



**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. 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 agosto de 2020.*



## *Resumen*

Se presenta el desarrollo de un prototipo de un medidor digital de potencia eléctrica con telemetría. Incluye tanto al diseño de hardware como a 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. Los valores medidos pueden ser accedidos a través de diferentes interfaces tales como modbus por RS485 y una salida de lazo de corriente. Asimismo, el dispositivo 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 de diseño en circuitos impresos y en Procedimientos y fundamentos para la manufactura de electrónica. Asimismo, se aplicaron conocimientos sobre protocolos de comunicación digital, sobre programación y arquitectura de microcontroladores, sobre 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 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. Mediciones eléctricas digitales . . . . .	1
1.2. Estructura del trabajo . . . . .	2
1.3. Motivación . . . . .	3
1.4. Requerimientos del trabajo . . . . .	5
1.5. Objetivos y alcance . . . . .	5
1.5.1. Objetivos del desarrollo . . . . .	5
1.5.2. Alcances . . . . .	6
<b>2. Introducción específica</b>	<b>7</b>
2.1. Microcontrolador principal . . . . .	7
2.2. Herramientas de programación . . . . .	9
2.2.1. FET debugger . . . . .	9
2.2.2. Entorno de desarrollo . . . . .	10
2.3. Circuito integrado de medición . . . . .	11
2.4. Librería Externa - Free Modbus . . . . .	12
<b>Bibliografía</b>	<b>13</b>





# Índice de figuras

1.1. Medidor electrónico comercial. . . . .	2
1.2. Diagrama planteado para la elaboración de hardware. . . . .	3
1.3. Módulo de medición de energía eléctrica con comunicación serie universal. . . . .	4
1.4. Gráfico de medición de potencia que muestran el encendido del motor trifásico de compresión de un frigorífico. . . . .	4
1.5. Ejemplo de dispositivo fabricado por la SERVAIND S.A. . . . .	6
2.1. Ilustración del micro controlador como se lo presenta en la pagina web del fabricante. . . . .	7
2.2. Esquemático del micro controlador. . . . .	8
2.3. Dimensiones del empaquetado LQFP-64 (valores en milímetro). . . . .	8
2.4. Foto del MSP-FET430UIF, que es la herramienta de programación del microcontrolador. . . . .	9
2.5. Cable conector de la interfaz JTAG. . . . .	10
2.6. Esquemático del conector JTAG de la herramienta de programación. . . . .	10
2.7. Imagen del entorno de desarrollo. . . . .	11



# Índice de Tablas



***Para Darío.***



# Capítulo 1

## Introducción general

En este capítulo se describe la motivación del trabajo y sus objetivos, con una breve 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 medir 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 eléctrica. Hay un gran número de tipos de cantidades en el campo de la ingeniería que necesitan ser medidas o expresadas en el trabajo diario. Esto incluye cantidades físicas, mecánicas y eléctricas por ejemplo [1]. La potencia eléctrica es una de estas cantidades físicas que suele ser de interés en diversos ámbitos, y para medirla y almacenarla en forma de datos se utiliza un 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.

Existen diversos métodos para la conversión de señal analógica a digital como el método posar la de aproximaciones sucesivas, la conversión directa, la de comparación rampa, la conversión por integración y la de sigma delta[Conversores].

#### 1.1.1. Mediciones eléctricas digitales

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) [3].



FIGURA 1.1. Medidor electrónico comercial.

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 [4].

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 [5].

## 1.2. Estructura del trabajo

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

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

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

Del sistema de procesamiento se tiene que el hardware contara con un puerto de configuración y varias salidas optoacopladas, se plantea que estas salidas sean un relé ,un puerto serie y un puerto ethernet.

Del sistema de medición se observa comunicar al procesamiento por una comunicación digital aislada y también por una salida analógica. También se indica que la medición tendrá varias entradas analógicas, pero estas no fueron especificadas.

En cuanto el 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 el software debía manejar correctamente todos los integrados que fueran a estar embebidos en el circuito del dispositivo y manejar todos los protocolos definidos en los requisitos.



