



FACULTAD DE INGENIERIA

Universidad de Buenos Aires

CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS EMBEBIDOS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

Medidor de energía eléctrica industrial con telemetría

Autor:
Ing. Hernán Darío Ferreyra

Director:
Esp. Ing. Nicolás Álvarez (FIUBA, UNSAM)

Jurados:
Ing. Juan Manuel Cruz Beaufrere (FIUBA, UTN-FRBA)
Dr. Ing. Mariano García Inza (FIUBA, CONICET)
Esp. Ing. Sergio Renato De Jesús Meleán (FIUBA)

*Este trabajo fue realizado en Misiones, Argentina,
entre agosto de 2018 y agosto de 2020.*

Resumen

Se presenta el desarrollo de un prototipo de un medidor digital de potencia eléctrica con telemetría. Incluye tanto el diseño de hardware como su respectivo firmware. El prototipo es capaz de realizar mediciones de tensión alterna y corriente alterna, de modo que calcula, entre otras variables, la potencia activa de una máquina o tablero eléctrico y las almacena. Es posible acceder a los valores medidos a través de diferentes interfaces tales como Modbus por RS485 y una salida de lazo de corriente. Asimismo, el dispositivo se destaca por su capacidad de realizar un corte de energía en caso de alarma por sobretensión o sobrecorriente. El desarrollo se hace a pedido de la empresa SERVAIND S.A.

Para llevar a cabo el trabajo se utilizaron las técnicas de diseño de hardware adquiridas en las materias del posgrado. A su vez, se aplicaron conocimientos sobre protocolos de comunicación digital, programación y arquitectura de microcontroladores, elaboración de informes y gestión de proyectos en ingeniería. Se utilizaron herramientas de control de versiones tanto para el software como para el hardware.

Agradecimientos

Gracias a mi familia por su apoyo incondicional y a mis profesores que supervisaron guiarme. También a Sebastián Bondar de Servaind S.A. que colaboró en el desarrollo de este trabajo.

Índice general

Resumen	III
1. Introducción general	1
1.1. Descripción general del trabajo y conceptos clave	1
1.2. Medición de potencia eléctrica	1
1.3. Estructura del trabajo	2
1.4. Motivación	3
1.5. Requerimientos del trabajo	4
1.6. Objetivos y alcance	5
1.6.1. Objetivos del desarrollo	5
1.6.2. Alcances	6
2. Introducción específica	7
2.1. Microcontrolador principal	7
2.2. Herramientas de programación	8
2.2.1. FET <i>debugger</i>	8
2.2.2. Entorno de desarrollo	9
El MSP Debug Stack	9
Entorno de desarrollo	10
2.3. Circuito integrado de medición	10
2.4. Biblioteca Externa - Free Modbus	12
3. Diseño e implementación	13
3.1. Desarrollo de <i>hardware</i>	13
3.1.1. Estructura Planteada	13
3.1.2. Componentes esenciales	13
Circuito de alimentación	15
Circuito de aislación o de cambio de nivel	15
Circuito de adaptación de microcontrolador	15
Circuito de comunicación por puerto	16
Circuito de relé	16
Circuito de salida analógica	16
Circuito de medición	17
3.1.3. Esquema analógico de medición	18
3.1.4. Fabricación	19
3.2. Diseño logrado	21
3.3. Desarrollo de <i>software</i>	22
3.3.1. Software previos de base	24
3.3.2. Software del fabricante utilizados	24
3.3.3. Especificaciones del software desarrollado	25
Comunicación con el ADE7953	26
3.3.4. Funcionalidades del software	27
Protocolo Modbus	29

Menú de calibración	29
4. Ensayos y resultados	31
4.1. Pruebas Realizadas	31
4.1.1. Pruebas de comunicación con el ADE7953	31
4.1.2. Testeo del protocolo Modbus	32
4.1.3. Testeo de la calibración	33
4.2. Verificación de requerimientos	33
4.2.1. Grupo de requerimientos referidos a alimentación eléctrica	33
4.2.2. Grupo de requerimientos referidos a medición de potencia	
del equipo	34
4.2.3. Grupo de requerimientos referidos a Interfaces de comuni-	
cación	35
4.2.4. Grupo de requerimientos referidos a diseño del circuito eléc-	
trico	35
4.2.5. Grupo de requerimientos referidos a diseño de impresión	
del circuito	36
5. Conclusiones	37
5.1. Conclusiones generales	37
5.2. Próximos pasos	37
Bibliografía	39

Índice de figuras

1.1. Medidor electrónico comercial ¹	1
1.2. Diagrama en bloques del hardware.	2
1.3. Módulo de medición de energía eléctrica con comunicación serie universal ²	3
1.4. Gráfico de medición de potencia que muestra el encendido del motor trifásico de compresión de un frigorífico.	4
1.5. Ejemplo de dispositivo fabricado por la empresa SERVAIND ³	6
2.1. Esquemático del micro controlador.	8
2.2. Foto del MSP-FET430UIF, que es la herramienta de programación del microcontrolador.	9
2.3. Esquemático del conector JTAG de la herramienta de programación..	9
2.4. Imagen del entorno de desarrollo.	10
2.5. Diagrama de bloques funcionales del ADE7953.	11
2.6. Trama de protocolo UART del ADE7953.	12
3.1. Medidas de la placa electrónica.	14
3.2. Placa de ejemplo para la aislación.	14
3.3. Circuito esquemático de la alimentación de la placa.	15
3.4. Circuito esquemático de la alimentación del sector aislado.	15
3.5. Circuito esquemático de la comunicación digital aislada.	16
3.6. Header JTAG añadido al PCB.	16
3.7. Circuito esquemático con la implementación del MAX3222.	17
3.8. Circuito esquemático con la implementación del ISL83485.	17
3.9. Transistor darlington para la acción del relé.	17
3.10. Circuito de salida 4 - 20 mA.	18
3.11. Diagrama de bloque del ADE7953.	19
3.12. Circuito esquemático de la entrada de tensión.	19
3.13. Circuito esquemático de la entrada de corriente.	20
3.14. Salidas del dispositivo.	20
3.15. Estandares fijados por la empresa argentina Ernesto Mayer SA ⁴	21
3.16. Imagen 3D de la parte frontal del PCB.	21
3.17. Imagen 3D de la parte trasera del PCB.	22
3.18. Primer PCB fabricado con conexiones arregladas.	23
3.19. Soldado de cables para corregir el prototipo del PCB.	23
3.20. Segundo prototipo fabricado.	24
3.21. Diagrama de flujo del programa.	25
3.22. Lectura por UART del ADE7953.	26
3.23. Escritura por UART del ADE7953.	26
3.24. Menú serie de configuración.	29
3.25. Menú de calibración.	30

4.1.	Pulso de 1 milsegundo en el Osciloscopio.	31
4.2.	Variables leídas por el microcontrolador durante las pruebas.	32
4.3.	Lectura de registros Modbus en la computadora del banco de pruebas.	32
4.4.	Banco de pruebas con el autotransformador.	33
4.5.	Esquema de calibración según la hoja de aplicación del integrado ADE7953. La hoja de aplicación denominada AN-1118, se encuentra disponible en la pagina web del fabricante ⁵	34
4.6.	Conexión del prototipo durante las pruebas.	34
4.7.	Prueba de la interfaz RS232.	35
4.8.	Area del microcontrolador en el dispositivo.	36

Índice de Tablas

3.1. Registros 8 bit ADE79853	28
3.2. Registros Modbus en software	29

Para Darío.

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se describe la motivación del trabajo y sus objetivos, con una breve explicación sobre mediciones eléctricas digitales, que es un concepto clave en este trabajo.

1.1. Descripción general del trabajo y conceptos clave

El trabajo desarrollado consiste en un sistema para medir potencia eléctrica. El trabajo fue desarrollado para SERVAIND S.A. que es una empresa privada localizada en Argentina [1].

1.2. Medición de potencia eléctrica

La mayoría de los medidores electrónicos digitalizan las variables medidas vía un ADC sigma-delta de alta resolución. La técnica de diseño de estos medidores digitales está influenciada por tres grandes factores: el costo, la eficiencia y el tamaño. Mientras que el costo se ve influenciado por la capacidad de compra del cliente, la eficiencia y el tamaño se encuentran sujetos a estándares como por ejemplo el IEC-62052-11 establecido por la IEC (*International Electrotechnical Commission*) [2].



FIGURA 1.1. Medidor electrónico comercial¹.

La exactitud del medidor eléctrico digital depende de la precisión del circuito de entrada analógica, la del conversor analógico-digital y la de los cálculos digitales [3].

¹<https://www.smartprocess.co.uk/>

Los convertidores analógico-digitales basados en la modulación sigma-delta son económicamente viables para convertidores de alta resolución (mayores que 12 bits), por lo que son usados en el circuito integrado de procesadores de señales.

1.3. Estructura del trabajo

Inicialmente se realizó un plan de trabajo [4] donde se plantea cómo se afronta el problema y el modo en que se lo resolverá. El proyecto propuesto consta de dos partes principales: hardware y software.

Para el hardware se planteó un diagrama de bloques que sirvió de guía al realizar el circuito esquemático, que puede verse en la figura 1.2. El diagrama planteó dos sectores, uno de procesamiento y otro de medición que se encontraran aislados.

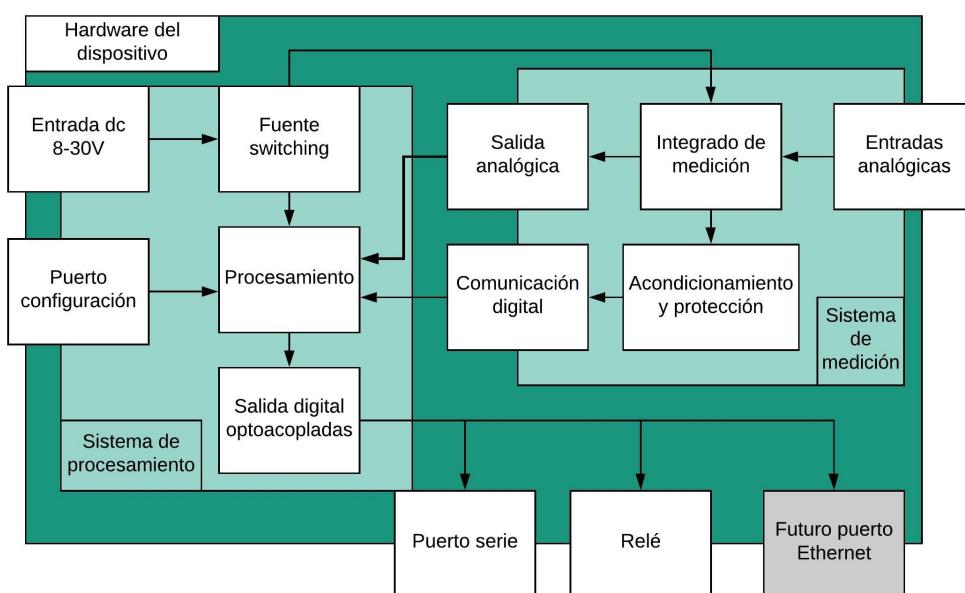


FIGURA 1.2. Diagrama en bloques del hardware.

El diagrama presupone que se usará una entrada de alimentación de corriente continua de 8 a 30 V conectado a una fuente *switching*, donde alimentará tanto al procesamiento como a la medición.

En el subsistema “sistema de procesamiento” de la figura 1.2, se estableció que el hardware contaría con un puerto de configuración y varias salidas optoacopladas. Se planteó que estas salidas fuesen un relé, un puerto serie y un puerto Ethernet.

Se propuso también que el subsistema “sistema de medición” de la figura 1.2, se conectara al sector “sistema de procesamiento” por una comunicación digital aislada y también por una salida analógica.

En cuanto al software, se estableció que sea el necesario para lograr el testeo de las partes del hardware y la verificación de los requerimientos, por lo que debía manejar correctamente todos los integrados que fueran a estar embibidos en el circuito del dispositivo y manejar todos los protocolos definidos en los requisitos.

En la primera parte del trabajo se armó la electrónica del prototipo y el software se fue construyendo para demostrar el funcionamiento del hardware.

Una vez finalizado el armado del hardware se procedió a una segunda parte del desarrollo del software, donde debía además de comunicarse con diferentes protocolos, ser capaz de realizar diferentes configuraciones del dispositivo según requiera el usuario.

1.4. Motivación

En la actualidad se pueden encontrar en el mercado internacional múltiples módulos electrónicos de bajo costo con puertos de comunicación para la medición de energía eléctrica. Asimismo, existen medidores digitales de energía de diferentes marcas para diferentes entornos, lo que permite pensar que un dispositivo similar podría ser fabricado en la Argentina.

Los módulos de medición pueden servir para apoyar a sistemas de seguridad. Estos actuarían como un método preventivo de fallas, dado que los parámetros de consumo dan una idea del estado de las máquinas eléctricas.

El módulo de la figura 1.3 es un medidor de energía que se comunica mediante una interfaz serie universal [5]. El módulo fue usado por el autor en una experiencia previa, en la cual varias copias de este se instalaron en un local comercial. Con el conjunto de estos módulos se logró medir el consumo de los electrodomésticos presentes en el lugar de trabajo. Gracias a su implementación se detectaron fallas en algunas máquinas. Además se observó el comportamiento del aparato eléctrico de mayor consumo del local que es la cámara frigorífica (que representa más del 25 % del consumo total), cuyo comportamiento puede verse en la figura 1.4.



