



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

MEDIDOR REMOTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

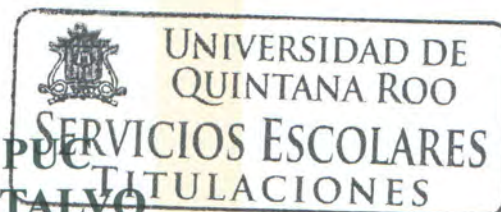
TRABAJO DE TESIS
Para obtener el grado de

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

PRESENTA
GIOVANNY RENE SONI GUERRA

DIRECTOR
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA

ASESORES
**DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC
M.C. EMMANUEL TORRES MONTALVO**





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Trabajo de Tesis elaborado bajo la supervisión del Comité de
asesoría y aprobada como requisito parcial para obtener el grado
de:

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

Comité de supervisión

Director:

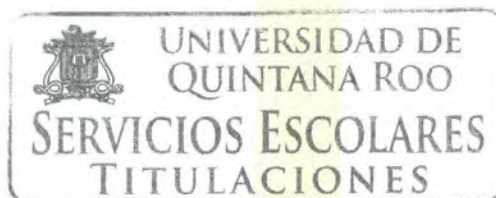

Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta

Asesor:


Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

Asesor:


M.C. Emmanuel Torres Montalvo





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

A dios y a la virgen por iluminar mi camino, a mi madre Lilia Guerra Cortes porque por ella sé de dónde vengo y a donde voy, a mis tíos, Guadalupe Salinas Cortes y José Caamal Motejo, por inculcarme el valor del trabajo y el amor a la familia, a mi asesor Dr. Víctor Sánchez Huerta por confiar en mí y apoyarme en esta mi última etapa como estudiante y tal vez la más difícil.



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

DEDICTORIA

Nada de esto hubiera sido posible sin el apoyo y el consejo de mi familia, por eso quiero dedicar este proyecto a mi esposa Sandy Aurora Jiménez García y a mi hija Patricia Ximena Soni Jiménez por ser mi razón para levantarme día con día, a mi madre, hermanos y a mi abuela Patricia Cortes Rosas quien en vida siempre cuidó de mí y quien aún siento que me acompaña, a todos ellos les dedico todo este esfuerzo y dedicación.

Resumen

En este trabajo de tesis se realizó la implementación de un sistema en desarrollo de un módulo de evaluación de un medidor de energía que incorpora un servidor web vía Ethernet, basado en la plataforma de desarrollo de sistemas embebidos abierta Arduino. El sistema Arduino puede monitorear hasta 16 variables analógicas. Las características del sistema de adquisición de datos le permiten ser utilizado de forma aislada requiriendo adicionalmente de una fuente de alimentación portátil. Mediante el monitoreo de las señales de pulsos emitidas por el módulo de evaluación por parte del sistema Arduino el cual es programado previamente, es posible conocer los datos de la potencia eléctrica conectada en watts así como la cantidad de energía consumida por unidad de tiempo en kilowatt-hora. Después de obtener los datos deseados, estos son procesados y enviados a un servidor web vía Ethernet para poder ser visualizados en una página diseñada en el sistema Arduino.

Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	3
DEDICTORIA.....	4
Resumen	5
Índice de figuras	9
1.1 Problemática	12
1.2 Solución propuesta	13
1.4 Descripción del proyecto	14
2.1 Introducción.....	16
2. 2 Parámetros eléctricos.....	16
2.2.1 Carga eléctrica:	16
2.2.2 Voltaje	16
2.2.3 Corriente	17
2.2.5 Potencia	18
2.2.6 Potencia activa, reactiva y aparente	18
2.2.7 Factor de potencia.....	19
2.2.8 Frecuencia Armónica.....	21
2.3 Sensores.....	21
2.3.1 Transformador de corriente	21
2.3.2 Bobina de Rogowski:	23
2.3.3 Sensor de voltaje	24
3.1 Introducción.....	26
3.2 Sistema embebido.....	27
3.3 Fuente de alimentación del sistema	29
3.3.1 Fuente de alimentación Resistor capacitor (RC)	29
3.3.2 Fuente de alimentación conmutada	31
3.4 Entradas analógicas	31
3.4.1 Entradas analógicas de tensión	32
3.4.2 Entradas analógicas de Corriente	33

3.5 Implementación del software.....	33
3.5.1 Configuración de sistemas periféricos	33
3.5.2 Configuración del convertidor sigma delta $\Sigma\Delta 24$	34
3.5.3 Reloj de tiempo real (RTC_C)	35
3.5.4 Controlador de LCD	35
3.7 Adquisición de señales de parámetros eléctricos	37
3.7.1 Fórmulas de Cálculo	37
3.7.2 Voltaje y Corriente RMS	37
3.7.3 Potencia y energía	38
3.7.4 Factor de Potencia	39
3.8 Acondicionamiento de señales	40
3.8.1 Señales de tensión y de corriente	41
3.8.2 Compensación de fase	42
3.8.3 Medición de Frecuencia y Seguimiento de Ciclo	43
Capítulo 4 Instalación, implementación y obtención de datos del módulo de evaluación del medidor de energía a través del sistema embebido Arduino	46
4.1 Introducción.....	46
4.2 Entradas de tensión de corriente alterna AC	48
4.3 Entradas de corriente	49
4.4 Generación de pulsos del módulo de evaluación del medidor de energía.....	50
4.5 Comunicación y obtención de datos del medidor a través del sistema embebido Arduino	52
4.5.1 Sistema embebido Arduino Mega 2560	54
4.5.2 Arduino Ethernet Shield	55
4.6 Configuración física del sistema embebido Arduino Mega 2560.	57
4.7 Pruebas experimentales del módulo de evaluación del medidor de energía	59
4.7.1 Prueba n° 1 visualización de resultados en el display del módulo evaluación ..	60
4.7.2 prueba n°2 Visualización de pulsos por medio de un equipo de osciloscopio ..	62
4.8 Visualización de resultados vía web.....	67
4.8.1 Diagrama de flujo del servidor web	67

4.8.2 Instalación física del Servidor Web.....	69
4.9 Pruebas experimentales con el sistema embebido Arduino.....	70
4.9.1 Pruebas con el sistema Arduino con una carga conectada	71
4.9.2 Pruebas con el sistema Arduino con dos cargas conectada	73
4.9.3 Pruebas con el sistema Arduino con tres cargas conectadas	74
5.1 Conclusiones.....	76
Referencias	77
Anexo A programa Arduino	78

Índice de figuras

FIGURA 2. 1 RELACION DE POTENCIAS ELECTRICAS	19
FIGURA 2. 2 MODELO ELÉCTRICO DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	22
FIGURA 2. 3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOBINA DE ROGOWSKI.	244
FIGURA 2. 4 CIRCUITO ELÉCTRICO DEL DIVISOR DE TENSIÓN	244
FIGURA 3. 1 CONEXIÓN ESTRELLA 3-FASES, 4-HILOS USANDO EL MSP430F677	28
FIGURA 3. 2 FUENTE DE ALIMENTACION RESISTOR-CAPACITOR	30
FIGURA 3. 3 FUENTE DE ALIMENTACION CONMUTADA	31
FIGURA 3. 4 DIAGRAMA DE LAS ENTRADAS ANALOGICAS A LOS ADC	32
FIGURA 3. 5 ENTRADAS ANALOGICAS DE CORRIENTE	33
FIGURA 3. 6 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PRIMER PLANO	36
FIGURA 3. 7 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE FONDO	41
FIGURA 3.8 MUESTREO DE LAS SEÑALES CERCA DEL CRUCE POR CERO Y SU INTERPOLACIÓN LINEAL	44
FIGURA 4. 1 VISTA SUPERIOR DEL MÓDULO DE EVALUACIÓN DEL MEDIDOR DE ENERGIA	46
FIGURA 4. 2 UBICACIÓN DE COMPONENTES DEL MEDIDOR DE ENERGIA	47
FIGURA 4. 3 CONEXIONES DE LAS ENTRADAS DE TENSIÓN	48
FIGURA 4. 4 CONEXIONES DE LAS ENTRADAS DE CORRIENTE	49
FIGURA 4. 5 DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LAS SALIDAS DE PULSOS ELÉCTRICOS	51
FIGURA 4.6 INTERRUPCIÓN ADJUNTA	52
FIGURA 4. 7 PLACA ARDUINO MEGA 2560 Y LA TARJETA ETHERNET SHIELD	53
FIGURA 4. 8 ARDUINO MEGA 2560	54
FIGURA 4. 9 ARDUINO ETHERNET SHIELD	55
FIGURA 4. 10 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SERVIDOR WEB	577
FIGURA 4. 11 SEÑAL DE ACTIVACIÓN DE LA FUNCION DE INTERRUPCIÓN	58
FIGURA 4. 12 CONEXIÓN DEL MEDIDOR DE ENERGÍA A UNA CARGA TRIFÁSICA RESISTIVA	59
TABLA 4. 1 PRUEBA EXPERIMENTAL N° 1 CARGA TRIFÁSICA CONECTADA	60
FIGURA 4. 13 VALORES DE VOLTAJE, CORRIENTE Y POTENCIA EN LA FASE A	60
FIGURA 4. 14 VALORES DE VOLTAJE, CORRIENTE Y POTENCIA EN LA FASE B.	61
FIGURA 4. 15 VALORES DE VOLTAJE, CORRIENTE Y POTENCIA EN LA FASE C.	62
FIGURA 4. 16 DISTANCIA DE PULSO EN FUNCIÓN DE TIEMPO CON UNA CARGA CONECTADA	63
FIGURA 4. 17 DISTANCIA DE PULSO EN FUNCIÓN DE TIEMPO CON DOS CARGAS CONECTADAS	64
FIGURA 4. 18 DISTANCIA DE PULSO EN FUNCIÓN DE TIEMPO CON TRES CARGAS CONECTADAS	65
FIGURA 4. 19 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SERVIDOR WEB	68
FIGURA 4. 20 INSTALACIÓN FÍSICA DEL SERVIDOR WEB	69
FIGURA 4. 21 INSTALACIÓN FÍSICA VÍA INTRANET DE LA UNIVERSIDAD	69
FIGURA 4. 22 CONEXION DEL SISTEMA ARDUINO	71
TABLA 4. 2 RESULTADOS DE MEDICIÓN DE ENERGÍA	72
FIGURA 4. 23 DATOS DE POTENCIA Y ENERGÍA DESPLEGADOS EN LA WEB POR EL SISTEMA ARDUINO	72
TABLA 4. 3 RESULTADOS DEL MEDIDOR DE ENERGIA CON DOS CARGAS CONECTADAS.	73

