Even this integrated circuit is capable of calculating the RMS and fundamental signals of the measured system.

The core of this study is to develop a cheaper option but keeping the quality of the measurements. In order to respect that idea, a PMIC unit is used to obtain the data of a three phase system. This data will indicate if this power meter is able to meet international standards.

The state of art of ICs is presented. It details the different types of PMICs used to measure three phase systems. After that, a comparison table is made to show advantages and disadvantages of each other. Consequently, this study shows the characteristics of the chosen one and explains the necessary configurations to obtain the data from it.

Finally, the conclusions are presented based on the experimental work. This include the design, manufacture and experimental results obtained in laboratory tests.

Keywords

Power Management Integrated Circuit, Power Analyzer, PCBs.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ABREVIACIONES	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Estado del Arte	1
1.1.1. Medidor de Energía	2
1.1.2. Circuito integrado	2
1.1.3. Circuitos Integrados de Gestión de Energía	2
1.2. Contribuciones	3
1.3. Objetivo General, Específicos, Alcances y Limitaciones	4
1.4. Resumen del Capítulo	4
2. CIRCUITOS INTEGRADOS DE GESTIÓN DE ENERGÍA	5
2.1. Características	5
2.2. Funcionalidades	6
2.3. Modelos	7
2.4. Modelos destacados de cada fabricante	8
2.4.1. ADE9000:	8
2.4.2. STPM32:	10
2.4.3. M90E36A:	10
2.4.4. CS5480:	10
2.5. Estándar de medición	11
2.5.1. Fluctuaciones de Voltaje	12
2.5.2. Armónicos e interarmónicos	13
3. DISEÑO DE MEDIDOR DE POTENCIA	14
3.1. Características del ADE9000	16

3.1.1. Pines	16
3.1.2. Medición de corriente	16
3.1.3. Medición de voltaje	18
3.1.4. Cálculo señal RMS	18
3.1.5. Cálculo de potencias	19
3.1.6. Cálculo de señales fundamentales	20
3.1.7. Tasa de actualización de acumulación de energía	20
3.1.8. Calidad de medición	22
3.1.9. Comunicación	22
3.2. Tarjeta de evaluación	23
3.3. Diseño del prototipo	24
3.3.1. Esquemático	24
3.3.2. Diseño PCB	24
3.4. Configuración	26
3.5. Resultado final	29
4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL	30
4.1. Preparación	30
4.2. Identificar fase y neutro en tomacorriente	32
4.3. Mediciones de voltaje	32
4.4. Mediciones con tarjeta de evaluación	34
4.5. Cálculos de variables eléctricas	36
4.6. Comparación de valores experimentales y teóricos	37
4.7. Remuestreo de señales eléctricas medidas	38
5. CONCLUSIONES	41
5.1. Trabajo Futuro	41
A. ESQUEMÁTICOS DEL MEDIDOR DE POTENCIA	43
B. PCB DEL MEDIDOR DE POTENCIA	57
C. LISTADO DE COMPRA DE COMPONENTES	59
D. CÓDIGO ARDUINO	64
BIBLIOGRAFÍA	74
COPYRIGHT	77

Índice de figuras

1.1. Línea de tiempo de las distintas aplicaciones para los ICs [1]	3
2.1. Paquete QFN	6
2.2. Ejemplo de un evento Dip [2]	13
2.3. Ejemplo de un evento Swell [2]	13
3.1. Diagrama de bloques del diseño propuesto	15
3.2. Tarjetas de evaluación del modelo ADE9000	15
3.3. Diagrama de los canales de corriente [3]	17
3.4. Diagrama de los canales de voltaje [3]	18
3.5. Diagrama de la señal RMS [3]	18
3.6. Diagrama de la potencia activa [3]	19
3.7. Diagrama de la potencia reactiva [3]	19
3.8. Diagrama de la potencia aparente [3]	20
3.9. Diagrama de acumulación de energía [3]	21
3.10. Bloques del esquemático	25
3.11. Módulos del prototipo	26
3.12. Prototipo diseñado sin terminar de montar	29
4.1. <i>Setup</i> utilizado para pruebas experimentales	31
4.2. Medición de resistencia de $48.8\ \Omega$	32
4.3. Interfaz de Arduino IDE	35
4.4. Interfaz de PuTTY	36
4.5. Remuestreo de señal de voltaje	39
4.6. Remuestreo de señal de corriente con carga RL	39
4.7. Conexión para realizar escalón de carga	40
4.8. Remuestreo de señal de corriente con escalón de carga	40

Índice de tablas

2.1.	Comparación entre distintos PMICs del fabricante Analog Devices . . .	9
2.2.	Comparación entre distintos PMICs del fabricante STMicroelectronics . .	9
2.3.	Comparación entre distintos PMICs del fabricante Atmel Corporation . .	9
2.4.	Características del PMIC CS5480 del fabricante Cirrus Logic	9
2.5.	Resumen características de PMICs	11
4.1.	Mediciones del multímetro Flujo y de la tarjeta de evaluación	34
4.2.	Mediciones y cálculos de la tarjeta de evaluación	37
4.3.	Mediciones y cálculos de la tarjeta de evaluación	38

ABREVIACIONES

Mayúsculas

AC	: alternate current
ADC	: analog to digital converter
AFE	: analog front end
BiCMOS	: Bipolar complementary metal–oxide–semiconductor
CMOS	: complementary metal–oxide–semiconductor
CPU	: central processing unit
DC	: direct current
DFT	: discrete fourier transform
DSP	: digital signal processor
FFT	: fast fourier transform
IC	: integrated circuit
IoT	: internet of things
HMI	: human machine interface
LED	: light-emitting diode
PCB	: printed circuit board
PMIC	: power management integrated circuit
PMU	: power management unit
QFN	: quad-flat no-leads
RMS	: root mean square
SCADA	: supervisory control and data acquisition
SNR	: signal to noise ratio
SPI	: serial peripheral interface
SPS	: samples per second
THD	: total harmonic distortion
UART	: universal asynchronous receiver-transmitter
WiFi	: wireless fidelity

INTRODUCCIÓN

1.1. Estado del Arte

La medición de voltaje y corriente se ha implementado con distintos métodos desde el siglo XIX. En las últimas décadas se ha vuelto fundamental el medir estas señales, junto a la potencia, de los distintos dispositivos electrónicos que se van creando en el mundo tecnológico con el objetivo de medir y regular su consumo. De esta forma, la industria tecnológica ha creado distintas alternativas para satisfacer la necesidad de medir estas variables, a un menor costo y tamaño.

Debido a la cuarta revolución industrial, la colección y análisis de datos son procesos fundamentales para todas las empresas, sin importar el rubro. En el área de las empresas de distribución eléctrica, es fundamental medir las señales de interés de la red eléctrica para poder monitorear el sistema. En la actualidad, esta medición de variables eléctricas se realiza en los reconfiguradores que están ubicados en las redes de distribución, los cuales envían las mediciones por fibra óptica con el objetivo de analizarlas en una plataforma SCADA. Esta medición se realiza a través de uno de los componentes del reconfigurador, el sincrofaseador.

El principal problema de este método de medición es el costo asociado a los reconfiguradores. Estos equipos cuestan entre 10 y 16 millones de pesos en el mercado local. Por esta razón las empresas eléctricas intentan optimizar la ubicación de estos equipos en zonas estratégicas. Por supuesto que estos equipos no solo miden las señales eléctricas sino que cumplen una labor fundamental en la regulación y protección, de la red de distribución, de sobrecorrientes y desconexiones. Debido a su alto costo, y porque cumplen la función principal de proteger la red eléctrica, no se instalan suficientes de estos equipos en la línea de distribución para obtener datos importantes, perdiéndose una gran oportunidad de analizarlos.

1.1.1. Medidor de Energía

Ahora al explorar solamente la medición de señales eléctricas se tienen los medidores de energía que se ocupan en varias aplicaciones industriales y vienen en todos los tamaños. Se tiende a pensar inmediatamente en los medidores domésticos que existen en los domicilios pero su aplicación no se limita solo a esa área. Por eso, se debe realizar la siguiente pregunta. ¿Que más se puede realizar con la medición de energía? ¿Solo cobrar por un servicio eléctrico? La respuesta es no. Actualmente, los principales usos para medir energía son el control de la demanda en una microred, el control de procesos y el ahorro de recursos.

Por ejemplo Chilquinta Energía S.A, que es una empresa que distribuye energía eléctrica a gran parte de la Quinta Región, utiliza medidores de ION en las subestaciones eléctricas. Para estas zonas se instala el modelo de medidor ION 8650 de la empresa Schneider Electric, cuya clase de precisión es de 0,2 [4]. Recomendado en el uso de Subestaciones Eléctricas en donde hayan Transferencias Económicas. La utilización de este tipo de medidores es fundamental en las áreas de producción y subestaciones eléctricas porque se necesita una medición exacta de cuanta potencia se esta generando o distribuyendo, cual sea el caso. En el mercado actual estos equipos valen alrededor de 2 y 8 millones de pesos, dependiendo de su exactitud y si es para medir una red monofásica o trifásica.

Por otro lado, en la mayoría de los hogares chilenos se encuentran los medidores electromecánicos monofásicos que registran la potencia consumida en el hogar. Esta es una forma muy antigua de medir potencia y que día a día está quedando atrás en todos los países. Con la llegada de los paneles solares a los hogares chilenos, las empresas distribuidoras de energía eléctrica fomenta la actualización de éstos medidores por los medidores digitales bidireccionales, capaces de introducir energía a la red.

1.1.2. Circuito integrado

Justificando lo anterior, los ICs pueden ser utilizados para regular procesos en equipos electrónicos. En esta memoria se plantea utilizar un IC para regular el proceso de medición de señales eléctricas, abstrayéndose del clásico medidor de energía del hogar chileno que suele ser electromecánico y viejo. Los ICs fueron inventados por el ganador del premio Nobel Jack Kilby en 1957, mientras trabajaba para el ejercito estadounidense [5]. Desde esa fecha los nuevos empaquetados son cada vez más pequeños y cada año se agregan nuevas funcionalidades. Últimamente han alcanzado gran popularidad debido a su pequeño tamaño y a lo económico de su producción.

1.1.3. Circuitos Integrados de Gestión de Energía

Los PMICs son circuitos integrados relacionados a la gestión de energía. Es común confundirlos con los Power Management Unit (PMU) pero la diferencia fundamental es que éste último es un microcontrolador que gestiona la energía, es decir, un computador pequeño con su propia unidad central de procesamiento (CPU). Estos circuitos integrados comenzaron a ser necesarios en los años 80 con la introducción de los computadores. Pero antes, ya en los años 70 se hablaba de los circuitos integrados de potencia, donde su primera aplicación fue

ayudar a regular la frecuencia de audio [6]. Poco a poco fue necesario regular el voltaje y la energía de nuevos artículos electrónicos. Ya para el año 2000, la globalización comenzó a generar efecto y la demanda por artículos electrónicos personales se disparó, trayendo con ello la explotación de las distintas funcionalidades de los ICs. Los celulares y tablets cuentan con decenas de ICs en sus sistemas, al igual que los nuevos automóviles [7]. Esta evolución se puede observar de una manera más gráfica en la Figura 1.1.

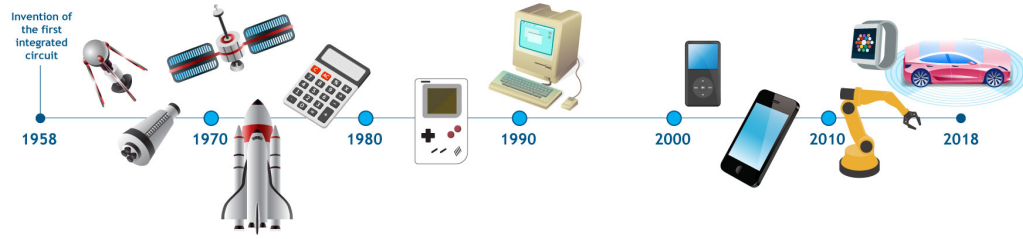


Figura 1.1: Línea de tiempo de las distintas aplicaciones para los ICs [1]

Los PMIC se ocupan en muchas aplicaciones [8], tales como:

- Regulador de voltaje
- Conmutador distribuidor de energía
- Cargador de baterías
- Controlador de light-emitting diodes (LEDs)
- Convertidor AC/DC
- Controlador de motor
- Medidor de energía

Este proyecto se va a enfocar en diseñar un medidor de potencia, por ende, se analizarán distintos modelos de PMIC que cumplan con esta funcionalidad.

Cuando se tenga seleccionado el PMIC a utilizar, se diseñará una Printed Circuit Board (PCB) con el objetivo de poder obtener las mediciones eléctricas de una manera más fácil y estándar.

1.2. Contribuciones

La contribución de esta memoria de título será principalmente el diseño de un medidor de potencia utilizando una unidad PMIC para procesar los datos de las mediciones. Se entregarán los archivos de diseño con la esperanza de perfeccionarlo en futuros trabajos de

título.

Además, la idea es poder utilizar la tarjeta de evaluación del PMIC seleccionado para comparar su funcionamiento con el del diseño propuesto. Es por esto que se entregará una guía de como configurar el PMIC, y como poder obtener los datos de las mediciones y cálculos eléctricos.

Finalmente, se utilizará una tarjeta de desarrollo para comunicarse con el PMIC. De esta forma se proporcionarán los scripts necesarios para la configuración y obtención de datos.

1.3. Objetivo General, Específicos, Alcances y Limitaciones

El objetivo principal es poder diseñar un medidor de potencia, capaz de proporcionar mediciones y cálculos de la red eléctrica.

En específico, los objetivos consideran desarrollar el diseño del medidor utilizando una unidad PMIC y agregando todos los componentes pasivos y activos necesarios para un correcto funcionamiento. Además, considerar los componentes necesarios para la medición de voltaje y corriente eléctrica, es decir, divisores de tensión, filtros pasabajos, conectores y transformadores de corriente.

Dentro de esto, se hará el análisis de varias opciones de PMICs, microcontroladores y elementos de filtro, con el objetivo de seleccionar la opción más completa e indicada para el proyecto. La idea es poder desarrollar una alternativa pequeña y de bajo costo, para poder ser instalada fácilmente en una zona remota.

Otro de los objetivos de este documento es poder proporcionar una guía de usuario para la tarjeta de evaluación del PMIC seleccionado, ya que de esta forma futuros alumnos van a poder utilizarla de manera más fácil.

Limitaciones, principalmente el trabajar con un sistema monofásico y trifásico, pero sin voltajes desbalanceados. Además, no se va a analizar la reconstrucción de la onda para encontrar las armónicas del sistema.

1.4. Resumen del Capítulo

Este documento está dividido en cinco capítulos. El Capítulo 1 es una introducción al tema de la memoria de título. Contiene una revisión del estado del arte, establece los aportes de esta y una estructura general del capítulo. El Capítulo 2 incluye una revisión de los PMICs seleccionados. Se realizan comparaciones de tipo de mediciones que son capaces de entregar, estándares que garantizan sus mediciones y rangos de voltajes que soportan o son capaces de medir. En el Capítulo 3 se realiza un análisis a la tarjeta de evaluación. Se presenta su diseño, las señales que es capaz de medir y la guía de usuario necesaria para configurar el PMIC. El Capítulo 4 considera los resultados del diseño del medidor de potencia y las mediciones de prueba que se realizan para probar la exactitud de este y la tarjeta de evaluación. Finalmente, en el Capítulo 5 se escriben las conclusiones y comentarios de esta memoria de título.

CIRCUITOS INTEGRADOS DE GESTIÓN DE ENERGÍA

2.1. Características

LOS circuitos integrados de gestión de energía son componentes que incluyen múltiples Entradas de medición y funciones de gestión de energía dentro de un sólo empaquetado. Los PMICs se utilizan frecuentemente para alimentar y controlar dispositivos pequeños, ya que al integrar múltiples funciones en un sólo componente da como resultado un uso más eficiente del espacio y la energía del sistema.

La mayoría de estos componentes son fabricados mediante el proceso Contracción de Bipolar - Semiconductor Complementario de Óxido Metálico (BiCMOS). Esta es una tecnología de fabricación de IC que combina las ventajas de las tecnologías de un transistor de unión bipolar y un Semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS), integrándolas juntas en un mismo dispositivo.

Estos circuitos integrados también pueden ser fabricados como paquetes Quad-Flat No-leads (QFN). Esta es una tecnología de montaje superficial, una de varias tecnologías que conectan los circuitos integrados a las superficies de los PCB sin through-holes, como se puede observar en la figura 2.1.

En el área de comunicación estos ICs tienen distintas alternativas para transmitir la información calculada y configurar el PMIC. Típicamente estos componentes presentan modelos con interfaz de comunicaciones I2C, UART o SPI. Estas interfaces de comunicación hacen que sea imperativo usar un computador o algún dispositivo IoT que pueda ser utilizado para configurar los parámetros del PMIC y a la vez recibir la información para poder ser analizada o transmitida a otras plataformas a través de una vía de comunicación más tradicional, como Wireless Fidelity (WiFi).

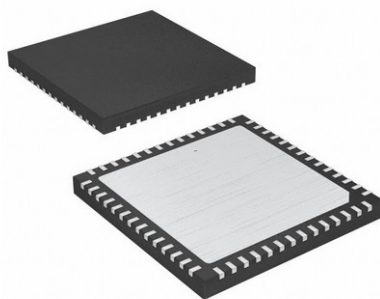


Figura 2.1: Paquete QFN

2.2. Funcionalidades

Como ya se dijo previamente, los PMICs son circuitos integrados de administración de potencia que ayudan a solucionar los problemas de potencia y/o energía de circuitos en distintas aplicaciones de potencia. Tal como se introdujo en un inicio, estos dispositivos se consideran en aplicaciones tales como, reguladores de tensión, gestión de batería, controladores LED, controladores/indicadores de motor y medidores de energía. La mayoría de estas aplicaciones consideran un circuito integrado principal, pero también requieren componentes adicionales para que el circuito pueda funcionar correctamente, tales como conectores, elementos pasivos, osciladores y botones.

Los reguladores de tensión son convertidores DC-DC que están disponibles en una gran variedad de topologías pero se pueden separar en dos grandes familias, los lineales y los conmutados. Por un lado, los reguladores lineales trabajan detectando la tensión en la carga y ajustando este nivel en comparación con una referencia de tensión fija, que generalmente está integrada en el dispositivo. Por otro lado, los reguladores conmutados pueden aumentar y disminuir la tensión de salida. Estos reguladores comparan el nivel de tensión de salida con una tensión de referencia y luego, al cambiar la frecuencia de conmutación, pueden cambiar la tensión para que reaccione a una carga variable.

Los dispositivos de gestión de baterías también son conocidos como controladores de carga. Estos monitorean activamente el suministro de energía de una batería y proporcionan seguridad, por si ocurre una falla o sobrecarga en el sistema. Además, estos dispositivos ayudan a aumentar la esperanza de vida de la batería. Las baterías también tienen tensiones de carga y requisitos de corriente que pueden ser controlados gracias a este IC. Estos requisitos son distintos en cada banco de baterías y dependen de la química de estas. Estos dispositivos son necesarios debido a que los niveles de voltaje de la batería pueden caer por debajo de un nivel crítico en el que los circuitos dependientes a ella pueden fallar. También es común que se incluyan entradas de detección de temperatura y la capacidad de detección de corriente para proteger el sistema.

Los medidores de potencia ayudan a verificar la condición de los suministros de energía y generan controles que reaccionan de manera inteligente a cambios en el suministro de energía. El objetivo de estos dispositivos es poder medir el consumo de los equipos y pro-

teger la operación del sistema ante sobretensiones que pueden dañar circuitos, y las bajas tensiones que pueden anticipar un futuro apagón parcial.

Para el desarrollo de esta memoria se usará la aplicación de medición de energía. A continuación, se presentará una gran variedad de modelos de PMICs que cumplen con ésta funcionalidad.

2.3. Modelos

Este proyecto enfocará en diseñar un medidor de potencia, por ende, se analizarán distintos modelos de PMICs que cumplan con ésta funcionalidad. En las Tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 se puede observar la comparación de 9 PMICs seleccionados para realizar el diseño del medidor. Se comparan las siguientes características:

- Resolución de los convertidores análogo digital (ADC)
- Precisión en la medición de potencia activa (P)
- Tipo de mediciones que ofrecen
- Voltaje de medición para corriente y voltaje (V_D)
- Voltaje de alimentación (V_{cc})
- Normas que se cumplen con las mediciones
- Precio de la unidad en dólares estadounidenses (US\$)

Estos modelos de PMIC fueron separados en 4 tablas para poder identificar fácilmente las opciones que presentan 4 fabricantes del mercado actual. A partir de estas tablas, se puede observar que existen distintas alternativas o versiones provenientes de un mismo fabricante.

- La Tabla 2.1 entrega las alternativas de Analog Devices.
- La Tabla 2.2 entrega las opciones de STMicroelectronics.
- La Tabla 2.3 muestra las 2 alternativas de Atmel Corporation.
- La Tabla 2.4 representa el único modelo del fabricante Cirrus Logic.

Como se puede observar en estas tablas, la mayoría de estos componentes se parecen bastante y todos valen relativamente lo mismo, considerando un proyecto de más de \$100 USD. Si bien la mayoría de ellos cumplen con más de una norma de calidad, hay que tener precaución de elegir el PMIC que cumpla con la norma que solicita el estado chileno [9]. Otro punto a considerar dentro de estas alternativas es la antigüedad del componente. Por ejemplo, en la empresa Analog Devices se tienen 4 opciones de PMIC con distintos números de modelos. Este número no es arbitrario, si no que considera la evolución de los PMICs que ofrecen. De ésta forma se puede apreciar fácilmente que el ADE9000 es más nuevo que el ADE7758, y por ende presenta más funcionalidades que la versión previa.

Observando nuevamente las 4 tablas, se puede ver que el fabricante Analog Devices es la empresa que ofrece la mayor variedad de PMICs, lo cual se puede interpretar como una

empresa con vasta experiencia produciendo este tipo de IC. Además dentro de las 4 opciones disponibles, el PMIC que más destaca es el modelo ADE9000 ya que ofrece un mayor número de mediciones y es el modelo más nuevo según los datasheet [3].