FIGURA 1.3. Módulo de medición de energía eléctrica con comunicación serie universal².

Estos módulos se consiguen únicamente en el mercado internacional de modo que hay que importarlos, lo que presenta una barrera para una herramienta de mucha utilidad.

²<https://peacefair.es.aliexpress.com/store/177345>

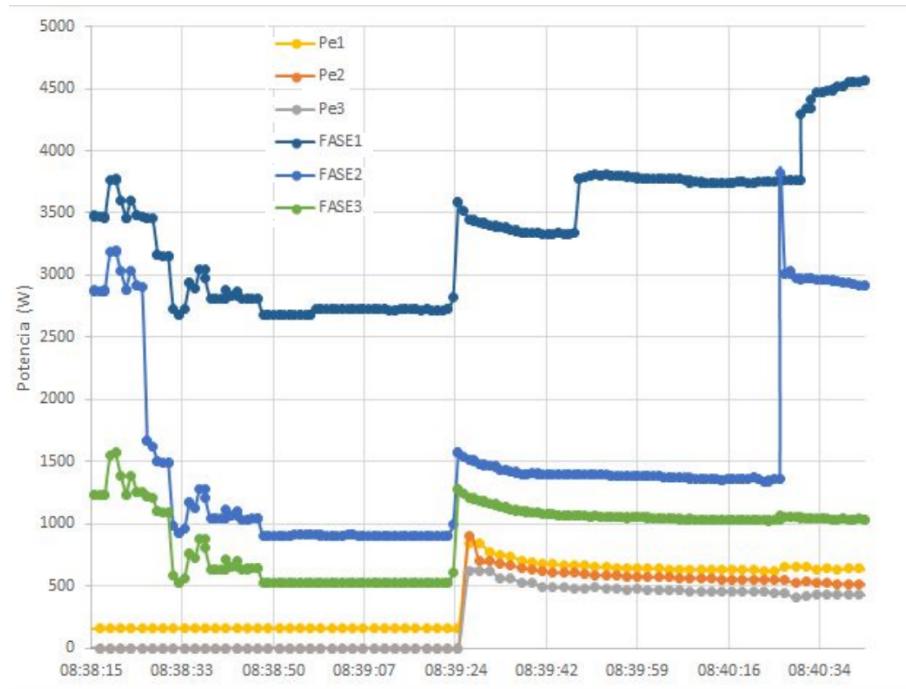


FIGURA 1.4. Gráfico de medición de potencia que muestra el encendido del motor trifásico de compresión de un frigorífico.

Las curvas de la figura 1.4 sirvieron para tener una idea más clara del funcionamiento del encendido de la cámara frigorífica y saber el costo energético que implica. Además gracias a los datos recabados se lograron detectar el mal funcionamiento en otros equipos eléctricos de refrigeración.

Desde el punto de vista de SERVAIND S.A., el trabajo se planteó ante la necesidad de cuantificar consumos energéticos de procesos industriales para supervisar la alimentación de equipos de control o de medición. También como una alternativa a un producto anterior que solo medía consumos de corriente continua. En suma, la necesidad de hacer uso de la herramienta y poseer los medios necesarios para fabricar la electrónica de manera local impulsaron el trabajo realizado.

1.5. Requerimientos del trabajo

Los requerimientos fueron elaborados a partir de un documento enviado por el equipo de desarrollo de la empresa SERVAIND S.A. y se resumen en la siguiente lista:

- Grupo de requerimientos referidos a medición de potencia del equipo:
 1. El dispositivo debe ser capaz de realizar la medición de tensión alterna de una línea monofásica de baja tensión de Argentina, entrada de medición para 220 V o 380 V con una tolerancia de +/-15 %.
 2. El dispositivo debe ser capaz de realizar la medición de corriente alterna de una línea monofásica de baja tensión de Argentina, hasta 5 A.

3. El dispositivo debe ser capaz de realizar la medición de potencia eléctrica activa de una línea monofásica de baja tensión de Argentina, hasta 4000 W.
 4. El sistema de medición que se utiliza para las mediciones debe ser aislado de la salida de comunicaciones del puerto serie.
- Grupo de requerimientos referidos a interfaces de comunicación:
 5. El dispositivo debe realizar las comunicaciones a través de protocolos RS485 y RS232.
 6. El dispositivo debe tener en su diseño espacio para una posible modificación a futuro en la que se incluya una interfaz Ethernet a través de una entrada para rj45.
 - Grupo de requerimientos referidos a diseño del circuito eléctrico:
 7. El dispositivo debe alimentarse con tensión continua que debe ser inferior a 30 V y superior a 12 V.
 8. El dispositivo debe poseer como microcontrolador principal MSP430F2418.
 9. El dispositivo debe implementar protecciones contra sobretensión en salida y entradas.
 10. El dispositivo debe tener un relé para realizar un corte por corriente.
 - Grupo de requerimientos referidos a diseño de impresión del circuito:
 11. El tipo de soldado debe ser por refusión en la cara superior del circuito impreso.
 12. El tipo de soldado debe ser por ola en la cara inferior del circuito impreso.

1.6. Objetivos y alcance

1.6.1. Objetivos del desarrollo

El objetivo del trabajo fue el desarrollo de un dispositivo de medición basado en un microcontrolador de la familia MSP430 en conjunto con un ADC SOC (*system on chip*). Se pretendió lograr un dispositivo comercial similar a aquellos elaborados anteriormente por la empresa privada, por lo que las dimensiones del PCB (*Printed Circuit Board*) deberán ajustarse a las utilizadas por las carcasa estándar que utiliza la empresa, como puede verse en la figura 1.5.

Además, se esperaba que el firmware manejara protocolo Modbus y comunicara las variables medidas a través de los puertos de comunicación. Físicamente se estableció que el dispositivo fuera capaz de comunicar por puertos serie RS-232 y RS-485, y que este pudiera funcionar en un ambiente industrial (el dispositivo tendría que ser robusto).

³Imagen tomada de <http://www.proser.com.ar/>



FIGURA 1.5. Ejemplo de dispositivo fabricado por la empresa SER-VAIND³

1.6.2. Alcances

El trabajo abarcó el planteo, diseño y fabricación de un PCB. Asimismo, incluyó la selección de componentes, la elaboración del esquemático de conexiones lógicas y la elaboración del PCB y su diseño para la fabricación. Además se debió elaborar un prototipo y realizar testeos.

También se esperaba realizar un firmware para el funcionamiento del dispositivo, teniendo en cuenta que el software debía incluir métodos de configuración para un futuro usuario.

Capítulo 2

Introducción específica

En el presente capítulo se describe el microcontrolador que se eligió para el trabajo, los métodos de medición usados y las herramientas de software desarrolladas por terceros que se utilizaron.

2.1. Microcontrolador principal

El trabajo realizado implicó el desarrollo de un producto electrónico que debe efectuar diferentes tareas, como medir, comunicar y en algunos casos accionar. Uno de los elementos que hace posible el funcionamiento del sistema es el microcontrolador, que es el encargado de realizar las diferentes tareas que el dispositivo debe llevar a cabo.

Para este trabajo se optó por un microcontrolador que pueda ser usado para una aplicación de medición y que sea de bajo consumo eléctrico.

El microcontrolador elegido para el dispositivo fue un MSP430F2618 [6], fabricado por la empresa Texas Instruments. Este microcontrolador es de ultra baja potencia y posee una CPU de instrucciones RISC de 16 bits. Posee periféricos analógicos y digitales orientados a aplicaciones de medición. Este microcontrolador, cuyo *pinout* se puede observar en la figura 2.1, puede pasar de sus distintos modos de baja potencia al modo activo en menos de un $1\ \mu s$.

El MSP430F2618 posee varios tipos de periféricos ideados para diferentes aplicaciones. El fabricante denomina a cada uno de estos periféricos como “módulos”.

Estos módulos son hardware de diferentes aplicaciones que normalmente usan los microcontroladores, los cuales el fabricante decidido incluirlos en el circuito integrado. El MSP430F2618 incluye por ejemplo un módulo de reloj, un módulo controlador de memoria flash, un módulo de comunicación serie y un módulo de control directo de memoria (DMA) [[msp430slau144j](#)].

Cómo los módulos se encuentran en el circuito integrado, están conectados a la CPU a través de los buses de dato, dirección y control. Se pueden utilizar los módulos accediendo a las direcciones de memoria correspondiente. El uso de estos módulos facilita la programación del firmware, sin agregar hardware extra.

Este modelo de la familia MSP430 se eligió específicamente por poseer tanto un módulo ADC (conversor analógico-digital) como un módulo DAC (conversor digital-analógico). El módulo DAC fue utilizado para la implementación de un lazo de corriente, que es una forma de comunicación común para procesos industriales. Se consideró usar al módulo ADC para realizar mediciones de corriente o

tensión, sin embargo su uso fue descartado por otra solución más completa que involucraba a otro circuito integrado.

Para el trabajo se usó el módulo de comunicación serie universal para realizar la comunicación con el integrado de medición como también para realizar los protocolos de comunicación requeridos. El microcontrolador posee un oscilador interno por lo que no necesita de uno externo para funcionar, sin embargo se decidió usar un oscilador externo para asegurar la estabilidad de las comunicaciones seriales como también para aumentar la precisión de los módulos temporizadores que se implementaron.

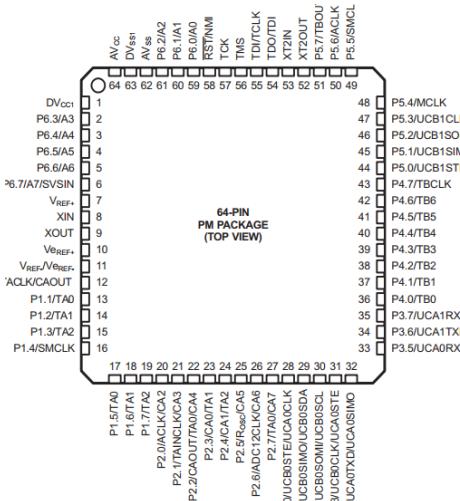


FIGURA 2.1. Esquemático del micro controlador.

2.2. Herramientas de programación

2.2.1. FET debugger

Para cargar el programa al microcontrolador, el fabricante especifica una herramienta de programación al que denomina “FET hardware JTAG”, donde FET es acrónimo de *Flash Emulation Tool* y JTAG acrónimo de *Joint Test Action Group*. La herramienta puede verse en la figura 2.2.

El JTAG es un estándar industrial para verificar diseños y testear placas de circuito impreso después de manufaturadas [7]. Los programadores JTAG son usados para escribir software en memorias *flash*.

Con las conexiones apropiadas un debugger y la interfaz JTAG pueden ser usadas para depurar código en el microcontrolador. Esto facilita la programación de prototipos a realizar. El cable utilizado para conectar la herramienta a través de una interfaz JTAG era un ejemplo de como debía ser la conexión en la placa electrónica del prototipo.

En la hoja de datos de la herramienta, el fabricante especifica las conexiones y funciones de cada pin, como puede verse en la figura 2.3. El circuito esquemático de las conexiones fue tomado en cuenta para el diseño del esquemático del prototipo, en el cual se optó por una interfaz *JTAG Through-Hole*.



FIGURA 2.2. Foto del MSP-FET430UIF, que es la herramienta de programación del microcontrolador.

Para el trabajo realizado, la empresa SERVAIND S.A. proveyó la herramienta MSP-FET430UIF para poder entender y probar el proceso de programación de un microcontrolador MSP430.

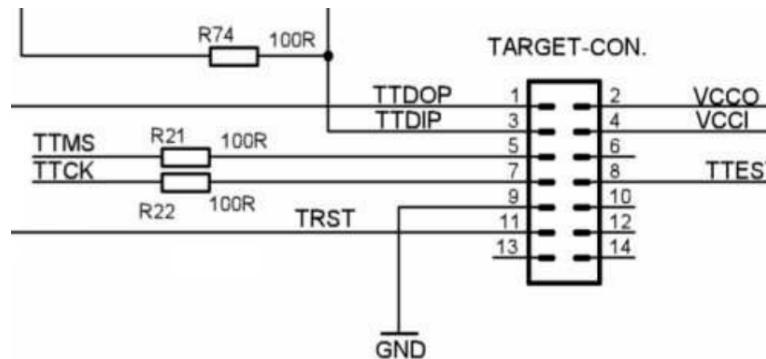


FIGURA 2.3. Esquemático del conector JTAG de la herramienta de programación..

2.2.2. Entorno de desarrollo

El MSP Debug Stack

Para poder programar el microcontrolador, el fabricante ofrece una solución de software denominada “MSPDS” que significa *MSP Debug stack*. El *MSP Debug stack* es una biblioteca dinámica que provee funciones para controlar y depurar microcontroladores de la familia MSP430 durante la fase de desarrollo de software.

El *MSP Debug stack* controla al MSP430 a través de la interfaz JTAG. La biblioteca provee control de dispositivo, programación de memoria y funcionalidad de depuración, por ejemplo *breakpoints* [8].

Esta biblioteca simplifica el controlar el MSP430 aislando al usuario de las complejidades del protocolo JTAG. Además, la biblioteca puede conectarse a un MSP430 objetivo sin parar o cambiar la ejecución del programa.

El “stack debug de MSP” es diseñado para los microcontroladores de la familia MSP430. Consiste en una biblioteca estática en el lado del host (donde se realizan los programas) y de un firmware embebido que corre herramientas de depuración para el MSP-FET [8].