FIGURA 4. 24 DATOS DE POTENCIA Y ENERGÍA DESPLEGADOS EN LA WEB POR EL SISTEMA ARDUINO CON DOS CARGAS CONECTADAS	73
TABLA 4. 4 RESULTADOS DEL MEDIDOR DE ENERGÍA CON TRES CARGAS CONECTADAS	744
FIGURA 4. 25 DATOS DE POTENCIA Y ENERGÍA DESPLEGADOS EN LA WEB POR EL SISTEMA ARDUINO CON TRES CARGAS CONECTADAS	74

Capítulo 1

Capítulo 1

1.1 Problemática

Actualmente en México no existe un dispositivo comercial de medición de la energía eléctrica que se consume en una instalación eléctrica que opere en tiempo real. La forma tradicional en que un usuario conoce su consumo eléctrico ocurre al momento de que la compañía de suministro eléctrico (CFE) le hace llegar el recibo de pago, el cual tiene una periodicidad bimestral. Esta falta de información en el consumo energético genera una problemática en cuanto a que el usuario no cuenta con información que le permita determinar una estrategia de ahorro de energía o en el peor de los casos que existan fugas de energía debido a problemas de su instalación eléctrica y que no se percate de ello, sino hasta el momento del pago de su recibo de energía eléctrica. Además, por si no fuera problemático determinar el costo del consumo eléctrico, a lo largo del año existe un cambio tarifario por kWh consumido y cuyo costo también cambia en función de la cantidad total de energía consumida lo que hace aún más difícil al usuario promedio determinar el costo a pagar al final del bimestre.

Esta problemática de un usuario doméstico también se extiende a usuarios comerciales e industriales, por lo que existe un nicho de mercado importante en el desarrollo de un sistema de medición energética, el cual no sólo realice el registro de los consumos eléctricos sino que además incorpore algoritmos computacionales que permitan predecir a partir de la información recolectada patrones de consumos anormales que puedan ser debido a la falla de una de las cargas eléctricas en la instalación. Esta técnica es una parte de lo que se conoce como una “red inteligente” (término conocido como “smart grid” en inglés) en la que la información recabada en una red eléctrica es utilizada para la operación confiable, eficiente, de bajo costo y sustentable en la generación y distribución de la energía eléctrica.

1.2 Solución propuesta

Este proyecto tiene como finalidad el desarrollo e integración de un sistema de medición de energía eléctrica trifásico con comunicación remota vía Ethernet. El prototipo desarrollado en este proyecto permitirá contar con un registro del consumo energético en una instalación eléctrica y tener acceso a esta información vía remota mediante comunicación Ethernet. El sistema de medición propuesto permitirá contar con un registro detallado del suministro de energía, así como de las variaciones de tensión, corriente y carga que se presentan en cualquier aplicación eléctrica. Este proyecto está planteado como un paso inicial para el desarrollo de un sistema de medición inteligente que permita predecir patrones de demanda eléctrica, patrones de fallos, así como poder establecer estrategias de interconexión eléctrica con sistemas de generación de fuentes renovables a partir de los datos registrados cotidianamente. Además, este proyecto también tiene potencial para el desarrollo de aplicaciones para computadoras y dispositivos móviles que permitan al usuario contar con información de su consumo eléctrico.

1.3 Justificación

Desarrollar una plataforma de medición de energía eléctrica con comunicación remota para el monitoreo y registro de la energía eléctrica consumida. El sistema de medición contará con un protocolo de comunicación estandarizado que le garantizará robustez en las mediciones efectuadas.

Este proyecto tiene un mercado importante para su potencial aplicación en instalaciones residenciales, comerciales e industriales. Además de que proveerá un tema de desarrollo de ingeniería en el que se puedan integrar alumnos tanto de Ingeniería en sistemas de Energía como del área de Ingeniería en redes.

En esta fase inicial del proyecto se propone desarrollar la implementación del sistema de medición con comunicación Ethernet mediante la plataforma abierta de sistema embebido Arduino.

1.4 Descripción del proyecto

En esta tesis se tiene como objetivo iniciar con el desarrollo de un medidor electrónico de energía eléctrica con comunicación inalámbrica. Este trabajo de tesis contempla desarrollar el sistema de medición de energía eléctrica a partir de un diseño de referencia y añadirle comunicación Ethernet para realizar la visualización de datos de forma remota. El protocolo de comunicación Ethernet es el más adecuado para ser utilizado en la comunicación remota de información debido a la madurez de su tecnología; además de que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos.

Capítulo 2

2.1 Introducción

El movimiento mundial para impulsar una mayor eficiencia energética en toda la infraestructura eléctrica e industrial requiere de una tecnología sofisticada para la gestión inteligente de la energía. Aprovechando las técnicas avanzadas de control de potencia para aplicaciones que abarcan industrial el control y la automatización, la generación de energía renovable, y la distribución de energía de redes inteligentes, los diseñadores de sistemas pueden lograr ganancias de eficiencia importantes que producen una mayor conservación de la energía, las emisiones contaminantes más bajas y enormes ahorros económicos.

Este perfil de rendimiento equipa a los diseñadores para lograr una mayor funcionalidad del sistema y la precisión mediante el uso de algoritmos más sofisticados y permite un número de objetivos de diseño a nivel de sistema, incluyendo el procesamiento en tiempo real de más datos, la latencia reducida, consolidación de las tareas de procesamiento a un solo procesador, y una mayor flexibilidad para optimizar las capacidades de la interfaz del sistema y control.

2. 2 Parámetros eléctricos

En esta sección se presentan los principales parámetros eléctricos considerados en este proyecto.

2.2.1 Carga eléctrica:

La carga eléctrica es la cantidad de potencia eléctrica que necesita un equipo o circuito eléctrico para su funcionamiento.

2.2.2 Voltaje

El voltaje, tensión o diferencia de potencial es la presión que ejerce una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz (FEM) sobre las cargas eléctricas o electrones en un circuito eléctrico cerrado, para que se establezca el flujo de una corriente eléctrica.

A mayor diferencia de potencial o presión que ejerza una fuente de FEM sobre las cargas eléctricas o electrones contenidos en un conductor, mayor será el voltaje o tensión existente en el circuito al que corresponda ese conductor.

El voltaje es la energía por unidad de carga. La energía se especifica en relación con algún nivel de referencia; por lo tanto, las tensiones se especifican con más precisión como diferencias de voltaje entre dos puntos de un circuito. La diferencia de voltaje entre dos puntos puede ser pensado como una diferencia en la energía potencial entre las cargas puestas en esos dos puntos. Las unidades de tensión son los voltios y se representa con la letra V en el sistema internacional de unidades.

2.2.3 Corriente

La corriente eléctrica es una medida de la cantidad de carga eléctrica transferida por unidad de tiempo. La corriente eléctrica representa el flujo de electrones a través de un material conductor. La corriente es una cantidad escalar (aunque en el análisis de circuitos, la dirección de la corriente es pertinente). La unidad SI de corriente eléctrica es el amperio, definida como 1 coulomb / segundo.

Se especifica en un punto particular en el circuito, y no es relativa a una referencia. Como la corriente es causada por la carga en movimiento, esta puede ser considerada como un indicador de la energía cinética.

Matemáticamente, la corriente se representa como:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

En donde i es la corriente en amperios, q es la carga en culombios, y t es el tiempo en segundos. Por lo tanto, la corriente es la tasa de tiempo de cambio de carga y unidades de carga son culombios por segundo o amperios que es representado por la letra A en el sistema internacional de unidades.

2.2.5 Potencia

Un sistema eléctrico es a menudo utilizado para excitar una carga eléctrica. Las interacciones entre el sistema eléctrico y la carga se describen generalmente en términos de potencia eléctrica. De esta forma la potencia eléctrica asociada con un elemento de un circuito es el producto de la corriente que pasa a través del elemento y la diferencia de voltaje a través del elemento [1]. Se define como:

$$P = v(t) \times i(t) \quad (2.1)$$

Donde $P(t)$ es la potencia instantánea en el tiempo t , $v(t)$ es la diferencia de voltaje en el tiempo t , y $i(t)$ es la actual en el tiempo t . La energía puede ser absorbida ya sea por un elemento de circuito o generada por un elemento de circuito; la determinación de si el elemento está absorbiendo o generando de energía puede ser determinada por los signos asociados a los valores de tensión y corriente. Las unidades de potencia en un sistema eléctrico de corriente directa CD son los watts W mientras que las unidades de potencia de un sistema de corriente alterna CA son los Volts-Ampere (VA).