2.4. Modelos destacados de cada fabricante

Los modelos de las Tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 fueron presentados como estado del arte de modelos de PMICs que son utilizados para medir energía y/o potencia. Además, se incluyen nuevas características de cada uno, su legalidad en Chile y herramientas necesarias para soldar el componente. En la Tabla 2.5 se consideran las siguientes características para cada modelo:

- Error y Filtro de entrada
- Tipos de mediciones y Rangos de voltaje
- Protocolo de comunicación
- Encapsulado y facilidad de soldar
- Estándares y legalidad en Chile
- Económico
- Tarjeta de evaluación

Estas características se plantean para identificar las ventajas y desventajas de cada modelo, con el objetivo de seleccionar el PMIC definitivo para llevar a cabo el diseño del medidor de potencia. A continuación, se expondrán las 4 alternativas, donde se eligió el circuito integrado más completo que ofrecía cada fabricante:

2.4.1. ADE9000:

Es un dispositivo polifásico muy preciso y totalmente integrado. Es capaz de entregar una gran cantidad de información eléctrica, tal como potencia activa, reactiva y aparente. Además, mezcla un gran rendimiento análogo con un potente análisis digital bajo el comando de un núcleo digital signal processor (DSP), o procesador de señales digitales en español [3].

Es capaz de almacenar 128 puntos por ciclo debido a un potente buffer que guarda la información a una tasa de 32000 muestras por segundo, permitiendo el uso de la transformada rápida de fourier (FTT) para calcular por lo menos 50 armónicas de la señal medida. Estos atributos permiten garantizar el cumplimiento del estándar IEC 61000-4-30 [18], el cual es requerido por el estado chileno para monitorear las redes de distribución eléctrica.

Este PMIC puede trabajar con 2 tipos de medidores de corriente, los transformadores de corriente y las bobinas de Rogowski. Para éste último, es necesario un integrador discreto para calcular la corriente y es por eso que este PMIC contiene en su interior un integrador digital para reemplazarlo.

PMIC	ADC bits	Error P[W]	Tipos de Medición	V_D [V]	V_{cc} [V]	Cumplimiento de Normas	Precio [US\$]
ADE7758 [10]	24	0.1 %	Potencia aparente, Irms, Potencia activa total, Poder reactivo total, Vrms	$\pm 0,5$	5	IEC 62053-21,22,23 IEC 60687, IEC 61036, IEC 61268	6.68
ADE7880 [11]	24	0.1 %	Potencia aparente, Activo fundamental, Reactivo fundamental, Irms, Medición neutral,Vrms, Potencia activa total, Distorsión armónica total	$\pm 0,5$	3.3	IEC 62053-21,22,23 EN 50470-1,3; ANSI C12.20, IEEE1459	6.79
ADE9000 [3]	24	0.1 %	10/12 Ciclos Rms, Activo Fundamental, Aparente Fundamental, Irms , Reactivo Fundamental, Vrms, Medición Neutral, Potencia Activa Total, Potencia Reactiva Total, Detección de anomalías	± 1	3.3	EN50470-3; IEC 62053-21,22,23 OIML R46; ANSI C12.20 ; IEC 62053-24 IEC 61000-4-30,7	6.39
ADE9078 [12]	24	0.1 %	Potencia aparente, Reactiva fundamental, Irms, Medición neutra, Potencia activa total, Potencia reactiva total, Vrms	± 1	3.3	IEC 62053-21,22,23 IEC 62053-4; EN50470-3; ANSI C12.20 IEC 61000-4-7	5.85

Tabla 2.1: Comparación entre distintos PMICs del fabricante Analog Devices

PMIC	ADC bits	Error P[W]	Tipos de Medición	V_D [V]	V_{cc} [V]	Cumplimiento de Normas	Precio [US\$]
STPM32 [13]	24	0.1 %	Potencia Activa Fundamental, Aparente Fundamental, Irms Reactivo Fundamental, Vrms, Detección de anomalías	$\pm 0,7$	3.3	EN 50470-x, IEC 62053-2x, ANSI12.2x	2.48
STPMC1 [14]	28	0.1 %	Potencia activa fundamental, reactiva fundamental, Vrms, Irms,	3-6.3	3.3-5	IEC 62052-11, IEC 62053-21,23	3.21

Tabla 2.2: Comparación entre distintos PMICs del fabricante STMicroelectronics

PMIC	ADC bits	Error P[W]	Tipos de Medición	V_D [V]	V_{cc} [V]	Cumplimiento de Normas	Precio [US\$]
M90E36A [15]	32	0.1 %	Potencia Activa Fundamental, Aparente Fundamental, Irms, Reactivo PF Fundamental, Vrms, Detección de anomalías, F, Temperatura	-0.6-3.6	3.3	IEC 62052-11, IEC 62053-22,23 ANSI C12.1,20	3.14
M90E32AS [16]	32	0.1 %	Potencia Activa , Aparente , Irms Reactivo, Vrms,Detección de anomalías, F, Temperatura, PF, Angulo Fase, Valores máximos	-0.3-5.5	3.3	IEC 62052-11, IEC 62053-22,23 ANSI C12.1,20	2.02

Tabla 2.3: Comparación entre distintos PMICs del fabricante Atmel Corporation

PMIC	ADC bits	Error P[W]	Tipos de Medición	V_D [V]	V_{cc} [V]	Cumplimiento de Normas	Precio [US\$]
CS5480 [17]	24	0.1 %	Potencia Activa , Aparente, Irms Reactivo, Vrms, Detección de anomalías, Frecuencia, PF	0.25	3.3	IEC 62053-22,23	3.9

Tabla 2.4: Características del PMIC CS5480 del fabricante Cirrus Logic

De esta forma, se puede observar que el ADE9000 es un dispositivo muy complejo y capaz de funcionar sin una CPU, ya que cuenta con comunicación Serial Peripheral Interface (SPI), completando con creces la función de monitorear energía con otros dispositivos a elección del usuario. Más detalles se pueden observar en la Tabla 2.5.

2.4.2. STPM32:

Es un dispositivo polifásico que es capaz de trabajar con 3 distintos medidores de corriente. Lo puede hacer con transformadores de corriente, bobinas de Rogowski y sensores de corriente Shunt. Además, este PMIC entrega mediciones básicas de potencia, voltaje y corriente, gracias a una combinación de componentes análogos con procesamiento digital desde una DSP [13].

La comunicación es fundamental para informar los datos calculados y es por eso que este dispositivo ofrece 2 tipos de protocolos de comunicación. Uno de ellos es el protocolo SPI y el otro es el Transmisor-Receptor Asíncrono Universal, o UART por sus siglas en inglés. Ambos protocolos son usados hace varios años en la industria y por lo mismo se espera tener una gran cantidad de documentación. Más detalles se pueden observar en la Tabla 2.5.

2.4.3. M90E36A:

Es un dispositivo polifásico capaz de medir 3 canales de voltaje y 4 canales de corriente, considerando el neutro. Para realizar los cálculos este PMIC tiene integrado una DSP que permite entregar la potencia activa, reactiva y aparente, junto a las armónicas de la potencia activa [15].

Además el dispositivo transmite la información calculada con el protocolo SPI. Aunque también está la opción de conectarse a puertos ADC para obtener la información directamente, ofreciendo una mayor flexibilidad. Los datos de las armónicas y los cálculos obtenidos con la transformada discreta de Fourier (DFT) se pueden acceder a través de los registros del IC. Más detalles se pueden observar en la Tabla 2.5.

2.4.4. CS5480:

Es un dispositivo Analog Front End (AFE), capaz de medir la energía de 3 fases eléctricas con alta precisión. Puede ofrecer mediciones de potencia, voltaje y corriente a través de convertidores análogo digital (ADC) con filtros del cuarto orden para efectuar los cálculos con una señal limpia [17].

Además, este PMIC cuenta con 2 tipos de protocolos de comunicación. El protocolo SPI ofrece la opción de mayor velocidad en la transmisión de datos y el protocolo UART permite enviar los datos con un mayor aislamiento, previniendo la pérdida de información.

Las mediciones de corriente se pueden realizar con resistencias Shunt, transformadores de corriente y bobinas de Rogowski. Más detalles se pueden observar en la Tabla 2.5.

Como se puede ver en la Tabla 2.5, la circuito integrado que más mediciones entrega es el modelo ADE9000. Este PMIC entrega una mayor cantidad de datos de la red eléctrica y cumple con el estándar chileno IEC 61000-4-30 para realizar mediciones en los sistemas de

Especificaciones	ADE9000	STPM32	M90E36A	CS5480
Error Potencia	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %
Tipo de mediciones	10/12 Ciclos Rms, Potencia Activa Fundamental, Aparente Fundamental, Reactiva Fundamental, Irms , Vrms, Medición Neutral, Potencia Activa Total, Potencia Reactiva Total, Detección de anomalías	Potencia Activa Fundamental, Aparente Fundamental, Reactiva Fundamental, Irms , Vrms Detección de anomalías	Potencia Activa Fundamental, Aparente Fundamental, Reactivo Fundamental, Irms, PF, Vrms, Detección de anomalías, Frecuencia, Temperatura	Potencia Activa , Aparente, Reactiva, Irms, Vrms Detección de anomalías, Frecuencia, PF
Voltaje de Medición [V]	±1 [V]	±0,7	-0.6 - 3.6	0.25
Voltaje de Alimentación [V]	3.3 [V]	3.3	3.3	3.3
Cumplimiento de Normas	EN50470-3 IEC 62053-21 IEC 62053-22 IEC 62053-23 OIML R46 ANSI C12.20 IEC 62053-24 IEC 61000-4-30 IEC 61000-7	EN 50470-x IEC 62053-2x ANSI12.2x	IEC 62052-11 IEC 62053-22 IEC 62053-23 ANSI C12.1,20	IEC 62053-22 IEC 62053-23
Protocolo de comunicación	SPI	SPI, UART	SPI	SPI, UART
Encapsulado	CP-40-7	QFN24L 4x4x1	TQFP48	24-pin QFN
Tarjeta de evaluación	EVAL-ADE9000EBZ	EVALSTPM32	ATM90E36A-DB	CDB5480U-Z
Precio [US/\$]	6.39	2.48	3.14	3.9

Tabla 2.5: Resumen características de PMICs

distribución eléctrico, por lo que es modelo seleccionado para realizar el diseño del medidor de potencia.

2.5. Estándar de medición

Esta memoria se esta realizando en Chile, por ende, la Comisión Nacional de Energía (CNE) determina los estándares de medición y suministro de energía. Este organismo señala, en el Artículo 6-3 de la NORMA TÉCNICA DE CALIDAD DE SERVICIO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN [9], que para medir las redes de distribución en territorio chileno, se debe realizar con equipos clase A o S que cumplan con el estándar IEC 61000-4-30.

Este estándar define los procedimientos para medir cada uno de los parámetros eléctricos, en base a los cuales se determina la calidad del suministro eléctrico. De esta forma se puede garantizar que se obtendrán resultados fiables, repetibles y comparables. Además, define con claridad la precisión, el ancho de banda y el conjunto de parámetros mínimos que deben cumplir estos equipos.

La creación de estos estándares de medición tienen la finalidad de eliminar las dudas a la hora de seleccionar con precisión un instrumento para el análisis de la calidad eléctrica.

Los parámetros que se incluyen son los siguientes:

- Frecuencia la tensión de alimentación.

- Magnitud de la tensión de alimentación.
- Flicker o parpadeo de tensión.
- Armónicos e interarmónicos.
- Fluctuaciones de la tensión de alimentación.
- Interrupciones en la tensión de alimentación
- Desequilibrios en la tensión de alimentación.
- Transmisión de señales a través de la alimentación.
- Cambios rápidos en la tensión de alimentación.

Un equipo se clasifica como Clase A cuando cumple con la totalidad de la norma. Si hubiera algún punto que no lo cumple, o lo cumple bajo otros criterios, entonces se clasifica como Clase B o S. De todas formas, los equipos clase B no se van a considerar para nuevos instrumentos de medición y se eliminará en la siguiente edición del estándar.

En este estándar se señala que el intervalo de tiempo de medición básico para las magnitudes de los parámetros de voltaje de suministro, armónicos, interarmónicos y desequilibrio, será un intervalo de tiempo de 10 ciclos para un sistema de energía de 50 Hz. También se señalan 12 ciclos para un sistema de 60 Hz pero debido a que las pruebas se harán en Chile, solo se considerarán las apreciaciones que hagan a sistemas con frecuencia de 50 Hz. Además, estos intervalos de tiempo se deben respetar tanto para equipos de clase A como de clase S.

2.5.1. Fluctuaciones de Voltaje

Dentro de los eventos medibles que considera este estándar, destacan los dips y swells. Un dip se considera como una breve reducción en la tensión RMS de aproximadamente un 10 % o simplemente una caída por debajo de la tensión nominal del equipo durante un período. Este evento puede ser causado por un cambio rápido de cargas, como lo es un arranque de motor o un cortocircuito en la red. En la Figura 2.2 se puede observar un ejemplo de este evento.

Por otro lado, los swells se consideran como un aumento de voltaje por sobre la tensión nominal. Este evento es menos común que las caídas de tensión y por lo general están relacionados con las condiciones de falla del sistema. Los swells pueden ocurrir debido a una falla entre una línea y la tierra, lo que elevará brevemente el nivel de tensión de las fases sin fallas como se muestra en el ejemplo de la Figura 2.3.

Para la detección de anomalías en la red eléctrica, como lo son los dips y swells, se realiza la medición del voltaje RMS obtenido en cada ciclo o cada medio ciclo. En esta parte el estándar hace la diferencia entre equipos de clase A y S, ya que para la clasificación clase A se debe realizar la medición de voltaje RMS cada medio ciclo, mientras que para la clase S se puede ejecutar la medición cada medio ciclo o el ciclo completo. También se hace la distinción entre mediciones monofásicas o polifásicas.

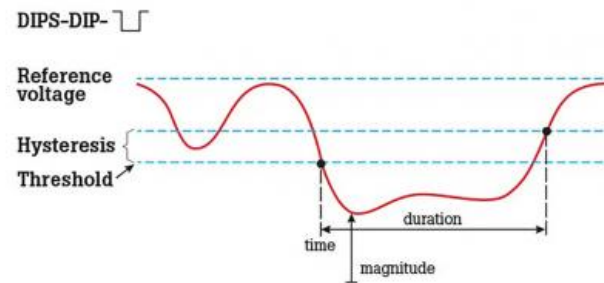


Figura 2.2: Ejemplo de un evento Dip [2]

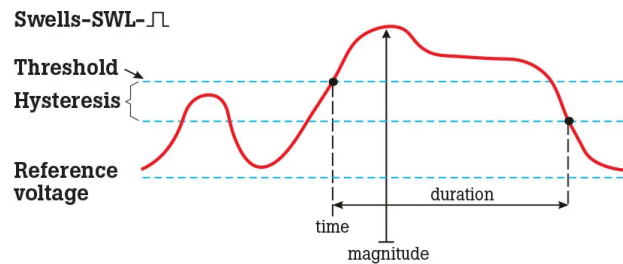


Figura 2.3: Ejemplo de un evento Swell [2]

2.5.2. Armónicos e interarmónicos

En este estándar de calidad de medición también se considera la medición de armónicas e interarmónicas. Este documento se respalda en el estándar IEC 61000-4-7 [19], el cual se titula *General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*. Para estas mediciones se hace la distinción entre clases:

- Clase A:
 - Clase I del estándar IEC 61000-4-7
 - Medir por lo menos hasta el armónico de orden 50
- Clase S:
 - Clase II del estándar IEC 61000-4-7
 - Medir por lo menos hasta el 40^{vo} armónico

DISEÑO DE MEDIDOR DE POTENCIA

EL tema de esta memoria de título es el diseño de un medidor de potencia utilizando una unidad PMIC. Desde hace décadas que existen los medidores eléctricos digitales pero estos no han bajado de precio a través de los años y son mucho más caros que los medidores eléctricos análogos. Este trabajo busca encontrar nuevas alternativas para la medición de las variables eléctricas en distintas aplicaciones, con el objetivo final de reducir el costo de producción.

Este trabajo surge de la necesidad de una empresa chilena de distribución eléctrica que busca reducir las pérdidas en sus redes de distribución. En base a esto se busca desarrollar un equipo capaz de medir voltaje y corriente en una red trifásica, y luego calcular la potencia y energía que circula a través de ésta. Debido a que este trabajo está enfocado en instalar estos equipos en una red de distribución, se busca canalizar la información, entregada por el PMIC, a través de otro dispositivo IoT que sea capaz de transmitir estos datos de manera inalámbrica. En la Figura 3.1 se identifican los módulos de este diseño.

Como se explicó en el Capítulo 2, se utiliza el modelo ADE9000 para la unidad PMIC. Este circuito integrado es fabricado por Analog Devices, cuya compañía es uno de los principales productores mundiales de componentes electrónicos de precisión, incluidos circuitos integrados lineales y digitales, que se utilizan para ayudar a convertir los datos análogos en un formato digital que las computadoras puedan entender. Los circuitos integrados de Analog Devices se utilizan en equipos de prueba de laboratorio, dispositivos médicos que detectan información como los latidos del corazón, sistemas para controlar la presión de la cabina del avión y controles en pozos de petróleo y armas militares.

Esta compañía no solo fabrica distintos tipos de circuitos integrados, si no que también ofrece tarjetas de evaluación para la mayoría de estos desarrollos tecnológicos. El PMIC ADE9000 no es una excepción y Analog Devices ofrece dos tarjetas de evaluación para com-

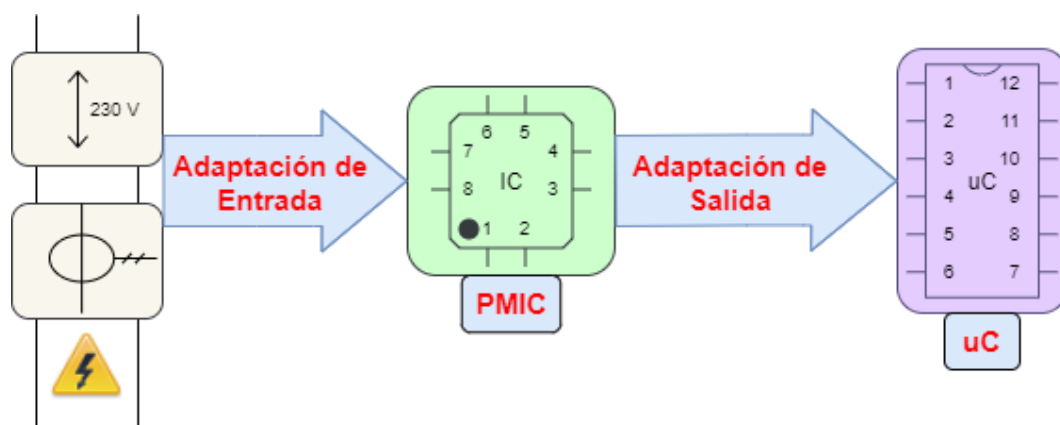
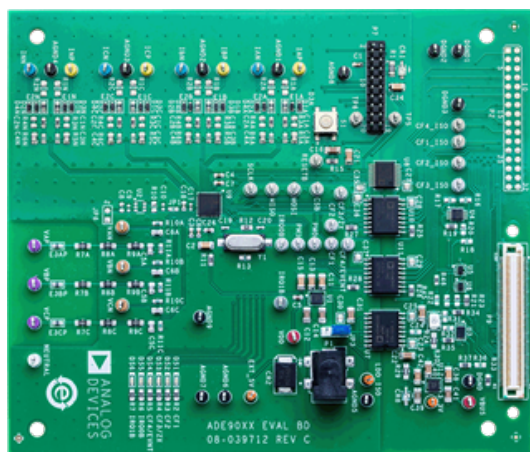
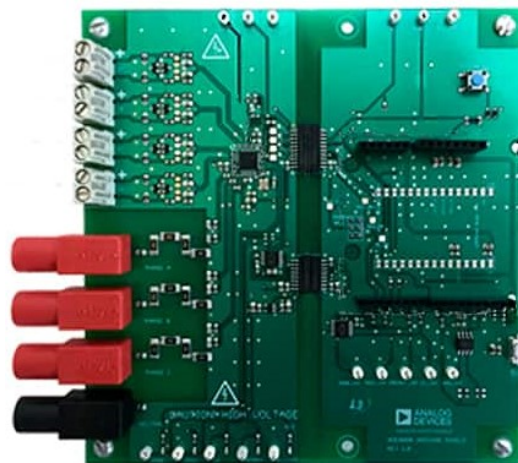


Figura 3.1: Diagrama de bloques del diseño propuesto

probar el funcionamiento de este modelo, las cuales se pueden observar en la Figura 3.2. Ambas tarjetas de evaluación son dependientes de otros componentes, específicamente se necesitan medidores de corriente y una segunda tarjeta para transferir los datos obtenidos con el circuito integrado. La gran diferencia entre estos productos es que una tarjeta de evaluación necesita una tarjeta de interfaz para conectarse directamente a un computador y la otra necesita una tarjeta de desarrollo para adquirir los datos del PMIC, sin la necesidad de conectarse a un computador.



(a) EVAL-ADE9000 [20]



(b) EVAL-ADE9000-Shield [21]

Figura 3.2: Tarjetas de evaluación del modelo ADE9000

3.1. Características del ADE9000

En esta sección se comentarán las características principales del ADE9000. Se analizarán los pines de salida y entrada, y que requisitos hay que cumplir para no dañar el componente. También se abordará como se realizan las mediciones de corriente y voltaje, que registros se utilizan y como se activan cada unas de las opciones disponibles. Por otro lado, también se comentará como se realizan los cálculos de las señales RMS y las potencias dentro del PMIC. Finalmente se comentará como se realiza la comunicación entre el PMIC y otro dispositivo IoT, y las opciones para controlar la calidad de medición y tasa de refresco en la medición de energía.

3.1.1. Pines

El ADE9000 cuenta con 40 pines, los cuales algunos son de entrada y otros de salida. Entre ellos se encuentran los pines de entrada que sirven para configurar el PMIC, tales como el PM0 y PM1, los cuales indican el tipo de operación del PMIC. Este circuito integrado permite dos estados de operación. Si ambos pines están conectados a tierra se está en operación normal, la cual se llama PSM0. Por otro lado, si ambos pines están en alto se está en operación de bajo consumo, la cual se llama PSM3. Este último estado de operación inhabilita la comunicación SPI y no se encienden los reguladores de baja caída. Respecto a la comunicación, los pines de comunicación SPI se encuentran en los pines MISO, MOSI, SS y SCLK.

Como se señaló en la Tabla 2.5 algunas de las mediciones que es capaz de entregar este dispositivo son medición de voltaje y corriente fundamental y RMS. Medición de potencia activa, reactiva y aparente. Por otro lado, también permite medir frecuencia, ángulo de fase, factor de potencia y distorsión armónica. Además, permite detectar anomalías como dips y swells.