Entorno de desarrollo

Para realizar el programa en lenguaje C, el fabricante del microcontrolador recomienda al IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) “IAR Embedded Workbench”, ya que este software incluye al MSP Debug Stack, por lo que no hay que escribir archivos *make file* o hacer una compilación manual ya que esto lo soluciona el entorno.

Para el trabajo realizado la empresa SERVAIND S.A. proveyó una versión del IDE IAR, con el fin de acelerar el proceso de desarrollo del software. Una ventana del entorno de desarrollo puede verse en la figura 2.4.

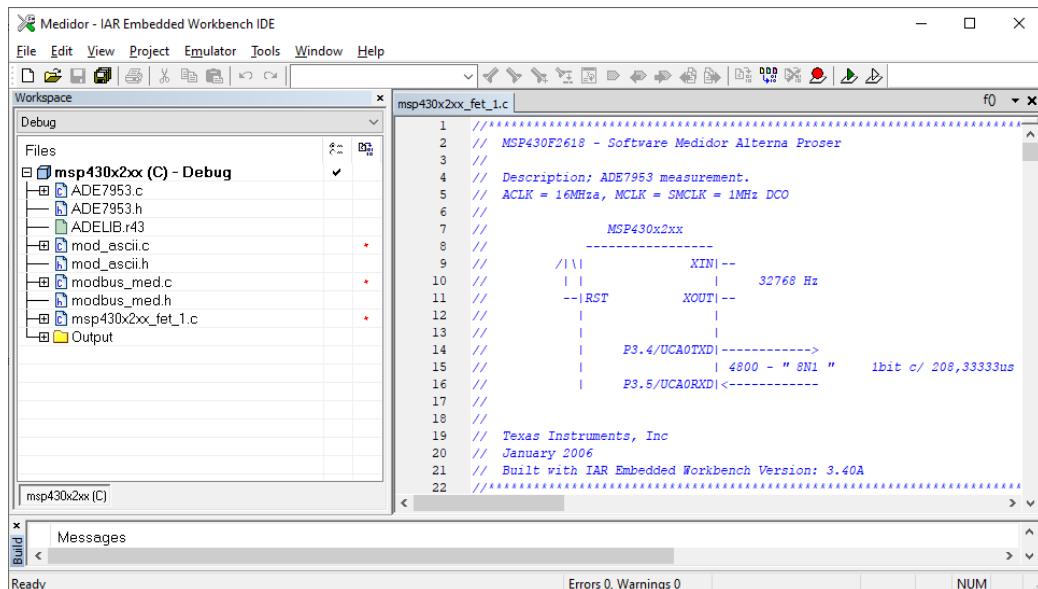


FIGURA 2.4. Imagen del entorno de desarrollo.

2.3. Circuito integrado de medición

Para la realización de este trabajo se decidió utilizar un chip que soluciona las complejidades de los cálculos de medición de una red eléctrica, el integrado de medición seleccionado fue el denominado ADE7953, cuyo fabricante es Analog Devices. El ADE7953 es un circuito integrado de medición de energía eléctrica de alta precisión, con el propósito de aplicaciones monofásicas. Mide tensión y

corriente de línea y calcula energía activa, reactiva y aparente. El dispositivo incorpora tres ADC sigma-delta con un núcleo de medición de energía de alta precisión. El integrado ADE7953 es un SOC (*System On Chip*) que adapta un AFE (Analog Front-End), el ADE7953 facilita el uso del AFE al adaptar la electrónica analógica a una interfaz de electrónica digital, integra el control de la tasa de muestreo del ADC, almacena datos en registros lógicos y provee una interfaz de comunicación.

Un AFE (*Analog Front End*) es un conjunto de circuitos que acondicionan señales usando amplificadores analógicos sensibles, comúnmente amplificadores operacionales, filtros y circuitos integrados para aplicaciones específicas. De esta manera un AFE provee un bloque electrónico funcional, flexible y configurable, que es necesario para ser interfaz de una variedad de sensores, conversores digitales o microcontroladores.

En el campo de las mediciones eléctricas, los chips AFE son circuitos integrados resultados de una combinación de circuitos analógicos con digitales. Estos suelen ser implementaciones de DAC, tensiones de referencia tipo bandgap, módulos de manejo de potencia, módulos de control, cálculos de medición o conversores de pulsos de energía.

System on chip puede ser definido como un circuito integrado complejo que consiste en uno o más núcleos programables, conectados usando un bus en chip con núcleo de procesamiento de señales (digitales o analógicas), y que pueden incorporar memoria en chip [9].

El ADE7953 es un system on chip que posee registros de memoria para facilitar el uso de los datos resultados de las mediciones. Su diagrama funcional puede verse en la figura 2.5.

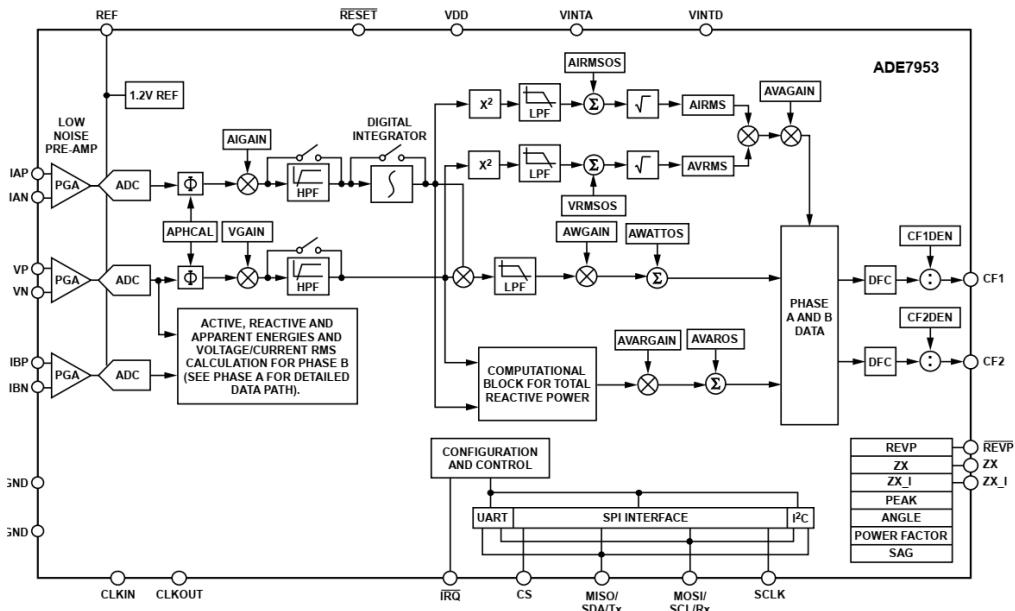


FIGURA 2.5. Diagrama de bloques funcionales del ADE7953.

El integrado puede comunicarse con el microcontrolador por tres diferentes protocolos: I2C, SPI y UART, para esto deben realizarse las conexiones necesarias. Estos modos de comunicación facilitan la lectura de los datos de los registros. El

chip utiliza diferentes protocolos, según se configure la lógica de los pines. Para el modo UART puede verse la configuración en la figura 2.6.

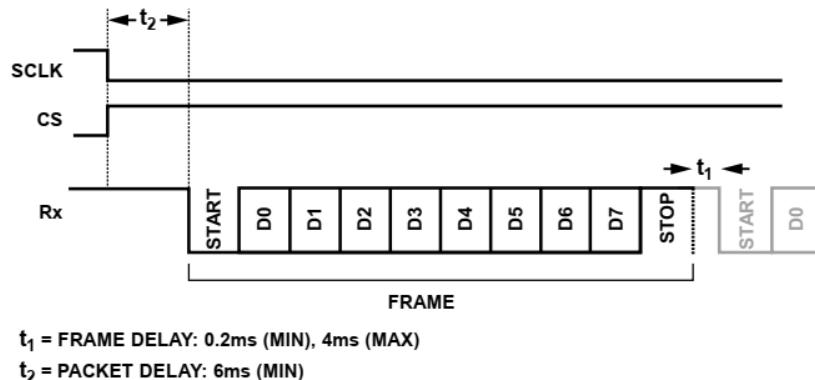


FIGURA 2.6. Trama de protocolo UART del ADE7953.

2.4. Biblioteca Externa - Free Modbus

Como el dispositivo a utilizar es pensado para un ambiente industrial, se implementó un protocolo Modbus para la comunicación de este con otros dispositivos, ya que Modbus es software libre de fácil de implementación.

El protocolo de comunicaciones serial Modbus, es un estándar de facto en la industria, diseñado para integrar PLC, computadoras, terminales, sensores y actuadores. Modbus es un sistema maestro/esclavo, donde un dispositivo, el nodo maestro, controla todas las actividades seriales encuestando selectivamente a los dispositivos esclavos. Modbus soporta un maestro y hasta 247 dispositivos esclavos. A cada dispositivo se le asigna una única dirección de nodo [10].

Para implementar el protocolo dentro del dispositivo del trabajo, se reescribió una biblioteca libre llamada “Freemodbus”, escrita por el Dr. techn. Christian Walter [11], que permite la implementación en lenguaje C del protocolo Modbus en diferentes microcontroladores. Se utilizó la biblioteca para desarrollar el código del protocolo del dispositivo, y las implementaciones RTU/ASCII para un dispositivo esclavo.

Capítulo 3

Diseño e implementación

En este capítulo se explican las consideraciones de diseño realizadas al elaborar el hardware del dispositivo. También se dan detalles de la implementación del software que usa el dispositivo y finaliza con la documentación elaborada.

3.1. Desarrollo de *hardware*

3.1.1. Estructura Planteada

Se comenzó a diseñar el circuito esquemático del hardware teniendo como punto de partida el microcontrolador a utilizar y planteando cómo se debería comunicar este con el circuito integrado de medición. Luego teniendo en cuenta un diagrama de bloques previamente realizado (este puede observarse en la figura 1.2), se decidió que la placa debería poseer dos sectores aislados eléctricamente entre si. Un sector sería destinado exclusivamente para las mediciones de altas tensiones y el otro sector sería destinado al microcontrolador.

En el sector del microcontrolador se encontrarían, además del microcontrolador principal, los integrados de comunicación y las salidas. Por otro lado el sector de medición debía manejar alta tensión, por lo que allí irían los arreglos analógicos para lograr la medición.

También se tuvo en cuenta la condición de que el PCB (*printed circuit board*) debía poseer las dimensiones mostradas en la figura 3.1, que son las necesarias para insertar la placa en una carcasa estándar, de uso habitual por la empresa.

Una vez que fueron establecidas las medidas y los conexionados de comunicación que debería tener el microcontrolador, se delimitó la placa en los dos sectores previamente mencionados. Esta división puede observarse en la figura 3.2, ambas divisiones deberían encontrarse aisladas, por lo que se debía dejar cierto espacio entre las pistas de cobre de cada sector.

La figura 3.2 es una vista de un diseño de otro proyecto electrónico que proveyó la empresa como punto de partida para el desarrollo de los circuitos impresos.

Se estableció entonces que en el sector del microcontrolador se encontrarán los puertos de comunicación y en el sector de medición, los integrados y circuitos analógicos que adapten las entradas a medir.

3.1.2. Componentes esenciales

Basándose en los requerimientos se fue definiendo al dispositivo como un conjunto de circuitos, estos son:

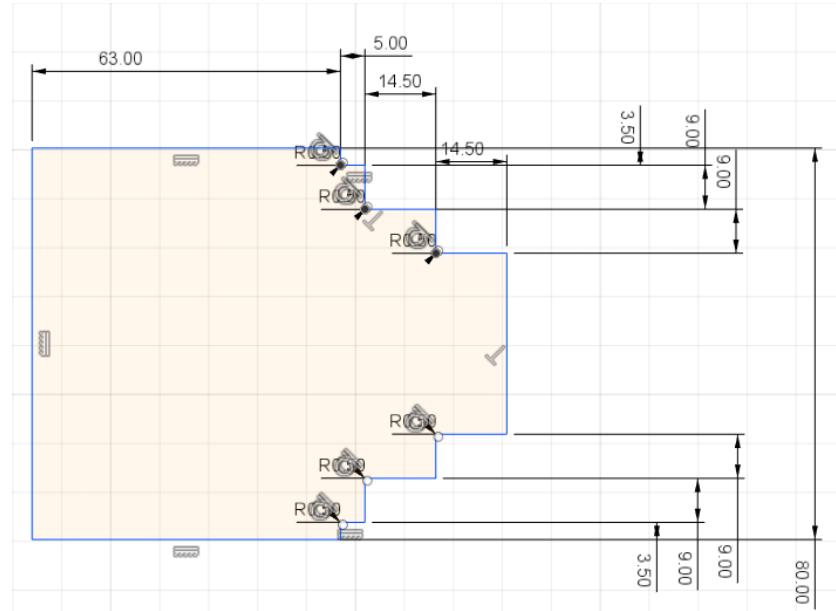


FIGURA 3.1. Medidas de la placa electrónica.

