

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
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 Beaufre (FIUBA, UTN-FRBA)  
Dr. Mariano García Inza (FIUBA)  
Esp. Ing. Sergio Renato De Jesús Meleán (FIUBA)

*Este trabajo fue realizado en las Ciudad Autónoma de Buenos Aires, entre agosto  
de 2018 y diciembre de 2019.*



## *Resumen*

Este trabajo presenta el desarrollo de un prototipo de un medidor digital de potencia eléctrica con telemetría en vínculo con la empresa Servaind S.A. Incluye tanto al diseño de hardware como a su respectivo firmware. El prototipo es capaz de realizar la medición de tensión alterna, corriente alterna y potencia de una máquina o tablero eléctrico, y provee los valores medidos mediante diferentes salidas de sí mismo. Además, el dispositivo es capaz de realizar un corte de energía en caso de alarma por tensión o corriente y de almacenar datos.

Para llevar a cabo el trabajo se utilizaron las técnicas de diseño de hardware aprendidas en las materias de diseño en Kicad, también procedimientos y fundamentos para la manufactura de electrónica, conocimientos sobre protocolos de comunicaciones digitales, conocimientos sobre programación y arquitectura de microcontroladores, uso de protocolos de comunicaciones, elaboración de informes y gestión de proyectos en ingeniería y sistemas de versionado tanto para el software como para el hardware. En suma, se empleó la totalidad de los conocimientos que se dictan en los cursos de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos (CESE).



## *Agradecimientos*

Gracias a mi familia por su apoyo incondicional, a mi tutor y profesores que supieron guiarme. También a Sebastián Bondar que colaboró en el desarrollo de este trabajo.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción General</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción general del trabajo y conceptos clave . . . . .	1
1.1.1. Sistemas electrónicos para mediciones eléctricas . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Objetivos y alcance . . . . .	4
1.3.1. Objetivos del desarrollo . . . . .	4
1.3.2. Alcances . . . . .	4
<b>2. Introducción Específica</b>	<b>5</b>
2.1. Estructura del proyecto . . . . .	5
2.1.1. Uso de mayúscula inicial para los título de secciones . . . . .	5
2.1.2. Este es el título de una subsección . . . . .	6
2.1.3. Figuras . . . . .	6
2.1.4. Tablas . . . . .	7
2.1.5. Ecuaciones . . . . .	8
<b>Bibliografía</b>	<b>11</b>





# Índice de figuras

1.1. Medidor electrónico comercial. . . . .	2
1.2. Módulo de medición de energía eléctrica con comunicación serie universal. . . . .	3
1.3. Gráfico de medición de potencia que muestran el encendido de un frigorífico. . . . .	3
1.4. Ejemplo de dispositivo fabricado por la empresa privada. . . . .	4
2.1. Ilustración del cuadrado azul que se eligió para el diseño del logo. . . . .	6
2.2. Imagen tomada de la página oficial del procesador <sup>1</sup> . . . . .	7
2.3. El lector no sabe por qué de pronto aparece esta figura. . . . .	7



# Índice de Tablas

2.1. caption corto . . . . .	8
------------------------------	---



*Para Darío.*



# Capítulo 1

## Introducción General

En este capítulo se describe la motivación del trabajo y sus objetivos, con una pequeña explicación de algunos conceptos fundamentales para entenderlo.

### 1.1. Descripción general del trabajo y conceptos clave

El trabajo desarrollado consiste en un sistema adquirente de datos con los sensores necesarios para una medición de potencia eléctrica, en otras palabras, un medidor digital de energía eléctrica. El trabajo fue desarrollado para SERVAIND S.A. que es una empresa privada localizada en Argentina.

El término medida es utilizado para describir el acto de determinar el valor o tamaño de una cantidad por ejemplo una corriente. Hay un gran número de tipos de cantidades en el campo de la ingeniería que necesitan ser medidas o expresadas en el trabajo día a día. Esto incluye cantidades físicas, mecánicas y eléctricas por ejemplo. De modo de almacenar y comparar estas magnitudes de cantidad algunas magnitudes deben ser tomadas como base o unidad [1]. Estas unidades medidas son de interés y por lo tanto se almacenan en el medidor digital.

La adquisición de datos o adquisición de señales consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otros dispositivos electrónicos (sistema digital). Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital.[2]

Un convertidor de señal analógica a digital (ADC) es un dispositivo electrónico capaz de convertir una señal analógica, ya sea de tensión o corriente, en una señal digital mediante un cuantificador y codificador.

#### 1.1.1. Sistemas electrónicos para mediciones eléctricas

Las aplicaciones más tempranas de computadores digitales a problemas de sistemas de potencia datan de alrededor de 1940. La mayoría de las aplicaciones tempranas estaban limitadas en alcance debido a la pequeña capacidad de las tarjetas calculadoras usadas en ese período. Computadoras digitales de larga escala estuvieron disponibles a mediados de 1950, y el éxito inicial de programas de flujo de carga llevó al desarrollo de programas para cálculos de corto circuitos y estabilidad [3].