Todas estas mediciones son capaces de realizar debido a 7 pines ADC, por los cuales se debe entregar las mediciones acondicionadas de voltaje y corriente. Se dice que estas señales están acondicionadas debido a que hay que reducir la señal de voltaje y corriente para proporcionar finalmente un voltaje menor a 1 V o 707 mV RMS. Estos ADC permiten entradas pseudo-diferencial y totalmente diferencial. Las entradas pseudo-diferenciales ayudan a separar la tierra de la señal, de la tierra del ADC, simplificando el requisito del controlador ADC al reducir la complejidad y la disipación de potencia de la señal. Las entradas totalmente diferenciales ofrecen un rango dinámico más amplio y un mejor rendimiento de relación señal ruido (SNR) que las entradas pseudo-diferenciales. Los ADC totalmente diferenciales son ideales para aplicaciones que requieren un mayor mayor rendimiento.

Estas entradas ADC también cuenta con un amplificador de ganancia programable, donde se puede asignar una ganancia de 1, 2 o 4. Según el fabricante lo más recomendable es seleccionar la ganancia 2 para no dañar los pines de entrada si es que se selecciona la ganancia 1 y para no tener problemas de ruido si es que se selecciona una ganancia mayor.

3.1.2. Medición de corriente

Para la medición de corriente se utiliza el diagrama de la figura 3.3. El bloque REFERENCE hace referencia a los 1.25 V de voltaje de referencia que se puede conectar al PMIC con el ob-

jetivo de comparar voltajes y obtener una medición más exacta. Luego, el bloque **MODULATOR** representa al ADC que se encarga de digitalizar las señales análogas que son introducidas al PMIC. Después de este bloque viene el **ADC REDIRECT MUX** o también llamado **IA DIN**. Este bloque representa a un multiplexor que realiza la redirección de las señales digitales. El siguiente bloque **SINC4**, como lo dice su nombre, es un filtro sinc que se utiliza para eliminar las frecuencias superiores a 32 kHz, con el objetivo de disminuir el ruido de las señales. El bloque **LPF** representa un filtro pasa bajos con una frecuencia de corte de 10MHz. Finalmente, el bloque **4:1** es un bloque que separa los canales en cuatro señales de 8kHz.

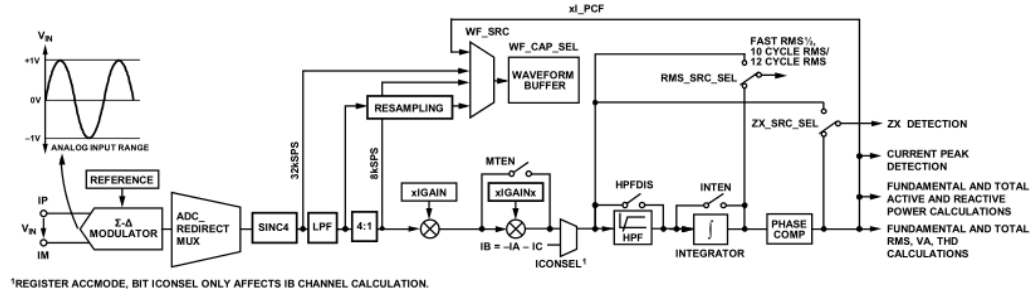


Figura 3.3: Diagrama de los canales de corriente [3]

Los bloques recién explicados son obligatorios en el paso de la señal de medición de corriente. Los siguientes bloques son opcionales y configurables a través de registros. Por ejemplo, el bloque $xIGAIN$ es un registro configurable donde se puede asignar una ganancia a las 3 fases de corriente, al igual que a la medición del neutro. Otro registro es el $ICONSEL$, donde se activa para calcular I_B cuando no se está midiendo la fase B, con el objetivo de ahorrar un transformador de corriente. Simplemente se calcula como $I_B = -I_A - I_C$. Luego, otro registro es el $HPFDIS$ el cual activa o desactiva un filtro pasa altos. El objetivo de este filtro es remover el offset DC de la señal de entrada para una medición más precisa de señales RMS y de potencia. También es posible asignar una frecuencia de corte en el registro $CONFIG2$.

Dentro de las opciones que se tienen con este PMIC, existen distintas alternativas para acondicionar la medición de corriente. El registro $INTEN$ representa la activación o desactivación de un integrador digital que se debe ocupar cuando se utiliza una bobina de Rogowski para medir corriente. El voltaje inducido a la salida de una bobina de Rogowski es proporcional a la tasa de cambio de tiempo de corriente que fluye en el conductor primario de la bobina, por lo tanto, el voltaje tiene un cambio de fase de 90° . Debido a que la salida de la bobina de Rogowski es proporcional a la derivada del primario, se requiere un integrador para recuperar la señal de corriente original. Para aplicaciones que requieren calcular potencias, la diferencia de fase entre corriente y voltaje es importante y requiere el cambio de fase de la salida del sensor [22]. Esto se hace usando un integrador, siendo su objetivo principal el compensar los sensores de Bobina de Rogowski, disminuyendo la señal con -20 dB/década y además realizando un desfase de -90° . Otra opción de configuración es la compensación de fase. Esta compensación puede ser entre -15° y 2.25° para una señal de 50 Hz.

3.1.3. Medición de voltaje

Para la medición de voltaje se puede observar en la figura 3.4 que se repiten la mayoría de los bloques presentes en la figura 3.3 que representa la medición de corriente. Los registros de corriente suelen venir con una I y los de voltaje con una V .

El bloque que cambia, comparado con la medición de corriente, es el **VCONSEL**. Este registro se utiliza para configurar el tipo de medición que se realizará. El PMIC permite medición con conexión estrella o delta con cuatro cables y también con una conexión de tres cables con cálculo de V_B , la fase B de la medición trifásica de voltaje.

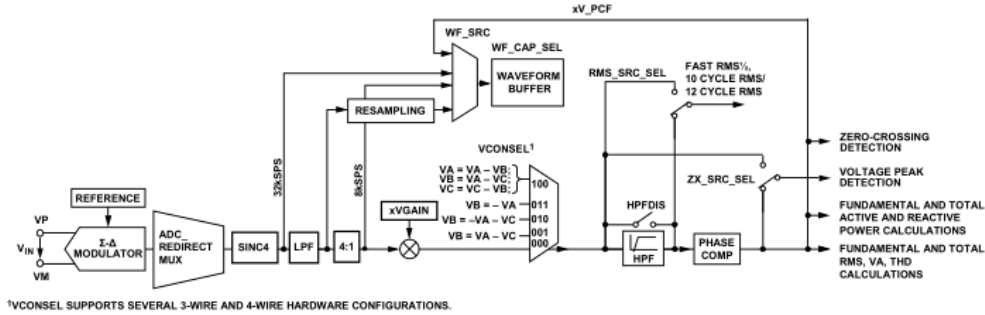


Figura 3.4: Diagrama de los canales de voltaje [3]

3.1.4. Cálculo señal RMS

Las señales RMS de las mediciones de voltaje y corriente se calculan en primera instancia elevando al cuadrado la señal de entrada. Luego se pasa la señal por un filtro paso bajo y finalmente se obtiene la raíz cuadrada del resultado. El algoritmo se puede observar en la figura 3.5. El filtro paso bajo LPF2 extrae el valor RMS, atenuando en al menos 64 dB los armónicos de una señal con frecuencia de 50 Hz, de modo que a escala completa, la variación es muy pequeña en el valor RMS calculado. Esta pequeña variación genera un error de $\pm 0.064\%$, un error bastante pequeño. Esta medición es actualizada a una señal de 8ksps.

Para valores de entrada muy pequeños, por debajo de la razón 1000: 1, se recomienda utilizar el registro *xRMSOS* para calibrar el cálculo de esta medición.

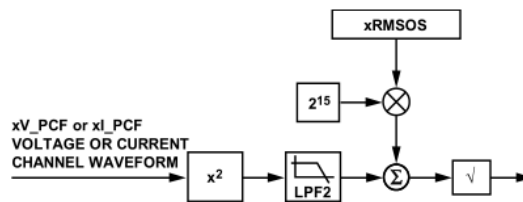


Figura 3.5: Diagrama de la señal RMS [3]

3.1.5. Cálculo de potencias

El ADE9000 es capaz de proporcionar la medición de potencia activa, reactiva y aparente. Además, este PMIC es capaz de calcular la potencia de cada fase del sistema trifásico que se está midiendo.

Para calcular la potencia activa total se sigue el algoritmo de la figura 3.6. Primero, se parte multiplicando las formas de onda xI_{PCF} y xV_{PCF} de cada fase, donde cada una de estas señales representa la medición de corriente y voltaje de cada fase, respectivamente. Luego, el resultado se filtra a través de un filtro paso bajo, cuya configuración es la misma que el filtro de la medición RMS. Finalmente, se puede utilizar el registro $xPGAIN$ para realizar una corrección de ganancia en los valores de potencia activa. Al igual que en la medición RMS, la señal de salida tiene un ancho de banda de 3.2 kHz y se actualiza a 8000 muestras por segundo (sps).

Para el cálculo de la potencia reactiva se sigue el algoritmo de la figura 3.7. La potencia reactiva total incluye la potencia reactiva de la fundamental y la de los armónicos.

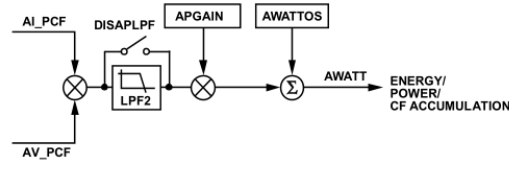


Figura 3.6: Diagrama de la potencia activa [3]

Se inicia con las señales de entrada xI_{PCF} y xV_{PCF} , donde la señal de corriente se desfasa 90° . Luego, se multiplica por xV_{PCF} y finalmente el resultado se filtra con un filtro paso bajos. Al igual que en la potencia activa, se puede compensar el valor de la potencia reactiva a través de una ganancia. La señal de salida $AVAR$ también tiene una tasa de 8 ksp/s y un ancho de banda de 3.2 kHz.

A diferencia de la potencia activa, este cálculo se puede deshabilitar a través del registro VAR_{DIS} . Esta opción está disponible ya que la mayoría de las aplicaciones, a las cuales están enfocadas este PMIC, no necesitan realizar esta medición.

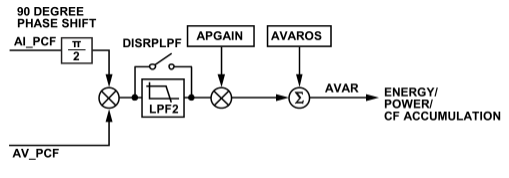


Figura 3.7: Diagrama de la potencia reactiva [3]

Ahora para calcular la potencia aparente se necesita multiplicar la medida RMS actual de la corriente $xIRMS$, por el voltaje RMS correspondiente $xVRMS$. Luego, al igual que con

el cálculo de las otras dos potencias, se puede aplicar una corrección de ganancia con el registro $xPGAIN$. De todas formas, este valor puede ser compensado previamente a través de las mediciones de $xIRMS$ y $xVRMS$, utilizando los registros $xIRMSOS$ y $xVRMSOS$.

La señal de salida xVA tiene una tasa de actualización de 8 ksps y un ancho de banda de 3.2 kHz. A diferencia del cálculo de las otras dos potencias, se puede configurar el registro $VNOM$ para asignarle un valor, de por ejemplo, 240 V RMS para multiplicar $VNOM$ por $xIRMS$ y obtener xVA . Esto se puede realizar por si se están manipulando las entradas de medición de voltaje.

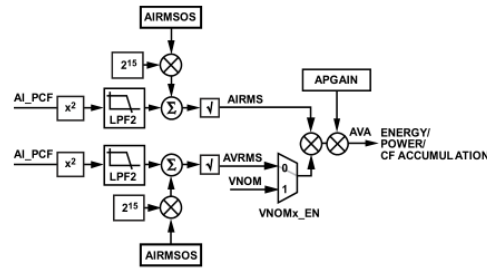


Figura 3.8: Diagrama de la potencia aparente [3]

3.1.6. Cálculo de señales fundamentales

En este caso, el PMIC ADE9000 no indica como se realizan estos cálculos. La empresa Analog Devices tiene patentado el algoritmo que utiliza para calcular los valores fundamentales de la corriente RMS, voltaje RMS, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, distorsión armónica (THD) de corriente y THD de voltaje [23].

Lo único que necesita este algoritmo es la frecuencia de la red y la tensión nominal, además de la señal a calcular. La frecuencia se puede calcular o se puede seleccionar si la señal es de 50 o 60 Hz en el registro $SELFREQ$.

3.1.7. Tasa de actualización de acumulación de energía

El ADE9000 es capaz de realizar mediciones de energía. Esto se realiza acumulando las mediciones de potencia instantánea en el registro $xWATT ACC$. Este registro se actualiza en un intervalo de tiempo definido en el registro $PWR TIME$, con un intervalo máximo de 1 segundo.

Las mediciones de energía se actualizan cada 8 ksps, cuyo valor corresponde a la frecuencia del DSP y viene configurado por default. Este valor se traducen en que se pueden almacenar hasta 106 segundos. Alternativamente, se puede configurar en un modo de acumulación diferente donde se actualizan después de un número definido, donde se configura en ciclos de la línea o en cantidad de muestras.

Además en la medición de energía se aplica un umbral de no-carga con el objetivo de detectar cuando no se esta alimentando una carga. De esta forma se puede verificar si se debe acumular la muestra *AWATT* en el acumulador de energía interno del PMIC. La detección de que no existe una carga evita la acumulación de energía debido al ruido. Esto puede ocurrir cuando las corrientes de entrada están por debajo de la corriente de inicio de un valor determinado. Es así como esta funcionalidad ayuda a verificar si la energía acumulada está por debajo de un umbral durante un período de tiempo configurable.

Las mediciones de factor de potencia, *ITHD* y *VTHD* se actualizan cada 1.024 segundos. Por otro lado, este PMIC ofrece el cálculo de señales RMS de corriente y voltaje con una actualización cada medio ciclo de línea, lo cual equivale a 10 ms en una señal con frecuencia igual a 50 Hz.

También se puede configurar el almacenamiento de la potencia activa y reactiva. La configuración que permite este PMIC es poder elegir el signo que debe tener la potencia para ser almacenada en el cálculo de la energía o si se deben almacenar todos los valores en formato de valor absoluto, ya sea un valor positivo o negativo.

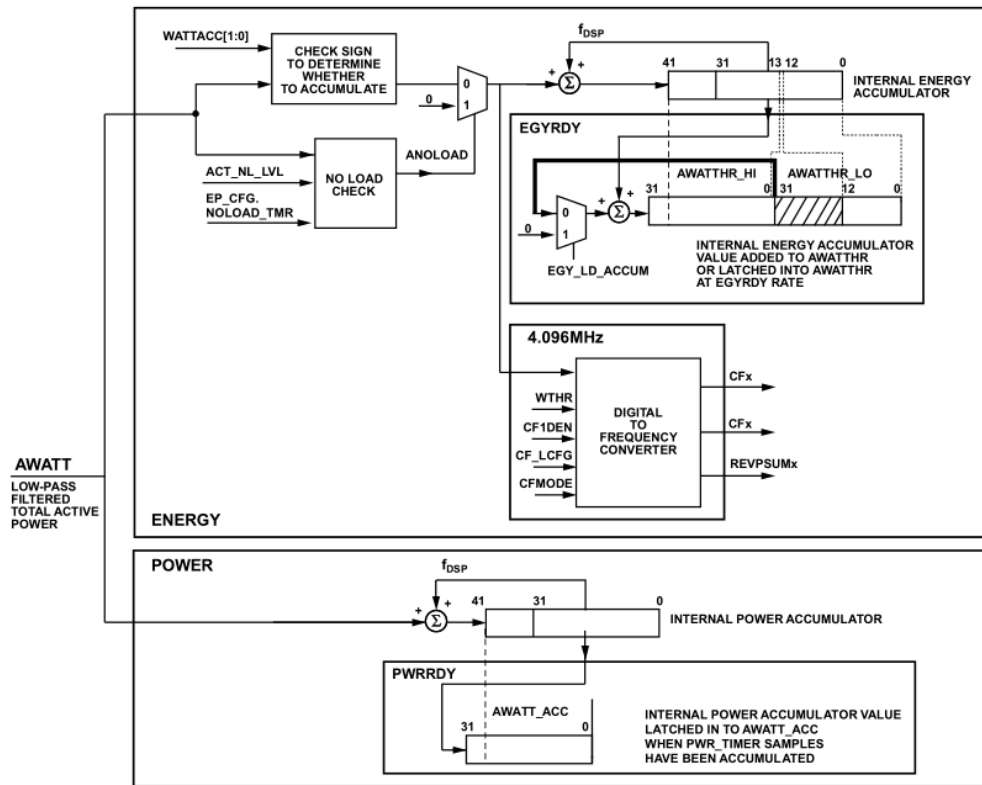


Figura 3.9: Diagrama de acumulación de energía [3]

3.1.8. Calidad de medición

La calidad de medición parte en base a la detección de cruce por cero de las señales. Este PMIC es capaz de detectar el cruce por cero en todas las entradas excepto en la corriente del neutro. Esta detección por cero se utiliza principalmente en el tiempo para remuestrear la señal de voltaje o corriente medida, el período de línea de las señales medidas, las mediciones de ángulos y la acumulación de energía mediante el modo de acumulación por ciclo de la línea eléctrica.

Por ejemplo, para calcular el periodo de línea de las señales, se toman los valores de las señales de voltaje y corriente para luego poder utilizarlas en un análisis que incluye interpolación lineal con dos valores cercanos al cruce por cero desde el lado positivo a negativo, de esta forma se llega a un resultado exacto. Aunque si este cálculo llega a fallar, es decir, si el valor que se obtiene está fuera del rango de 40 Hz a 70 Hz [24], el PMIC procede a utilizar el valor predefinido en las configuraciones que en este caso sería 50 Hz.

Otra de las competencias que tiene este PMIC, es el detectar una mala conexión en la entrada de éste, es decir, es capaz de detectar un error en la secuencia de fase. Debido a que hay que configurar que tipo de conexión se está midiendo, existen dos modos de detección, uno para una conexión estrella-delta de cuatro cables y otra para una conexión delta de tres cables.

El ADE9000 también es capaz de detectar el factor de potencia y el THD de las señales medidas. El cálculo del factor de potencia se realiza con la potencia acumulada y el THD se obtiene a partir de los valores RMS y su respectiva fundamental, cuyo algoritmo para calcular las señales fundamentales está patentado por Analog Devices, como ya se dijo anteriormente.

Finalmente, este circuito integrado es capaz de detectar anomalías en la red, tales como detección de sobre corriente, dips y swells. Estas detecciones se pueden alertar directamente a través de cuatro pines de salida configurables.

3.1.9. Comunicación

El único protocolo de comunicación que soporta este PMIC es el protocolo de comunicación SPI. Este dispositivo siempre se comportará como *Slave*, o esclavo en español. Esto quiere decir que necesita otro dispositivo *Master*, o maestro en español, para configurarlo y extraerle los datos eléctricos calculados.

Para establecer esta comunicación entre los dos dispositivos se necesitan conectar cuatro canales, MOSI, MISO, SCLK y $\overline{SS}$. Los datos pasan al PMIC a través del pin MOSI cuando la señal SCLK cae, es decir, cuando es igual a 0 V. Luego el dispositivo muestra los datos de entrada cuando SCLK está en alto. Esta señal del pin SCLK tiene forma de un tren de pulso rectangulares y marca la pauta de la comunicación.

Por otro lado, los datos salen del PMIC a través del canal MISO cuando el pin SCLK baja y deben ser mostrados por el dispositivo maestro cuando SCLK está en alto. La función que tiene el canal $\overline{SS}$ es informarle al PMIC que el dispositivo maestro está listo para comunicarse con él.

Esta transmisión de información se realiza enviando y recibiendo primero los bits más significativos del conjunto de bits. Además, es posible leer varios conjuntos de bits sin realizar el protocolo de inicialización cada vez que se envíe este conjunto, solo se necesita habilitar esta función en las configuraciones. Por último, se puede comentar que la máxima frecuencia del reloj SCLK en serie es 20 MHz.

3.2. Tarjeta de evaluación

En esta memoria se realiza la compra de la tarjeta de evaluación del ADE9000 para adquirir los datos a través de una tarjeta de desarrollo. Se elige esta tarjeta de evaluación porque este trabajo está orientado a poder medir variables eléctricas en zonas remotas, sin acceso a un computador. Esta compra se realiza con el objetivo de poder comparar el funcionamiento del diseño presentado en este documento, con el producto ofrecido por el fabricante. Además, no se tenía certeza de poder finalizar la prueba del diseño propuesto debido a la pandemia del Covid-Sars 2 durante el año 2020, lo que imposibilitó el trabajo en laboratorio y limitó las importaciones desde China.

Por otro lado, la tarjeta de evaluación que necesita acceso a un computador es más completa que la tarjeta comprada debido a que tiene un software de evaluación escrito en LABView, lo cual es mucho más fácil de acceder comparado a obtener los datos de una tarjeta de evaluación. Pero si bien esta tarjeta de evaluación es más completa que la otra adquirida, se optó por esta otra debido a que su esquemático ayudó a guiar el diseño propuesto en esta memoria, el cual está enfocado en reducir costos y que pueda ser ubicado en zonas remotas.

Esta tarjeta de evaluación se separa en una zona de alta tensión y otra de baja tensión, como se puede observar en la figura 3.2b. Esta tarjeta incluye 2 circuitos integrados que aíslan las señales de comunicación entre las 2 zonas.

En la zona aislada se conecta la alimentación de 5 V del circuito y la tarjeta de desarrollo para configurar y obtener los datos del PMIC. Esta tarjeta de evaluación solo soporta 3 tarjetas de desarrollo, el Arduino UNO, el Arduino Zero y la ESP8266. Dependiendo cual de las tres tarjetas se use, se deben modificar ciertos componentes en ella. Vale la pena mencionar que luego de realizar pruebas se comprobó que la tarjeta Arduino UNO no sirve para llevar a cabo las pruebas con la tarjeta de evaluación ya que no tiene memoria suficiente para el código de prueba.

Por otro lado, se deben comprar por separado los acondicionadores de la señal de corriente. Nuevamente dependiendo cual de estos transformadores se ocupe, se debe modificar ciertas resistencias y condensadores de la tarjeta de evaluación.