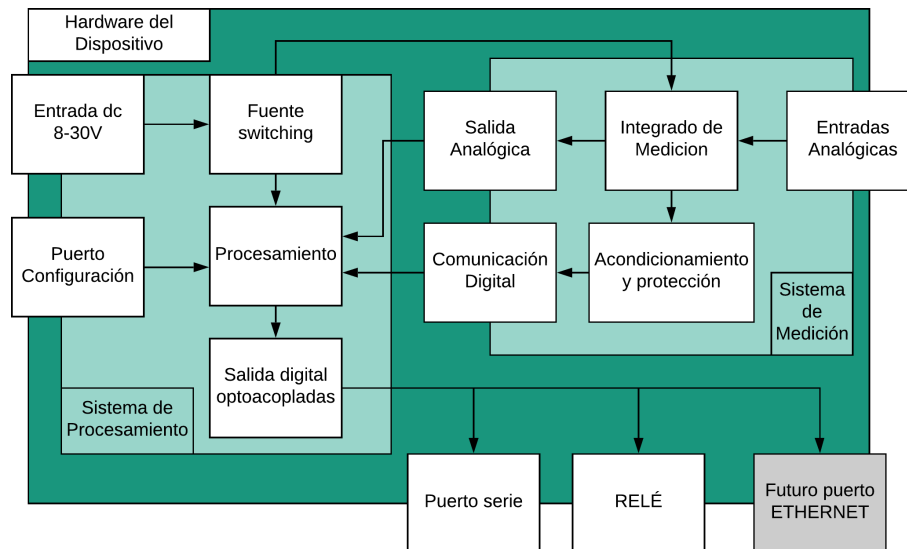


FIGURA 1.2. Diagrama planteado para la elaboración de hardware.

El enfoque inicial del trabajo fue el armado de la electrónica del prototipo, y el software se constituyó como la segunda parte que debía demostrar el correcto funcionamiento del hardware.

### 1.3. 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 para apoyar otros sistemas de seguridad actuando como un método preventivo de fallas, dado que los parámetros de consumo dan una idea de 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. Este modulo fue usado en una experiencia previa en la cual varios módulos fueron instalados en un local comercial para medir el consumo de la mayoría de los electrodomésticos. Gracias a su implementación se detectaron fallas en algunas maquinas, además se observó el comportamiento del aparato eléctrico de mayor consumo del local que es la cámara frigorífica (que representa mas del 25 % del consumo total), cuyo comportamiento puede verse en la figura 1.4.

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 de incorporar.

Estas gráficas sirvieron para tener una idea mas 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 malfuncionamientos en otros equipos eléctricos de refrigeración.



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

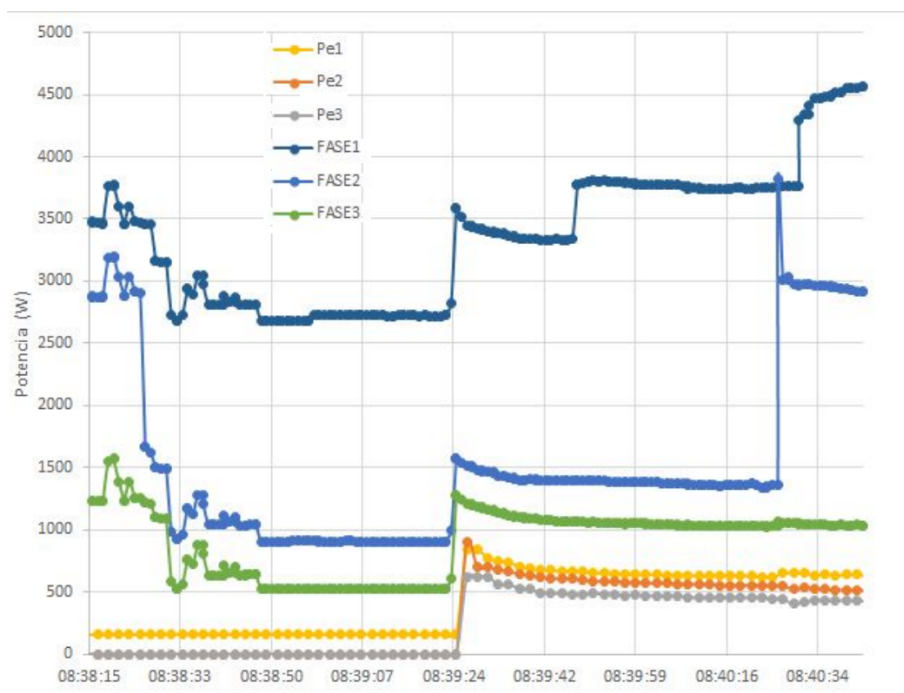


FIGURA 1.4. Gráfico de medición de potencia que muestran el encendido del motor trifásico de compresión de un frigorífico.