2.2.6 Potencia activa, reactiva y aparente

El medidor de energía eléctrica utilizado en este trabajo está destinado para su empleo en la red eléctrica comercial, el cual es un sistema de CA. Debido a esto, el medidor debe tener la capacidad de medir la potencia eléctrica que se proporciona a cargas de CA. Las máquinas y los aparatos eléctricos se construyen para determinados valores de tensión y de la corriente. Por tal motivo se los caracteriza no por la potencia activa que depende de la diferencia de fases entre la tensión y la corriente sino por la potencia aparente.

$$S = VI \quad (2.2)$$

La potencia aparente representa el producto de los valores eficaces de la tensión y de la intensidad y corresponde al valor máximo de la potencia activa que se puede obtener para una tensión y una corriente determinada [1].

La potencia aparente corresponde a la suma vectorial de la potencia activa y potencia reactiva. La potencia activa, aparente y reactiva tienen las siguientes unidades

Potencia aparente: VA (volt ampere)

Potencia activa: W (watt)

Potencia reactiva: VAR

La Figura 2.1 muestra la suma vectorial entre la potencia activa, reactiva y aparente. La relación mostrada en la figura es válida para señales senoidales puras a la frecuencia fundamental. En la presencia de armónicos, esta relación no es válida.

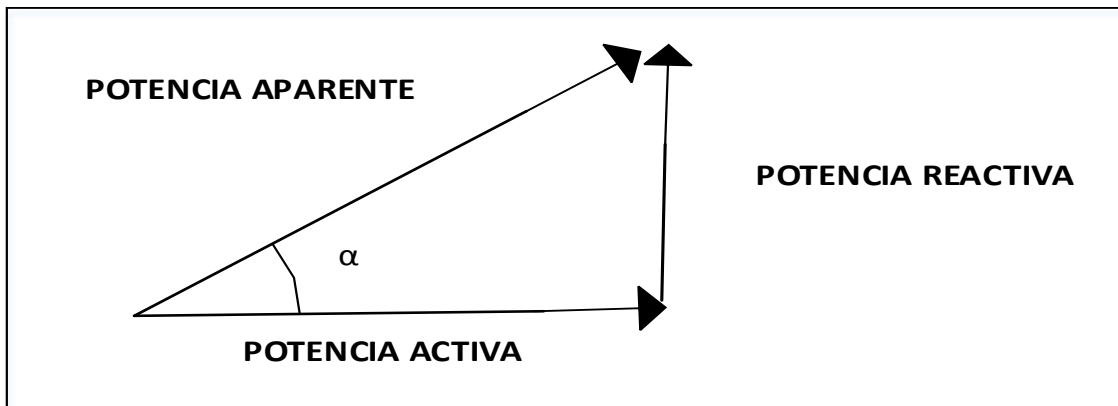


Figura 2. 1 Relación de potencias eléctricas.

La relación entre la potencia activa y la aparente se llama factor de potencia, que es igual al coseno del ángulo de la diferencia de fases entre la tensión y la corriente. Las relaciones matemáticas de estos parámetros están dadas por las siguientes expresiones:

$$**Potencia Activa = VI \cos \phi**$$

$$**Potencia Reactiva = VI \sen \phi**$$

$$**Potencia Aparente = VI**$$

$$**Factor de potencia = \cos \phi**$$

2.2.7 Factor de potencia

Para un mejor aprovechamiento de las instalaciones eléctricas conviene disponer de un factor de potencia lo más alto posible o de una mínima diferencia entre fases de la

corriente y la tensión; el mejor rendimiento se obtiene cuando el factor de potencia es igual a 1 (o sea $\alpha = 0$).

También conviene disponer de un alto factor de potencia para disminuir las pérdidas en las líneas de transmisión por diferentes factores. Para una potencia activa dada P del receptor, la corriente en la línea es tanto menor cuanto mayor es el valor del $\cos \alpha$.

La pérdida de potencia en la resistencia de los conductores de la línea es inversamente proporcional al cuadrado del factor de potencia del receptor de energía. Cuanto más bajo sea el factor de potencia, tanto más caro resultará el suministro de energía a los consumidores.

De allí que se establezca generalmente una tarifa diferencial para la energía eléctrica cuanto menor es el factor de potencia será más alto el precio de la energía suministrada.

El factor de potencia es un indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica. El factor de potencia toma valores de entre 0 y 1. En cargas eléctricas tales como lámparas incandescentes, planchas, y estufas eléctricas, toda la energía que se les suministra es transformada en energía lumínica o calórica, por lo que el factor de potencia de estos es 1 [2].

Por otra parte, las cargas eléctricas del tipo electromecánicas, además de transformar la energía de la línea en energía mecánica, térmica, etc., requieren energía para su propio funcionamiento, en cuyo caso, el factor de potencia toma valores menores a 1. La potencia que se transforma en trabajo, corresponde a la potencia activa, mientras que aquella que es usada para el propio funcionamiento de la carga eléctrica, se llama potencia reactiva. Existe una normativa que controla este indicador y señala que el factor de potencia no debería ser inferior a 0.85, en el caso de ser menor debe ser corregido a la brevedad.

Los inconvenientes que ocasiona que el factor de potencia sea inferior a 0,85, implica que las cargas eléctricas tienen elevados valores de consumo de energía reactiva, produciendo una circulación excesiva de la corriente en sus instalaciones y en las de la empresa distribuidora provocando daños en las mismas por efecto de sobrecargas. Además, produce

alteraciones en la regulación de la calidad técnica del suministro (variaciones de tensión), con lo cual empeora el rendimiento y funcionamiento de los equipos eléctricos.

2.2.8 Frecuencia Armónica

Los armónicos son otra causa común de interferencia eléctrica entre las fuentes de alimentación. En los sistemas de alimentación de CA, se producen variaciones de tensión de la onda sinusoidal del sistema de CA, pero una carga eléctrica no lineal puede generar una frecuencia diferente en el sistema eléctrico de CA, a la cual se le denomina armónico [2] y puede reflejarse en la señal de corriente, en la señal de voltaje o en ambas. Los armónicos pueden causar un aumento en la corriente del sistema que puede conducir a un mal funcionamiento de los componentes del sistema de CA. Las fuentes típicas de armónicos incluyen semiconductores de estado sólido, rectificadores de corriente, lámparas de descarga y velocidad variable y motores de inducción.

2.3 Sensores

El medidor de energía eléctrica requiere de disponer de los valores instantáneos de voltaje y corriente de CA para determinar la potencia suministrada a la carga eléctrica y de esta forma calcular la energía eléctrica consumida. Para ello se requiere de sensores de voltaje y de corriente que proporcionen los valores instantáneos de estas variables. De esta forma, a continuación se describen los sensores comerciales disponibles en el mercado para la medición de voltaje y corriente.

Existen 3 principales tipos de sensores de corriente:

- Shunt (Derivación)
- TC (transformador de corriente)
- Bobina de Rogowski

2.3.1 Transformador de corriente

Un transformador de corriente o “TC” es el dispositivo que produce una corriente proporcionalmente menor a la del corriente del circuito [3]. Un transformador de corriente

por su aplicación se puede subdividir en transformador de medición y transformador de protección, no obstante los transformadores se diseñan para realizar ambas funciones y su corriente nominal por secundario puede ser de 1 o 5 Amperes. Los transformadores de corriente desarrollan dos tipos de funciones, transformar la corriente y aislar los instrumentos de protección y medición conectados a los circuitos de alta tensión.

En el medidor remoto de energía, el primario del transformador se conecta en serie con el circuito cuya intensidad se desea medir y el secundario se conecta en serie con las bobinas de corriente de los dispositivos de medición y de protección que requieran ser energizados. Su principio de funcionamiento puede ser obtenido a través del modelo del transformador ideal, haciendo algunas consideraciones derivadas de su diseño y conexión dentro del sistema.