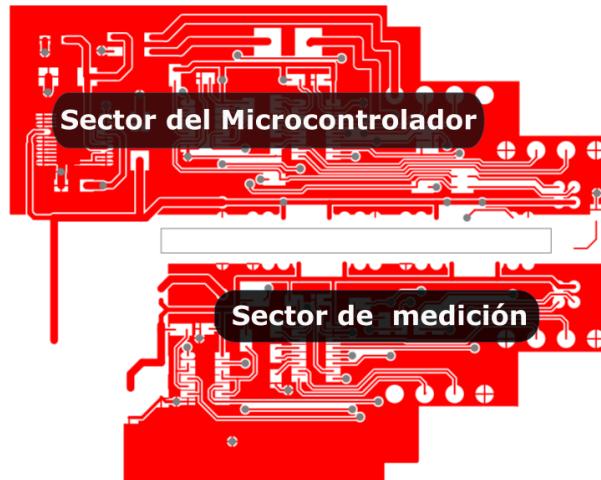


FIGURA 3.2. Placa de ejemplo para la aislación.

- un circuito de alimentación.
- circuito de adaptación de microcontrolador.
- circuito de aislación o de cambio de nivel.
- circuito de medición.
- circuito de comunicación por puerto.
- circuito de relé.
- circuito de salida analógica.

Todos estos circuitos se encuentran en el sector de microcontrolador que puede verse de la figura 3.2, a excepción del circuito de medición que se encuentra en el sector de medición y el circuito de aislación que funciona de interfaz y se encuentra en ambos sectores.

Círculo de alimentación

Se comenzó a realizar el circuito teniendo como presupuesto que la alimentación se haría con una fuente alterna de 8 V a 30 V.

Para la alimentación se optó por una fuente switching LM2574 que provee 5 V a un regulador lineal de 3,3 V necesarios para operar el microcontrolador. El circuito descrito puede observarse en la figura 3.3.

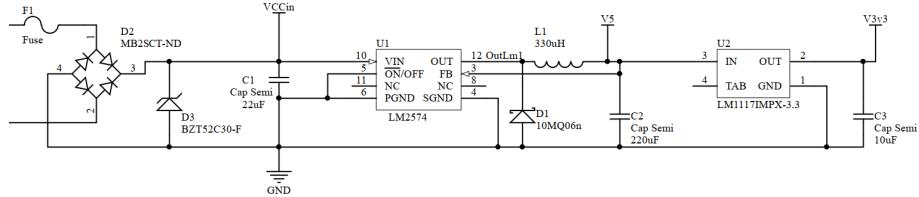


FIGURA 3.3. Circuito esquemático de la alimentación de la placa.

Círculo de aislación o de cambio de nivel

Para proteger al microcontrolador de elevadas tensiones se utilizó un integrado de aislación; para alimentar el circuito de medición, un conversor de continua a continua. También se añadió un aislador digital para comunicar el microcontrolador principal con un integrado de medición.

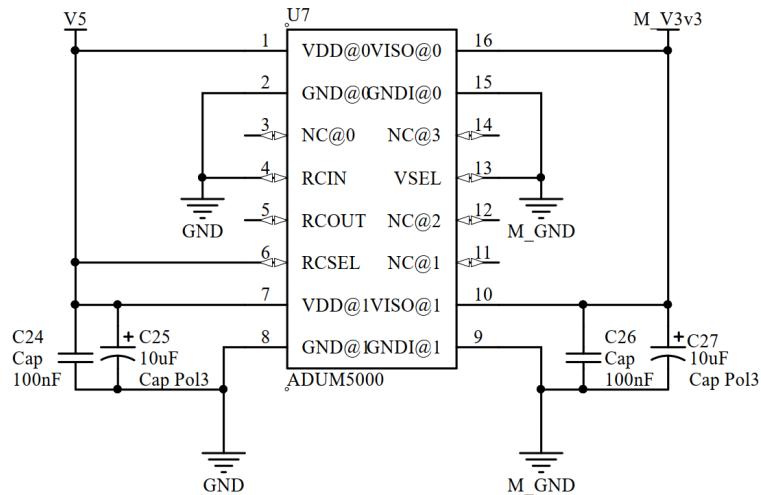


FIGURA 3.4. Circuito esquemático de la alimentación del sector aislado.

Círculo de adaptación de microcontrolador

El circuito de adaptación está integrado por resistores y capacidores necesarios para el correcto funcionamiento del microcontrolador, como también un cristal externo para usarlo como oscilador. Se usó un microcontrolador de la familia MSP430 de uso habitual en la empresa.

En el circuito de adaptación se incluyó un semiconductor para tensión de referencia y un cristal de 32768 Hz. Para el armado del dispositivo se seleccionó el modelo MSP430F2618, que posee un DAC interno de 12 bit que es de utilidad para la salida analógica utilizada en el lazo de corriente.

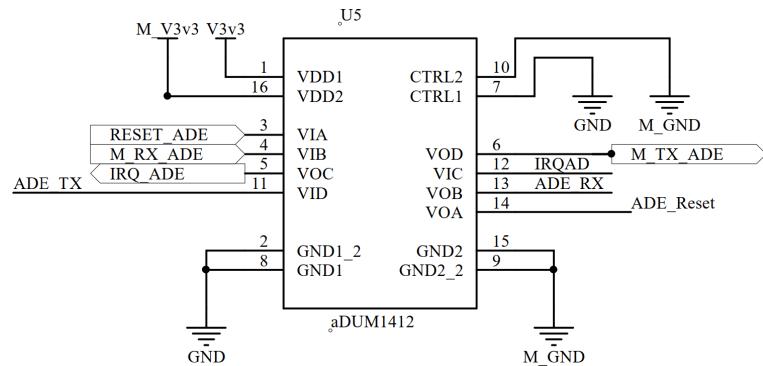


FIGURA 3.5. Circuito esquemático de la comunicación digital aislada.

Para programar al microcontrolador se añadió una conexión JTAG para conectar un programador flash de la empresa Texas Instrument. Este puerto de salida puede verse en la figura 3.6.

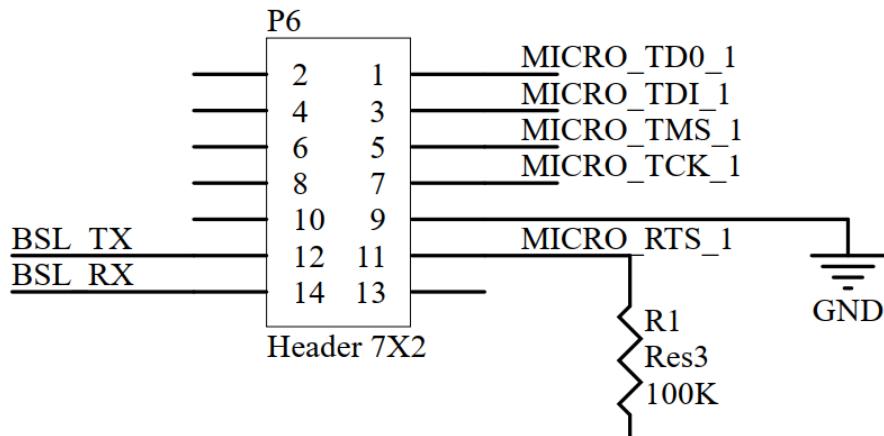


FIGURA 3.6. Header JTAG añadido al PCB.

Circuito de comunicación por puerto

Como se estableció en los requisitos, se implementaron integrados para la comunicación RS232, un max3222 y para la RS485, un integrado ISL83485. Estos integrados facilitan la adaptación de tensiones para lograr el estándar de comunicación deseado.

Circuito de relé

El circuito es integrado por los componentes mínimos para que el microcontrolador pueda manejar un relé que se acciona con tensiones del orden de los 5 voltos. El circuito puede verse en la figura 3.10.

Circuito de salida analógica

Este circuito esta compuesto por un *buffer* combinado con un integrado regulador de corriente para lograr una salida de lazo de corriente 4 - 20 mA.

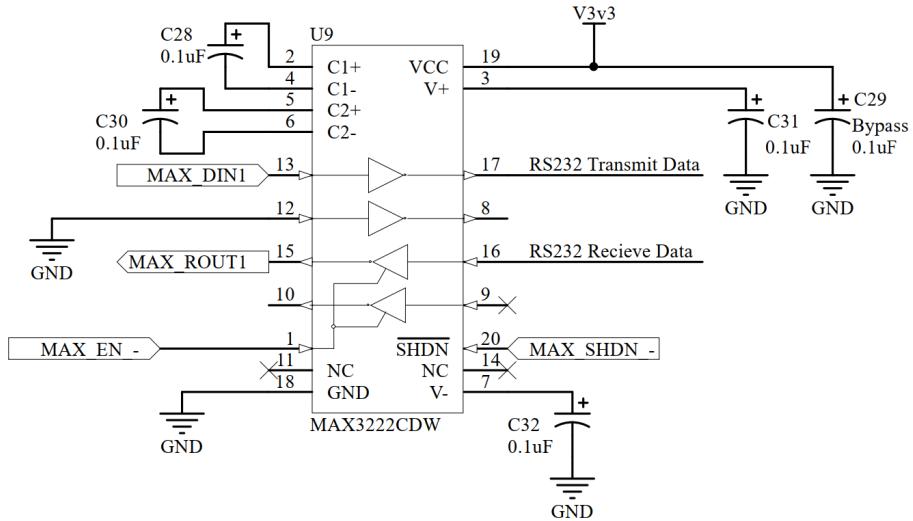


FIGURA 3.7. Circuito esquemático con la implementación del MAX3222.

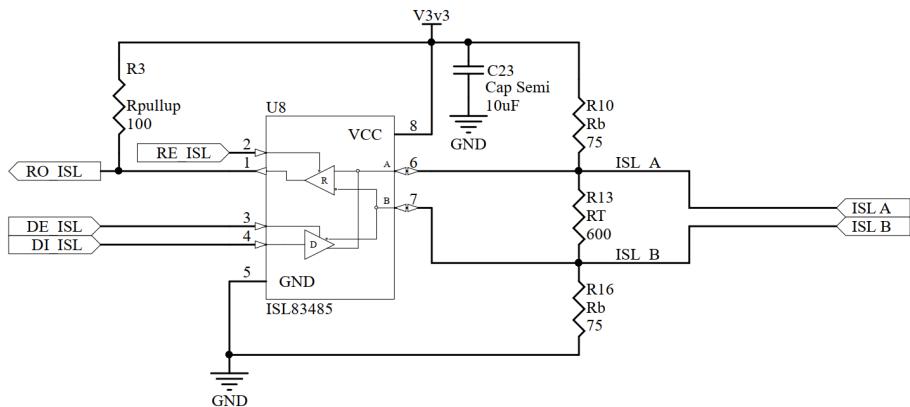


FIGURA 3.8. Circuito esquemático con la implementación del ISL83485.

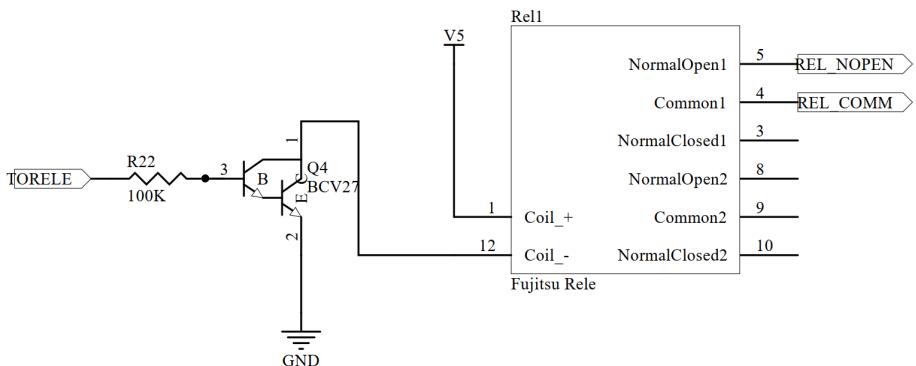


FIGURA 3.9. Transistor darlington para la acción del relé.

Circuito de medición

Para realizar la medición se optó por un integrado multifuncional de medición de una sola fase. El integrado permitió la rápida implementación de un medidor en el circuito del dispositivo. El integrado elegido es el ADE7953 del fabricante

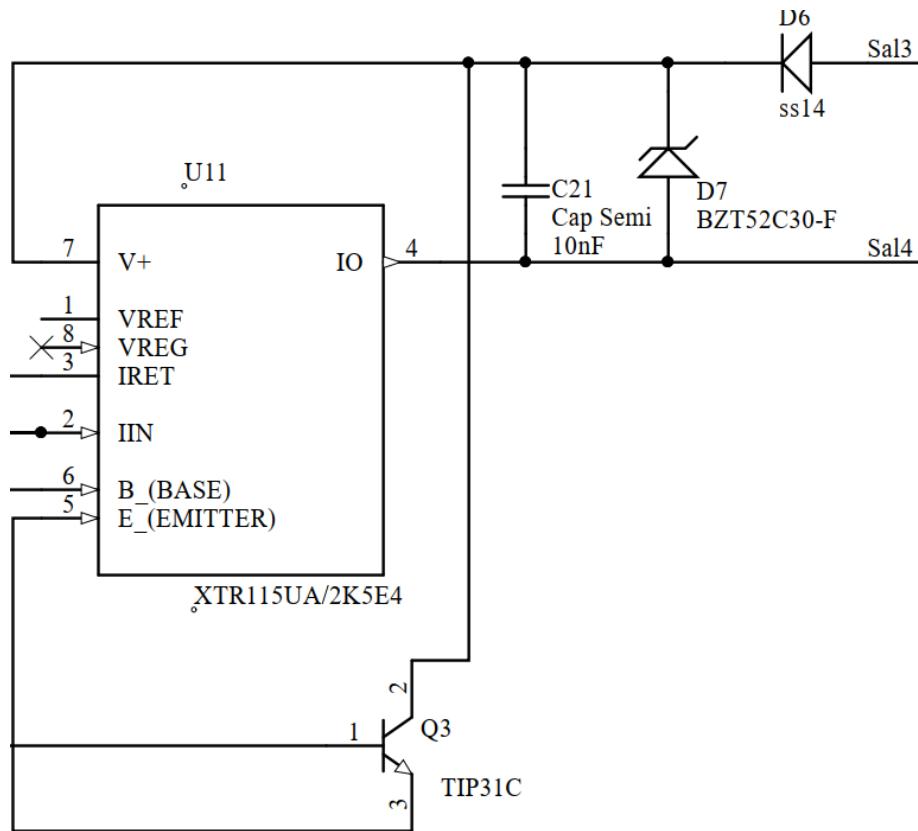


FIGURA 3.10. Circuito de salida 4 - 20 mA.