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 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.

## 1.4. Requerimientos del trabajo

Los requerimientos fueron elaborados a partir de un documento enviado por el equipo de desarrollo de la empresa. Pueden verse 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  $\pm 15\%$ .
  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.

## 1.5. Objetivos y alcance

### 1.5.1. 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 carcasas estándar que utiliza la empresa, como puede verse en la figura 1.5.



FIGURA 1.5. Ejemplo de dispositivo fabricado por la SERVAIND S.A.

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).

### 1.5.2. Alcances

El trabajo abarcó el planteo, diseño y fabricación de un pcb. Asimismo, incluye 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

A continuación se describirán diferentes tecnologías usadas en el trabajo que hicieron posible al trabajo desarrollado.

### 2.1. Microcontrolador principal

El trabajo realizado implicó el desarrollo de un producto electrónico que debe realizar 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. En este sistema embebido el microcontrolador ocupa un rol principal pues las demás estructuras que se diseñan dependen de este para funcionar, o mejor dicho se diseñan para ser controladas por este. Para este trabajo se optó por un microcontrolador que pueda ser usado para una aplicación de medición, siendo una de sus propiedades ser de bajo consumo eléctrico.

El microcontrolador elegido para el dispositivo fue un MSP430F2618 fabricado por la empresa Texas Instrument, este microcontrolador es de ultra baja potencia con una CPU de instrucciones RISC de 16 bits. Posee periféricos analógicos y digitales orientado a aplicaciones de medición. Este microcontrolador puede pasar de varios modos de baja potencia a modo activo en menos de 1 microsegundo, este puede observarse en la figura 2.1.

MSP430F2618



FIGURA 2.1. Ilustración del micro controlador como se lo presenta en la pagina web del fabricante.

El msp430F2618 pose varios tipos de periféricos ideados para diferentes aplicaciones, a cada uno de estos el fabricante los denomina como "módulos". Estos módulos son soluciones de hardware fáciles de implementar por lo que hacen al código mas sencillo.

Este modelo de la familia msp430 se eligió específicamente por poseer tanto un modulo ADC (conversor analógico - digital) como un modulo DAC (conversor

digital-analógico). El modulo DAC fue utilizado para la implementación de un lazo de corriente, que es una forma de comunicación común para procesos industriales. Por otra parte, el modulo ADC se planteo en un primer momento para las mediciones, su uso fue descartado.

Para el trabajo se uso el modulo 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.

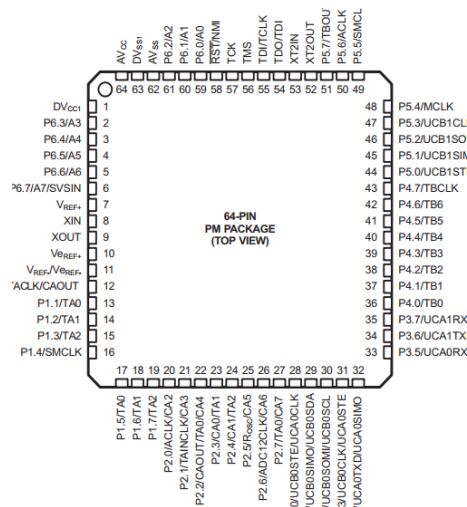


FIGURA 2.2. Esquemático del micro controlador.

En cuanto al empaquetado del dispositivo se opto por el de 64 pines de salida (denominado por el fabricante como "LQFP-64 Texas Instruments." este puede verse en la figura 2.3., esta version a diferencia del empaquetado de 80 pines posee mas de una implementación de módulos por pin, debido a que no se iban a usar todas las prestaciones del microcontrolador esto no presentaba un problema.