Esta tarjeta de evaluación viene con tres librerías de Arduino, las cuales se deben ocupar para configurar el PMIC. Para ello se debe ocupar el programa Arduino IDE y el código de prueba también puede ser modificado para que se pueda ocupar la tarjeta ESP8266. Las principales diferencias son los números de los pines que se van a ocupar ya que estas dos tarjetas de desarrollo son de distinto tamaño.

3.3. Diseño del prototipo

El prototipo de este trabajo consiste en el diseño del medidor de potencia en una placa de circuitos impresos. Para realizar este diseño se utiliza el software Altium Designer. En este software primero se hacen los esquemáticos de los circuitos, para luego elaborar los diseños de la tarjeta PCB y generar los archivos necesarios para su fabricación.

Para llevar a cabo el diseño y fabricación de este equipo se necesitan varios componentes. Primero se debe contar con la pieza fundamental, la tarjeta PCB. Esta tarjeta será fabricada en China e importada a Chile.

Por otro lado, los componentes que se integran a esta tarjeta vienen dados por componentes, tales como resistencias, condensadores, switches, diodos y test points. También se cuentan con conectores especiales para alto voltaje y conectores en forma de bloque para la medición de corriente.

Otros de los componentes que se ocupan en este prototipo son distintos circuitos integrados. Estos cumplen las funciones de medir corriente, temperatura, voltajes, de regular voltaje y corriente, y de aislar la tarjeta entre alto y bajo voltaje.

Además del diseño y los componentes físicos necesarios para fabricar este prototipo, se requiere un software para programar un microprocesador utilizando un código en lenguaje C++. Gracias esto, los datos del PMIC van a poder ser extraídos de este y ser analizados en plataformas externas.

3.3.1. Esquemático

En el esquemático se encuentran las conexiones eléctricas entre los componentes de la tarjeta en base a los circuitos propuestos en el diseño. La creación del esquemático en el software Altium es necesario para luego diseñar la placa PCB. El diseño del esquemático se basó en el diseño propuesto en la hoja de datos de la tarjeta de evaluación del PMIC ADE9000 [25]. Los circuitos del esquemático están simplificados en los bloques de la figura 3.10. Los circuitos y los valores de los componentes se pueden ver en los anexos A y C, respectivamente.

3.3.2. Diseño PCB

Este diseño parte desde la base de separar las tierras entre alta y baja tensión. Esto se debe hacer por seguridad de los equipos de comunicación y las personas que operen la tarjeta. Relacionado a lo mismo, como la tarjeta se puede conectar a altos voltajes se utilizan varios anchos de pistas. En las entradas de medición de corriente y de voltaje se utilizó una pista de 1 mm, mientras que para el resto de la tarjeta se utilizaron pistas con un ancho de 0.254 mm.

La tarjeta se alimenta a través de una entrada micro USB y con un voltaje de 5 V. Se hizo de esta forma para poder utilizar simplemente un cargador de celular para alimentar la tarjeta completa. Luego se utiliza un regulador lineal que es capaz de disminuir el voltaje de 5 V a 3.3 V, que es la tensión del PMIC y del resto de circuitos integrados.

Como se mostró en la representación del esquemático de la figura 3.10, por un tema de

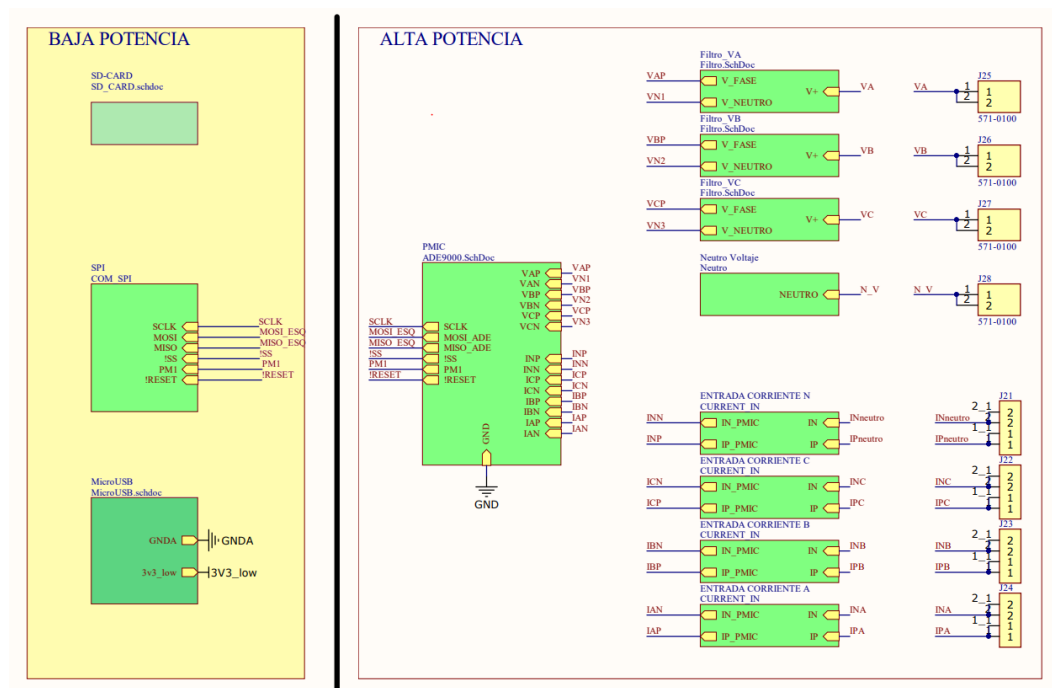


Figura 3.10: Bloques del esquemático

seguridad existe una aislación entre baja y alta tensión en la tarjeta prototipo. Esta aislación la realizan dos circuitos integrados, donde uno realiza la aislación de las señales de comunicación SPI y el otro se encarga de aislar las señales de alimentación del PMIC. Este bloque se puede observar en la parte baja de la figura 3.11.

Este prototipo cuenta además con un módulo para guardar los datos en una tarjeta Micro SD. Este diseño se basó en los módulos que se venden comercialmente en el mercado, aunque la distribución de sus componentes en la tarjeta PCB se hizo en base al espacio extra que dejaron los componentes que se ocupan para medir las variables eléctricas.

Para la medición de corriente se usaron conectores tipo bloque terminal con dos entradas, una para el conector positivo del transformador de corriente y otra para el conector negativo. Para los conectores en la medición de voltaje se utilizaron 4 socket PCB de tipo banana de 4 mm. Ambos conectores soportan 20 A de corriente y el conector de voltaje resiste hasta un peak de 1000 V.

Al momento de comparar los diseños de la tarjeta de evaluación y la tarjeta prototipo, se puede observar que esta última es un 40 % más pequeña que la otra, haciéndola más fácil de ocultar en un poste eléctrico. Además, en la tarjeta prototipo se eliminaron varios componentes de prueba que si se incluyen en la tarjeta de evaluación. Adicionalmente en la tarjeta prototipo se incluye un módulo para guardar datos offline gracias a la incorporación de una tarjeta micro SD. Por último, se incorporan conectores extra para los canales de comunicación SPI de la tarjeta prototipo. Estos conectores pueden ser utilizados para agregar

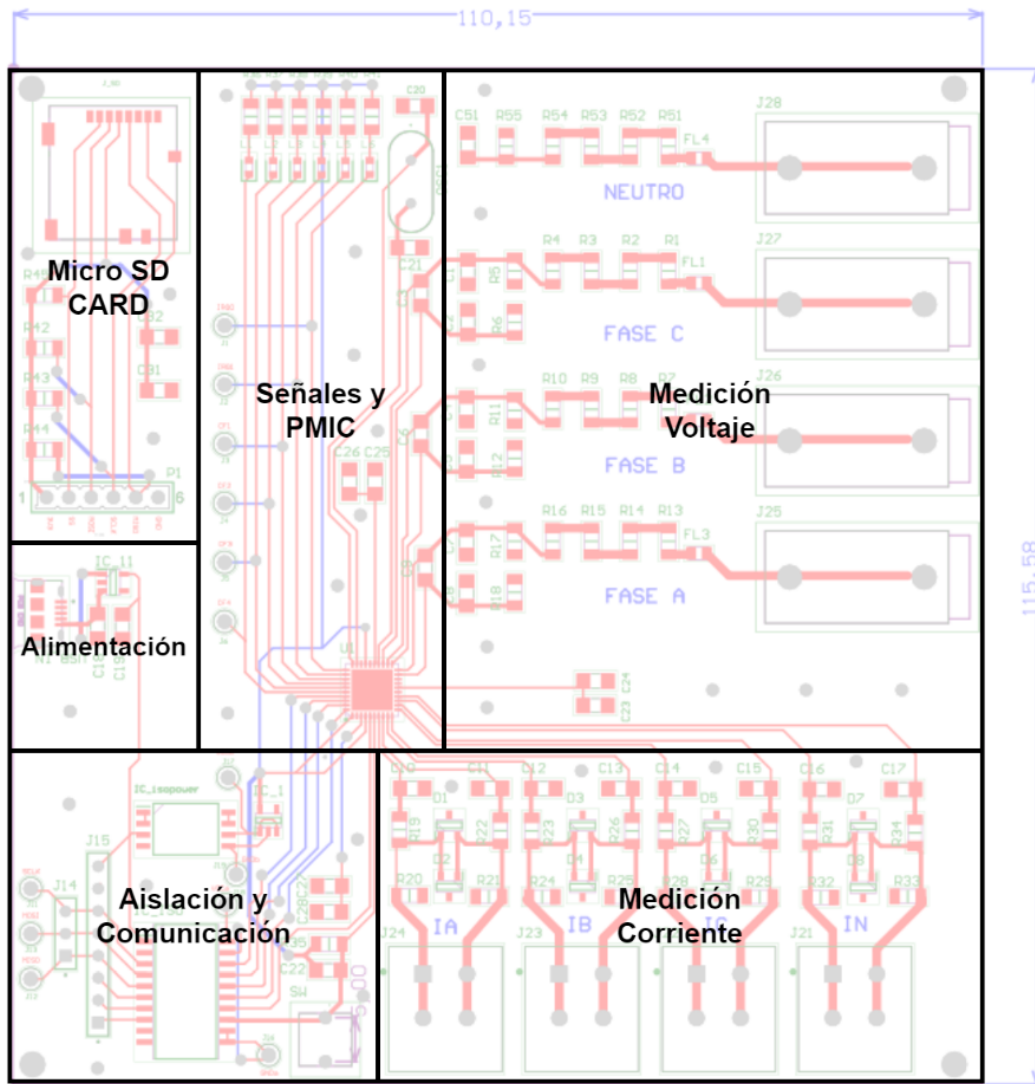


Figura 3.11: Módulos del prototipo

un periférico de comunicación, por ejemplo un módulo LoRa para transmitir los datos en una red LoRaWAN.

3.4. Configuración

Esta sección describe cómo configurar el ADE9000 para medir un sistema eléctrico trifásico, con una conexión en estrella de 4 canales.

1. Hay que esperar la interrupción RSTDONE. Esto ocurre cuando el pin $\overline{TRQ}$ está en bajo, es decir, en 0 V.

2. Hay que configurar el modo de energía normal llamado *PSM0*. Como ya se dijo anteriormente, esto se logra conectando los pines *PM1* y *PM0* a tierra, o a bajar la señal digital que se tiene conectada en esos pines desde la tarjeta de desarrollo.
3. Se debe configurar la ganancia *PGA* en los canales de corriente y voltaje usando el registro de ganancia *PGA GAIN*. De todas formas, la ganancia por defecto en todos los canales es igual a 1.
4. Se deben configurar los bits *HPFDIS* en el registro *CONFIG0* para habilitar o deshabilitar el filtro pasa altos que se tiene luego del ADC. De todas formas, el filtro paso altos esta habilitado por defecto. Se recomienda mantener siempre habilitado el filtro pasa altos, excepto si se desea medir una señal DC o con una frecuencia muy baja. Luego se debe configurar la frecuencia deseada para el filtro usando los bits *HPF CRN* en el registro *CONFIG2*. El valor predeterminado para *HPF CRN* es igual a 6, o 1.25 Hz de frecuencia.
5. Si se utilizan bobinas Rogowski como sensores de corriente, se debe habilitar el integrador digital utilizando los bits *INTEN* e *INITEN* en el registro *CONFIG0*. Estos integradores digitales están desactivados por defecto.
6. Se debe configurar la frecuencia fundamental esperada en las señales que se están midiendo. Esto se realiza usando el bit *SELFREQ* donde si el bit es igual a 0 significa que se están midiendo señales con frecuencia de 50 Hz, y si es el bit es igual a 1 son señales de 60 Hz. Ese bit se encuentra en el registro *ACCMODE*. Además, se debe programar la tensión nominal en el registro *VLEVEL* para que el PMIC pueda calcular las fundamentales de las señales medidas.
7. Hay que configurar la fuente del cruce por cero para la detección de *ZX*. Si el bit *ZX SRC SEL* es igual a 1 en el registro *CONFIG0*, los datos se obtienen antes de que pasen a través del filtro pasa altos, del integrador y de la compensación de fase, ahorrándose tiempo de análisis. De todas formas se recomienda mantener el bit *ZX SRC SEL* igual a 0 porque se realiza el análisis con una señal con más ruido.
8. Se debe asignar un valor igual a 000 a los bits de *VCONSEL*, los cuales estan ubicados en el registro *ACCMODE*. Esto significa que se están midiendo señales conectadas con una conexión estrella de cuatro hilos, tal como se dijo al inicio.
9. Se deben realizar las siguientes configuraciones si la energía se monitorea usando las salidas CF.
 - a) Se deben configurar los bits *CFxSEL* en el registro *CFMODE* para seleccionar el tipo de energía a monitorear.
 - b) Luego se deben configurar los bits *TERMSELx* en el registro *COMPMODE* para seleccionar que fases se van a monitoriar en las salidas CF.
 - c) Se asigna el valor 0x00100000 al registro *xTHR*.
 - d) Se debe calcular y asignar el valor correspondiente al registro *CFxDEN* en base a la cantidad de impulsos que se desean por kilowatt-hora que se miden.
 - e) Finalmente, se asigna el ancho de pulso de las salida CF usando el registro *CF LCFG*.

10. Si la energía se supervisa mediante registros de energía se deben seguir las siguientes configuraciones:
 - a) Se deben configurar los bits *WATTACC* y *VARACC* en el registro *ACCMODE* para seleccionar algún modo de acumulación. Como se explicó anteriormente, se puede configurar si se considera la potencia con signo positivo o negativo, absoluto, y suma entre potencia positiva y negativa. El valor por defecto es el modo de acumulación con signo, es decir, se suma la potencia positiva y se resta la potencia negativa.
 - b) Se deben configurar los bits *NOLOAD TMR* en el registro *EP CFG*. Además, se deben configurar los registros de nivel *ACT NL LVL*, *REACT NL LVL* y *APP NL LVL* para detectar cuando no haya una carga conectada a la medición y evitar la acumulación de ruido en los registros.
 - c) Se debe configurar el bit *EGY TMR MODE* en 1, en el registro *EP CFG*, para seleccionar si se va a acumular con muestras, o se le asigna un valor igual a 0 si se va a acumular con el ciclo de línea. Para configurar el número de muestras deseadas o los ciclos de línea, se debe utilizar el registro *EGY TIME*.
 - d) Luego se configura el bit *EGY LD ACCUM* en el registro *EP CFG*. Si se le asigna al bit un valor igual a 0, se va a agregar el registro de energía interno al registro de energía del usuario en *EGYRDY*. Por otro lado, si se le asigna al bit un 1, se va a sobrescribir el registro de energía del usuario con el valor del registro interno de energía.
 - e) Finalmente se configura en 1 el bit *RD RST EN* en el registro *EP CFG*. Esto se realiza para habilitar el restablecimiento de los registros de energía del usuario.
11. Este PMIC se puede configurar para generar interrupciones en base a una variedad de eventos. Estas interrupciones se pueden observar en los pines *TRQ0* y *TRQ1*. Estas interrupciones se puede configurar en los registros *MASK0*, *MASK1*, *STATUS0* y *STATUS1* gestionan las respectivas interrupciones de ambos pines.
12. También se pueden configurar las mediciones de calidad de energía.
13. También se puede configurar el Buffer Waveform, donde se puede asignar la cantidad de datos obtenidos, su actualización y la forma de acumularlos.
14. Se debe habilitar el núcleo DSP configurando el registro *RUN* igual a 1. Además se debe habilitar la acumulación de energía estableciendo el bit *EGY PWR EN* igual a 1 en el registro *EP CFG*.
15. La calibración se debe realizar una vez en funcionamiento condiciones típicas. Cuando se calculan los valores de calibración, se deben escribir las constantes en los registros antes de habilitar el núcleo DSP.
16. Para evitar cambios en la configuración de ADE9000, se puede habilitar la protección contra escritura configurando el registro *WR LOCK*, donde se debe escribir el valor 0x3C64.

3.5. Resultado final

Luego de todo este análisis se envían los archivos con el diseño del medidor de potencia a la empresa PCBCart que esta ubicada en China. Una vez fabricada la tarjeta, esta empresa la envía a Chile a través de la empresa DHL. Los componentes de la tarjeta son comprados en Mouser Electronics y también fueron enviados a Chile. Una vez que fueron recepcionados en la universidad se procedió a soldar los componentes en la tarjeta y realizar el montaje. El resultado no terminado de este proceso se puede observar en la figura 3.12.

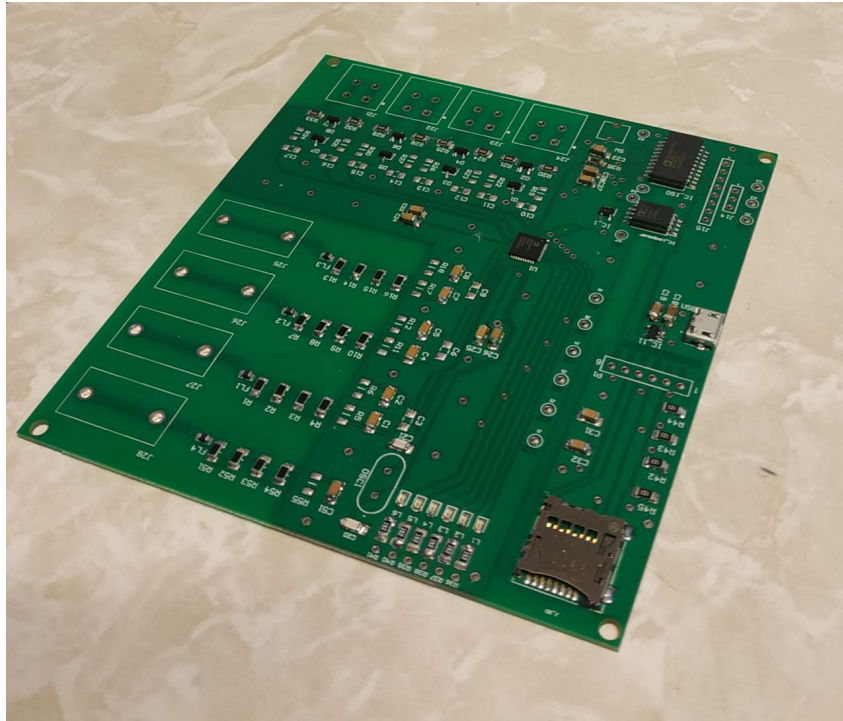


Figura 3.12: Prototipo diseñado sin terminar de montar

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

LA etapa experimental se vió truncada debido a la restricciones de movilidad del gobierno de Chile. La universidad ubicada en Valparaíso entró en cuarentena durante la primera semana de pruebas y no se pudo completar el montaje de la tarjeta diseñada ya que no se otorgaron facilidades para quienes requerían ingresar a la universidad durante cuarentena. Además, debido a la fecha de cierre del ramo Memoria de Titulación no se van a poder realizar pruebas en el prototipo diseñado ni se van a poder comparar ambas tarjetas. Para poder cerrar este ciclo, y sin muchas opciones sobre la mesa, se procede a realizar las pruebas solo en la tarjeta de evaluación ofrecida por Analog Devices.

4.1. Preparación

Las pruebas en la tarjeta se realizan en mi domicilio debido a las restricciones. El *setup* que se utilizó para las pruebas se puede observar en la figura 4.1. Para comparar las mediciones de la tarjeta de medición se ocupa una pinza amperimétrica True RMS AC/DC Fluke 376 FC con iFlex [26]. Si bien esta marca es conocida internacionalmente por la calidad de sus productos, este equipo no es el más óptimo para estas mediciones pero dentro del contexto actual de pandemia es el único equipo disponible para contrastar las mediciones y obtener un porcentaje de error. Este equipo no es el más óptimo debido a que solo entrega un decimal en cada medición y la exactitud en medición de corriente y voltaje alterno es de 2 %, un porcentaje muy bajo para corroborar la exactitud del PMIC ADE9000, que según su fabricante es capaz de calcular los datos de potencia con una exactitud de 0.1 %, una vez calibrado. Además, se le debe sumar el error humano porque se debe obtener el dato justo en el momento que la tarjeta de medición envía los datos de medición al computador.

Para estas pruebas fue necesario fabricar conectores especiales para conectar las cargas al tomacorriente domiciliario. Además, se tuvieron que mantener los cables por separado para poder realizar las mediciones de corriente con el transformador de corriente y la pinza del tester Fluke. Se tuvieron que fabricar estas extensiones principalmente por el transformador de corriente ya que tiene su núcleo cerrado y debe ser introducido por uno de los extremos

del cable antes de alimentar a las cargas.

Para conectar la tarjeta de evaluación al computador se necesita un cable de carga para celular con un conector micro USB a USB. Este cable se utiliza para conectar la tarjeta de desarrollo ESP8266 con el computador, ya que esta tarjeta esta conectada a los pines de comunicación de la tarjeta de desarrollo. Se necesita otro de estos cables para poder alimentar a la tarjeta de desarrollo con 5 V, por lo que se hace súper simple alimentar la tarjeta con un cargador de celular.

En el anexo D se encuentra el código utilizado para obtener las mediciones y cálculos del PMIC. En este código se encuentran todas las funciones y está debidamente comentado. Para poder utilizarlo se debe usar el software Arduino IDE [27] y utilizar las bibliotecas que ofrece el fabricante [28].