Texas Instrument. El integrado es un SOC (*System on a Chip*) que adapta un AFE (*analog front-end*) para su fácil uso. El circuito esquemático del ADE7953 puede verse en la figura 3.11.

El integrado de medición puede comunicarse con el microcontrolador a través de tres diferentes protocolos: I2C, SPI y UART, para esto deben realizarse las conexiones necesarias. Debido a la decisión de aislar el integrado y que las condiciones de espacio no permitían sobrepasarse con la cantidad de integrados para aislar, se realizaron las conexiones para la comunicación UART solamente.

3.1.3. Esquema analógico de medición

Como el principal objetivo del dispositivo es medir, se explican de manera muy breve los arreglos analógicos que se implementaron.

Suponiendo que las tensiones a medir fuesen del orden de los 600 V y teniendo en cuenta que la máxima tensión que soporta un pin del integrado es de 2 V, se añadió una serie de resistores para lograr 1 MΩ de resistencia en la entrada de medición, de modo de atenuar la tensión. Una vez atenuada la tensión se agregó un divisor resistivo del cual el integrado mide.

Para la medición de corriente es común ver en los módulos comerciales el uso de una bobina de Rogowski, sin embargo para el módulo diseñado se optó por usar un *shunt* para que el dispositivo no dependiera de otro objeto discreto para su instalación. El *shunt* elegido soporta grandes corrientes y se tomaron precauciones en las pistas del PCB para que pudiera operar con normalidad.

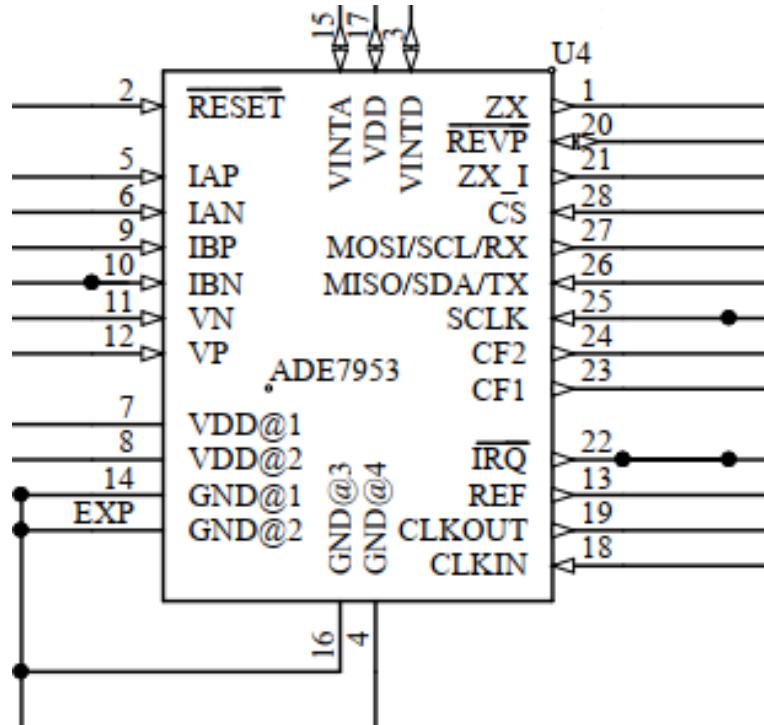


FIGURA 3.11. Diagrama de bloque del ADE7953.

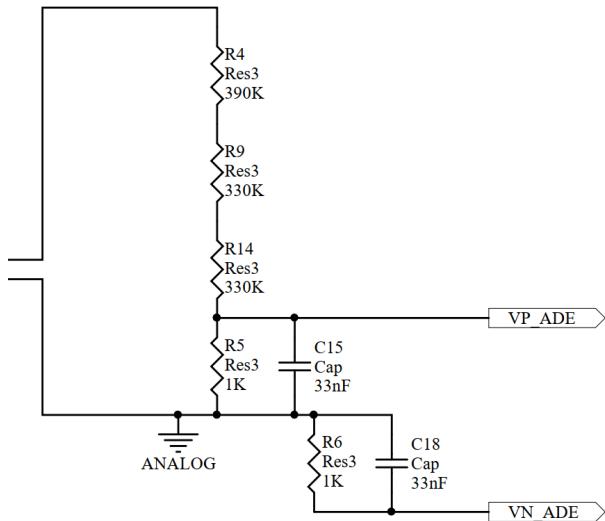


FIGURA 3.12. Circuito esquemático de la entrada de tensión.

3.1.4. Fabricación

Una vez completada la totalidad de las conexiones lógicas en el circuito esquemático, se debía decidir sobre el posicionamiento de los componentes, el tamaño de las perforaciones y la distribución de cada circuito. Se estableció desde la empresa privada que todos los componentes pasivos en lo posible fueran de montaje superficial, por lo que la mayoría de resistores y capacitores serían de encapsulado 0805.

Se dejó espacio para una entrada de conector RJ45 para un futuro puerto LAN Ethernet y se delimitó una zona de exclusión para dividir al PCB en una zona de medición y una zona de microcontrolador.

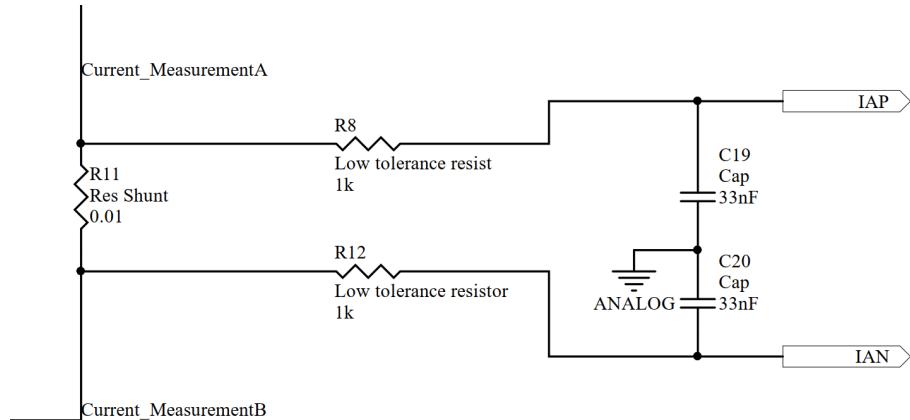


FIGURA 3.13. Circuito esquemático de la entrada de corriente.

Debido a que el PCB iba a ser encapsulado por una carcasa de plástico con posibilidad de conexión de 16 salidas, se decidió previamente cómo debería ser el esquema de conexiones. Se dejó un conector de 4 salidas para las mediciones ya que este se encontraría en un nivel aislado.

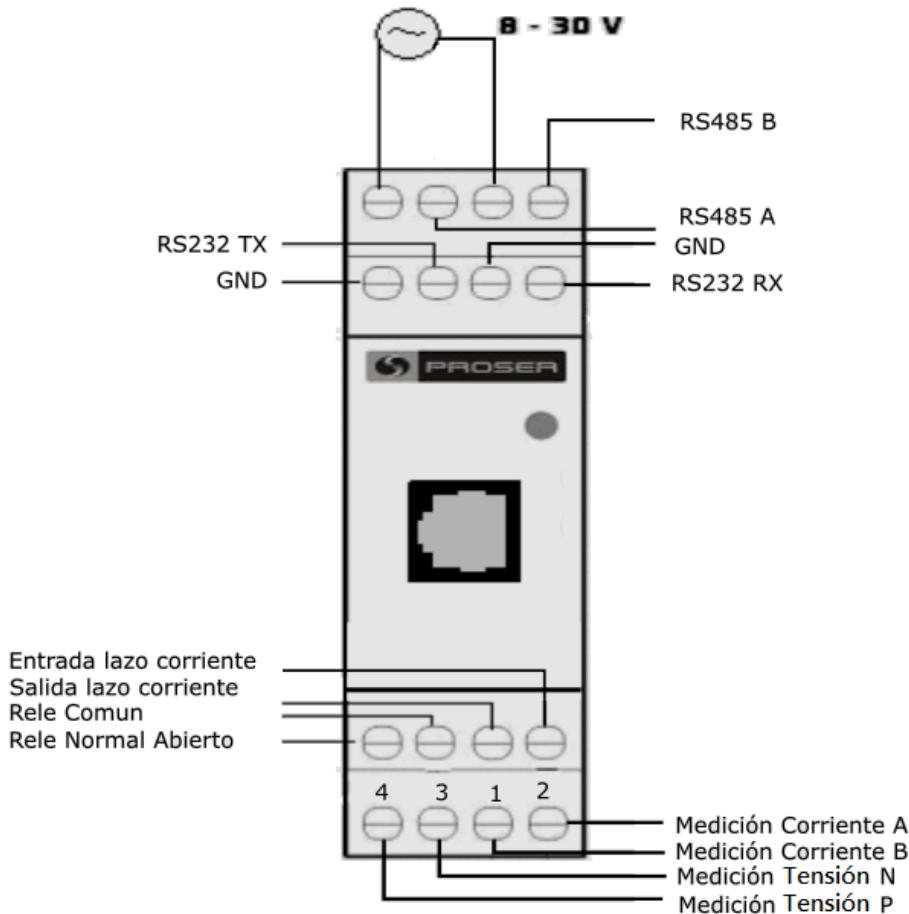


FIGURA 3.14. Salidas del dispositivo.

Se decidió fabricar las placas electrónicas en Argentina. La empresa fabricante tiene publicada una tabla donde divulga con qué tipos de tecnología de fabricación

trabaja. Se estableció como estándar a usar el de 8 mils y se trabajó con ese límite en el CAD de diseño.

TECNOLOGIA	12 MILS	10 MILS	8 MILS	6 MILS
DIAMETRO DE AGUJERO	28 (0.70 mm)	20 (0.50 mm)	16 (0.40 mm)	16 (0.40 mm)
DIAMETRO DE PAD O VIA	50 (1.27 mm)	40 (1.00 mm)	32 (0.80mm)	28 (0.70mm)
ANCHO DE TRAZA	12 (0.30mm)	10 (0.25 mm)	8 (0.20 mm)	6 (0.15mm)
SEPARACION ENTRE TRAZAS	12 (0.30mm)	10 (0.25 mm)	7 (0.18 mm)	6 (0.15mm)
SEPARACION ENTRE TRAZA Y PAD/VIA	10 (0.25 mm)	8 (0.20 mm)	6 (0.15mm)	6 (0.15mm)
DISTANCIA DE COBRE A BORDE	12 (0.30mm)	12 (0.30mm)	12 (0.30mm)	12 (0.30mm)
ALTURA - TRAZO DE LETRAS	48 - 8	36 - 6	30-5	30-5

FIGURA 3.15. Estandares fijados por la empresa argentina Ernesto Mayer SA¹.

El resultado del diseño puede verse en la figura 3.16, que es la cara superior de la placa donde se encuentran la mayoría de los componentes.

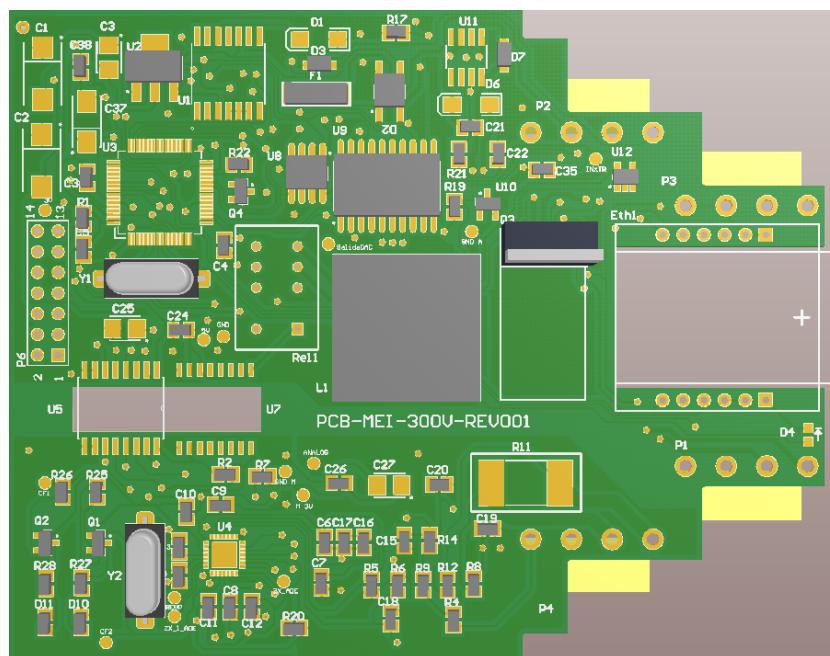


FIGURA 3.16. Imagen 3D de la parte frontal del PCB.