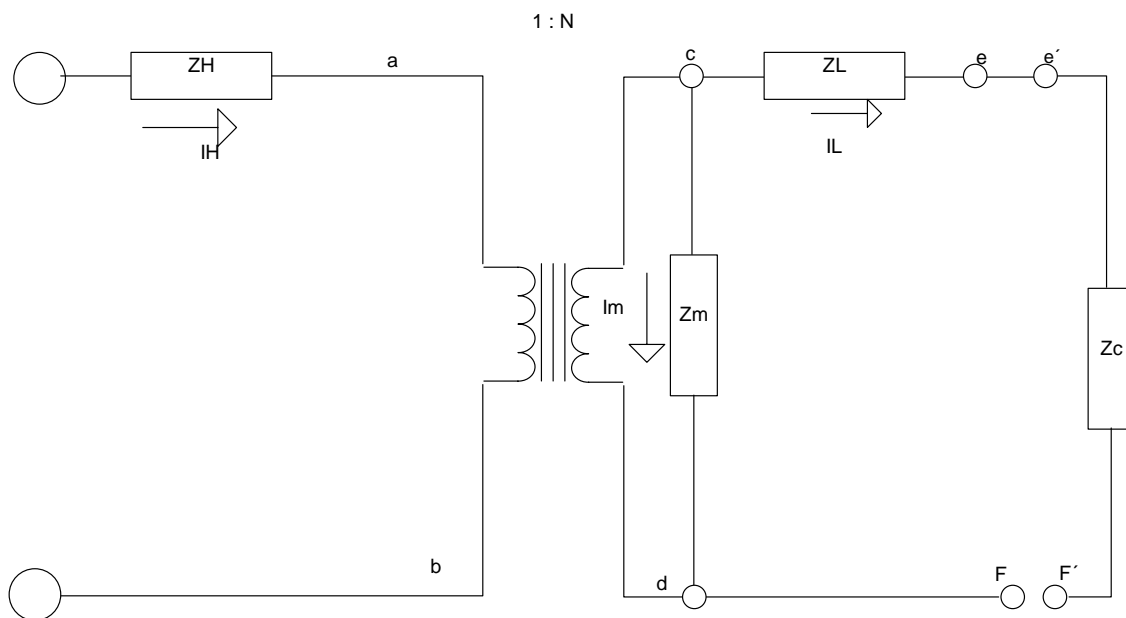


Figura 2. 2 Modelo eléctrico del transformador de corriente.

En el diagrama de la Figura 2.2 se utiliza la siguiente nomenclatura:

ZH = Impedancia propia del devanado de alta tensión.

ZL = Impedancia propia del devanado de baja tensión.

ZM = Impedancia de magnetización del transformador.

ZC = Impedancia de carga en el secundario.

IH = Corriente primaria.

IL = Corriente que alimenta a la carga.

IM = Corriente de magnetización.

1: N = Relación de transformación “RTC”.

Se debe tener cuidado para asegurarse de que el rango dinámico para detección de corriente con un TC dada es lo suficientemente grande para la aplicación. Los transformadores de corriente pueden saturar bajo gran corriente continua o corriente alta, y los diseñadores deben elegir los TC calificados para sus necesidades. Los TC pueden introducir cambio de fase y deben ser elegidos de acuerdo a la capacidad del diseñador para compensar este error. Además tenga en cuenta que ciertos TC introducen un error de escala inherente en función de la relación de vueltas seleccionado y, por lo tanto, se debe tener cuidado para asegurar que el nivel de corriente en el secundario del TC es el mismo como se esperaba.

2.3.2 Bobina de Rogowski:

El principio de funcionamiento básico de una bobina de Rogowski es medir la corriente primaria a través de inductancia mutua.

Cuando la corriente pasa a través de un conductor, forma un campo magnético alrededor del conductor [1]. La magnitud del campo magnético es directamente proporcional a la corriente. Los cambios en el campo magnético inducen una fuerza electromotriz (FEM) dentro de un bucle de alambre. La FEM es una señal de tensión y es proporcional a los cambios en el campo magnético dentro del bucle. La tensión de salida de la bobina es, por lo tanto, proporcional a la derivada (di/dt) de la corriente.

Una bobina de Rogowski se hace típicamente con un núcleo de aire, por lo que, en teoría, no hay histéresis, es decir la saturación o la no linealidad. Debido a que la bobina de Rogowski se basa en la medición del campo magnético, que hace que este tipo de sensor de corriente más susceptible a la interferencia de campo magnético externo que el TC.

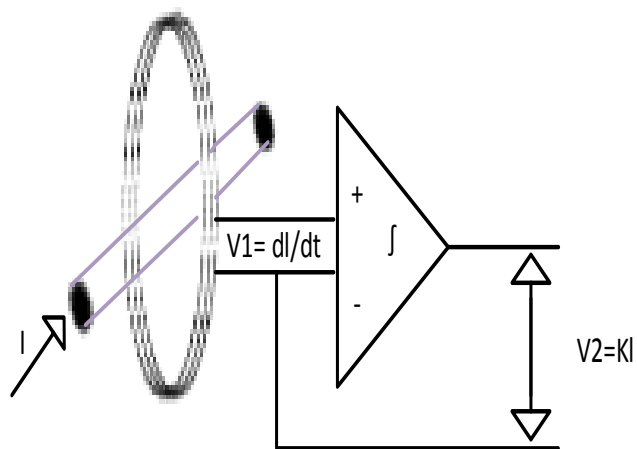


Figura 2. 3 Principio de funcionamiento de la bobina de Rogowski.

2.3.3 Sensor de voltaje

El sensor de voltaje consiste en un divisor de tensión. El divisor de tensión es un circuito simple que reparte la tensión de una fuente entre una o más impedancias conectadas [1]. Con sólo dos resistencias en serie y un voltaje de entrada, se puede obtener un voltaje de salida equivalente a una fracción del de entrada, como se observa en la Figura 2.4.

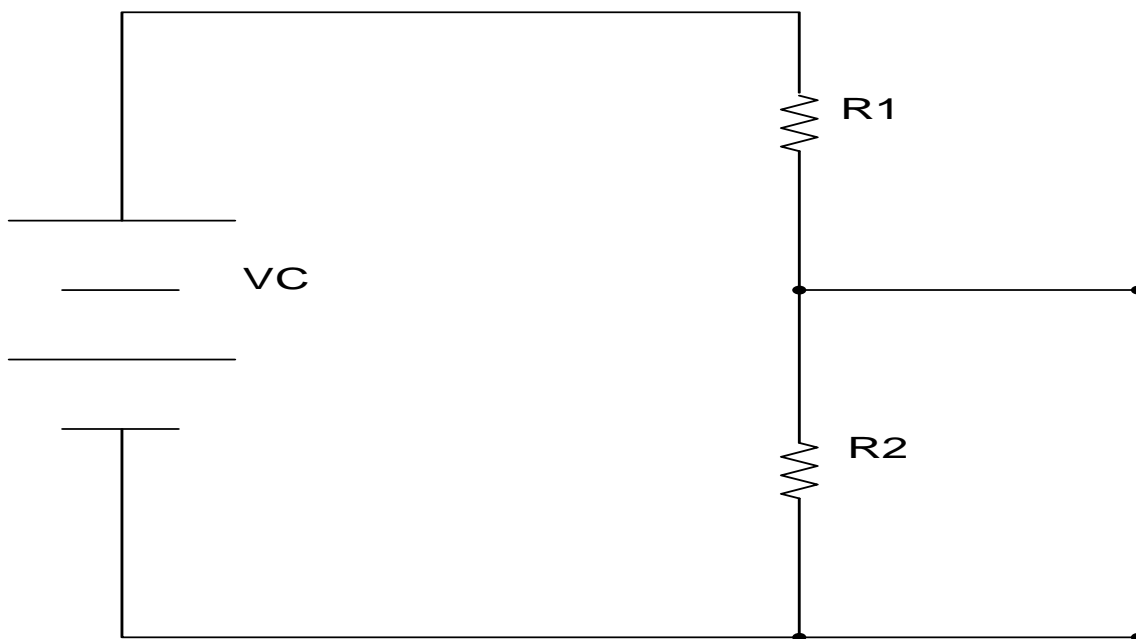


Figura 2. 4 Circuito eléctrico del divisor de tensión

Capítulo 3

3.1 Introducción

El medidor remoto de energía eléctrica está basado en el microcontrolador MSP430F677. El dispositivo MSP430F677 es un microcontrolador de 16 bits que cuenta con las características y flexibilidad necesaria para hacer mediciones de precisión en sistemas eléctricos polifásicos [4].

El MSP430F677 tiene una Unidad Central de Procesamiento (CPU por sus siglas en inglés) de 25 MHz. La interfaz analógica de este microcontrolador consiste en siete entradas analógicas independientes a los convertidores analógico-digitales (ADC) de 24 bits del tipo sigma delta de segundo orden [5]. Los convertidores de señal cuentan con elementos necesarios para soportar entradas de voltaje diferenciales.

Los ADCs sigma-delta funcionan de manera independiente y pueden dar resultados de los muestreos en 24 bits. Estos convertidores están agrupados para el muestreo simultáneo de tensiones y corrientes en la misma entrada. También tiene una etapa de ganancia integrado de hasta 128 para la amplificación en las señales de baja magnitud en los sensores de corriente [4]. El hardware multiplicador en el chip puede ser utilizado a 32 bits para acelerar las operaciones matemáticas durante el cálculo de la energía. El software de la biblioteca admite el cálculo de varios parámetros de energía, para su medición en sistemas eléctricos polifásicos. Los parámetros calculados durante las mediciones son:

- RMS de corriente y tensión.
- Energías Activa y Reactiva.
- Potencias Activa y Reactiva.
- Factor de potencia.
- Frecuencia.
- Análisis Armónico.
- Total de Distorsión armónica (THD).

3.2 Sistema embebido

El sistema embebido del MSP430F6779 conectado a un sistema trifásico en conexión estrella para efectos de la medición de los parámetros eléctricos mencionados anteriormente como se muestra en la Figura 3.1.