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, eficiencia y 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 los establecidos por la IEC (International Electrotechnical Commission) [4].



FIGURA 1.1: Medidor electrónico comercial.

La exactitud del medidor eléctrico digital depende de la precisión del circuito analógico de entrada analógica, la del conversor analógico-digital y la de los cálculos digitales [5].

Los convertidores analógicos-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.

La modulación sigma-delta fue introducida en 1962 y no ganaría importancia hasta recientes desarrollos en tecnologías VLSI (integración a escala muy grande) que proveen fines prácticos para implementar complejos circuitos de procesamiento de señales [6].

## 1.2. 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 como así también medidores digitales de energía de diferentes marcas para diferentes entornos, lo que nos permite pensar que un dispositivo similar podría ser fabricado en la Argentina.

Los módulos de medición pueden servir como un monitoreo de primera instancia y funcionar como un método preventivo de fallas, dado que los parámetros de consumo dan una idea de estado de las máquinas. El módulo de la figura 1.2 fue usado en un trabajo de grado para un local comercial cuyo resultados pueden verse en la figura 1.3.

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

Estas gráficas sirvieron para realizar observaciones como el encendido de un motor trifásico y malfuncionamiento de equipos de refrigeración.

Desde el punto de vista de la empresa privada, el trabajo se planteó ante la necesidad de cuantificar consumos energéticos de procesos industriales para supervisar





FIGURA 1.2: Módulo de medición de energía eléctrica con comunicación serie universal.

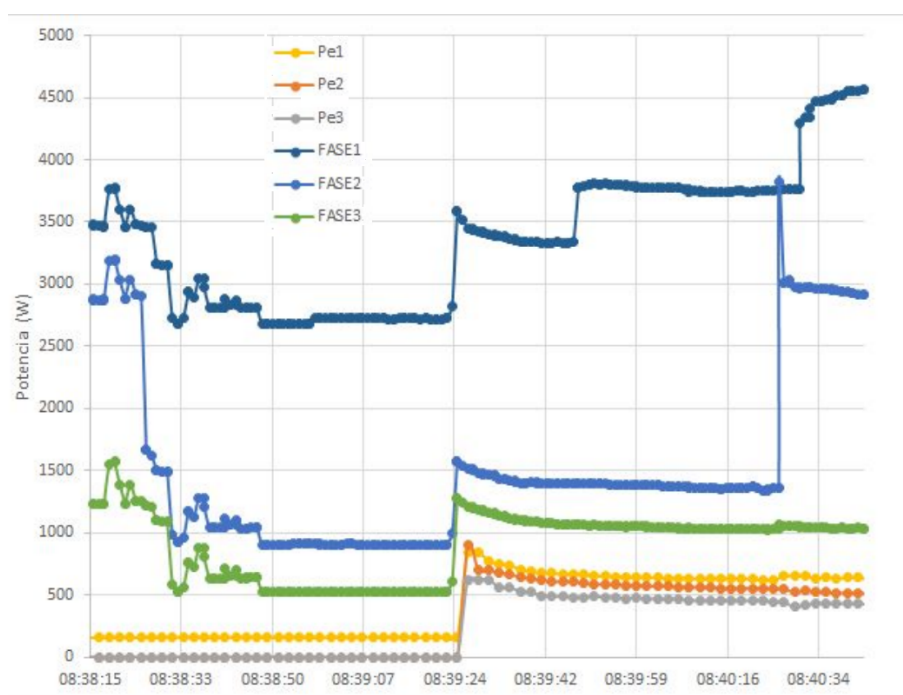


FIGURA 1.3: Gráfico de medición de potencia que muestran el encendido de un frigorífico.

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.

## 1.3. Objetivos y alcance

### 1.3.1. 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 pretende 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 los utilizados por las carcasas estándar que utiliza la empresa, como puede verse en la figura 1.4.



FIGURA 1.4: Ejemplo de dispositivo fabricado por la empresa privada.

Además se espera que el firmware maneje protocolo modbus y comunique las variables medidas a través de los puertos de comunicación. Físicamente se espera que el dispositivo sea capaz de comunicar por puertos serie RS-232 y RS-485, y ser diseñado pensando en su uso industrial (el dispositivo deberá ser robusto).

### 1.3.2. Alcances

El trabajo abarca desde el planteo, diseño y fabricación de un pcb, la selección de componentes la elaboración del esquemático de conexiones lógicas, elaboración del pcb y su diseño teniendo en cuenta la fabricación de este hasta inclusive la elaboración de un prototipo y testeo sobre este.