La cara inferior puede verse en la figura 3.17. Como esta cara se soldaría por refusión de una ola de estaño que viene de izquierda a derecha, tal como se ve en la imagen, se minimizó la cantidad de integrados en ella y se acomodaron los *footprints* para que no queden puntos ciegos sin soldar.

3.2. Diseño logrado

Luego de finalizada la realización de la primera versión del circuito esquemático, se generaron los debidos archivos de fabricación y se envió a fabricar el PCB.

¹<http://www.maverpcb.com/informacion-tecnica.html>

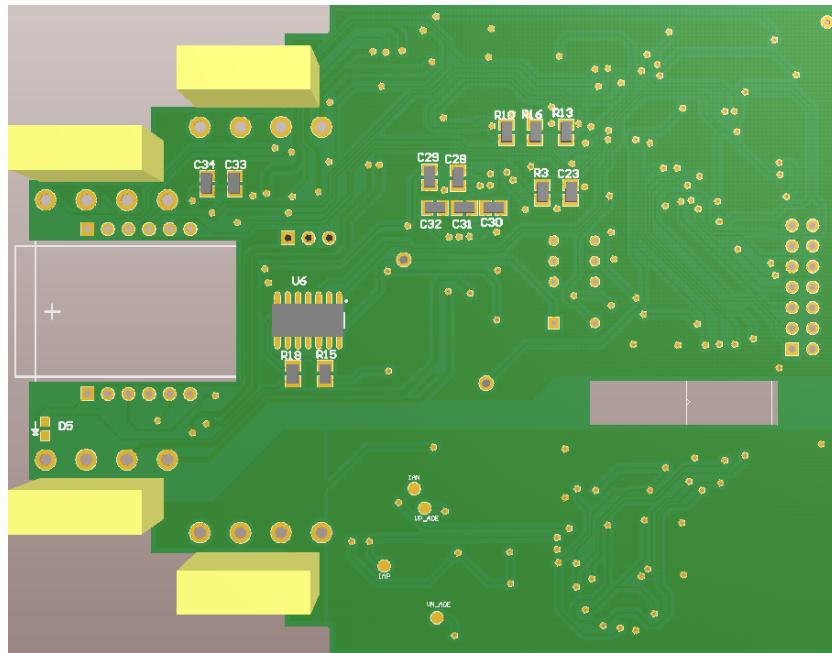


FIGURA 3.17. Imagen 3D de la parte trasera del PCB.

Una vez obtenido el PCB la empresa SERVAIND S.A. se encargo del soldado y ensamblado de la electrónica sobre la placa. El resultado final puede verse en la figura 3.18.

Debido a la inexperiencia en el uso del programa CAD de diseño se realizó un mal manejo del grid de trabajo en el esquemático. Algunos bloques de dispositivos fueron importados de bibliotecas externas y poseían medidas diferentes al grid de trabajo, por lo que el programa no detectaba como conexiones existentes a algunas conexiones realizadas. Este error fue trasladado al diseño del PCB por lo que las conexiones hechas no figuraban en la placa. Por ende las conexiones de alimentación del integrado de medición eran inexistentes como también la de los dos transistores discretos encargados de manejar el relé accionador y la señal de control.

Viendo las importantes faltantes en la placa, se procedió a corregir el diseño en el circuito esquemático y se decidió que se realizaría un segundo prototipo, que corregiría todos los problemas que presentó el primero. Para realizar las pruebas de funcionamiento las conexiones faltantes se realizaron soldando cables en los terminales correspondientes, esto puede verse en la figura 3.19. Una vez asegurado el funcionamiento de los módulos se procedió a testear la placa.

El segundo prototipo desarrollado puede verse en la figura 3.20. Este prototipo es la versión final del trabajo desarrollado.

3.3. Desarrollo de software

Una vez terminado el desarrollo de la primera versión del hardware se procedió a desarrollar un software capaz de controlar todos los dispositivos periféricos que fueron agregados a la placa. Inicialmente se comenzó a desarrollar la comunicación con el chip ADE 7953 y luego se procedió a realizar las diferentes comunicaciones. Por último se realizó el almacenamiento de datos en la EEPROM.



FIGURA 3.18. Primer PCB fabricado con conexiones arregladas.



FIGURA 3.19. Soldado de cables para corregir el prototipo del PCB.

Si bien inicialmente no se planteó que estructura debía seguir el software, este fue el resultado de una evolución natural de los requisitos y exigencias del hardware. Luego de finalizar el software que daba funcionalidad a la electrónica se procedió a desarrollar una segunda parte de manejo de datos y configuración. Esta última parte desarrollada consta del manejo del protocolo Modbus y de dos menús de configuraciones, el de usuario y el de calibración.

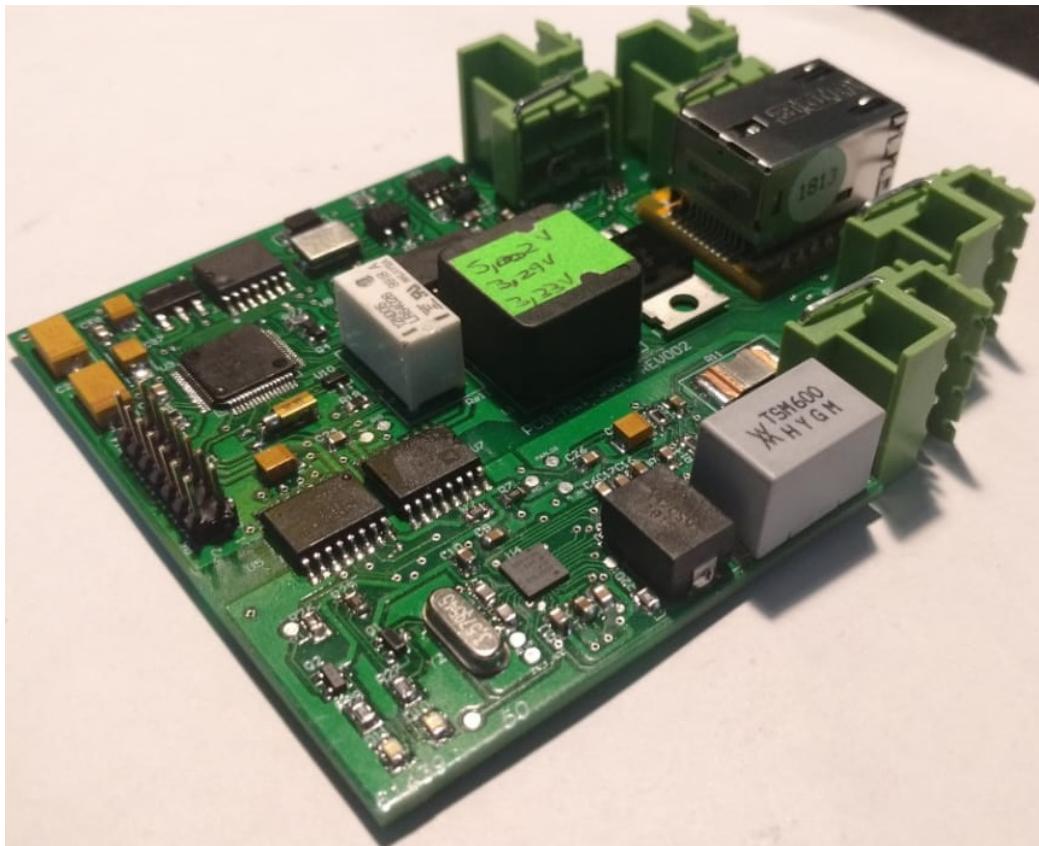


FIGURA 3.20. Segundo prototipo fabricado.

3.3.1. Software previos de base

Se desarrolló durante la cursada de la Especialización un programa en lenguaje C para hacer uso de un circuito integrado wiznet w5500 con un microcontrolador LPC4337. El wiznet w5500 es un controlador *Ethernet* que maneja protocolo TC-P/IP, comúnmente utilizado para realizar una conexión a internet de manera sencilla. Se pensó en el desarrollo de este programa para facilitar la implementación del futuro puerto *Ethernet* del dispositivo.

También se habían desarrollado como parte de las materias de la Especialización programas simples de bucle infinito con interrupción para la introducción de sistemas operativos, uno de estos programas fue usado como base para la elaboración del programa final.

3.3.2. Software del fabricante utilizados

El fabricante Texas Instrument provee en su página web para la familia de microcontroladores MSP430 una conjunto de software de ejemplo, escritos en lenguaje C y altamente comentados, que utilizan los diferentes módulos del microcontrolador. Para el trabajo se usaron varios de estos ejemplos para realizar la implementación del programa del dispositivo.

De los ejemplos escritos en C se usaron principalmente los programas que controlan la interfaz UART, los de manejo de memoria EEPROM y los referidos al manejo del módulo ADC. El resto de los ejemplos sirvieron como referencia a la hora de configurar el microcontrolador.

3.3.3. Especificaciones del software desarrollado

Ante la necesidad de realizar un software robusto y de uso instrumental se deseaba implementar un FreeRTOS pero debido a limitaciones de memoria del microcontrolador resultaba inviable hacerlo, por lo que se decidió realizar un programa *bare metal*.

El software realizado consiste en un bucle infinito controlado por tiempo (1 milisegundo) usando uno de los dos timers internos del microcontrolador. La principal tarea del programa es comunicarse constantemente con el integrado de medición ADE7953 y almacenar los datos de sus registros en la memoria local. Dentro del período de un milisegundo que dura el barrido del bucle se realizan otras tareas como comunicar datos a otros puertos, accionar el relé o cambiar los leds. En la figura 3.21 se presenta un diagrama de flujo simplificado para entender el funcionamiento del programa.

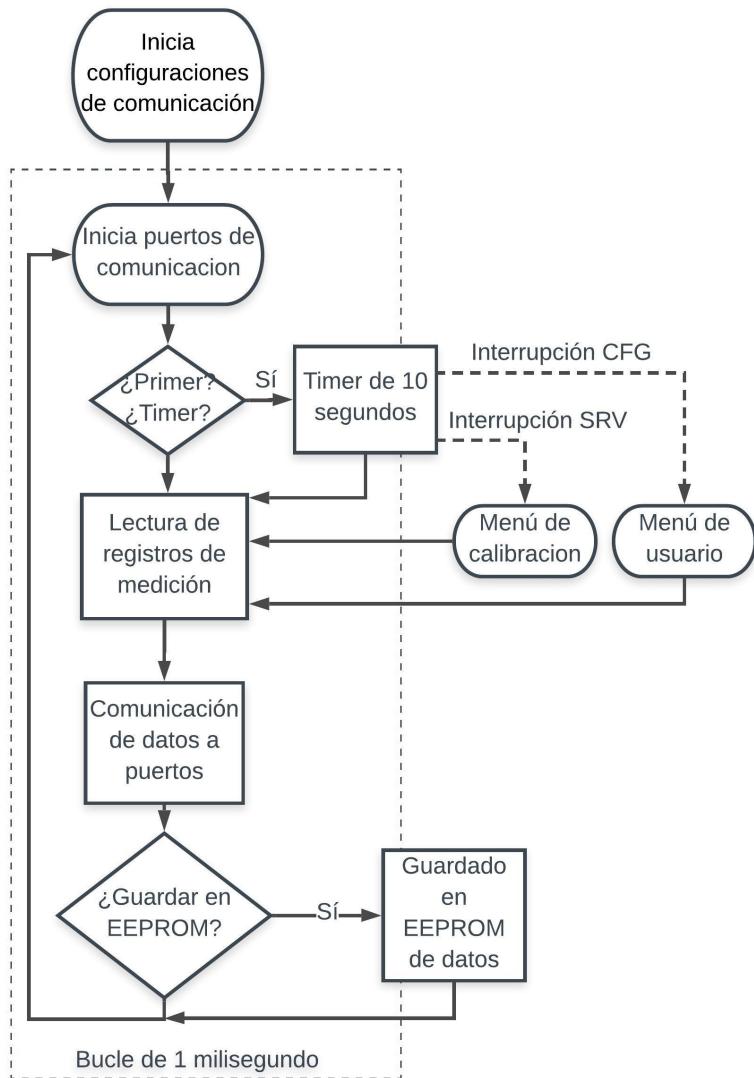


FIGURA 3.21. Diagrama de flujo del programa.

Comunicación con el ADE7953

La comunicación con el ADE7953 se realiza por UART por medio de un protocolo establecido por el fabricante del chip. Como la comunicación UART del chip está fijada en 4800 bps, cada frame que se le envía tiene un tiempo de 2,08 ms. El tiempo entre cada frame es de 0,2 ms a 4ms (el fabricante lo denomina como t1) como máximo y el tiempo de espera entre cada comunicación exitosa es de 6ms (el fabricante lo denomina como t2).

El ADE7953 tiene registros internos de 8, 16 y 24 bits donde almacena información de medición y de configuración para su funcionamiento. Estos registros son tanto de escritura como de lectura. La dirección de registros de 8 bits puede verse en la tabla 3.1.

Las operaciones de lectura con el ADE7953 pueden verse en la figura 3.22. Para leer un registro debe primeramente enviarse un byte de valor 0x35 y luego los bytes de la dirección del registro a leer, para luego recibir la cantidad de bytes según el tamaño del registro solicitado.