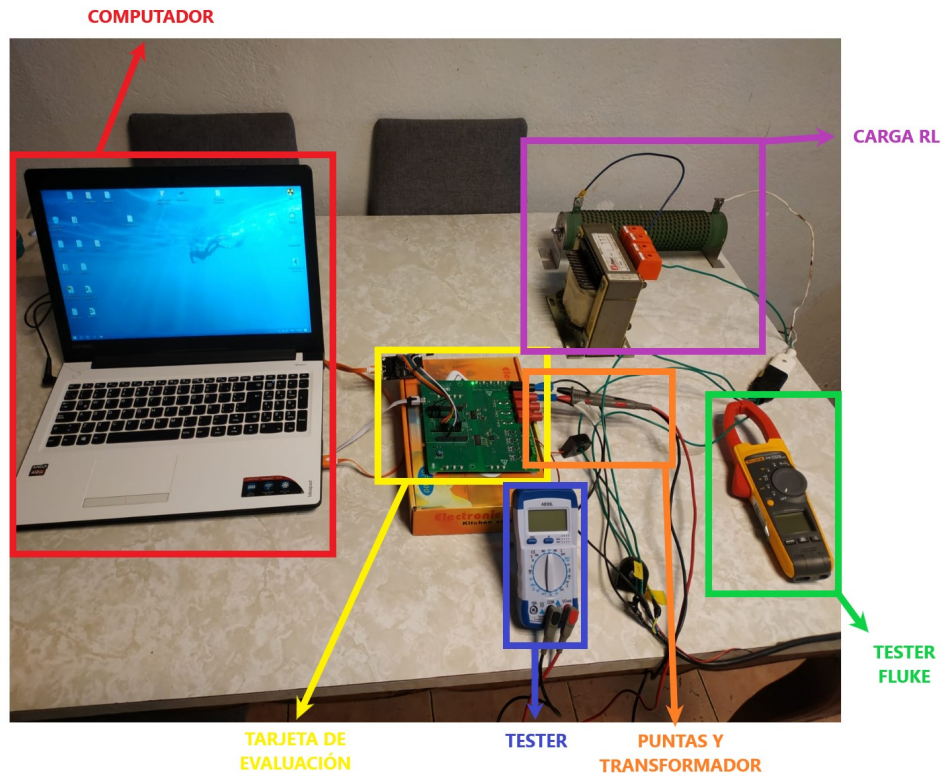


Figura 4.1: *Setup* utilizado para pruebas experimentales

Para la carga se utiliza un carga RL, es decir, una resistencia con un inductor conectados en serie. Se tienen dos resistencias y un inductor. Una de las resistencias tiene un valor teórico de $47\ \Omega$ y la otra de $10\ \Omega$, mientras que el inductor de $15\ mH$. Con el multímetro Fluke se mide el valor de las resistencias y se obtiene un valor de $48.8\ \Omega$ y $9.9\ \Omega$, como se puede observar en la figura 4.2. No se cuenta con un equipo para medir la inductancia, por lo que se usará el valor que entrega el fabricante para el cálculo de las variables eléctricas.



Figura 4.2: Medición de resistencia de 48.8Ω

4.2. Identificar fase y neutro en tomacorriente

Para iniciar las mediciones se debe identificar la fase y el neutro de la casa en el tomacorriente donde se va a conectar la tarjeta de evaluación. Esto se debe realizar debido a que la tarjeta tiene predefinidas las entradas de las fases y el neutro. Además, este diseño no tiene un divisor de tensión en la entrada del neutro, por lo que una mala conexión podría quemar la tarjeta de evaluación. Esta prueba se hace introduciendo las puntas del multímetro en las entradas del tomacorriente.

4.3. Mediciones de voltaje

La primera medición que se realiza es solo midiendo el voltaje de la casa. Se lleva a cabo esta prueba para obtener un porcentaje de error y para calibrar la medición de la tarjeta de evaluación.

El código que se necesita para solo obtener el voltaje RMS del hogar se muestra a continuación y debe reemplazar el código que está adentro de la función `void loop()` del anexo D. Se le asigna un *delay* de 3 segundos para poder escribir las mediciones del multímetro y se utiliza la fase C debido a que la entrada de la fase A no cuenta con los condensadores que se usan para filtrar el ruido de medición.

```
1 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CVRMS)*voltage_const,DEC);  
2 delay(3000);
```

Debido a que vivo en una zona industrial, a media cuadra del metro y cerca de una subestación eléctrica, el voltaje del hogar es bastante variable. En un momento dado, por un par de segundos, se mantuvo la medición y los valores fueron:

- Voltaje Multímetro: 227.5 V
- Voltaje Tarjeta: 226.42 V

De todas formas, luego de varias mediciones se pudo observar que existía una diferencia constante de aproximadamente 1.1 V, es decir, un error aproximado de 0.5 %.

Con estos datos ahora se debe calibrar la tarjeta de evaluación escribiendo un valor en el registro de ganancia de voltaje de la fase C. Para ello se utiliza una plantilla Excel que es proporcionada por el fabricante [29]. De todas formas la ecuación 4.1 representa la fórmula que se utiliza para obtener el valor de ganancia de la fase x [24].

$$xGANANCIA = \left(\frac{Valor_{real}}{Valor_{medido}} - 1 \right) \cdot 2^{27} \quad (4.1)$$

$$= \left(\frac{227,5}{226,42} - 1 \right) \cdot 2^{27} \quad (4.2)$$

$$= 640205 \quad (4.3)$$

Luego de obtener el valor en la ecuación 4.3, se debe convertir el valor de formato decimal a hexadecimal y escribirlo en el registro del PMIC a través del siguiente código. El valor 640205 es representado en hexadecimal por `0x9C4CD` y debe ser escrito en la función `SPI_Write_32()` de la biblioteca `ade9000`. Esta función debe ir dentro de la función `void setup()` del anexo D.

```

1 ...
2 ade9000 . SPI_Write_32 (ADDR_CVGAIN, 0x9C4CD) ;
3 ...

```

Ahora que la tarjeta de evaluación esta calibrada se procede a realizar 25 mediciones de voltaje para obtener un error de medición aproximado. En la tabla 4.1 se encuentran las mediciones del multímetro y de la tarjeta de evaluación.

Con los datos de la tabla 4.1 se puede obtener el porcentaje de precisión de la tarjeta en la medición de voltaje.

$$\frac{\sum_{n=1}^{25} \frac{|V_{F,n} - V_{T,n}|}{V_{F,n}} \cdot 100 \%}{n} = 0,0563 \%$$

Se puede observar que la precisión es mayor a la que indica el fabricante, esto significa que el PMIC cumple con los estándares de medición y que la calibración fue realizada exitosamente, bajando el error de 0.5 % a 0.05 % aproximadamente. De todas formas existe

Multímetro Fluke [V]	Tarjeta de Evaluación [V]
225.4	225.44
225.6	225.56
226.4	226.32
226.4	226.40
226.5	226.53
226.7	226.69
226.5	226.48
226.5	226.50
226.2	226.32
225.8	225.97
226.2	226.36
226.8	226.93
227.0	226.61
226.7	226.57
226.6	226.21
226.2	225.90
226.0	225.96
226.0	226.24
226.4	226.44
226.6	226.66
226.7	226.72
226.3	226.28
225.8	225.61
225.4	225.23
224.3	224.69

Tabla 4.1: Mediciones del multímetro Fluke y de la tarjeta de evaluación

un porcentaje considerable de error de medición debido a que se debía anotar el dato del multímetro Fluke una vez que aparecían los datos de la tarjeta de evaluación en la pantalla del computador, dando unos milisegundos de retraso. Este error se potencia si se considera que el voltaje de mi hogar es bastante variable.

Finalmente se procede a instalar todo el *setup* de la figura 4.1 para realizar las pruebas de corriente y potencia.

4.4. Mediciones con tarjeta de evaluación

Antes de conectar la carga, se procede a obtener el valor teórico de la corriente para no sobrepasar los 20 A que soporta la instalación eléctrica de la casa.

Primero se calcula la impedancia del inductor con la siguiente ecuación.

$$Z_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 15m = 4,71238898 \Omega$$

Luego se obtiene la impedancia de las cargas RL de la siguiente forma.

$$X_{RL,1} = 48,8 + j4,71238898 = 49,027^{\angle -0,096267 \text{ rad}} \Omega$$

$$X_{RL,2} = 58,7 + j4,71238898 = 58,889^{\angle -0,0801074 \text{ rad}} \Omega$$

Finalmente se puede obtener la corriente RMS en base a un valor arbitrario de voltaje, por ejemplo 225 V.

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{X_{RL,1}} = \frac{225}{49,027^{\angle -0,096267 \text{ rad}}} = 4,589^{\angle -0,096267 \text{ rad}} \text{ A} \quad (4.4)$$

También se calcula la corriente que circularía con ambas resistencias en serie junto al inductor, dando como resultado 3.82 A. De esta forma se puede concluir que es seguro conectar la carga en el domicilio.

Se conecta la carga RL al tomacorriente del hogar y se guardan los datos que se transmiten desde la tarjeta de evaluación. Primero se realiza utilizando solo la resistencia de 48.8Ω y luego ambas resistencias en serie con 58.7Ω . Para obtener estos datos se utiliza la función `readRegistersFunctions()` que se encuentra en la línea 207 del código del anexo D. Debido a que solo se hará una medición monofásica en la entrada de la fase C de la tarjeta de evaluación, solo se utilizarán las líneas de código de esta fase. Estas líneas están debidamente comentadas para identificar la fase que se está leyendo.

Los datos se pueden leer con varios programas que permitan el traspaso de datos a través de una interfaz serial. En este caso se utiliza el software Arduino IDE para comprobar que los datos están siendo transmitidos correctamente, y el software PuTTY para guardar los datos en un archivo de texto. Ambas interfaces se pueden observar en las figuras 4.3 y 4.4. Los datos que se observan en estas figuras son ordenados y tabulados para mostrarlos en la tabla 4.2. Para el remuestro de las señales medidas se aplica la misma técnica pero se omite la descripción de la señal para que sea más fácil graficarla.

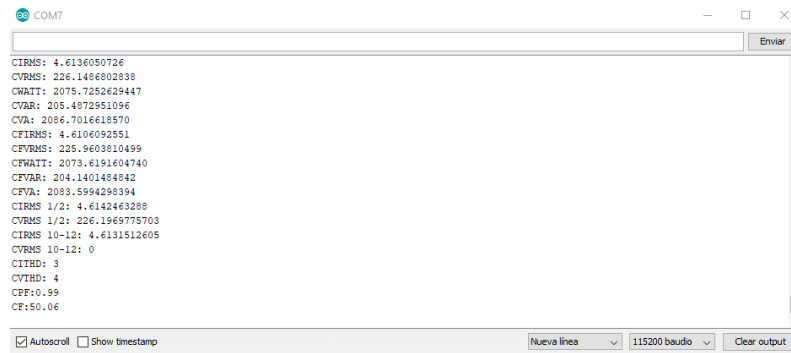


Figura 4.3: Interfaz de Arduino IDE

```

R1
CIRMS: 4.6087709872
CVRMS: 226.2385364504
CWATT: 2074.5773422287
CVAR: 205.2121736156
CVA: 2085.3640021797
CFIRMS: 4.6054561858
CFVRMS: 226.0355029976
CFWATT: 2071.9779184586
CFVAR: 203.9978442632
CFVA: 2082.0435703566
CIRMS 1/2: 4.6093629160
CVRMS 1/2: 226.2671128823
CIRMS 10-12: 4.6087611217
CVRMS 10-12: 0
CITHD: 3
CVTHD: 4
CPF:1.00
CF:50.14

```

Figura 4.4: Interfaz de PuTTY

4.5. Cálculos de variables eléctricas

Ahora para contrastar los valores experimentales obtenidos con la tarjeta de evaluación se calcularán los valores teóricos de las potencias, la corriente y algunas variables eléctricas.

Usando los valores de la carga y el valor del voltaje RMS obtenido con la tarjeta de evaluación, se procede a calcular la corriente que debería obtenerse con estas cargas. Para la primera medición se midió 223.78 V y para la segunda se obtuvieron 225.76 V.

Para la corriente se usa la ecuación 4.4, recién utilizada para revisar la seguridad de la conexión.

$$I_{rms,1} = \frac{V_{rms,1}}{X_{RL,1}} = \frac{223,78}{49,027 \angle -0,096267 \text{ rad}} = 4,5644 \angle -0,096267 \text{ rad A}$$

$$I_{rms,2} = \frac{V_{rms,2}}{X_{RL,2}} = \frac{225,76}{58,889 \angle -0,0801074 \text{ rad}} = 3,8337 \angle -0,0801074 \text{ rad A}$$

Ahora para la potencia aparente se utiliza el valor del voltaje RMS medido por la tarjeta de evaluación y la corriente RMS teórica.

$$S_1 = V_{rms,1} \cdot I_{rms,1} = 1021,42 \angle -0,096267 \text{ rad} = 1016,69 - j98,177 \text{ VA}$$

$$S_2 = V_{rms,2} \cdot I_{rms,2} = 865,50 \angle -0,0801074 \text{ rad} = 862,72 - j69,23 \text{ VA}$$

Para calcular la potencia activa y reactiva se utiliza la potencia aparente obtenida anteriormente.

$$P_1 = 1016,69 \text{ W} \qquad Q_1 = 98,177 \text{ VAR}$$

$$P_2 = 862,72 \text{ W} \qquad Q_2 = 69,23 \text{ VAR}$$

Ahora se calcula el factor de potencia teórico para la carga conectada a la casa. Esto se realiza dividiendo la potencia activa por la potencia aparente, como se muestra a continuación.

$$FP_1 = \frac{P_1}{S_1} = 0,9953699$$

$$FP_2 = \frac{P_2}{S_2} = 0,9967879$$

4.6. Comparación de valores experimentales y teóricos

Ahora para realizar las comparaciones entre las mediciones y lo calculado teóricamente, más lo medido por el multímetro Fluke, se crearon las tablas 4.2 y 4.3.

Parametro	Tarjeta de Evaluación	Teórico
Corriente RMS	4.56	4.56
Voltaje RMS	223.78	223.78
Potencia Activa	1017.36	1016.69
Potencia Reactiva	100.88	98.18
Potencia Aparente	1021.98	1021.42
Factor de Potencia	0.99	0.99
Corriente Fundamental RMS	4.56	
Voltaje Fundamental RMS	223.77	
Potencia Fundamental Activa	1014.67	
Potencia Fundamental Reactiva	99.75	
Potencia Fundamental Aparente	1019.55	
Corriente RMS 1/2 ciclo	4.56	
Voltaje RMS 1/2 ciclo	223.77	
THD Corriente	4 %	
THD Voltaje	5 %	
Frecuencia	50.14 Hz	

Tabla 4.2: Mediciones y cálculos de la tarjeta de evaluación

Se puede observar que la corriente medida por la tarjeta de evaluación es la misma que debería dar teóricamente 4.56 A y 3.83 A, respectivamente. Por otro lado, el multímetro Fluke midió 4.4 A y 3.7 A, respectivamente.

También ve que la potencia aparente teórica es bastante similar a la obtenida por la tarjeta de evaluación, dando un error de 0.055 % para la primera prueba y 0.070 para la segunda. Para las potencias activa y reactiva se observa que nuevamente los valores teóricos son cercanos a los datos calculados por la tarjeta de evaluación, con un error de 0.066 % para la potencia activa y 2.75 % para la potencia reactiva para la primera prueba. Para la segunda prueba se obtienen errores de 0.089 % y 2.30 %, respectivamente. Hay que considerar que el fabricante indica que el PMIC entrega el cálculo de la potencia activa con una precisión del 0.1 %, por lo que en estos casos cumple con lo obtenido.

Por último se mide la frecuencia de la red con el multímetro Fluke y se obtiene una medición de 50.1 Hz para ambos casos. Se puede observar que la tarjeta de evaluación midió 50.14 Hz en la primera prueba y 50.10 en la segunda, por lo que la medición coincide con lo medido por el multímetro. Finalmente, se puede ver que el factor de potencia coincide con los valores obtenidos por la tarjeta de evaluación.

Parametro	Tarjeta de Evaluación	Teórico
Corriente RMS	3.83	3.83
Voltaje RMS	225.76	225.76
Potencia Activa	863.49	862.72
Potencia Reactiva	70.815	69.23
Potencia Aparente	866.11	865.5
Factor de Potencia	0.99	0.99
Corriente Fundamental RMS	3.83	
Voltaje Fundamental RMS	225.58	
Potencia Fundamental Activa	861.98	
Potencia Fundamental Reactiva	70.39	
Potencia Fundamental Aparente	864.86	
Corriente RMS 1/2 ciclo	3.84	
Voltaje RMS 1/2 ciclo	225.76	
THD Corriente	3 %	
THD Voltaje	4 %	
Frecuencia	50.10 Hz	

Tabla 4.3: Mediciones y cálculos de la tarjeta de evaluación

Vale la pena señalar que las mediciones RMS de 1/2 ciclo, representan la medición de corriente y voltaje en medio ciclo de las señales, y no en un ciclo completo como en el resto de las mediciones.

4.7. Remuestreo de señales eléctricas medidas

Otra de las funciones que tiene el PMIC ADE9000 es el remuestreo de las señales medidas, es decir, la corriente y el voltaje de la red eléctrica. Esta señal se obtiene de la medición de 128 puntos por período, es decir, 128 puntos en 0.02 segundos si la frecuencia es de 50 Hz, por ende la tasa de muestreo es de 6.4 ksps. Los datos que se obtienen de la tarjeta de evaluación son entregados en base a las muestras obtenidas, por lo que hay que acondicionar las señales para graficarlas en base al tiempo y magnitud correcta.

La primera señal remuestreada es el voltaje de la red eléctrica, la cuál se puede observar en la figura 4.5. Luego al tener conectada la carga RL con la resistencia de 48.8 Ω , se procede a remuestrear la corriente que alimenta la carga, como se observa en la figura 4.6.

Por último se ejecuta una prueba de escalón de carga que implica la conexión de otra resistencia en paralelo a los 48.8 Ω y conectada a un switch en serie, como se observa en la figura 4.7. En la figura 4.8 se puede ver el resultado, donde en un comienzo solo está conectada la resistencia de 48.8 Ω , por lo que circulan 4.56 A RMS aproximadamente. Luego, se acciona el switch y la corriente aumenta ya que se instaló una resistencia de 9.9 Ω en paralelo, por lo que la corriente aumenta a 21 A aproximadamente. Esta acción se tuvo que realizar por solo un par de segundos ya que el tomacorriente solo resiste hasta 10 A, el interruptor automático hasta 20 A y las resistencias no son aptas para tanta potencia. De todas formas se obtuvo un resultado positivo y no se dañó ningún equipo en el proceso.

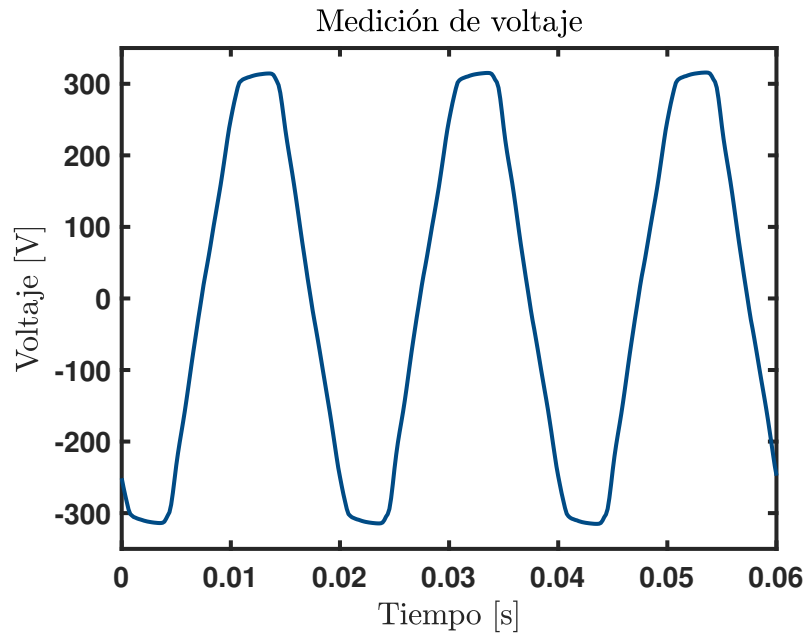


Figura 4.5: Remuestreo de señal de voltaje

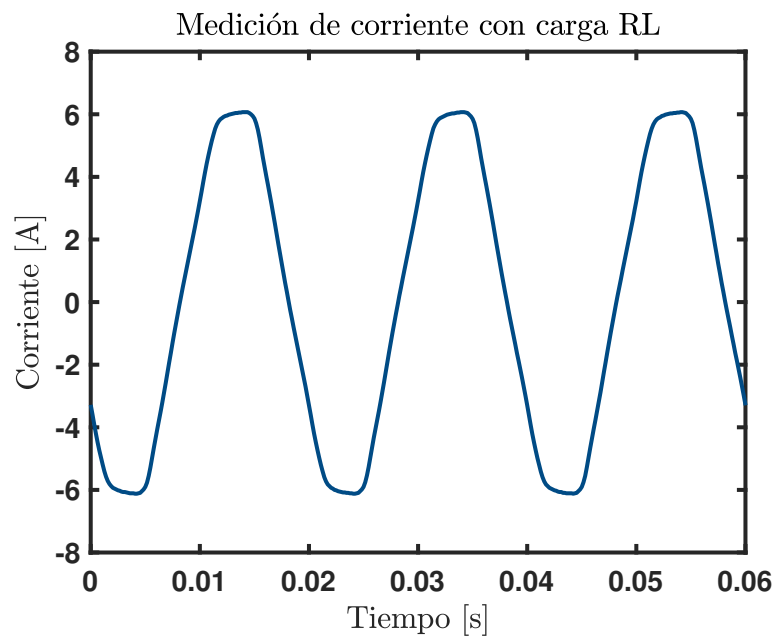


Figura 4.6: Remuestreo de señal de corriente con carga RL

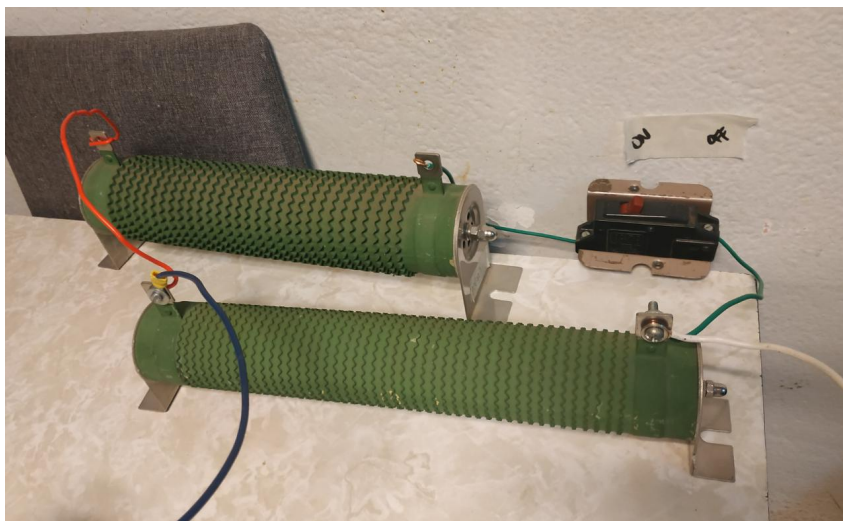


Figura 4.7: Conexión para realizar escalón de carga

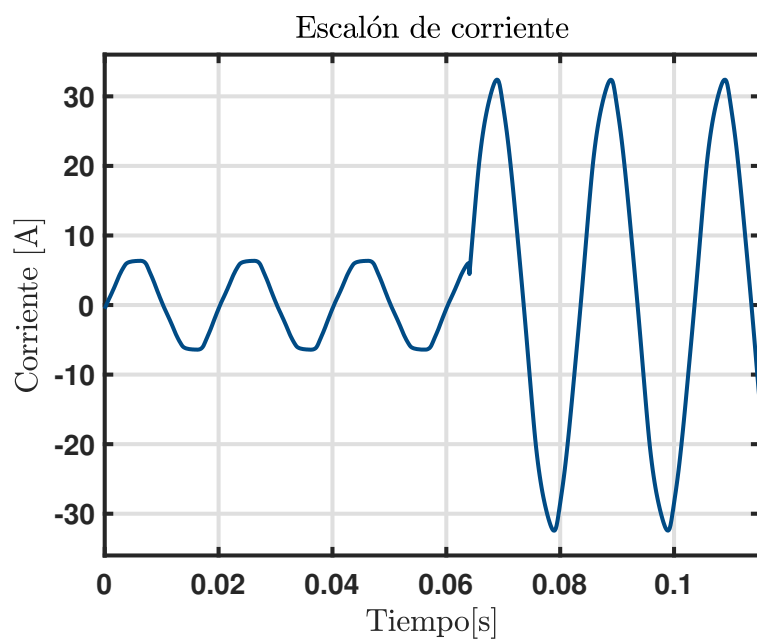


Figura 4.8: Remuestreo de señal de corriente con escalón de carga

CONCLUSIONES

COMO conclusión de este trabajo de memoria se tiene que el PMIC si es capaz de medir el voltaje y la corriente de una red eléctrica con buena precisión. Además, se comprobó que el ADE9000 si es capaz de calcular la potencia activa, reactiva y aparente con gran precisión, teniendo en consideración que no se tuvieron los equipos más adecuados para llevar a cabo las pruebas.