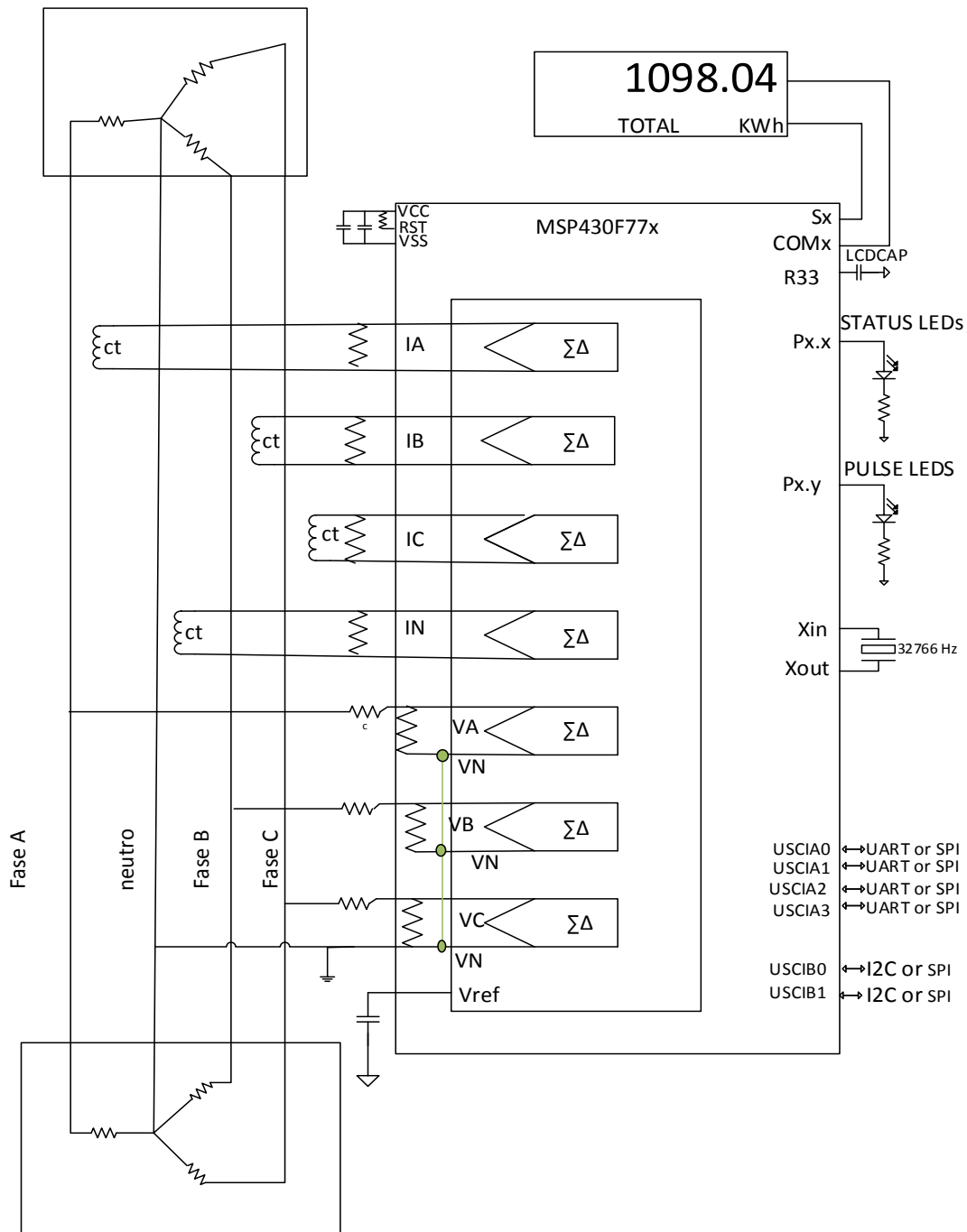


Figura 3. 1 Conexión estrella 3-Fases, 4-hilos usando el MSP430F677

Como se aprecia en la Figura 3.1, los sensores de corriente están conectados a cada uno de los canales de corriente y estos son del tipo transformador de corriente. Posteriormente, la corriente proveniente de estos sensores es convertida a una señal de voltaje mediante una

resistencia de carga para ser aplicada a los convertidores ADC sigma-delta. La resistencia de carga en paralelo con los transformadores de corriente TC debe estar conectada en todo momento para proteger a los ADC sigma-delta. Los transformadores de corriente TC pueden ser reemplazados fácilmente por bobinas Rogowski con cambios mínimos en este circuito.

3.3 Fuente de alimentación del sistema

El medidor electrónico tiene microcontroladores de bajo consumo de energía. Cada microcontrolador tiene una serie de modos de bajo consumo y también tienen bajo consumo de energía durante el modo activo cuando la CPU y otros periféricos están funcionando. La función de bajo consumo de energía del dispositivo permite que el diseño de la fuente de alimentación sea simple y de bajo costo. La fuente de alimentación permite el funcionamiento del medidor de energía alimentándose directamente de la red eléctrica [4].

El medidor de energía tiene dos diferentes opciones de fuentes de alimentación, las cuales se describen a continuación

3.3.1 Fuente de alimentación Resistor capacitor (RC)

La Figura 3.2 muestra una fuente de alimentación resistor capacitor, que proporciona un voltaje de salida de 3,3 V alimentándose de la red eléctrica de 120/230 V de corriente alterna CA RMS a 50 o 60 Hz. Como se aprecia en la Figura 3.2 esta fuente básicamente consiste de un rectificador puente completo trifásico y después de un convertidor conmutado CD/CD para regular el voltaje de alimentación.

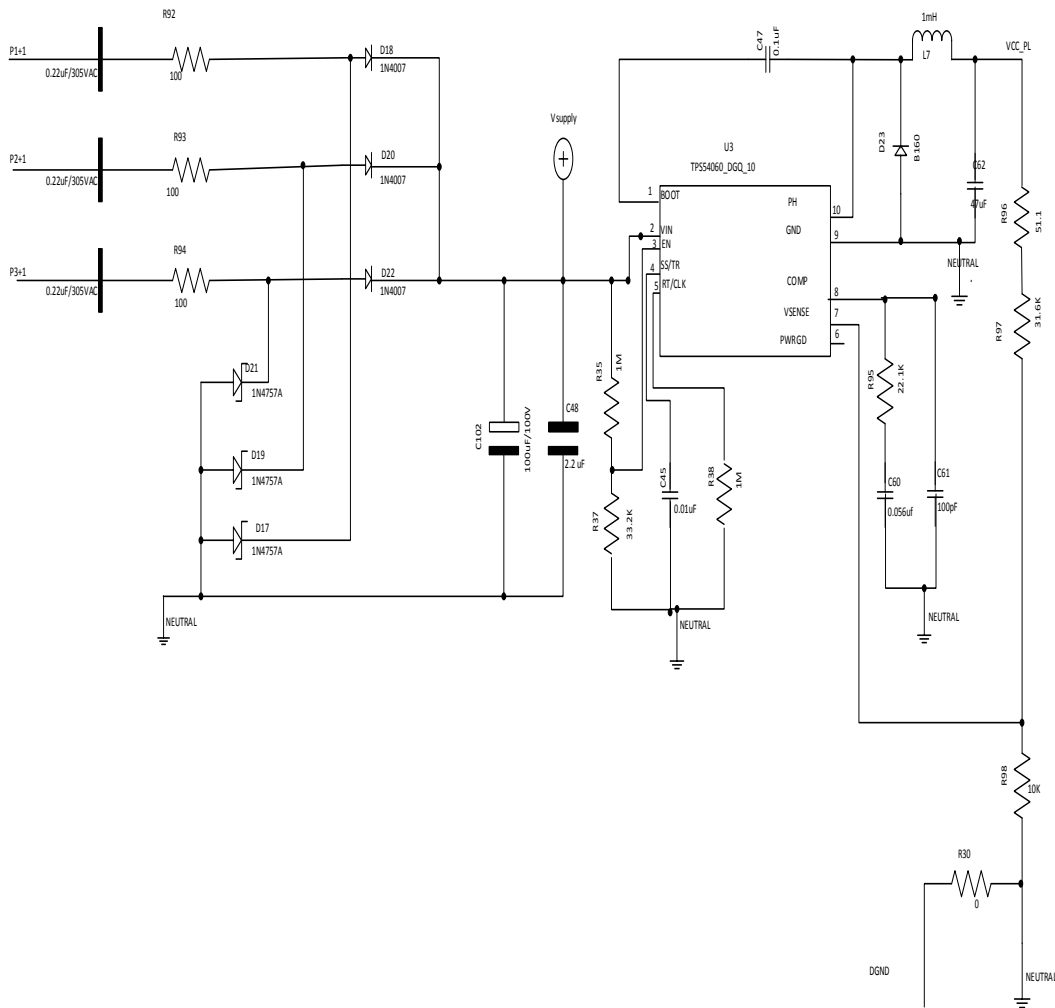


Figura 3. 2 Fuente de alimentación resistor-capacitor

Se deben elegir los valores adecuados de resistencias (R92, R93, R94) y los condensadores (C39, C46, C50) basado en la salida del convertidor de corriente requerida por la fuente de alimentación [4]. El voltaje de la red eléctrica alimenta directamente a un circuito resistor capacitor RC seguido por un circuito de rectificación para proporcionar un voltaje de corriente continua CC para el funcionamiento del MSP430.

El voltaje de salida se regula a 3,3 V para el funcionamiento del MSP430. Esta configuración permite que las tres fases que contribuyen a la unidad actual, que es de aproximadamente tres veces el de la unidad disponible de una sola fase.