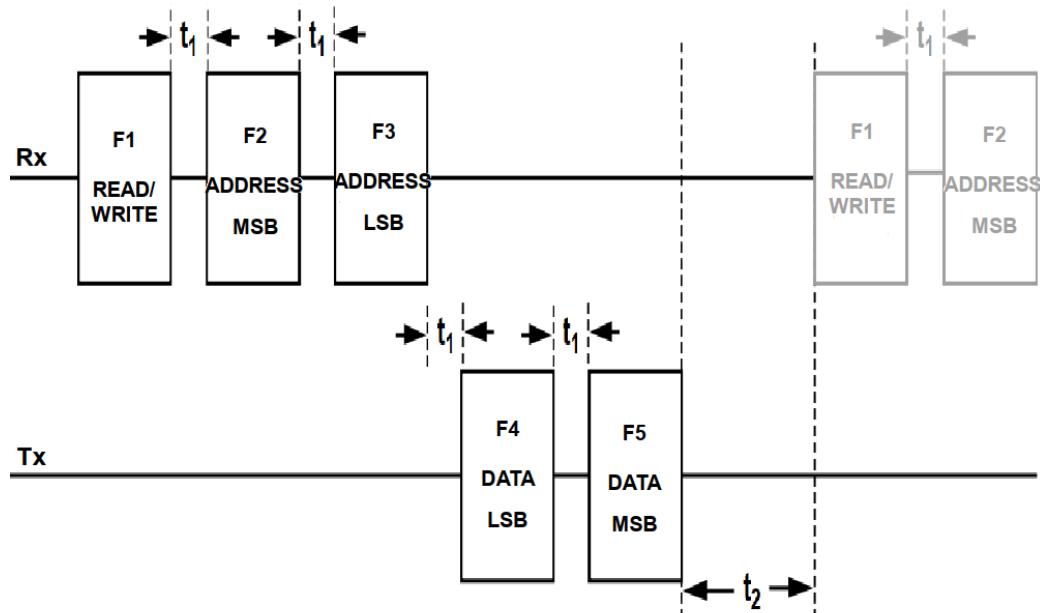


FIGURA 3.22. Lectura por UART del ADE7953.

Para la operación de escritura del ADE7953 debía enviarse un byte con el valor 0xCA, luego los bytes de la dirección a escribir y por último los datos en la misma cantidad de *frames* que espacio del registro, como puede observarse en la figura 3.23.

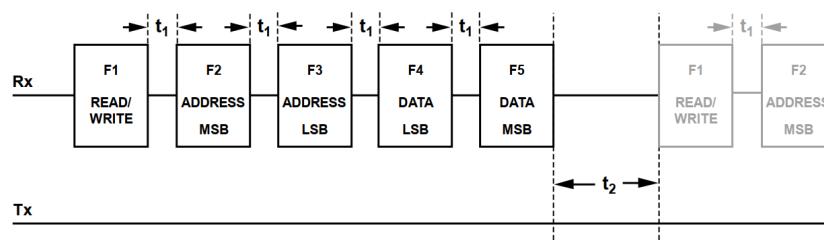


FIGURA 3.23. Escritura por UART del ADE7953.

Se configuró el programa de tal modo que lea los registros necesarios para monitorear la potencia eléctrica de la maquina donde se lo instale. Los registros que el programa lee y almacena son:

- AVA_24 potencia aparente instantánea.
- AWATT_24 potencia activa instantánea.
- AVAR_24 potencia reactiva instantánea.
- IA_24 corriente instantánea.
- V_24 tensión instantánea.
- IRMSA_24 corriente RMS.
- VRMS_24 tensión RMS.
- AENERGYA_24 energía activa.
- RENERGYA_24 energía reactiva.
- APENERGYA_24 energía aparente.
- VPEAK_24 pico de tensión.
- PFA_16 factor de potencia.
- Period_16 registro de período.

El programa tarda aproximadamente un total de 241 ms en leer la totalidad de estos registros usando el protocolo elegido, por lo que queda un amplio margen para realizar otras operaciones.

3.3.4. Funcionalidades del software

El software maneja un menú por el cual una terminal puede comunicarse con el programa por medio de un puerto serie para realizar determinadas configuraciones. La comunicación debe iniciarse por el puerto RS232 del dispositivo.

Al iniciar el programa, dentro de los primeros 10 segundos se puede enviar caracteres en código ANSI. Si se envían las letras “cfg” el programa inicia un menú, enviando caracteres con las opciones. Este menú puede verse en la figura 3.24.

El menú puede mostrar las variables que se están midiendo, puede configurar el puerto serie, modificar de qué variable depende la salida del bucle analógico y activar una alarma que acciona el relé dependiendo de una variable seleccionada.

Se desarrolló el manejo de una salida para una conexión de lazo de corriente de 4 a 20 mA, que es un estándar en la industria para el control de procesos, el programa puede hacer que esta salida sea proporcional a una variable de medición que puede seleccionarse en el menú serie de configuración.

El software almacena en la memoria del programa los valores de medición para poder comunicarlos ya sea por los puertos serie o el enlace de corriente.

Se guardan los valores de energía dentro de la EEPROM cada 40 segundos, se utiliza ese tiempo debido a que es el que tardaría el registro contador de energía en llenarse si se estuviera midiendo la máxima potencia posible.

²<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7953.pdf>

TABLA 3.1. Registros de 8 bit del ADE7953².

Address	Register Name	R/W	Default	Type	Register Description
0x000	SAGCYC	R/W	0x00	Unsigned	Sag line cycles No-load
0x001	DISNLOAD	R/W	0x00	Unsigned	detection disable Line cycle
0x004	LCYCMODE	R/W	0x40	Unsigned	accumulation mode configuration Voltage channel
0x007	PGA_V	R/W	0x00	Unsigned	gain configuration (Bits[2:0]) Current
0x008	PGA_IA	R/W	0x00	Unsigned	Channel A gain configuration (Bits[2:0]) Current
0x009	PGA_IB	R/W	0x00	Unsigned	Channel B gain configuration (Bits[2:0])
0x040	WRITE_PROTECT	R/W	0x00	Unsigned	Write protection bits (Bits[2:0]) Contains the type (read or write)
0x0FD	LAST_OP	R	0x00	Unsigned	of the last successful communication (0x35 =read; 0xCA = write) Contains the data
0x0FF	LAST_RWDATA	R	0x00	Unsigned	from the last successful 8-bit register communication
0x702	Version	R	N/A	Unsigned	Contains the silicon version number
0x800	EX_REF	R/W	0x00	Unsigned	Reference input configuration: set to 0 for internal; set to 1 for external

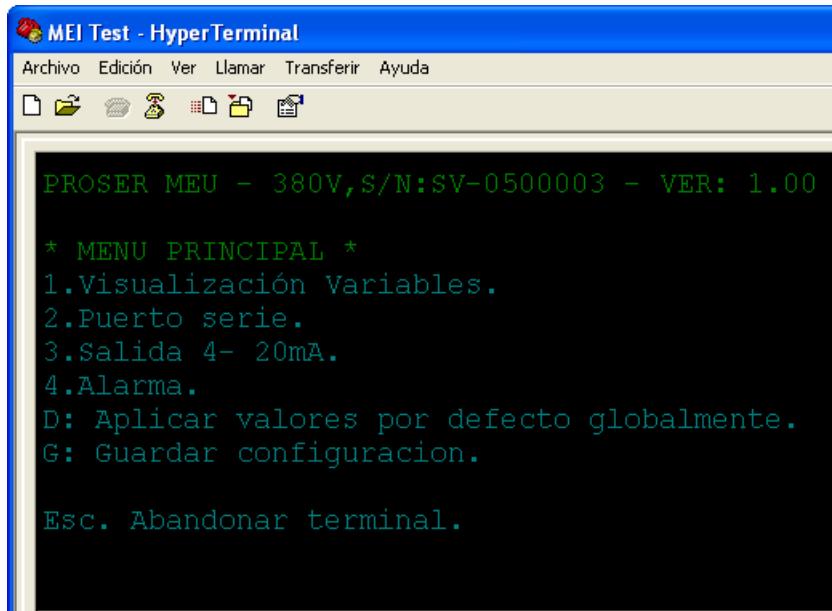


FIGURA 3.24. Menú serie de configuración.

Protocolo Modbus

El software que controla la placa maneja protocolo Modbus para comunicar registros internos en dos diferentes puertos de interfaces RS232 y RS485 según sean seleccionados. Para implementarlo se siguió como referencia el “Modicon Modbus Protocol Reference Guide PI-MBUS-300” y un *driver* libre, el Freemodbus.

El modo de acceder a los datos por Modbus es solicitando registros que el software maneja, la dirección de los registros puede verse en la tabla 3.2.

TABLA 3.2. Registros generados para la comunicación Modbus.

Dirección del Registro	Número del parámetro	Descripción	Unidades	Tipo de dato
7001	1	Tensión instantánea	Volts	Float 32
7003	2	Tensión rms	Volts	Float 32
7005	3	Corriente instantánea	Ampere	Float 32
7007	4	Corriente rms	Ampere	Float 32
7009	5	Potencia activa	Watt	Float 32
7011	6	Potencia reactiva	VA	Float 32
7013	7	Factor de potencia	-	Float 32
7015	8	Frecuencia	Hz	Float 32
7017	9	Energía reactiva medida	Joules	Float 32
7019	10	Energía activa total acumulada	kWh	Float 32

Menú de calibración

Además del menú de configuración, se desarrolló un segundo menú denominado menú de calibración, que puede verse en la figura 3.25. Este menú también puede mostrar las variables que se encuentra midiendo el dispositivo, pero además permite realizar modificaciones sobre cómo se calculan las variables a medir. En este

menú a diferencia del de configuración, en cada cambio que se realice se guarda en la memoria EEPROM para mantener los parámetros de calibración.

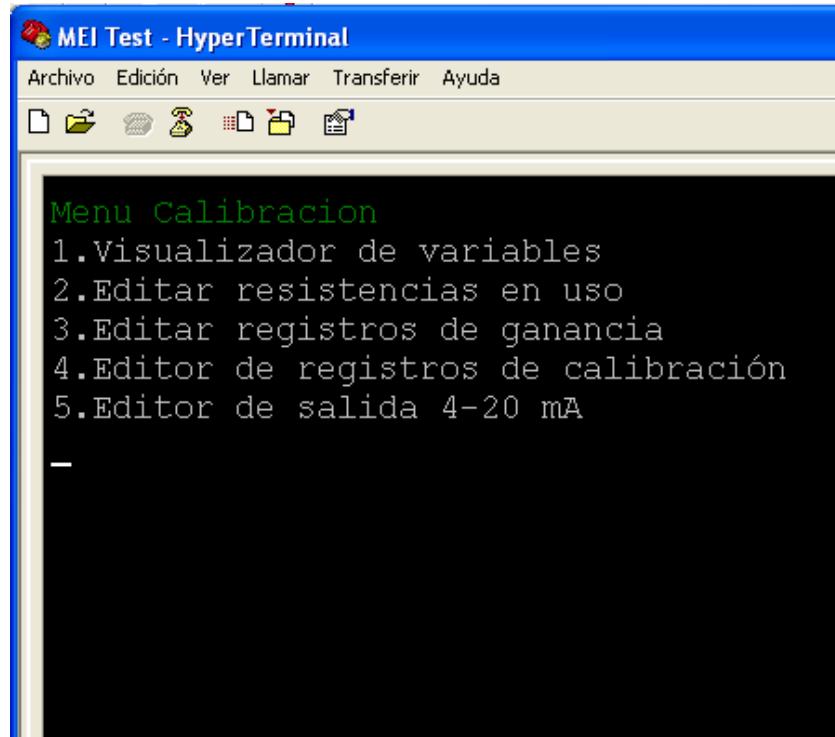


FIGURA 3.25. Menú de calibración.

El menú permite editar, según las resistencias soldadas en la placa, el cálculo de medición. Se puede especificar en la opción 2 del menú, que resistores posee el dispositivo para así realizar los cálculos correctos. En esta parte del desarrollo del software se parametrizan todas las variables que se involucran en el cálculo, por lo que se debe especificar qué valores de resistencia se involucran en la medición.

En la opción 3 del menú, se pueden editar las ganancias del chip de medición, el microcontrolador se comunica con el ADE7953 y configura el amplificador de ganancia programable según las opciones elegidas. Se puede variar qué ganancia usar para aumentar la precisión del cálculo. Ya que al variar la ganancia varían los rangos de medición, el menú muestra en esta sección qué valores límite puede medir el dispositivo.

En la opción 4 del menú, se pueden editar los registros de calibración. Esta opción sirve para calibrar el dispositivo. Según que variable física se elija, debe inyectarse al dispositivo los valores que este solicite para que realice la calibración. El menú solicita 5 valores de medición para realizar los cálculos. Un documento que detalla y resume los procesos de calibración fue realizado y enviado a la empresa.

La última opción del menú permite variar los valores de cálculo de la salida 4-20 mA de manera manual. La opción permite variar la corriente que el software interpreta como mínima o también la que interpreta como máxima, para adecuarse al valor real.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

En este capítulo se explican los diferentes ensayos y tareas que se realizaron para testear tanto el software desarrollado como el hardware fabricado.

4.1. Pruebas Realizadas

Todas las pruebas realizadas se hicieron sobre el prototipo diseñado, que fue fabricado por la empresa Servaind SA. Debido a que la empresa se encuentra radicada en CABA, todas las pruebas con el prototipo fabricado fueron realizadas a distancia por medio de conexiones remotas.