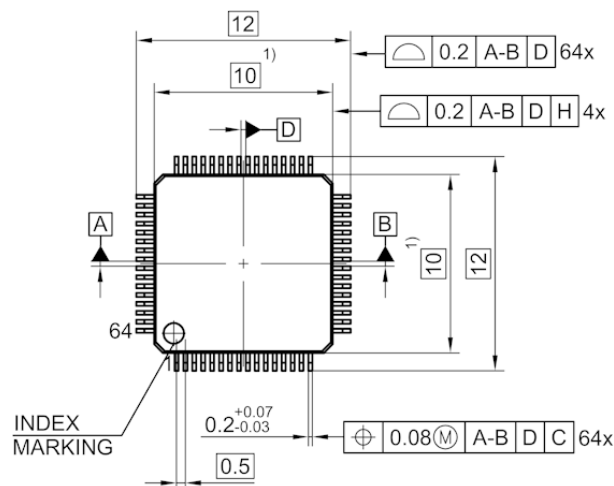


FIGURA 2.3. Dimensiones del empaquetado LQFP-64 (valores en milímetro).

El empaquetado de montaje superficial es de un tamaño bastante pequeño (sus dimensiones son de 12x12mm) por lo que presentaba un pequeño desafío al implementarlo en el diseño del PCB.

## 2.2. Herramientas de programación

### 2.2.1. FET debugger

Para lograr que el microcontrolador realice todas las tareas requeridas se debe programarlo para tal fin, es decir se debe escribir las instrucciones que deberá seguir el microcontrolador. El conjunto de instrucciones que se escriben para que un microcontrolador funcione es a lo que denominamos programa, y en este trabajo se llamara firmware. El firmware debe cargarse de algún modo desde la computadora personal donde lo diseñamos al chip.

Para cargar el programa al microcontrolador, el fabricante especifica una herramienta de programación, a esta herramienta lo denomina "FET hardware JTAG", puede verse en la figura 2.5, siendo FET acrónimo de "Flash Emulation Toolz JTAG acrónimo de Joint Test Action Group. El JTAG es un estándar industrial para verificar diseños y testear placas de circuito impresas después de manufacturadas [6]. Los programadores JTAG son usados para escribir software en memorias flashes.



FIGURA 2.4. Foto del MSP-FET430UIF, que es la herramienta de programación del microcontrolador.

Con las conexiones apropiadas un debugger y la interfaz JTAG pueden ser usadas para *debuggear* 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 puede verse en la figura 2.5, esta interfaz daba una idea de como debía ser la conexión en la placa electrónica del prototipo.

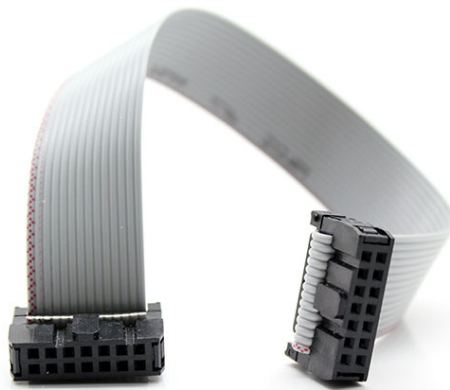


FIGURA 2.5. Cable conector de la interfaz JTAG.

En la hoja de datos de la herramienta, el fabricante especifica las conexiones y funciones de cada pin, esto fue tomado en cuenta para el diseño del esquemático del prototipo, en el cual se optó por una interfaz JTAG Through-Hole, esto se detallara en el siguiente capítulo.

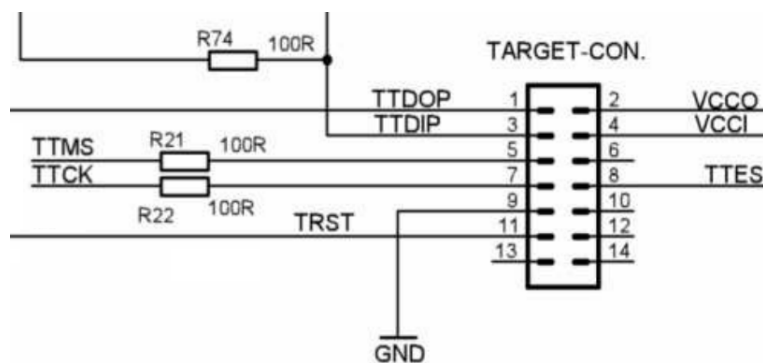


FIGURA 2.6. Esquemático del conector JTAG de la herramienta de programación..