3.3.2 Fuente de alimentación conmutada

La figura (3.3) muestra una fuente de alimentación basada en la conmutación, la fuente de alimentación proporciona un voltaje de salida de 3,3 V desde la red eléctrica de corriente alterna a 100 V o 230 V RMS. En esta configuración el medidor se alimenta siempre y cuando haya voltaje de corriente alterna en la fase C, lo que corresponde a la línea 3 en el hardware y el P3 1 en el esquema [4].

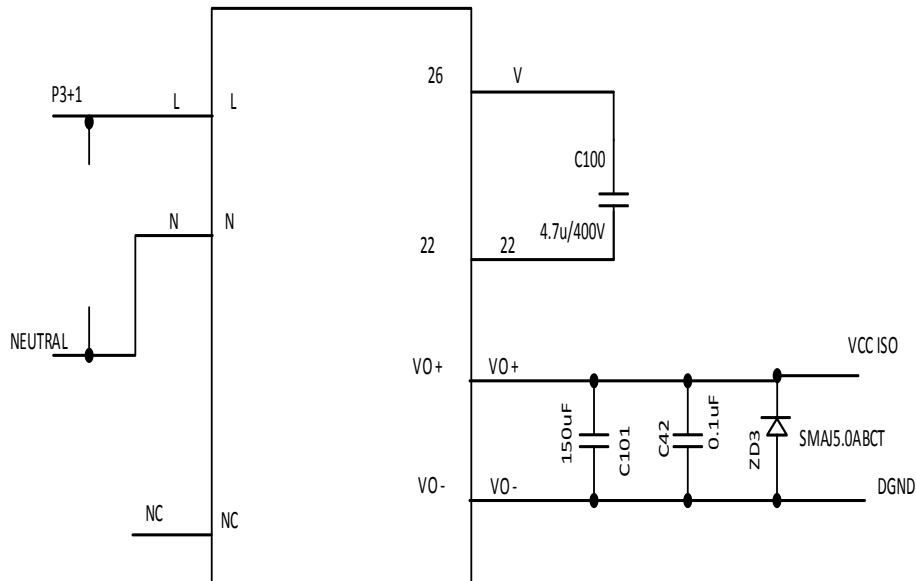


Figura 3. 3 Fuente de alimentación conmutada

3.4 Entradas analógicas

La parte frontal analógica del MSP430, que consiste en los convertidores ADCs tipo sigma-delta $\Sigma\Delta$, los cuales son de canal diferencial y requieren que voltajes de entrada en sus pines no excedan ± 930 mV. Para cumplir con esta especificación, la corriente y el voltaje de entrada deben ser atenuados. Los convertidores sigma-delta $\Sigma\Delta$ permiten un voltaje máximo negativo de -1 V. Con esto, las señales de corriente alterna de la red pueden ser conectadas directamente, sin la necesidad de un circuito adicional para desplazar el voltaje atenuado de la red eléctrico.

3.4.1 Entradas analógicas de tensión

El voltaje de la red eléctrica es por lo general 120 V o 230 V RMS y debe ser llevado a un rango de 930 mV. La parte analógica para la tensión consiste en varistores de protección pico seguido de un divisor de tensión y un filtro pasa bajas RC, como se muestra en la Figura 3.4 [4].

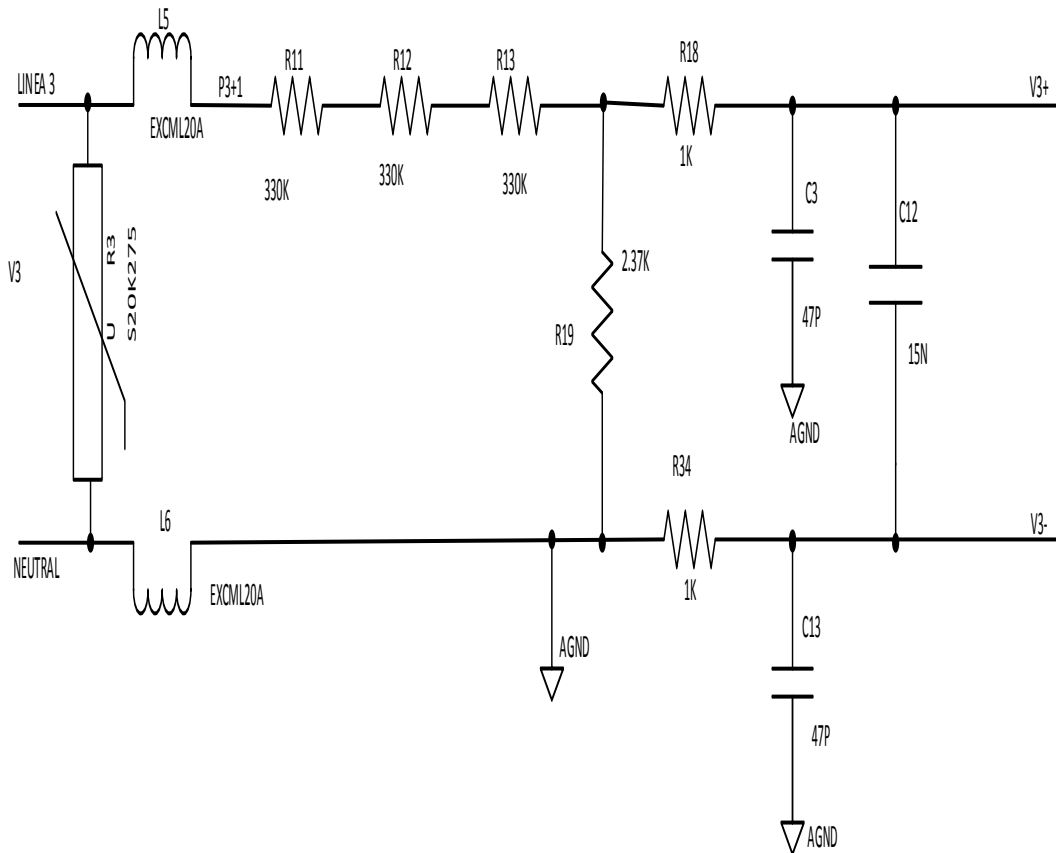


Figura 3. 4 Diagrama de las entradas analógicas a los ADCs.

La Figura 3.4 muestra la parte frontal analógica para las entradas de voltaje, con un voltaje de red de 230 V. El voltaje es atenuado hasta 549 mV RMS, que corresponde a 779 mV pico, y se alimenta a la entrada positiva. Este voltaje está dentro de los límites del convertidor $\Sigma\Delta$ del MSP430 con un margen de seguridad mayor de 15%. Este margen permite mediciones precisas durante condiciones de voltaje pico.

3.4.2 Entradas analógicas de Corriente

La parte analógica para las entradas de corriente es diferente de la parte analógica para las entradas de voltaje. La figura 3.5 muestra la parte analógica usado para un canal de corriente.

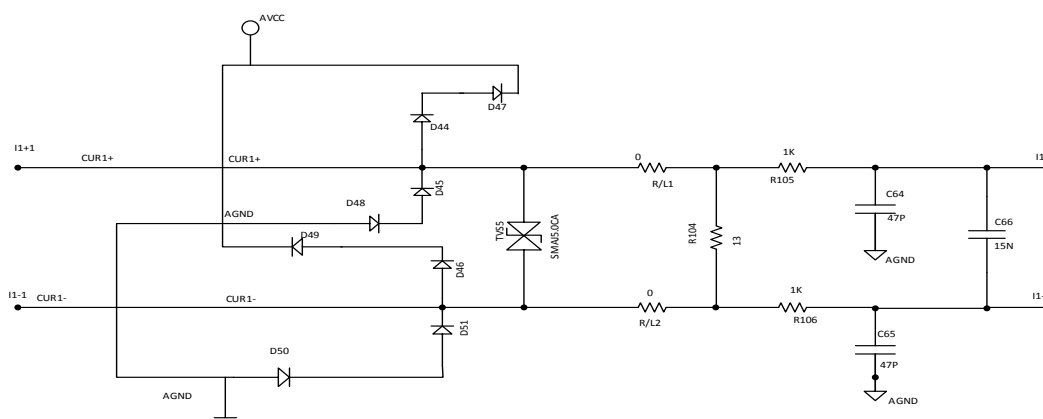


Figura 3. 5 Entradas analógicas de corriente.

El resistor R104 es la resistencia de carga que se selecciona sobre la base de la relación de vueltas del transformador de corriente TC. El valor de la resistencia de carga para este diseño es de 13Ω .; los circuitos de atenuación, consisten en resistencias y capacitores, seguido de la resistencia de carga. La entrada de señal al convertidor es una entrada diferencial con una oscilación de voltaje de $\pm 919 \text{ mV}$ máximo cuando la ganancia del convertidor se establece en 1 [4].

3.5 Implementación del software

El software que implementa el medidor remoto de energía es dividido en dos distintos procesos, el proceso de primer plano y el proceso de fondo.

3.5.1 Configuración de sistemas periféricos

Los principales sistemas periféricos son el convertidor ADC sigma-delta de 24 bits ($\Sigma\Delta$), el sistema de reloj, temporizador, LCD y el temporizador de vigilancia (WDT).