4.1.1. Pruebas de comunicación con el ADE7953

En el inicio del desarrollo del software, se realizaron pruebas midiendo los pines de comunicación entre el microcontrolador y el ADE7953.

Una vez armada la comunicación dentro del programa, se midieron los tiempos de la trama de mensaje UART con un osciloscopio. También se realizaron pruebas de tiempo realizando una serie de pulsos cada milsegundo, la señal puede verse en la figura 4.1.

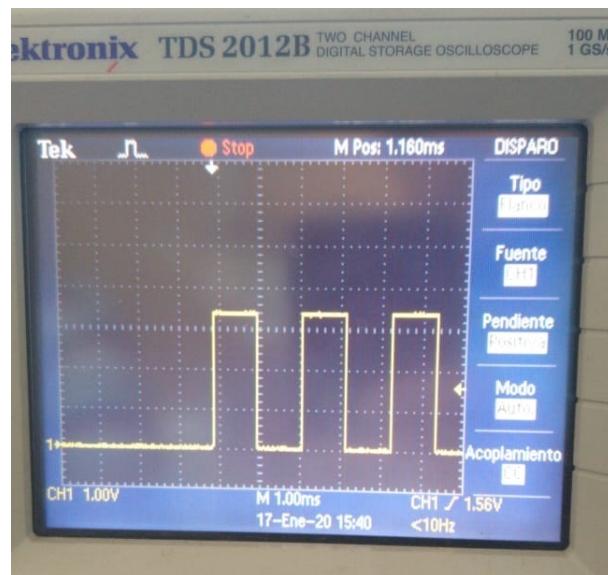


FIGURA 4.1. Pulso de 1 milsegundo en el Osciloscopio.

En el osciloscopio se verificó que los tiempos de la trama fueran los correctos, siguiendo el esquema de la figura 3.22. Con el debugger del MSP430 se verificaron las respuestas en los registros. Se enviaron tramas para que el ADE7953 responda los registros de la tabla 3.1, en la figura 4.2 se ve en la memoria del programa la respuesta al registro LAST_OP durante las pruebas.

Expression	Value
a	'\0' (0x00)
a	'\0' (0x00)
DATA_ADE[a...]	<unavailable>
DATA_ADE	<array>"5"
[0]	'5' (0x35)
[1]	'\0' (0x00)
[2]	'y' (0xFF)
P3DIR	'.-' (0x04)
P3OUT	0b11110000
P3SEL	
Voltaje_Me...	0
Voltaje_rms	0

FIGURA 4.2. Variables leídas por el microcontrolador durante las pruebas.

4.1.2. Testeo del protocolo Modbus

Una vez finalizado el desarrollo del protocolo Modbus, se procedió a conectar por el puerto RS232 de la placa a la computadora del banco de trabajo. Se leyeron todos los registros disponibles. Esto puede verse en la figura 4.3.

Pt. No.	Value	Time
07001	186.415176	05 17
07003	221.564590	05 17
07005	0.647912	05 17
07007	0.484126	05 17
07009	107.199982	05 17
07011	-0.756768	05 17
07013	-1.000031	05 17
07015	50.000000	cros pre 05 17
07017	-0.302023	cup = 4
07019	0.000000	

FIGURA 4.3. Lectura de registros Modbus en la computadora del banco de pruebas.

Se forzaron errores para observar si el software respondía adecuadamente. Los errores probados fueron:

- Función ilegal
- Dirección de dato ilegal

- Valor de dato ilegal

Luego se testeo el mismo protocolo sobre la interfaz RS485 para asegurar que no hubiera ninguna diferencia con la interfaz RS232. Gracias a esta segunda prueba se había detectado errores en el software, la biblioteca se inicializaba cada 2 milisegundos. Al finalizar las pruebas, todos los errores encontrados fueron corregidos.

4.1.3. Testeo de la calibración

Finalizado el desarrollo del menú principal dentro del programa, se procedió a testear las mediciones que realizaba el dispositivo con un variador de tensión alterna y una carga conocida. La carga conocida usada fue una lámpara de 100 W. Esta fue utilizada principalmente durante el desarrollo del programa al interpretar los valores de los registros de medición del ADE7953.

El variador de tensión alterna puede verse en la figura 4.4. Este fue utilizado al finalizar el desarrollo para realizar pruebas con respecto a la calibración. Se conectó el variador al dispositivo y se probaron diferentes rangos de tensión, realizando pequeños incrementos y verificando con un multímetro. Las mediciones fueron comparadas con un multímetro digital “Gw Insteek Gdm360”.



FIGURA 4.4. Banco de pruebas con el autotransformador.

Los procedimientos para realizar la calibración fueron los recomendados por la hoja de aplicación del fabricante, se imitó el esquema de la figura 4.5.

4.2. Verificación de requerimientos

4.2.1. Grupo de requerimientos referidos a alimentación eléctrica

Se conectó el prototipo a un variador de alimentación para probar las diferentes tensiones que soporta para encenderse. Para probar su conector de alimentación, se lo conectó con un fusible. Esto puede verse en la figura 4.6.

¹<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1118.pdf>

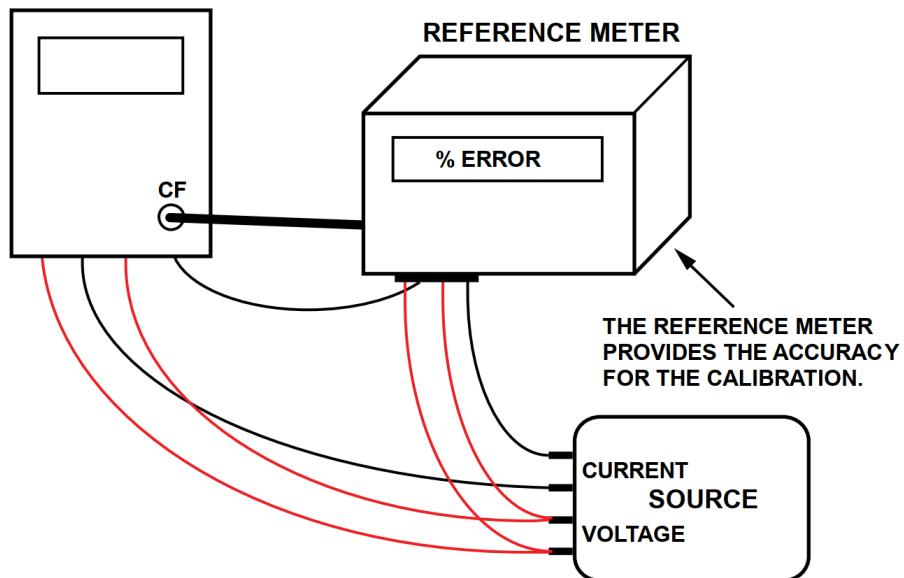


FIGURA 4.5. Esquema de calibración según la hoja de aplicación del integrado ADE7953. La hoja de aplicación denominada AN-1118, se encuentra disponible en la pagina web del fabricante¹.



FIGURA 4.6. Conexión del prototipo durante las pruebas.

4.2.2. Grupo de requerimientos referidos a medición de potencia del equipo

En el prototipo fabricado se implementó una resistencia shunt de 4 mili ohms para realizar mediciones hasta 10 amperes. La intensidad de corriente eléctrica que tolera el shunt de medición en el prototipo es de alrededor de 30 amperes. También se implementó un arreglo de resistores de $1 \text{ M}\Omega$ para lograr medir efectivamente hasta 495 volts.

Durante las pruebas, se conectó al prototipo una carga con diferentes valores de

corriente y tensión, de este modo se pudo verificar la posibilidad de medir la potencia solicitada en los requerimientos. Las mediciones fueron comparadas con un multímetro para así lograr el objetivo de medir con tolerancias inferiores al 15 %. El valor de error se encontraba cerca del 4 %.

4.2.3. Grupo de requerimientos referidos a Interfaces de comunicación

La interfaz RS232 fue conectada exitosamente a la computadora del banco de trabajo por un puerto serie y utilizada para comunicaciones serie con el microcontrolador. La conexión realizada puede verse en la figura 4.7.



FIGURA 4.7. Prueba de la interfaz RS232.

La interfaz RS485 fue conectada exitosamente a través de un adaptador de nivel por puerto serie a la computadora, y utilizada durante las pruebas de protocolo Modbus.

Se instaló en el prototipo el módulo wiz820io, de puerto Ethernet, para que en el futuro se pueda programar en el dispositivo una interfaz Ethernet.

4.2.4. Grupo de requerimientos referidos a diseño del circuito eléctrico

Se usó el microcontrolador MSP430F2418 de Texas Instruments con una referencia de tensión externa y un cristal oscilador de 32768 Hz. Este puede verse soldado en la placa en la figura 4.8.

Un polyswitch que protege a la placa de sobre corriente puede verse en la figura 4.8 en el sector superior derecha, también puede verse en la misma figura, en la parte inferior derecha, un relé soldado.



FIGURA 4.8. Area del microcontrolador en el dispositivo.

4.2.5. Grupo de requerimientos referidos a diseño de impresión del circuito

El diseño de la parte inferior del PCB se realizó teniendo en cuenta que el tipo de soldado fuese por ola de refusión. Los componentes fueron alineados teniendo en cuenta si provocarían sombras de estaño. El diseño puede verse en la figura 3.17.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones generales

Del trabajo realizado se logró obtener un dispositivo medidor de potencia eléctrica con tolerancias aceptables, capaz de transmitir datos en un entorno industrial.

El trabajo demostró que a partir de requerimientos establecidos por un cliente se puede diseñar la electrónica necesaria para cumplirlos. También se demuestra que el diseño y programación de un prototipo electrónico puede llevarse a cabo de manera completamente remota.

Se cumplieron los requisitos planteados al comienzo del trabajo. Durante la elaboración se encontraron otras necesidades que deberán ser satisfechas en una actualización del software.

Se realizó un manual de usuario para poder comercializar el dispositivo. El manual incluye las limitaciones del dispositivo como también especificaciones de cómo usarlo.

En el desarrollo de este trabajo se aplicaron conocimientos obtenidos de las materias de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos. Podemos resaltar:

- Técnicas de ingeniería de software y uso de repositorios para mantener organizadas las versiones tanto del software como del hardware.
- De la materia “Diseño de PCB” los métodos para nombrar y realizar esquemas prolijos en circuitos de varias hojas.
- Los fundamentos de la materia “Diseño para la manufactura electrónica” fueron claves para la fabricación del PCB.
- Los conocimientos de programación y arquitectura de microcontroladores facilitaron la curva de aprendizaje del microcontrolador usado.
- Los conocimientos de protocolos y comunicaciones digitales al implementar en el software protocolos comúnmente conocidos y protocolos nuevos.

5.2. Próximos pasos

El trabajo elaborado consideraba que en el dispositivo debía implementarse un puerto LAN Ethernet en un futuro. Durante el desarrollo del trabajo se encontraron posibles evoluciones del proyecto. Las siguientes tareas a realizar son:

- Implementar en el software un driver previamente desarrollado para el puerto LAN Ethernet.
- También agregaría valor al trabajo elaborar una aplicación, tipo web app o más compleja, para agregar un método adicional de configurar el dispositivo como también visualizar los datos que este comunica.

Bibliografía

- [1] SERVAIND S.A. 2020. URL: <http://www.servaind.com/>.
- [2] C. Micheal, O.A. Ogungbenro y Kennedy Okafor. «Digital Metering System: A Better Alternative for Electromechanical Energy Meter in Nigeria». En: *International Journal of Academic Research* 3 (ene. de 2011), págs. 189-192.
- [3] Ján Hribik y col. «Digital Power and Energy Measurement». En: (2004).
- [4] Hernán Ferreyra. *Medidor de energía eléctrica industrial con telemetría*. Plan de Proyecto del Trabajo Final de Carrera de Especialización de Sistemas Embebidos. LSE. 2018. URL: <http://laboratorios.fi.uba.ar/lse/tesis.html>.
- [5] *PZEM-004T V30 User Manual*. Peacefair. 2019. URL: <https://innovatorsguru.com/wp-content/uploads/2019/06/PZEM-004T-V3.0-Datasheet-User-Manual.pdf>.
- [6] *MSP430F261x, MSP430F241x Mixed-Signal Microcontrollers*. SLAS541L. REVISED MAY 2020. Texas Instrument. 2007. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f2618.pdf>.
- [7] Stewart Christie Randy Johnson. *JTAG 101 - IEEE 1149.x and Software*. 321095. Intel Corporation. January 2009. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/white-papers/jtag-101-ieee-1149x-paper.pdf>.
- [8] *Developer's Guide - MSPDebugStack*. SLAU656B. Revised June 2016. Texas Instrument. 2015. URL: <https://www.ti.com/lit/ug/slau656b/slau656b.pdf?ts=1594684069406>.
- [9] W. Badawy y G.A. Julien. *System-on-Chip for Real-Time Applications*. The Springer International Series in Engineering and Computer Science. Springer US, 2002. ISBN: 9781402072543. URL: <https://books.google.com.ar/books?id=Ha76NqrqPVIC>.
- [10] B. Drury y col. *Control Techniques Drives and Controls Handbook*. IEE Power Series. Institution of Engineering y Technology, 2001. ISBN: 9780852967935. URL: <https://books.google.com.ar/books?id=vDQHzeEmSfUC>.
- [11] Dr. techn. Christian Walter. *Freemodbus*. 2018. URL: <https://github.com/cwalter-at/freemodbus>.