Lo más destacable del PMIC es su precisión, considerando que en la entrada de los ADCs ingresa una señal acondicionado menor a 700 mV. Los filtros con los que cuentan las entradas de la tarjeta de evaluación, que son muy similares al diseño propuesto, funcionan perfectamente para los datos que se obtuvieron.

Esta memoria se pudo finalizar haciendo pruebas en casa mientras se estaba viviendo una emergencia sanitaria, por lo que se puede resaltar lo fácil de trabajar y utilizar la tarjeta de evaluación, sin la necesidad de otros equipos que pueden ser muy costosos.

Finalmente se destaca la capacidad de transmitir la información de los datos medidos y calculados a múltiples plataformas. Los datos ya están disponibles y en formato digital, solo queda que el usuario final defina como transmitirlos a otros dispositivos. Por ejemplo en el diseño propuesto, se pensaba utilizar la tecnología LoRaWAN para transmitir los datos inalámbricamente a una gran distancia. Lamentablemente esto último no se pudo realizar ya que no se contaban con los equipos de recepción de la señal que se iba a emitir.

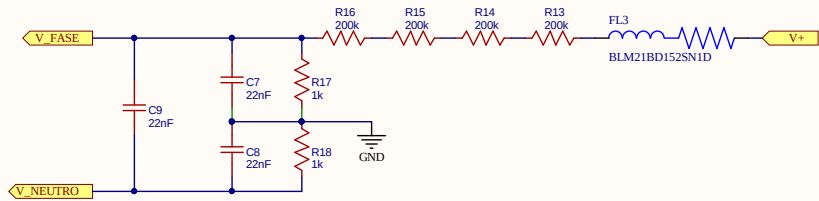
5.1. Trabajo Futuro

- El principal trabajo a futuro es poder finalizar el montaje del diseño propuesto, ya que no se pudo completar debido a las restricciones de movilidad del gobierno de Chile.
- La tarjeta de evaluación se recibió con algunos componentes pasivos faltantes, por lo que se insta a comprarlos y soldarlos para futuros trabajos en ella.
- La medición de corriente no se pudo comparar bien debido al equipo de medición

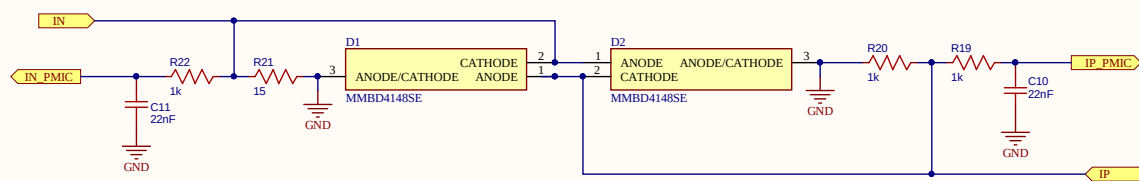
que se tenía disponible. Se insiste en comprobar de mejor manera este resultado principalmente ya que de aquí nacen los cálculos de potencia y el análisis de la red eléctrica.

- La medición de corriente se hizo utilizando transformadores de corriente fabricados para medir como máximo 100 A, por lo que se sobredimensionaron para las mediciones que se realizaron. Se sugiere utilizar transformadores más pequeños para disminuir el ruido de medición.
- Implementar nuevas tecnologías de comunicación para transmitir los datos medidos y calculados por el PMIC.
- Analizar el remuestreo de las señales de corriente y voltaje para obtener una lectura completa, en tiempo real y con la posibilidad de poder obtener los armónicos de las señales.
- Evaluar la lectura de temperatura que ofrece el PMIC.
- Diseñar e implementar un *dashboard* para mostrar las mediciones y cálculos del PMIC.

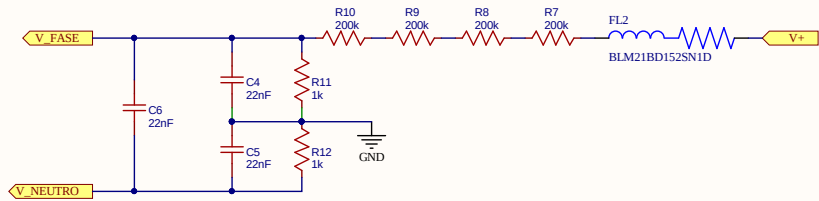
ESQUEMÁTICOS DEL MEDIDOR DE POTENCIA



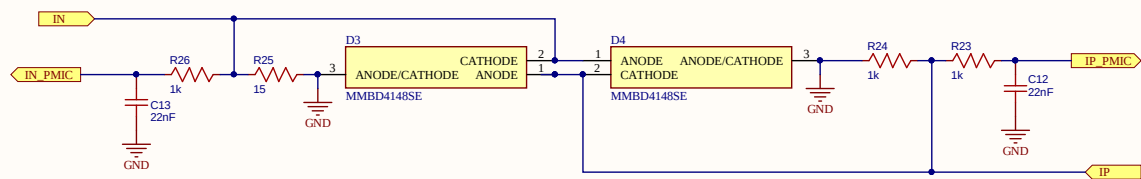
Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05/11/2020	Sheet of
File:	D:\Users\...\Filtro.SchDoc	Drawn By:



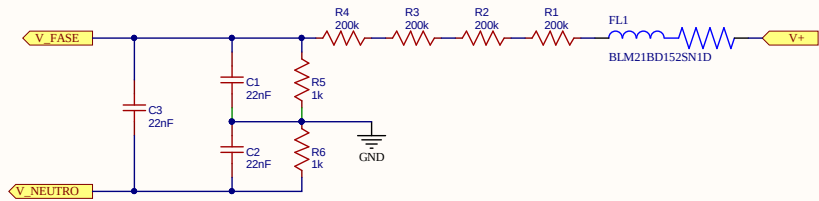
Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05/11/2020	Sheet of
File:	D:\Users\...CURRENT_IN.SchDoc	Drawn By:



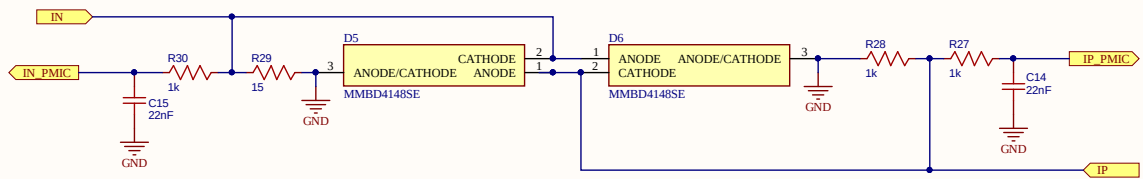
Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05/11/2020	Sheet of
File:	D:\Users\...\Filtro.SchDoc	Drawn By:



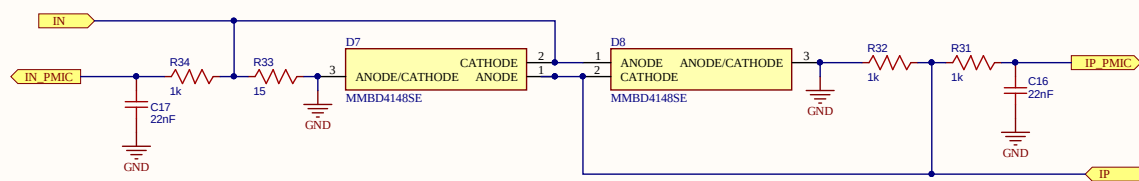
Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05/11/2020	Sheet of
File:	D:\Users\...CURRENT_IN.SchDoc	Drawn By:



Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05/11/2020	Sheet of
File:	D:\Users\...\Filtro.SchDoc	Drawn By:

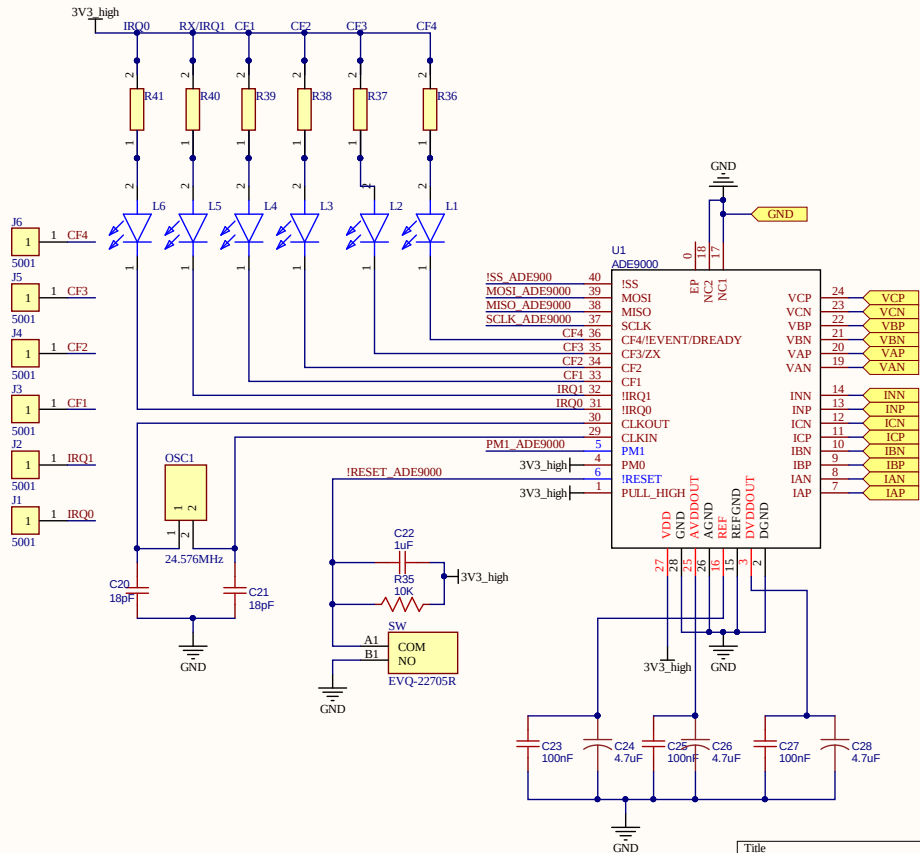


Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05/11/2020	Sheet of
File:	D:\Users\...CURRENT_IN.SchDoc	Drawn By:

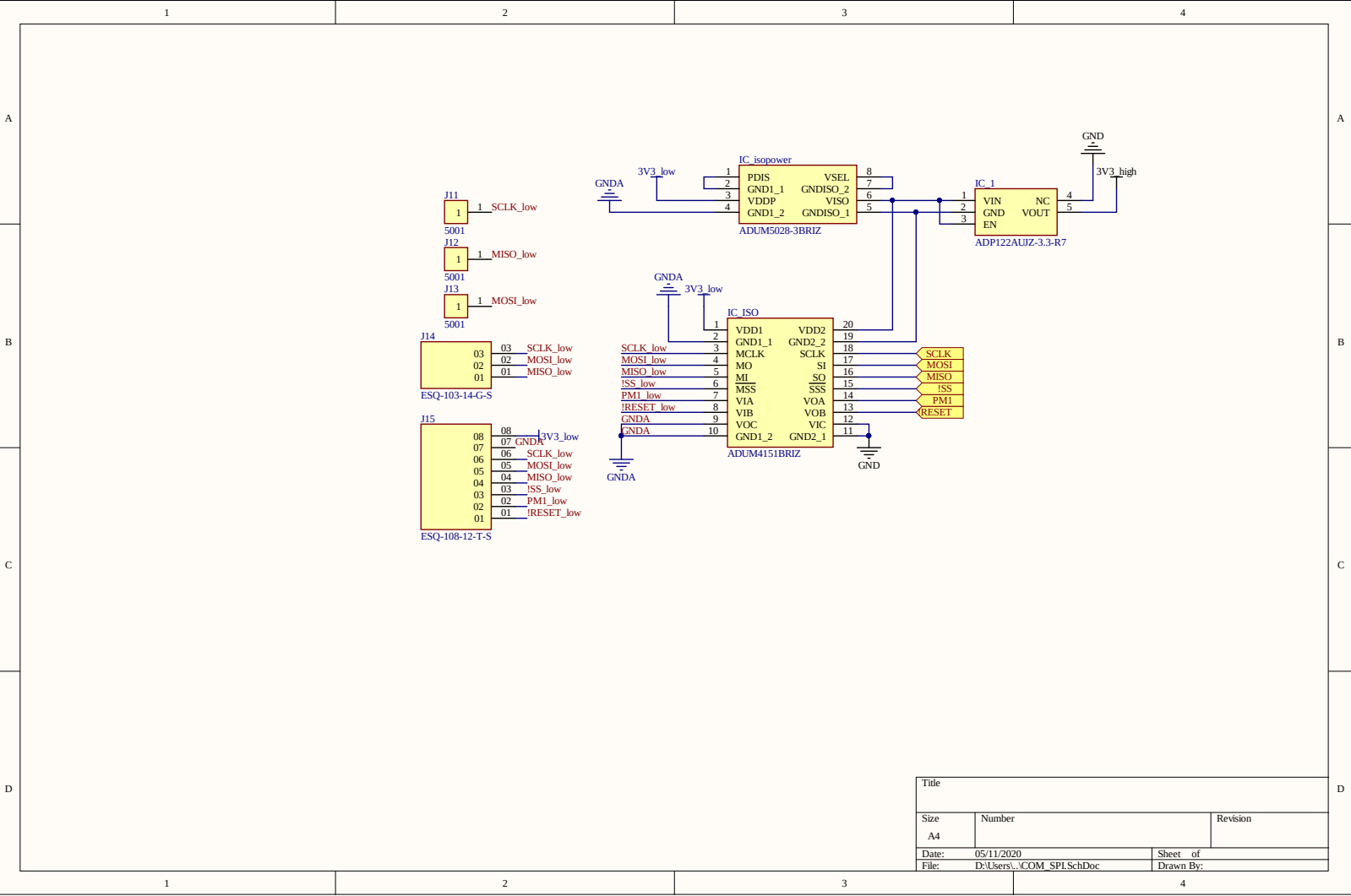


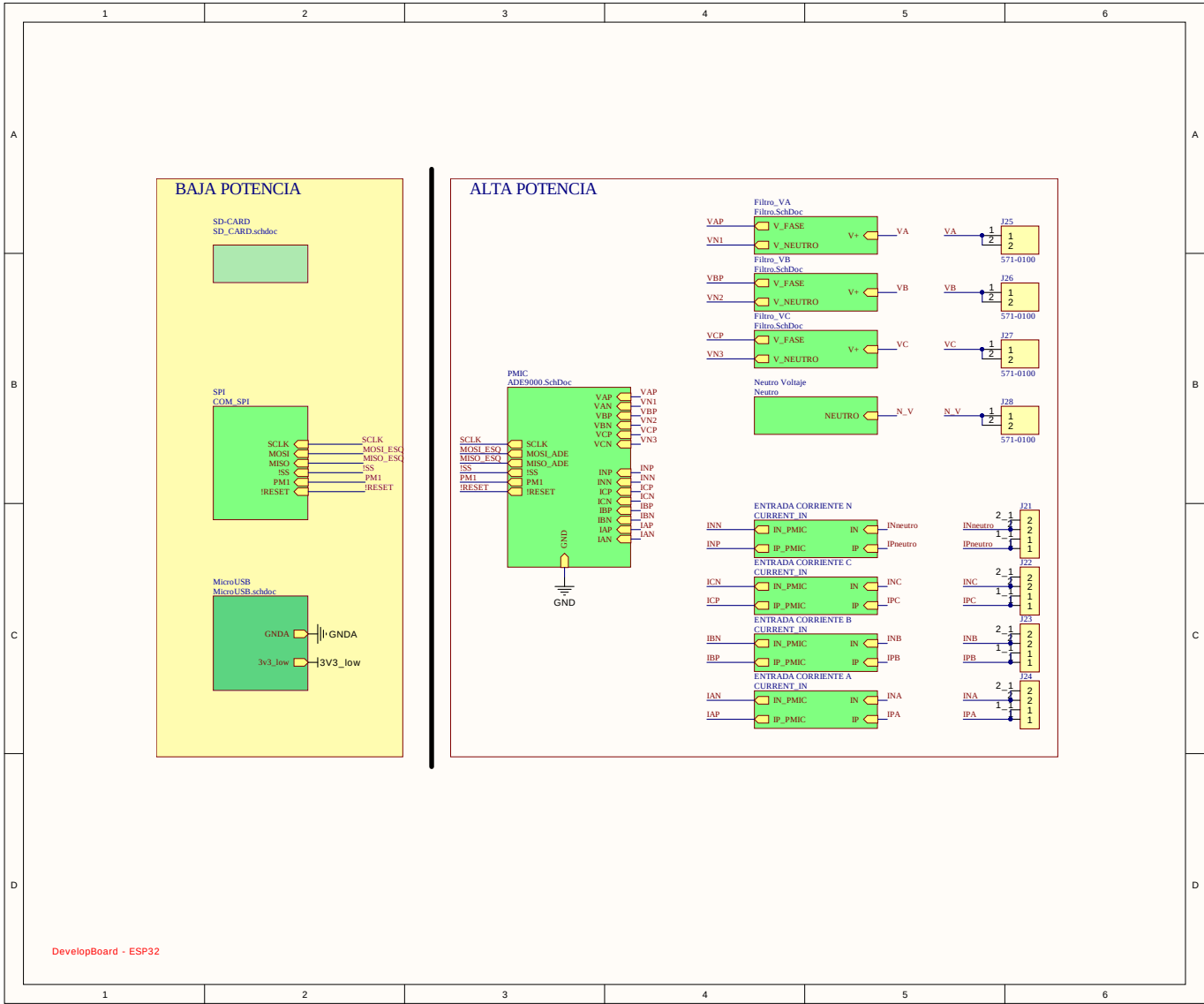
Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05/11/2020	Sheet of
File:	D:\Users\...\CURRENT_IN.SchDoc	Drawn By:

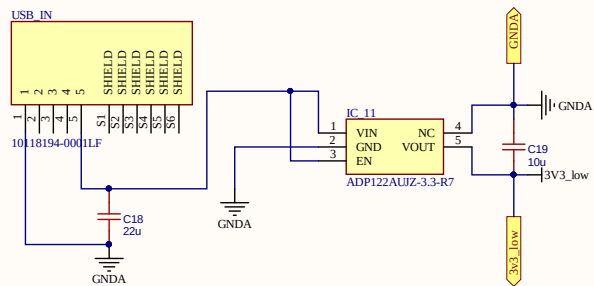
ISS_ADE9000
MOSI_ADE9000
MISO_ADE9000
SCLK_ADE9000
PM1_ADE9000
IRESET_ADE9000



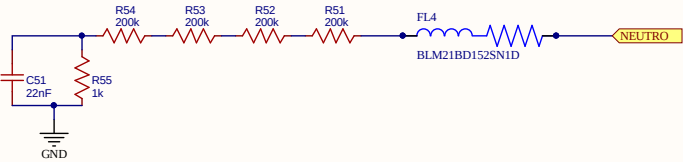
Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05/11/2020	Sheet of
File:	D:\Users\ADE9000.SchDoc	Drawn By:



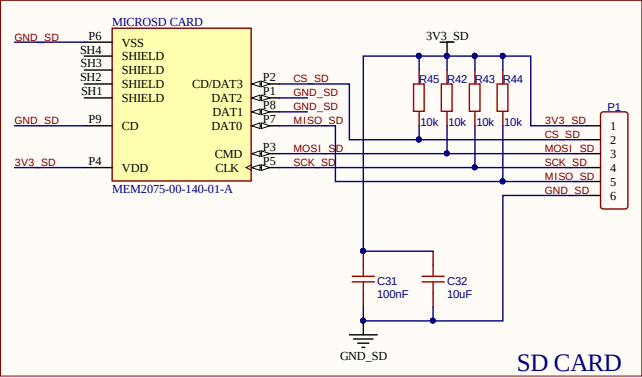




Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05/11/2020	Sheet of
File:	D:\Users\...\MicroUSB.SchDoc	Drawn By:

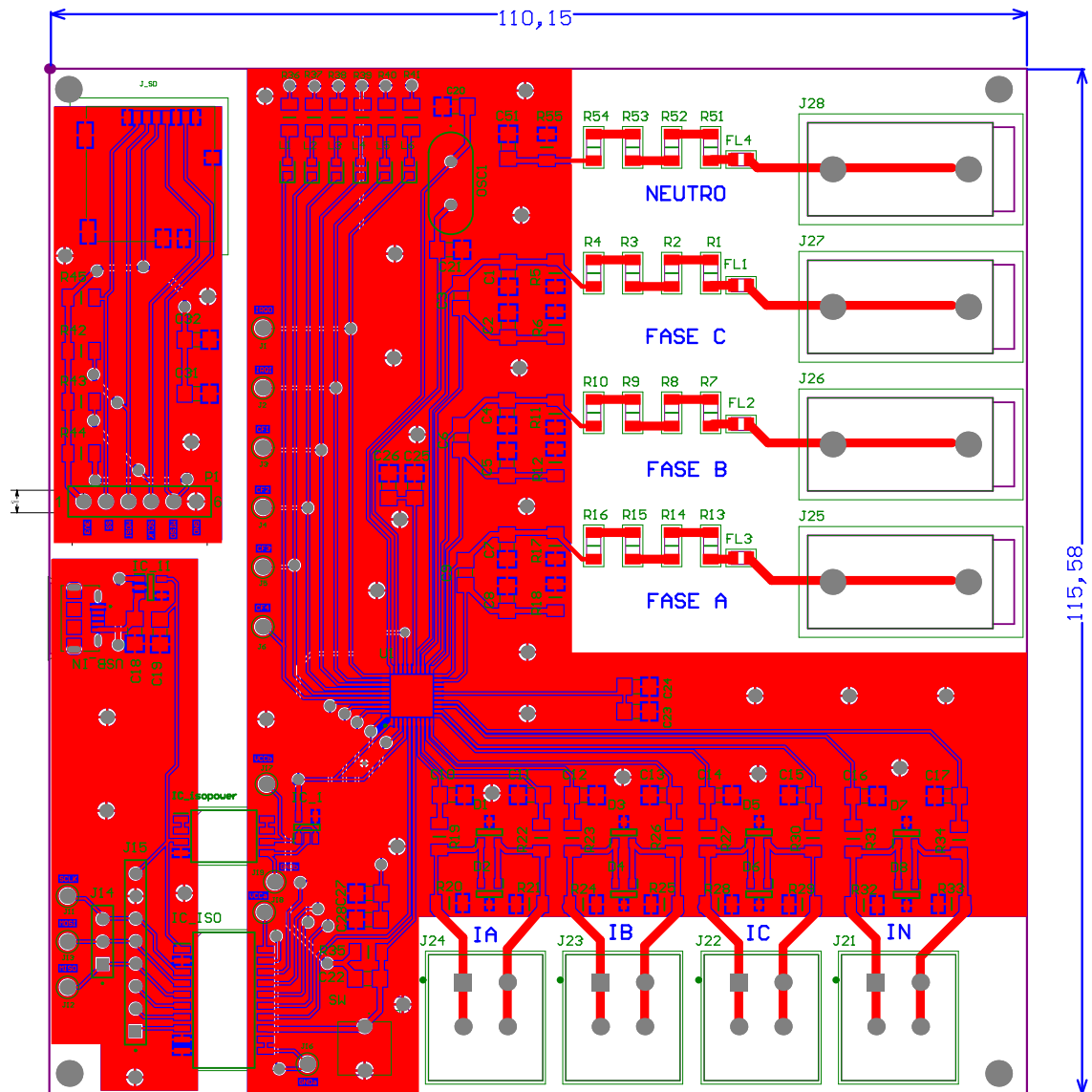


Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05/11/2020	Sheet of
File:	D:\Users\...\Neutro.SchDoc	Drawn By:



Title		
Size	Number	
A4	Revision	
Date:	05/11/2020	Sheet of
File:	D:\Users\SD_CARD.SchDoc	Drawn By:

PCB DEL MEDIDOR DE POTENCIA



LISTADO DE COMPRA DE COMPONENTES



CARRITO DE COMPRAS

Esta no es una factura.

Clasificar	Detalle de los productos		Descripción	Cantidad	Disponibilidad	Precio unitario (USD)	Precio ext. (USD)
1		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	485-3072 3072 Adafruit ADE9000UTFSM ▾	Herramientas de desarrollo RF Adafruit RFM95W LoRa Radio Transceiver Breakout - 868 or 915 MHz - RadioFruit En conformidad con la RoHS	1	1 Se envía ahora	\$19.95 \$19.95
2		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	649-10118194-0001LF 10118194-0001LF FCI / Amphenol ADE9000UTFSM ▾	Conectores USB 5P MICRO USB TYPE B RCPT W/ REAR PEGS En conformidad con la RoHS	1 Embalaje: **Cinta cortada	1 Se envía ahora	\$0.48 \$0.48
3		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	983-T60404-E4626X002 T60404-E4626-X002 Vacuumschmelze ADE9000UTFSM ▾	Transformadores de corriente Current Transformer 100A 1:2500 97Henry En conformidad con la RoHS	4	4 Se envía ahora	\$9.36 \$37.44
4		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	164-6218 571-0100 Delttron ADE9000UTFSM ▾	Enchufes de prueba SINGLE PCB SOCK BLK En conformidad con la RoHS	4	4 Se envía ahora	\$2.16 \$8.64
5		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	512-MMBD4148SE MMBD4148SE ON Semiconductor ADE9000UTFSM ▾	Diodos - Propósito general, Energía, Conmutación High Conductance Ultra Fast En conformidad con la RoHS	8 Embalaje: **Cinta cortada	8 Se envía ahora	\$0.31 \$2.48
6		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	604-APT1608LSECKJ3RV APT1608LSECK/J3-PRV Kingbright ADE9000UTFSM ▾	LED estándar - SMD (montaje superficial) 1.6X0.8MM RED LOW CURRENT SMD En conformidad con la RoHS	6 Embalaje: **Cinta cortada	6 Se envía ahora	\$0.64 \$3.84
7		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	660-RN73R2BTD2003B25 RN73R2BTTD2003B25 KOA Speer ADE9000UTFSM ▾	Resistores de película fina - SMD 200K ohm 0.1% 25 ppm En conformidad con la RoHS	16 Embalaje: **Cinta cortada	16 Se envía ahora	\$0.461 \$7.38
		Mouser N.º: Fabricante N.º:	667-ERA-8AEB102V ERA-8AEB102V	Resistores de película fina - SMD 1206 1.0Kohm 0.1%	19	0 Se envía ahora	

8		Fabricante:: Panasonic Ref. Cliente: ADE9000UTFSM	25ppm En conformidad con la RoHS por exención	Embalaje: 19 Pedido pendiente **Cinta cortada	\$0.474	\$9.01
9		Mouser N.º: 559-FOXSLF-20-LF Fabricante N.º: FOXSLF/245F-20 Fabricante:: Fox Ref. Cliente: ADE9000UTFSM	Cristales 24.576MHz 20pF En conformidad con la RoHS	1	1 Se envía ahora	\$0.33 \$0.33
10		Mouser N.º: 603-RC1206JR-0710KL Fabricante N.º: RC1206JR-0710KL Fabricante:: Yageo Ref. Cliente: ADE9000UTFSM	Resistores de película gruesa - SMD 10K OHM 5% En conformidad con la RoHS por exención	5	5 Se envía ahora	\$0.10 \$0.50
11		Mouser N.º: 279-RP73D2B4R99BTDF Fabricante N.º: RP73D2B4R99BTDF Fabricante:: TE Connectivity Ref. Cliente: ADE9000UTFSM	Resistores de película fina - SMD RP 2B 4R99 0.1% 15PPM En conformidad con la RoHS	8	8 Se envía ahora	\$0.92 \$7.36
12		Mouser N.º: 77-VJ1206Y223JXBAC Fabricante N.º: VJ1206Y223JXBAC Fabricante:: Vishay Ref. Cliente: ADE9000UTFSM	Capacitores cerámicos de capas múltiples (MLCC) - SMD/SMT .022uF 100volts 5% En conformidad con la RoHS	18	18 Se envía ahora	\$0.13 \$2.34
13		Mouser N.º: 791-1206B104J101CT Fabricante N.º: 1206B104J101CT Fabricante:: Walsin Ref. Cliente: ADE9000UTFSM	Capacitores cerámicos de capas múltiples (MLCC) - SMD/SMT 0.1uF 5% 100V En conformidad con la RoHS	5	5 Se envía ahora	\$0.14 \$0.70
14		Mouser N.º: 963-LMK316ABJ226ML-T Fabricante N.º: LMK316ABJ226ML-T Fabricante:: Taiyo Yuden Ref. Cliente: ADE9000UTFSM	Capacitores cerámicos de capas múltiples (MLCC) - SMD/SMT 1206 10VDC 22uF 20% X5R En conformidad con la RoHS	1	1 Se envía ahora	\$0.33 \$0.33
15		Mouser N.º: 791-SH31B105K500CT Fabricante N.º: SH31B105K500CT Fabricante:: Walsin Ref. Cliente: ADE9000UTFSM	Capacitores cerámicos de capas múltiples (MLCC) - SMD/SMT 1uF 10% 50V Soft Termination En conformidad con la RoHS	1	0 Se envía ahora	\$0.10 \$0.10
Se establece un tiempo de entrega prolongado para este producto.						
16		Mouser N.º: 791-1206X475K250CT Fabricante N.º: 1206X475K250CT Fabricante:: Walsin Ref. Cliente: ADE9000UTFSM	Capacitores cerámicos de capas múltiples (MLCC) - SMD/SMT 4.7uF +-10% 25V En conformidad con la RoHS	3	3 Se envía ahora	\$0.11 \$0.33

Capacitores

17		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	187-CL31A106KAHNNNE CL31A106KAHNNNE Samsung Electro-Mechanics ADE9000UTFSM	cerámicos de capas múltiples (MLCC) - SMD/SMT 10uF+/-10% 25V X5R 3216 En conformidad con la RoHS	1 Embalaje: **Cinta cortada	1 Se envía ahora	\$0.13	\$0.13
18		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	80-C1206C180F8ACTU C1206C180F8ACTU KEMET ADE9000UTFSM	Capacitores cerámicos de capas múltiples (MLCC) - SMD/SMT 10V 18pF X8R 1206 1% En conformidad con la RoHS	2 Embalaje: **Cinta cortada	2 Se envía ahora	\$0.40	\$0.80
19		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	612-TL59AF160Q TL59AF160Q E-Switch ADE9000UTFSM	Interruptores táctiles 6.2X5.0MM 160G En conformidad con la RoHS	1 Embalaje: **Cinta cortada	1 Se envía ahora	\$0.29	\$0.29
Ver información adicional del producto								
20		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	81-BLM21BD152SN1D BLM21BD152SN1D Murata ADE9000UTFSM	Núcleos de ferrita 0805 1.5K OHM En conformidad con la RoHS	4 Embalaje: **Cinta cortada	4 Se envía ahora	\$0.18	\$0.72
21		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	584-ADP122AUJZ-3.3R7 ADP122AUJZ-3.3-R7 Analog Devices Inc. ADE9000UTFSM	Reguladores de tensión lineal 300mA LDO 3.3Vout En conformidad con la RoHS	2 Embalaje: **Cinta cortada	2 Se envía ahora	\$1.15	\$2.30
22		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	534-5001 5001 Keystone Electronics ADE9000UTFSM	Equipos de placas de circuito - tableros de circuito impreso (PCB) TEST POINT BLACK En conformidad con la RoHS	13 Embalaje: **Cinta cortada	13 Se envía ahora	\$0.335	\$4.36
23		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	200-ESQ10314GS ESQ-103-14-G-S Samtec ADE9000UTFSM	Conectores PC / 104 .100" PC/104 Elevated Socket Strip En conformidad con la RoHS	1 Embalaje: **Cinta cortada	1 Se envía ahora	\$1.42	\$1.42
24		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	490-TBL05A50002GY2WT TBL005A-500-02GY-2WT CUI Devices ADE9000UTFSM	Bloques de terminales fijas Terminal block, screwless, 5.00, 45 , 2, Gray w White Button	4 Embalaje: **Cinta cortada	4 Se envía ahora	\$0.81	\$3.24
25		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	200-TSW10607TS TSW-106-07-T-S Samtec ADE9000UTFSM	Alojamientos de cables y cabecera .100" Terminal Strip En conformidad con la RoHS	1 Embalaje: **Cinta cortada	1 Se envía ahora	\$0.43	\$0.43
26		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	945-PJS008-2120-0 PJS008-2120-0 Yamaichi Electronics ADE9000UTFSM	Conectores de tarjeta de memoria STD MNT MICRO SD PUSH-PUSH, SMT CONN En conformidad con la RoHS	1 Embalaje: **Cinta cortada	1 Se envía ahora	\$2.66	\$2.66
		Mouser N.º:	200-ESQ10813TS	Conectores PC / 104				

27		Mouser N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	ESQ-108-13-T-S Samtec ADE9000UTFSM	.100" PC/104 Elevated Socket Strip En conformidad con la RoHS	1	1 Se envía ahora	\$1.24	\$1.24
28		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	584-ADE9000ACPZ ADE9000ACPZ Analog Devices Inc. ADE9000UTFSM	Reguladores y monitores de potencia y corriente IC, Power Quality Monitoring AFE En conformidad con la RoHS	1	1 Se envía ahora	\$13.42	\$13.42
29		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	584-ADUM5028-3BRIZ ADUM5028-3BRIZ Analog Devices Inc. ADE9000UTFSM	Reguladores de voltaje de conmutación isoPower 3kV, LowEMI,300mW pwr, 3.3V En conformidad con la RoHS	1	0 Se envía ahora 1 Pedido pendiente	\$7.20	\$7.20
30		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	667-ERJ-8GEYJ152V ERJ-8GEYJ152V Panasonic ADE9000UTFSM	Resistores de película gruesa - SMD 1206 1.5Kohms 5% AEC- Q200 En conformidad con la RoHS por exención	6 Embalaje: **Cinta cortada	6 Se envía ahora	\$0.10	\$0.60
31		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	356-ESP8266DKITC02DF ESP8266-DevKitC-02D-F Espressif ADE9000UTFSM	Herramientas de desarrollo WiFi (802.11) ESP8266 General Development Kit, embeds ESP- WROOM-02D and female header connector on the board.	1	1 Se envía ahora	\$8.00	\$8.00

Al enviar su pedido, usted acepta estos términos y condiciones.
Para obtener más información acerca de la disponibilidad, haga clic en el N.º de artículo de Mouser.

****Ningún artículo de MouseReel™ se puede cancelar ni devolver.**

Mercadería: **\$148.02**

Envío: **DHL International Express \$35.00**

+ Más opciones de envío



Hay artículos pendientes en su carrito. Podrá hacer otras selecciones en el proceso de compra.

Subtotal: **\$183.02**

CÓDIGO ARDUINO

```
1
2 #include <SPI.h>
3 #include <SD.h>
4 #include <ADE9000RegMap.h>
5 #include <ADE9000API.h>
6
7 /*Basic initializations*/
8 ADE9000Class ade9000;
9 #define SPLSPEED 5000000 // SPI Speed
10 #define CS_PIN 16 // 8—>Arduino Zero. 16—>
    ESP8266
11 #define CS_PIN_SD 2 // D4 —>ESP8266
12 #define ADE9000.RESET_PIN 5 // Reset Pin on HW
13 #define PM1 15 // PM1 Pin: 4—>Arduino Zero.
    15—>ESP8266
14
15 #define voltage_const 10.74705975*0.000001
16 #define current_const 6.576986947*0.000001/2
17 #define power_const 9.486948066*0.001
18
19 /*Structure declaration */
20 struct CurrentRMSRegs curntRMSRegs; // Current RMS
21 struct VoltageRMSRegs vltgRMSRegs; // Voltage RMS
22 struct ResampledWfbData resampledData; // Resampled Data
23 struct ActivePowerRegs powerRegs; // Declare powerRegs of type
    ActivePowerRegs to store Active Power Register data
24 struct ReactivePowerRegs rePowerRegs; // Reactive Power
25 struct ApparentPowerRegs apPowerRegs; // Apparent Power
26 struct FundActivePowerRegs fundPowerRegs; // Fundamental Active Power
27 struct FundReactivePowerRegs fundRePowerRegs; // Fundamental Reactive Power
28 struct FundApparentPowerRegs fundApPowerRegs; // Fundamental Apparent Power
29 struct FundVoltageRMSRegs fundVltgRMSRegs; // Fundamental Voltage RMS
30 struct FundCurrentRMSRegs fundCurntRMSRegs; // Fundamental Current RMS
31 struct HalfVoltageRMSRegs halfVltgRMSRegs; // Voltage Half RMS
32 struct HalfCurrentRMSRegs halfCurntRMSRegs; // Current Half RMS
33 struct Ten12VoltageRMSRegs ten12VltgRMSRegs; // Voltage RMS 10–12 ciclos
34 struct Ten12CurrentRMSRegs ten12CurntRMSRegs; // Current RMS 10–12 ciclos
```

```

35 struct VoltageTHDRegs voltageTHDRegsnValues; // Voltage THD
36 struct CurrentTHDRegs currentTHDRegsnValues; // Current THD
37 struct PowerFactorRegs pFactorRegs; // Power Factor
38 struct PeriodRegs periodRegs; // Period
39 struct AngleRegs angleRegs; // Angle
40 struct TemperatureRegnValue TempRegsValue; // Temperature
41
42
43 /*Function Decleration*/
44 void readRegisterData(void);
45 void readResampledData(void);
46 void resetADE9000(void);
47 void readRegistersFunctions(void);
48
49 void setup()
50 {
51     Serial.begin(115200);
52     pinMode(PM1, OUTPUT); //Set PM1 pin as output
53     digitalWrite(PM1, LOW); //Set PM1 select pin low for
54     PSM0 mode
55     pinMode(ADE9000_RESET_PIN, OUTPUT);
56     digitalWrite(ADE9000_RESET_PIN, HIGH);
57     void resetADE9000();
58     delay(1000);
59     ade9000.SPI_Init(SPI_SPEED, CS_PIN); //Initialize SPI
60     ade9000.SetupADE9000(); //Initialize ADE9000 registers
61     according to values in ADE9000API.h
62     //ade9000.SPI_Write_16(ADDR_RUN,0x1); //Set RUN=1 to turn on DSP.
63     Uncomment if SetupADE9000 function is not used
64     /*Serial.print("RUN Register: ");
65     Serial.println(ade9000.SPI_Read_16(ADDR_RUN),HEX);*/
66     ade9000.SPI_Write_32(ADDR_CVGAIN,0xAD4CB);
67 }
68
69 //Loop calling functions
70 void loop() {
71     readRegisterData();
72     readRegistersFunctions();
73     readResampledData();
74     delay(1000);
75     SD_CARD_SPI();
76     delay(500);
77     SD_CARD_DATA();
78     delay(1000);
79 }
80
81 void readRegisterData()
82 {
83     /////// TEMPLATE
84
85     //Reading directly from registers
86     /* Serial.print("CIRMS: ");
87     Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CIRMS),HEX);
88     // AIRMS */
89
90     //JUST READING
91     //IRMS
92     Serial.print("AIRMS: ");

```

```

91 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AIRMS),DEC); // AIRMS
92 Serial.print("BIRMS: ");
93 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BIRMS),DEC); // BIRMS
94 Serial.print("CIRMS: ");
95 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CIRMS),DEC); // CIRMS
96 //VRMS
97 Serial.print("AVRMS: ");
98 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AVRMS),DEC); // AVRMS
99 Serial.print("BVRMS: ");
100 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BVRMS),DEC); // BVRMS
101 Serial.print("CVRMS: ");
102 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CVRMS),DEC); // CVRMS
103 //WATT
104 Serial.print("AWATT: ");
105 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AWATT),DEC); // AWATT
106 Serial.print("BWATT: ");
107 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BWATT),DEC); // BWATT
108 Serial.print("CWATT: ");
109 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CWATT),DEC); // CWATT
110 //VAR
111 Serial.print("AVAR: ");
112 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AVAR),DEC); // AVAR
113 Serial.print("BVAR: ");
114 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BVAR),DEC); // BVAR
115 Serial.print("CVAR: ");
116 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CVAR),DEC); // CVAR
117 //APPARENT POWER
118 Serial.print("AVA: ");
119 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AVA),DEC); // AVA
120 Serial.print("BVA: ");
121 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BVA),DEC); // BVA
122 Serial.print("CVA: ");
123 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CVA),DEC); // CVA
124 //IRMS FUNDAMENTAL
125 Serial.print("AFIRMS: ");
126 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AIFRMS),DEC); // AFIRMS
127 Serial.print("BFIRMS: ");
128 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BIFRMS),DEC); // BFIRMS
129 Serial.print("CFIRMS: ");
130 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CIFRMS),DEC); // CFIRMS
131 //VRMS FUNDAMENTAL
132 Serial.print("AFVRMS: ");
133 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AVFRMS),DEC); // AFVRMS
134 Serial.print("BFVRMS: ");
135 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BVFRMS),DEC); // BFVRMS
136 Serial.print("CFVRMS: ");
137 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CVFRMS),DEC); // CFVRMS
138 //WATT FUNDAMENTAL
139 Serial.print("AFWATT: ");
140 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AFWATT),DEC); // AFWATT
141 Serial.print("BFWATT: ");
142 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BFWATT),DEC); // BFWATT
143 Serial.print("CFWATT: ");
144 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CFWATT),DEC); // CFWATT
145 //VAR FUNDAMENTAL
146 Serial.print("AFVAR: ");
147 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AFVAR),DEC); // AFVAR
148 Serial.print("BFVAR: ");
149 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BFVAR),DEC); // BFVAR
150 Serial.print("CFVAR: ");