3.5.2 Configuración del convertidor sigma delta $\Sigma\Delta$

El microcontrolador F677 tiene siete convertidores de datos tipo sigma delta, independientes. Para un sistema trifásico de voltaje, menos de seis convertidores son necesarios para medir de forma independiente los voltajes y corrientes. El código que acompaña esta aplicación está diseñado para hacer mediciones en un sistema de 3 fases con “antitampering”. Sin embargo, el código es compatible con la medición de la corriente en el neutro. El reloj del convertidor sigma delta $\Sigma\Delta$ (FM) se deriva del reloj del sistema, que está configurado para funcionar a 16 MHz. La frecuencia de muestreo es definido como:

$$f_s = \frac{f_M}{OSR} \quad (3.1)$$

La OSR es el valor de un registro de 8 bits con el mismo nombre y cuyo valor puede ser configurado hasta un valor de 256 y la frecuencia de modulación (FM), es de 1.048576 MHz, lo que resulta en una frecuencia de muestreo de 4.096 ksps [4]. Los convertidores $\Sigma\Delta$ se configuran para generar interrupciones regulares en cada instancia de muestreo definido.

Las siguientes son las asociaciones de los canales de los convertidores $\Sigma\Delta$:

A0.0 + y A0.0- → voltaje V1

A1.0 + y A1.0- → voltaje V2

A2.0 + y A2.0- → voltaje V3

A4.0 + y -A4.0 → corriente I1

A5.0 + y -A5.0 → corriente I2

A6.0 + y -A6.0 → corriente I3

El voltaje y corriente del neutro puede ser procesado a través de canal + A3.0 y A3.0. Para esta aplicación no está implementada la medición del neutro.

3.5.3 Reloj de tiempo real (RTC_C)

El RTC_C es un módulo de reloj en tiempo real que está configurado para dar interrupciones precisas por 1 segundo. Basado en estas interrupciones de 1 segundo, la hora y la fecha se actualizan en el software, según sea necesario.

3.5.4 Controlador de LCD

El controlador LCD en la MSP430F677 soporta hasta 8 pantallas-mux de 320 segmentos. Esta también equipado con un circuito de almacenamiento de energía que se puede utilizar para un buen contraste. En el diseño, la pantalla LCD en el controlador está configurado para funcionar en modo de 4 pantallas-mux, usando 160 segmentos con la frecuencia de actualización se establece en $ACLK/64$, que es 512 Hz.

3.6 Proceso de primer plano

El proceso en primer plano incluye la configuración inicial del dispositivo y los programas del MSP430 después del reinicio del medidor. La Figura (3.6) muestra el diagrama de flujo para este proceso [4].

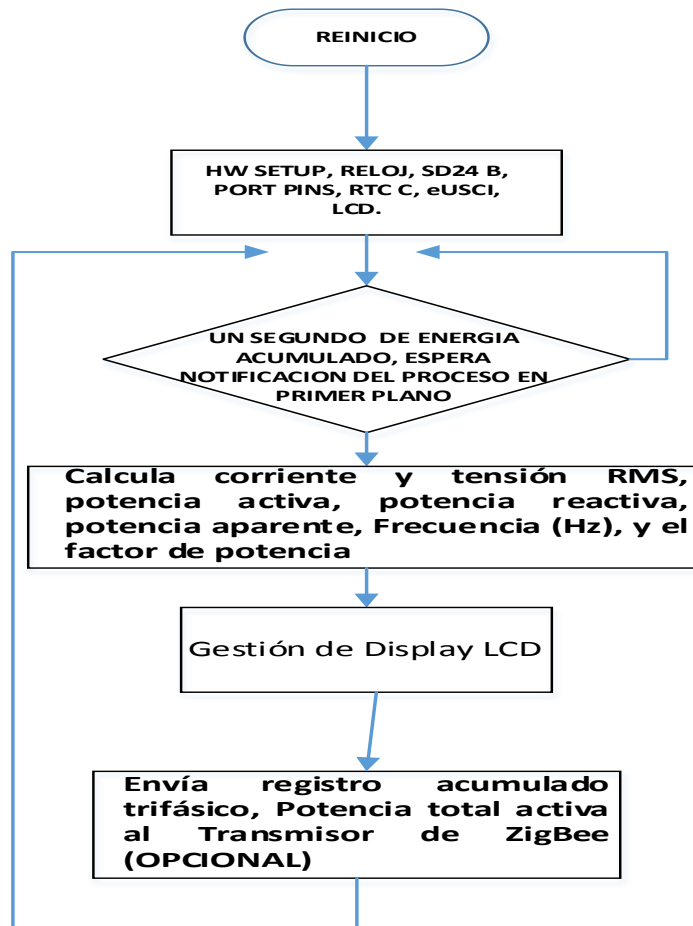


Figura 3. 6 Diagrama de flujo del proceso de primer plano

Las rutinas de inicio implican la configuración de los convertidores analógico digital sigma-delta, sistema de reloj, uso en general de puertos de entrada / salida, el módulo RTC para la funcionalidad de reloj, el LCD, y la USCI_A0 para funcionalidad UART. Además, si se habilita la comunicación ZigBee, el USCI_A3 se encuentra ya configurado.

Después de que el hardware está configurado, el proceso en primer plano espera a que el proceso en segundo plano lo notifique para calcular nuevos parámetros de medición. Esta notificación se realiza a través de un indicador de estado cada vez que un conjunto de datos está disponible para su procesamiento. El muestreo de datos se compone de los valores de la corriente, voltaje, energía activa, y energía reactiva acumulada durante un segundo. Esto es equivalente a la acumulación de 50 o 60 ciclos de datos sincronizados a la señal del voltaje de entrada. Un contador de muestras hace un seguimiento de la cantidad de

datos que se han acumulado a lo largo de este periodo de muestreo. Este recuento puede variar debido a que el software se sincroniza con la frecuencia de la red entrante.

Los voltajes procesados se acumulan en registros de 48 bits. En contraste, las corrientes procesadas, energías activas, y las energías reactivas se acumulan en registros de 64 bits por separado a otro proceso para obtener el RMS y la media de los valores. Utilizando los valores del primer plano calculados de potencia activa y reactiva, se calcula la potencia aparente. La frecuencia en Hertz y el factor de potencia también se calculan utilizando parámetros calculado por el proceso de fondo.

3.7 Adquisición de señales de parámetros eléctricos

En esta sección se describen las fórmulas utilizadas para el cálculo del voltaje, corriente y los cálculos de energía.

3.7.1 Fórmulas de Cálculo

Esta sección describe las fórmulas utilizadas para el cálculo del voltaje, corriente y cálculos de energía.

3.7.2 Voltaje y Corriente RMS

La tensión simultánea y muestras de corriente se obtienen a partir de los convertidores $\Sigma\Delta$ s independientes, a una velocidad de muestreo de 4096 Hz. Todas las muestras que se toman en 1 segundo se mantienen y se utiliza para obtener los valores eficaces de voltaje y corriente para cada fase [4]. Los valores RMS son obtenidos por las siguientes fórmulas:

$$V_{rms} = K_{vph} \frac{\sqrt{(\sum_n^{\text{numero de muestras}} v_{ph}^{n*} v_{ph}^n)}}{\text{numero de muestras}} \quad (3.2)$$

$$I_{rms} = K_{iph} \frac{\sqrt{(\sum_n^{\text{numero de muestras}} i_{ph}^{n*} i_{ph}^n)}}{\text{numero de muestras}} \quad (3.3)$$

donde

ph = fase de referencia, la fase A (= 1), B (= 2), o C (= 3)

vph^n = muestra del voltaje en una muestra instantánea n

iph^n = muestra de la corriente en una muestra instantánea n

numero de muestras = número de muestras en un segundo

Kvph = Factor de escala para el voltaje.

Kiph = Factor de escala para cada corriente.

3.7.3 Potencia y energía

La potencia y la energía se calculan para el valor de un número determinado de muestras de energía activa y reactiva. Estas muestras tienen una corrección de fase y se transmiten al proceso en primer plano, que utiliza el número de muestras para calcular la potencia activa y reactiva de fase por las fórmulas.

$$P_{act} = K_{act,ph} \frac{(\sum_{n=1}^{\text{número de muestras}} v(n)Xiph^n)}{\text{número de muestras}} \quad (3.4)$$

$$P_{act} = K_{react,ph} \frac{(\sum_{n=1}^{\text{número de muestras}} v90(n)Xiph^n)}{\text{número de muestras}} \quad (3.5)$$

Donde:

$v(n)Xiph^n$ = muestra de voltaje en un instante de muestra n.

Kact,ph = Factor de escala de potencia activa.

Kreact,ph = Factor de escala de la potencia reactiva.

La energía activa se calcula a partir de la potencia activa como:

$$E_{act,ph} = P_{act,ph} * \text{numero de muestra} \quad (3.6)$$

$$E_{react,ph} = P_{react,ph} * \text{numero de muestra} \quad (3.7)$$

Debido a que la frecuencia de la red varía, es importante medir primero la frecuencia de la red a la fase, ya que podrían variar las muestras de voltaje.

La aplicación de corrección de fase consta de una parte entera y una parte fraccional, la parte de número entero se realiza proporcionando una N muestras de retardo. La parte fraccionaria se realiza por un filtro de retardo fraccional.