### 2.2.2. Entorno de desarrollo

Para poder programar el microcontrolador el fabricante ofrece una solución de software denominado "MSPDS" que significa MSP Debug stack. El MSPDebug stack es una librería dinámica que provee funciones para controlar y debuggear el

El "stack debug de MSP.<sup>es</sup> diseñado para los microcontroladores de la familia MSP430, consiste en una librería estática en el lado del host (donde se realizan los programas) y de un firmware embebido que corre herramientas de debugging para el MSP-FET.[7]



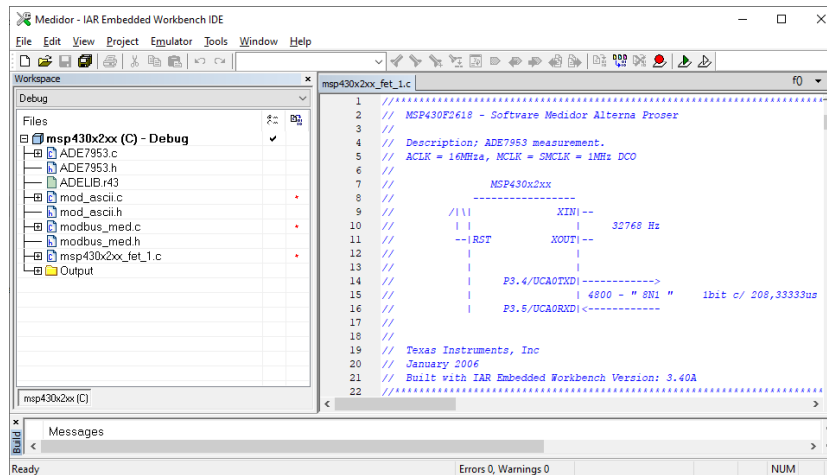


FIGURA 2.7. Imagen del entorno de desarrollo.

## 2.3. Circuito integrado de medición

JTAG (named after the Joint Test Action Group which codified it) is an industry standard for verifying designs and testing printed circuit boards after manufacture. Although JTAG's early applications targeted board level testing, here the JTAG standard was designed to assist with device, board, and system testing, diagnosis, and fault isolation. Today JTAG is used as the primary means of accessing sub-blocks of integrated circuits, making it an essential mechanism for debugging embedded systems which

With the proper connections, the debugger and an FET hardware JTAG interface (such as the MSP-FET430PIF and MSP-FET430UIF) can be used to program and debug code on the target board. In addition, the connections also support the MSP-GANG430 or MSP-PRGS430 production programmers, thus providing an easy way to program prototype boards, if desired.

JTAG programmers are also used to write software and data into flash memory. This is usually done using the same data bus access the CPU would use, and is sometimes handled by the CPU. In other cases the memory chips themselves have JTAG interfaces. Some modern debug architectures provide internal and external bus master access without needing to halt and take over a CPU. In the worst case, it is usually possible to drive external bus signals using the boundary scan facility.

This manual describes the hardware of the Texas Instruments MSP-FET430 Flash Emulation Tool (FET). The FET is the program development tool for the MSP430 ultra-low-power microcontroller. Both available interface types, the parallel port interface and the USB interface, are described.

If you intend to program your MSP430 or MSP432 device out of an IDE, simply download the latest version of Code Composer Studio or IAR Embedded Workbench release. The latest MSP Debug Stack will be included.

Para realizar el programa en lenguaje c y descargarlo en el microcontrolador la empresa SERVAIND S.A. proveyó un entorno de desarrollo privado y una placa electrónica con el microcontrolador funcionando, de modo de probarla. Una ventana del entorno de desarrollo puede verse en la figura 2.7.

## **2.4. Librería Externa - Free Modbus**

# Bibliografía

- [1] R.S. 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. URL: <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>.
- [3] 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.
- [4] Ján Hribík y col. «Digital Power and Energy Measurement». En: (2004).
- [5] Sangil P. *Principles of Sigma Delta Conversion for Analog to Digital Converters*.
- [6] 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>.
- [7] *Developer's Guide - MSPDebugStack*. SLAU656B. Revised June 2016. Texas Instrument. 15. URL: <https://www.ti.com/lit/ug/slau656b/slau656b.pdf?ts=1594684069406>.