También se espera que se realice un firmware para el funcionamiento del dispositivo, teniendo en cuenta que el software debe incluir métodos de configuración para un futuro usuario.

## Capítulo 2

# Introducción Específica

En el capítulo se realizará una descripción sobre el planeamiento y estructura del proyecto, los requerimientos de este y sus características principales.

### 2.1. Estructura del proyecto

Inicialmente se realizó un plan de trabajo donde se plantea cómo se afronta el problema y como se lo resolverá.

El proyecto consta de dos partes principales, hardware y software.

Para el hardware se planteó un esquema que sirvió de guía al realizar el esquemático, que puede verse en la figura 5. El esquema asume/presupone que se usará una entrada de alimentación de continua, que el hardware poseerá una fuente switching, puerto de configuración, aislacion, un puerto serie y un relé.

Para el software no se planteó ningún esquema inicial. En los documentos de planeamiento se establece que la configuración del prototipo "... se llevará a cabo mediante un puerto USB utilizando un terminal estándar de Windows (software de configuración embebido). Se podrá visualizar las variables instantáneas, configurar el puerto de comunicaciones y realizar ajustes de zero – span para calibración."

Por lo que el enfoque inicial del trabajo fue en el armado de la electrónica del prototipo, quedando el software relegado a ser un elemento secundario del proyecto.

#### 2.1.1. Uso de mayúscula inicial para los título de secciones

Si en el texto se hace alusión a diferentes partes del trabajo referirse a ellas como capítulo, sección o subsección según corresponda. Por ejemplo: "En el capítulo 1 se explica tal cosa", o "En la sección ?? se presenta lo que sea", o "En la subsección 2.1.2 se discute otra cosa".

Entre párrafos sucesivos dejar un espacio, como el que se observa entre este párrafo y el anterior. Pero las oraciones de un mismo párrafo van en forma consecutiva, como se observa acá. Luego, cuando se quiere poner una lista tabulada se hace así:

- Este es el primer elemento de la lista.
- Este es el segundo elemento de la lista.

Notar el uso de las mayúsculas y el punto al final de cada elemento.

Si se desea poner una lista numerada el formato es este:

1. Este es el primer elemento de la lista.
2. Este es el segundo elemento de la lista.

Notar el uso de las mayúsculas y el punto al final de cada elemento.

### 2.1.2. Este es el título de una subsección

Se recomienda no utilizar **texto en negritas** en ningún párrafo, ni tampoco texto subrayado. En cambio sí se sugiere utilizar *texto en cursiva* donde se considere apropiado.

Se sugiere que la escritura sea impersonal. Por ejemplo, no utilizar “el diseño del firmware lo hice de acuerdo con tal principio”, sino “el firmware fue diseñado utilizando tal principio”. En lo posible hablar en tiempo pasado, ya que la memoria describe un trabajo que ya fue realizado.

Se recomienda no utilizar una sección de glosario sino colocar la descripción de las abreviaturas como parte del mismo cuerpo del texto. Por ejemplo, RTOS (*Real Time Operating System*, Sistema Operativo de Tiempo Real) o en caso de considerarlo apropiado mediante notas a pie de página.

Si se desea indicar alguna página web utilizar el siguiente formato de referencias bibliográficas, dónde las referencias se detallan en la sección de bibliografía de la memoria, utilizado el formato establecido por IEEE en [IEEE:citation]. Por ejemplo, “el presente trabajo se basa en la plataforma EDU-CIAA-NXP, la cual se describe en detalle en [7]”.

### 2.1.3. Figuras

Al insertar figuras en la memoria se deben considerar determinadas pautas. Para empezar, usar siempre tipografía claramente legible. Luego, tener claro que es incorrecto escribir por ejemplo esto: “El diseño elegido es un cuadrado, como se ve en la siguiente figura:”



La forma correcta de utilizar una figura es la siguiente: “Se eligió utilizar un cuadrado azul para el logo, el cual se ilustra en la figura 2.1”.



FIGURA 2.1: Ilustración del cuadrado azul que se eligió para el diseño del logo.

El texto de las figuras debe estar siempre en español, excepto que se decida reproducir una figura original tomada de alguna referencia. En ese caso la referencia de la cual se tomó la figura debe ser indicada en el epígrafe de la figura e incluida como una nota al pie, como se ilustra en la figura 2.2.



FIGURA 2.2: Imagen tomada de la página oficial del procesador<sup>1</sup>.

La figura y el epígrafe deben conformar una unidad cuyo significado principal pueda ser comprendido por el lector sin necesidad de leer el cuerpo central de la memoria. Para eso es necesario que el epígrafe sea todo lo detallado que corresponda y si en la figura se utilizan abreviaturas entonces aclarar su significado en el epígrafe o en la misma figura.