```

```

151 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CFVAR),DEC); // CFVAR
152 //APPARENT POWER FUNDAMENTAL
153 Serial.print("AFVA: ");
154 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AFVA),DEC); // AFVA
155 Serial.print("BFVA: ");
156 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BFVA),DEC); // BFVA
157 Serial.print("CFVA: ");
158 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CFVA),DEC); // CFVA
159 //IRMS 1/2
160 Serial.print("AIRMS 1/2: ");
161 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AIRMSONE),DEC); //
    AIRMS 1/2
162 Serial.print("BIRMS 1/2: ");
163 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BIRMSONE),DEC); //
    BIRMS 1/2
164 Serial.print("CIRMS 1/2: ");
165 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CIRMSONE),DEC); //
    CIRMS 1/2
166 //VRMS 1/2
167 Serial.print("AVRMS 1/2: ");
168 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AVRMSONE),DEC); //
    AVRMS 1/2
169 Serial.print("BVRMS 1/2: ");
170 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BVRMSONE),DEC); //
    BVRMS 1/2
171 Serial.print("CVRMS 1/2: ");
172 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CVRMSONE),DEC); //
    CVRMS 1/2
173 //IRMS 10-12
174 Serial.print("AIRMS 10-12: ");
175 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AIRMS1012),DEC); //
    AIRMS 10-12
176 Serial.print("BIRMS 10-12: ");
177 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BIRMS1012),DEC); //
    BIRMS 10-12
178 Serial.print("CIRMS 10-12: ");
179 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CIRMS1012),DEC); //
    CIRMS 10-12
180 //VRMS 10-12
181 Serial.print("AVRMS 10-12: ");
182 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AVRMS1012),DEC); //
    AVRMS 10-12
183 Serial.print("BVRMS 10-12: ");
184 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BVRMS1012),DEC); //
    BVRMS 10-12
185 Serial.print("CVRMS 10-12: ");
186 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CVRMS1012),DEC); //
    CVRMS 10-12
187 //THD CURRENT
188 Serial.print("AITHD: ");
189 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AITHD)*100/134217728, DEC);
    // AITHD
190 Serial.print("BITHD: ");
191 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_BITHD)*100/134217728, DEC);
    // BITHD
192 Serial.print("CITHD: ");
193 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_CITHD)*100/134217728,DEC);
    // CITHD
194 //THD VOLTAGE
195 Serial.print("AVTHD: ");

```

```

196 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR.VTHD),DEC); // AVTHD
197 Serial.print("BVTHD: ");
198 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR.BVTHD),DEC); // BVTHD
199 Serial.print("CVTHD: ");
200 Serial.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR.CVTHD),DEC); // CVTHD
201
202
203
204
205 }
206
207 void readRegistersFunctions()
208 {
209     //Read, Store and Print Register using ADE9000 Read
210     Library
211     /* ade9000.ReadVoltageRMSRegs(&
212     vltgRMSRegs); //Template to read Power registers
213     from ADE9000 and store data in ESP8266
214     Serial.print("CVRMS:");
215     Serial.println(vltgRMSRegs.
216     VoltageRMSReg-C*10.74706*0.000001); //Print AVRMS register
217     */
218     // ACTIVE POWER
219     ade9000.ReadActivePowerRegs(&powerRegs);
220     Serial.print("AWATT:");
221     Serial.println(powerRegs.ActivePowerReg-A*power_const); //Print AWATT
222     register*/
223     Serial.print("BWATT:");
224     Serial.println(powerRegs.ActivePowerReg-B*power_const); //Print AWATT
225     register*/
226     Serial.print("CWATT:");
227     Serial.println(powerRegs.ActivePowerReg-C*power_const); //Print AWATT
228     register*/
229     // REACTIVE POWER
230     ade9000.ReadReactivePowerRegs(&rePowerRegs);
231     Serial.print("AVAR:");
232     Serial.println(rePowerRegs.ReactivePowerReg-A*power_const);
233     Serial.print("BVAR:");
234     Serial.println(rePowerRegs.ReactivePowerReg-B*power_const);
235     Serial.print("CVAR:");
236     Serial.println(rePowerRegs.ReactivePowerReg-C*power_const);
237     // APPARENT POWER
238     ade9000.ReadApparentPowerRegs(&apPowerRegs);
239     Serial.print("AVA:");
240     Serial.println(apPowerRegs.ApparentPowerReg-A*power_const);
241     Serial.print("BVA:");
242     Serial.println(apPowerRegs.ApparentPowerReg-B*power_const);
243     Serial.print("CVA:");
244     Serial.println(apPowerRegs.ApparentPowerReg-C*power_const);
245     // VOLTAGE RMS
246     ade9000.ReadVoltageRMSRegs(&vltgRMSRegs);
247     Serial.print("AVRMS:");
248     Serial.println(vltgRMSRegs.VoltageRMSReg-A*voltage_const);
249     Serial.print("BVRMS:");
250     Serial.println(vltgRMSRegs.VoltageRMSReg-B*voltage_const);
251     Serial.print("CVRMS:");
252     Serial.println(vltgRMSRegs.VoltageRMSReg-C*voltage_const);
253     // CURRENT RMS
254     ade9000.ReadCurrentRMSRegs(&curntRMSRegs);
255     Serial.print("AIRMS:");

```

```

249 Serial.println(curntRMSRegs.CurrentRMSReg_A*current_const);
250 Serial.print("BIRMS:");
251 Serial.println(curntRMSRegs.CurrentRMSReg_B*current_const);
252 Serial.print("CIRMS:");
253 Serial.println(curntRMSRegs.CurrentRMSReg_C*current_const);
254 // ACTIVE POWER FUNDAMENTAL
255 ade9000.ReadFundActivePowerRegs(&fundPowerRegs);
256 Serial.print("AFWATT:");
257 Serial.println(fundPowerRegs.FundActivePowerReg_A*power_const); //Print
    AWATT register*/
258 Serial.print("BFWATT:");
259 Serial.println(fundPowerRegs.FundActivePowerReg_B*power_const); //Print
    AWATT register*/
260 Serial.print("CFWATT:");
261 Serial.println(fundPowerRegs.FundActivePowerReg_C*power_const); //Print
    AWATT register*/
262 // REACTIVE POWER FUNDAMENTAL
263 ade9000.ReadFundReactivePowerRegs(&fundRePowerRegs);
264 Serial.print("AFVAR:");
265 Serial.println(fundRePowerRegs.FundReactivePowerReg_A*power_const);
266 Serial.print("BFVAR:");
267 Serial.println(fundRePowerRegs.FundReactivePowerReg_B*power_const);
268 Serial.print("CFVAR:");
269 Serial.println(fundRePowerRegs.FundReactivePowerReg_C*power_const);
270 // APPARENT POWER FUNDAMENTAL
271 ade9000.ReadFundApparentPowerRegs(&fundApPowerRegs);
272 Serial.print("AFVA:");
273 Serial.println(fundApPowerRegs.FundApparentPowerReg_A*power_const);
274 Serial.print("BFVA:");
275 Serial.println(fundApPowerRegs.FundApparentPowerReg_B*power_const);
276 Serial.print("CFVA:");
277 Serial.println(fundApPowerRegs.FundApparentPowerReg_C*power_const);
278 // VOLTAGE RMS FUNDAMENTAL
279 ade9000.ReadFundVoltageRMSRegs(&fundVltgRMSRegs);
280 Serial.print("AFVRMS:");
281 Serial.println(fundVltgRMSRegs.FundVoltageRMSReg_A*voltage_const);
282 Serial.print("BFVRMS:");
283 Serial.println(fundVltgRMSRegs.FundVoltageRMSReg_B*voltage_const);
284 Serial.print("CFVRMS:");
285 Serial.println(fundVltgRMSRegs.FundVoltageRMSReg_C*voltage_const);
286 // CURRENT RMS FUNDAMENTAL
287 ade9000.ReadFundCurrentRMSRegs(&fundCurntRMSRegs);
288 Serial.print("AFIRMS:");
289 Serial.println(fundCurntRMSRegs.FundCurrentRMSReg_A*current_const);
290 Serial.print("BFIRMS:");
291 Serial.println(fundCurntRMSRegs.FundCurrentRMSReg_B*current_const);
292 Serial.print("CFIRMS:");
293 Serial.println(fundCurntRMSRegs.FundCurrentRMSReg_C*current_const);
294 // VOLTAGE RMS 1/2
295 ade9000.ReadHalfVoltageRMSRegs(&halfVltgRMSRegs);
296 Serial.print("AVRMS 1/2:");
297 Serial.println(halfVltgRMSRegs.HalfVoltageRMSReg_A*voltage_const);
298 Serial.print("BVRMS 1/2:");
299 Serial.println(halfVltgRMSRegs.HalfVoltageRMSReg_B*voltage_const);
300 Serial.print("CVRMS 1/2:");
301 Serial.println(halfVltgRMSRegs.HalfVoltageRMSReg_C*voltage_const);
302 // CURRENT RMS 1/2
303 ade9000.ReadHalfCurrentRMSRegs(&halfCurntRMSRegs);
304 Serial.print("AIRMS 1/2:");
305 Serial.println(halfCurntRMSRegs.HalfCurrentRMSReg_A*current_const);

```

```

306 Serial.print("BIRMS 1/2:");
307 Serial.println(halfCurntRMSRegs.HalfCurrentRMSReg_B*current_const);
308 Serial.print("CIRMS 1/2:");
309 Serial.println(halfCurntRMSRegs.HalfCurrentRMSReg_C*current_const);
310 // VOLTAGE RMS 10-12
311 ade9000.ReadTen12VoltageRMSRegs(&ten12VltgRMSRegs);
312 Serial.print("AVRMS 10-12:");
313 Serial.println(ten12VltgRMSRegs.Ten12VoltageRMSReg_A*voltage_const);
314 Serial.print("BVRMS 10-12:");
315 Serial.println(ten12VltgRMSRegs.Ten12VoltageRMSReg_B*voltage_const);
316 Serial.print("CVRMS 10-12:");
317 Serial.println(ten12VltgRMSRegs.Ten12VoltageRMSReg_C*voltage_const);
318 // CURRENT RMS 10-12
319 ade9000.ReadTen12CurrentRMSRegs(&ten12CurntRMSRegs);
320 Serial.print("AIRMS 10-12:");
321 Serial.println(ten12CurntRMSRegs.Ten12CurrentRMSReg_A*current_const);
322 Serial.print("BIRMS 10-12:");
323 Serial.println(ten12CurntRMSRegs.Ten12CurrentRMSReg_B*current_const);
324 Serial.print("CIRMS 10-12:");
325 Serial.println(ten12CurntRMSRegs.Ten12CurrentRMSReg_C*current_const);
326 // VOLTAGE THD
327 ade9000.ReadVoltageTHDRegsnValues(&voltageTHDRegsnValues);
328 Serial.print("AV THD:");
329 Serial.println(voltageTHDRegsnValues.VoltageTHDValue_A);
330 Serial.print("BV THD:");
331 Serial.println(voltageTHDRegsnValues.VoltageTHDValue_B);
332 Serial.print("CV THD:");
333 Serial.println(voltageTHDRegsnValues.VoltageTHDValue_C);
334 // CURRENT THD
335 ade9000.ReadCurrentTHDRegsnValues(&currentTHDRegsnValues);
336 Serial.print("AI THD:");
337 Serial.println(currentTHDRegsnValues.CurrentTHDValue_A);
338 Serial.print("BI THD:");
339 Serial.println(currentTHDRegsnValues.CurrentTHDValue_B);
340 Serial.print("CI THD:");
341 Serial.println(currentTHDRegsnValues.CurrentTHDValue_C);
342 // POWER FACTOR
343 ade9000.ReadPowerFactorRegsnValues(&pFactorRegs);
344 Serial.print("APF:");
345 Serial.println(pFactorRegs.PowerFactorValue_A);
346 Serial.print("BPF:");
347 Serial.println(pFactorRegs.PowerFactorValue_B);
348 Serial.print("CPF:");
349 Serial.println(pFactorRegs.PowerFactorValue_C);
350 // FREQUENCY
351 ade9000.ReadPeriodRegsnValues(&periodRegs);
352 Serial.print("AF:");
353 Serial.println(periodRegs.FrequencyValue_A);
354 Serial.print("BF:");
355 Serial.println(periodRegs.FrequencyValue_B);
356 Serial.print("CF:");
357 Serial.println(periodRegs.FrequencyValue_C);
358 // ANGLES
359 ade9000.ReadAngleRegsnValues(&angleRegs);
360 Serial.print("ANGLE VA-VB:");
361 Serial.println(angleRegs.AngleValue_VA_VB);
362 Serial.print("ANGLE VB-VC:");
363 Serial.println(angleRegs.AngleValue_VB_VC);
364 Serial.print("ANGLE VA-VC:");
365 Serial.println(angleRegs.AngleValue_VA_VC);

```

```

366 Serial.print("ANGLE VA-IA:");
367 Serial.println(angleRegs.AngleValue_VA_IA);
368 Serial.print("ANGLE VB-IB:");
369 Serial.println(angleRegs.AngleValue_VB_IB);
370 Serial.print("ANGLE VC-IC:");
371 Serial.println(angleRegs.AngleValue_VC_IC);
372 Serial.print("ANGLE IA-IB:");
373 Serial.println(angleRegs.AngleValue_IA_IB);
374 Serial.print("ANGLE IB-IC:");
375 Serial.println(angleRegs.AngleValue_IB_IC);
376 Serial.print("ANGLE IA-IC:");
377 Serial.println(angleRegs.AngleValue_IA_IC);
378 // TEMPERATURE
379 ade9000.ReadTempRegnValue(&TempRegsValue);
380 Serial.print("TEMPERATURE:");
381 Serial.println(TempRegsValue.Temperature);
382
383
384 }
385
386 void readResampledData()
387 {
388     uint32_t temp;
389     /*Read and Print Resampled data*/
390     /*Start the Resampling engine to acquire 4 cycles of resampled data*/
391     ade9000.SPI_Write_16(ADDR_WFB_CFG,0x1000);
392     ade9000.SPI_Write_16(ADDR_WFB_CFG,0x1010);
393     delay(100); //approximate time to fill the waveform buffer with 4 line
                 //cycles
394     /*Read Resampled data into Arduino Memory*/
395     ade9000.SPI_Burst_Read_Resampled_Wfb(0x800,WFB_ELEMENT_ARRAY_SIZE,&
        resampledData); // Burst read function
396
397
398     for (temp=0;temp<WFB_ELEMENT_ARRAY_SIZE;temp++)
399     {
400         /*Serial.print("VA: ");
401         Serial.println(resampledData.VA_Resampled[temp],DEC);
402         Serial.print("IA: ");
403         Serial.println(resampledData.IA_Resampled[temp],DEC);
404         Serial.print("VB: ");
405         Serial.println(resampledData.VB_Resampled[temp],DEC);
406         Serial.print("IB: ");
407         Serial.println(resampledData.IB_Resampled[temp],DEC);
408         Serial.print("VC: ");
409         Serial.println(resampledData.VC_Resampled[temp],DEC);
410         Serial.print("IC: ");
411         Serial.println(resampledData.IC_Resampled[temp],DEC);
412         /*Serial.print("IN: ");
413         Serial.println(resampledData.IN_Resampled[temp],DEC); */
414     }
415
416     for (temp=0;temp<WFB_ELEMENT_ARRAY_SIZE;temp++)
417     {
418         Serial.println(resampledData.IC_Resampled[temp],DEC);
419     }
420
421
422
423 }

```

```

424
425 void resetADE9000(void)
426 {
427   digitalWrite(ADE9000.RESET_PIN, LOW);
428   delay(50);
429   digitalWrite(ADE9000.RESET_PIN, HIGH);
430   delay(1000);
431   Serial.println("Reset Done");
432 }
433
434
435 /* programaci n para SD CARD*/
436 /*
437 void SD_CARD_SPI(void)
438 {
439   while (!Serial) {
440     ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
441   }
442   Serial.print(" Initializing SD card...");
443
444   // see if the card is present and can be initialized:
445   if (!SD.begin(CS_PIN_SD)) {
446     Serial.println("Card failed, or not present");
447     // don't do anything more:
448     while (1);
449   }
450   Serial.println("card initialized.");
451 }
452
453 void SD_CARD_DATA(void) {
454   uint32_t temp1;
455   // open the file. note that only one file can be open at a time,
456   // so you have to close this one before opening another.
457   File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
458
459   // if the file is available, write to it:
460   if (dataFile) {
461     dataFile.print("AIRMS: ");
462     dataFile.println(ade9000.SPI_Read_32(ADDR_AIRMS), HEX); // AIRMS
463     dataFile.print("AVRMS:");
464     dataFile.println(vltgRMSRegs.VoltageRMSReg_A); //Print AVRMS register
465     dataFile.print("AWATT:");
466     dataFile.println(powerRegs.ActivePowerReg_A); //Print AWATT register
467     for (temp1=0;temp1<WFB_ELEMENT_ARRAY_SIZE;temp1++)
468     {
469       dataFile.print("VA: ");
470       dataFile.println(resampledData.VA_Resampled[temp1], HEX);
471       dataFile.print("IA: ");
472       dataFile.println(resampledData.IA_Resampled[temp1], HEX);
473       dataFile.print("VB: ");
474       dataFile.println(resampledData.VB_Resampled[temp1], HEX);
475       dataFile.print("IB: ");
476       dataFile.println(resampledData.IB_Resampled[temp1], HEX);
477       dataFile.print("VC: ");
478       dataFile.println(resampledData.VC_Resampled[temp1], HEX);
479       dataFile.print("IC: ");
480       dataFile.println(resampledData.IC_Resampled[temp1], HEX);
481       dataFile.print("IN: ");
482       dataFile.println(resampledData.IN_Resampled[temp1], HEX);
483     }

```

```
484     dataFile.close();  
485 }  
486 // if the file isn't open, pop up an error:  
487 else {  
488     Serial.println("error opening datalog.txt");  
489 }  
490 }  
491 */
```

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “60 years of integration, lam blog,” <https://blog.lamresearch.com/60-years-of-integration/>, accessed: 2020-05-19.
- [2] “What are voltage dips, swells and transients?, fluke,” <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/power-quality/voltage-sags-dips-transients>, accessed: 2021-01-26.
- [3] “ADE9000 Datasheet, analog devices,” <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE9000.pdf>, accessed: 2020-05-22.
- [4] “Medidor ION 8650 - Clase 0,2 - Sin Calibración, tecnored,” <https://www.tiendatecnored.cl/medidor-ion-8650-clase-0-2-sin-calibracion.html>, accessed: 2021-04-8.
- [5] “The History of the Integrated Circuit, anysilicon,” <https://anysilicon.com/history-integrated-circuit/>, accessed: 2020-05-19.
- [6] I. Kobayashi, “A new technology for high-power ic,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 18, no. 1, pp. 45–50, 1971.
- [7] “Power management, ti,” <http://www.ti.com/power-management/multi-channel-ics-pmic/applications.html>, accessed: 2020-05-19.
- [8] “Power Management, stmicroelectronics,” <https://www.st.com/en/power-management.html>, accessed: 2020-05-19.
- [9] “NORMA TÉCNICA DE CALIDAD DE SERVICIO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN, cne,” https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2015/06/Norma-Técnica-de-Calidad-de-Servicio-para-Sistemas-de-Distribución_vf.pdf, accessed : 2021 – 01 – 24.
- [10] “ADE7758 Datasheet, analog devices,” <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7758.pdf>, accessed: 2020-05-22.
- [11] “ADE7880 Datasheet, analog devices,” <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7880.pdf>, accessed: 2020-05-22.
- [12] “ADE9078 Datasheet, analog devices,” <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE9078.pdf>, accessed: 2020-05-22.
- [13] “STPM32 Datasheet, stmicroelectronics,” <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stpm32.pdf>, accessed: 2020-05-22.

- [14] “STPMC1 Datasheet, stmicroelectronics,” <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stpmc1.pdf>, accessed: 2020-05-22.
- [15] “M90E36A Datasheet, atmel,” <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-46004-SE-M90E36A-Datasheet.pdf>, accessed: 2020-05-22.
- [16] “M90E32AS Datasheet, atmel,” <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/Atmel-46003-SE-M90E32AS-Datasheet.pdf>, accessed: 2020-05-22.
- [17] “CS5480 Datasheet, cirrus logic,” https://d3uzseaevmutz1.cloudfront.net/pubs/proDatasheet/CS5480_F3.pdf, 2020 – 05 – 22.
- [18] “bs en 61000-4-30:2015 - electromagnetic compatibility (emc). testing and measurement techniques. power quality measurement methods_{2021,bsi},” <https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Standard?UPI=000000000030354293>, accessed: 2021 – 04 – 8.
- [19] “BS EN 61000-4-7:2002+A1:2009 - Electromagnetic compatibility (EMC). Testing and measurement techniques . General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, bsi,” <https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Standard?UPI=000000000030255780>, accessed: 2021-04-8.
- [20] “EVAL-ADE9000, analog devices,” <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/EVAL-ADE9000.html>, accessed: 2021-01-28.
- [21] “EVAL-ADE9000-Shield, analog devices,” <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/EVAL-ADE9000-Shield.html>, accessed: 2021-01-28.
- [22] “Active Integrator for Rogowski Coil Reference Design With Improved Accuracy for Relays and Breakers, ti designs,” <https://www.ti.com/lit/ml/tiduby4a/tiduby4a.pdf?ts=1618505847790>, accessed: 2021-04-15.
- [23] “System and method for detecting a fundamental frequency of an electric power system, justia patents,” <https://patents.justia.com/patent/9696355>, accessed: 2021-04-15.
- [24] “ADE9000 Technical Reference Manual UG-1098, analog devices,” <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/ADE9000-UG-1098.pdf>, accessed: 2021-04-12.
- [25] “EV-ADE9000SHIELDZ User Guide - UG-1170, analog devices,” <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/ev-ade9000shieldz-ug-1170.pdf>, accessed: 2021-03-20.
- [26] “Fluke 376 True RMS AC/DC Clamp Meter with iFlex, fluke,” https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/99011365_PN_{AW}.PDF, accessed: 2021 – 04 – 10.
- [27] “Downloads, arduino,” <https://www.arduino.cc/en/software>, accessed: 2021-04-16.

- [28] “EVAL-ADE9000-Shield - Software, analog devices,” https://www.analog.com/media/en/evaluation-boards-kits/evaluation-software/ade9000_arduino_software.zip, accessed : 2021 - 04 - 16.
- [29] “ADE9000 Calibration Tool, analog devices,” <https://www.analog.com/media/en/engineering-tools/design-tools/ADE9000-Calibration-Tool.zip>, accessed: 2021-04-12.

COPYRIGHT

Some sections and figures of this document are protected by copyright laws. Please contact the Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE, the Universidad Técnica Federico Santa María, UTFSM or Diego Allende Labra prior to any non-personal use of this material.