FIGURA 2.3: El lector no sabe por qué de pronto aparece esta figura.

Nunca colocar una figura en el documento antes de hacer la primera referencia a ella, como se ilustra con la figura 2.3, porque sino el lector no comprenderá por qué de pronto aparece la figura en el documento, lo que distraerá su atención.

#### 2.1.4. Tablas

Para las tablas utilizar el mismo formato que para las figuras, sólo que el epígrafe se debe colocar arriba de la tabla, como se ilustra en la tabla 2.1. Observar que sólo algunas filas van con líneas visibles y notar el uso de las negritas para los encabezados. La referencia se logra utilizando el comando `\ref{<label>}` donde label debe estar definida dentro del entorno de la tabla.

```

\begin{table}[h]
\centering
\caption[caption corto]{caption largo más descriptivo}
\begin{tabular}{l c c}
\toprule
\textbf{Especie} & & \textbf{\& \textbf{Tamaño} \& \textbf{Valor aprox.}} \\
\midrule
Amphiprion Ocellaris & \& 10 cm & \$ 6.000 \\
Hepatus Blue Tang & \& 15 cm & \$ 7.000 \\
Zebrasoma Xanthurus & \& 12 cm & \$ 6.800

```

<sup>1</sup><https://goo.gl/images/i7C70w>

```

\bottomrule
\hline
\end{tabular}
\label{tab:peces}
\end{table}

```

TABLA 2.1: caption largo más descriptivo

Especie	Tamaño	Valor aprox.
Amphiprion Ocellaris	10 cm	\$ 6.000
Hepatus Blue Tang	15 cm	\$ 7.000
Zebrasoma Xanthurus	12 cm	\$ 6.800

En cada capítulo se debe reiniciar el número de conteo de las figuras y las tablas, por ejemplo, Fig. 2.1 o Tabla 2.1, pero no se debe reiniciar el conteo en cada sección. Por suerte la plantilla se encarga de esto por nosotros.

### 2.1.5. Ecuaciones

Al insertar ecuaciones en la memoria estas se deben numerar de la siguiente forma:

$$ds^2 = c^2 dt^2 \left( \frac{d\sigma^2}{1 - k\sigma^2} + \sigma^2 [d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2] \right) \quad (2.1)$$

Es importante tener presente que en el caso de las ecuaciones estas pueden ser referidas por su número, como por ejemplo “tal como describe la ecuación 2.1”, pero también es correcto utilizar los dos puntos, como por ejemplo “la expresión matemática que describe este comportamiento es la siguiente:”

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(\mathbf{r})\Psi = -i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (2.2)$$

Para las ecuaciones se debe utilizar un tamaño de letra equivalente al utilizado para el texto del trabajo, en tipografía cursiva y preferentemente del tipo Times New Roman o similar. El espaciado antes y después de cada ecuación es de aproximadamente el doble que entre párrafos consecutivos del cuerpo principal del texto. Por suerte la plantilla se encarga de esto por nosotros.

Para generar la ecuación 2.1 se utilizó el siguiente código:

```

\begin{equation}
\label{eq:metric}
ds^2 = c^2 dt^2 \left( \frac{d\sigma^2}{1-k\sigma^2} + \right.
\sigma^2 \left[ d\theta^2 +
\sin^2 \theta d\phi^2 \right] \left. \right)
\end{equation}

```

Y para la ecuación 2.2:

```

\begin{equation}
\label{eq:schrodinger}

```

---

```
\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi + V(\mathbf{r})\Psi =  
-i\hbar \frac{\partial\Psi}{\partial t}  
\end{equation}
```





# Bibliografía

- [1] R. Sedha, *Electronic Measurement and Instrumentation*. S Chand & Co Ltd, 2013, ISBN: 8121997755, 978-8121997751.
- [2] NationalInstrument, *¿Qué es Adquisición de Datos?*, Disponible: 2019-11-04, 2019. dirección: <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>.
- [3] «IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (Brown Book)», *IEEE Std 399-1997*, págs. 1-488, 1998. DOI: [10.1109/IEEESTD.1998.88568](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.88568).
- [4] C. Micheal, O. Ogungbenro y K. Okafor, «Digital Metering System: A Better Alternative for Electromechanical Energy Meter in Nigeria», *International Journal of Academic Research*, vol. 3, págs. 189-192, ene. de 2011.
- [5] J. Hribik, P. Fuchs, M. Hruskovic, R. Michálek, B. Lojko y F. Sut, «Digital Power and Energy Measurement», 2004.
- [6] S. P., *Principles of Sigma Delta Conversion for Analog to Digital Converters*.
- [7] Proyecto CIAA, *Computadora Industrial Abierta Argentina*, Disponible: 2016-06-25, 2014. dirección: <http://proyecto-ciaa.com.ar/devwiki/doku.php?id=start>.