Después de calcular la potencia activa y reactiva, la potencia aparente de cada fase se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P_{app,ph} = \sqrt{P_{act,ph}^2 + P_{react,ph}^2} \quad (3.8)$$

Además de calcular la potencia y la energía activa y reactiva por fase, la suma acumulada de estos parámetros se calcula mediante:

$$P_{act,acumulada} = \sum_{ph=1}^3 P_{act,ph} \quad (3.9)$$

$$P_{react,acumulada} = \sum_{ph=1}^3 P_{react,ph} \quad (3.1.1)$$

$$E_{act,acumulada} = \sum_{ph=1}^3 E_{act,ph} \quad (3.1.2)$$

$$E_{react,acumulada} = \sum_{ph=1}^3 E_{react,ph} \quad (3.1.3)$$

El proceso en segundo plano calcula la frecuencia en términos de muestras por ciclo de red. El proceso de primer plano, entonces lo convierte a Hertz por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{frecuencia (Hz)} = \frac{\text{Frecuencia de muestreo (muestras/segundo)}}{\text{frecuencia (muestras /ciclo)}} \quad (3.1.4)$$

3.7.4 Factor de Potencia

Después de haber calculado la potencia activa y la potencia aparente, el valor absoluto del factor de potencia es calculado. En representación interna del factor de potencia del medidor, un factor de potencia positivo corresponde a una carga capacitiva y un factor de potencia negativo corresponde a una carga inductiva [4]. El signo de la representación interna del factor de potencia se determina si las ondas senoidales de corriente o de voltaje se retrasan, lo que es determinado en el proceso de fondo. Por lo tanto, se calcula la representación interna de factor de potencia por la siguiente fórmula:

$$\text{Representacion del factor de potencia} = \frac{P_{act}}{P_{app}}, \text{ si la carga es capacitiva} \quad (3.1.5)$$

$$\text{Representacion del factor de potencia} = -\frac{P_{act}}{P_{app}}, \text{ si la carga es inductiva} \quad (3.1.6)$$

3.8 Acondicionamiento de señales

El acondicionamiento de señales es llevado a cabo en el proceso de fondo, El proceso de fondo utiliza el convertidor $\Sigma\Delta$ de interrupción como un señalizador para coleccionar muestras de voltaje y de corriente [4-5]. Estas muestras se usan para calcular los resultados intermedios. Debido a que en las muestras de voltaje se procesan en 16 bits, las muestras se procesan adicionalmente y se acumulan en los registros de 48 bits. Por el contrario, las muestras de corriente se almacenan en registros de 24 bits, se procesan y se acumulan en registros de 64 bits. La potencia activa y potencia reactiva de cada fase también se acumulan en registros de 64 bits.

El proceso de fondo se ocupa de la temporización de eventos críticos en el software. Después de que suficientes muestras se han acumulado, el proceso de primer plano se activa para calcular los valores finales de V_{rms} , I_{rms} , potencias activa, reactiva y aparente, así como la energía activa, reactiva y aparente, la frecuencia y el factor de potencia. El proceso en segundo plano también es responsable del cálculo de pulsos proporcionales de energía, la frecuencia (en muestras / ciclo), y la determinación de la corriente en condiciones de adelanto y atraso. La Figura 3.7 muestra el diagrama de flujo del proceso de fondo.

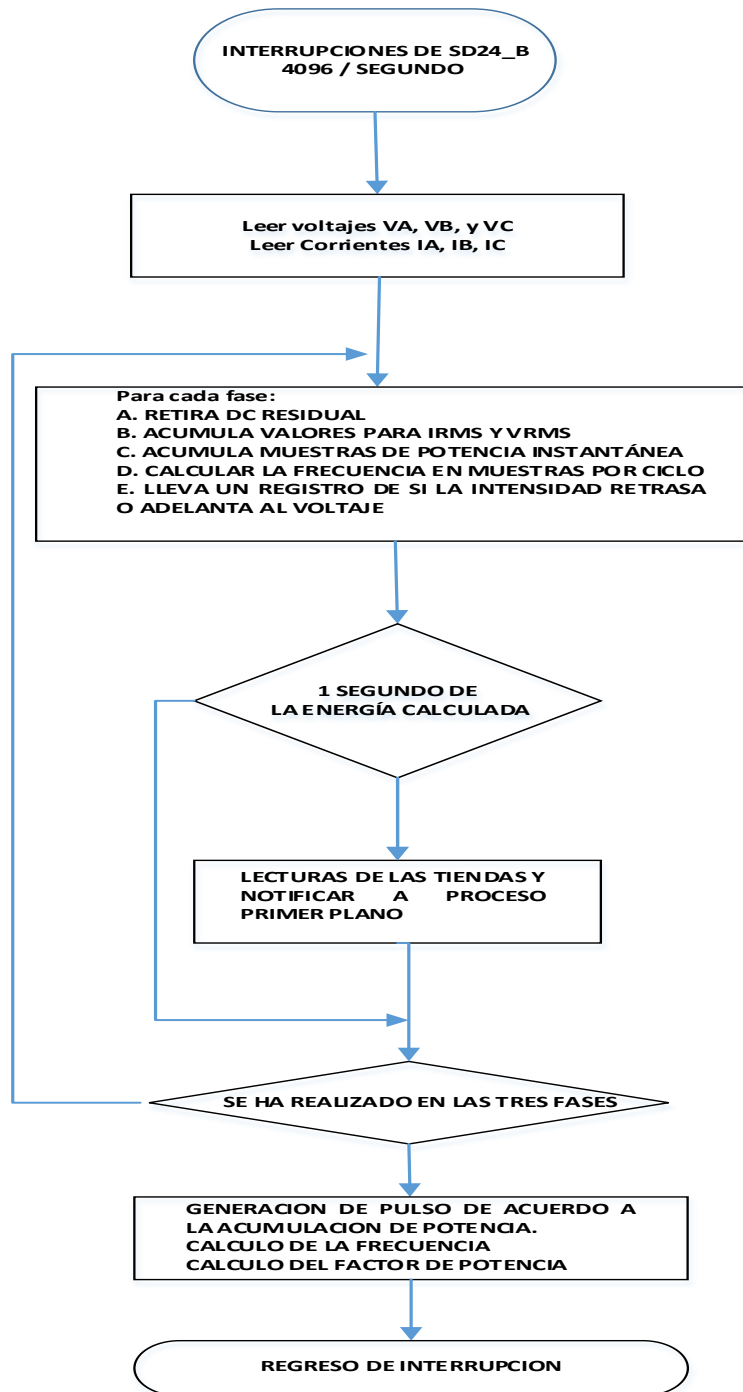


Figura 3. 7 Diagrama de flujo del proceso de fondo

3.8.1 Señales de tensión y de corriente

El convertidor $\Sigma\Delta$ tiene arquitectura de entrada diferencial y cada pin de un convertidor $\Sigma\Delta$ puede aceptar entradas negativas; así, ningún cambio de nivel en el voltaje de corriente

alterna de entrada es necesario [4-5]. La salida de cada convertidor $\Sigma\Delta$ es un entero y cualquier pérdida de corriente directa o valor de desplazamiento se eliminan, estos convertidores $\Sigma\Delta$ usan un filtro de seguimiento de corriente continua CC. Las estimaciones independientes para los voltajes y corrientes CC se obtienen utilizando el filtro y muestras de voltaje y de corriente ya acumuladas. Estas estimaciones se restan de cada muestra de tensión y de corriente.

El voltaje instantáneo resultante y las muestras de corriente se utilizan para generar los siguientes resultado intermedio:

- El valor acumulado de los valores cuadrados de voltajes y corrientes que se utilizan para cálculos de voltaje V_{rms} y de corriente I_{rms} .
- El valor acumulado de las muestras de energía para calcular las energías activas.

Estos valores acumulados son procesados por el proceso de primer plano.

3.8.2 Compensación de fase

Cuando un transformador de corriente (TC) se utiliza como sensor, se introduce un desplazamiento de fase adicional en las señales. También, la tensión y los componentes pasivos del circuito de entrada de corriente pueden introducir un cambio de fase adicional. El desplazamiento de fase entre las muestras de tensión y de corriente debe ser compensado para asegurar mediciones precisas. Los convertidores $\Sigma\Delta$ tienen un retardo de registros programables ($\Sigma\Delta 24PREx$) que se puede aplicar a un canal en particular. Esta característica en precarga se utiliza para proporcionar la compensación de fase requerida.

La resolución de retardo fraccional es una función de la frecuencia de entrada (F_{in}), el valor en el registro OSR, y la frecuencia de muestreo (f_s).

$$resolucion\ de\ retardo = \frac{360^\circ \times fin}{OSR \times fs} = \frac{360^\circ \times fin}{fM} \quad (3.1.7)$$

En una aplicación, con una frecuencia de entrada de 60 Hz, un valor en el registro OSR de 256, y una frecuencia de muestreo de 4096, la resolución para cada bit en el registro de precarga es de aproximadamente $0,02^\circ$, con un máximo de $5,25^\circ$ de 255 pasos [4]. Debido a que el muestreo de los siete canales es un grupo independiente, un método comúnmente

utilizado es aplicar 128 pasos de retraso a todos los canales y luego aumentar o disminuir este valor base. Esto permite aumentar o disminuir el tiempo de retardo para compensar el avance de fase o desfase. Esto pone al límite práctico el diseño de $\pm 2,62^\circ$. Al utilizar los transformadores de corriente TC que proporcionan un desplazamiento de fase más grande que este máximo ya definido, también deben ser proporcionados retrasos de muestra junto con retardo fraccional. Esta compensación de fase también puede ser modificada mientras la aplicación se está ejecutando, pero las conversiones en los convertidores $\Sigma\Delta$ deben ser detenidas mientras se realizan cambios en la compensación de fase.

3.8.3 Medición de Frecuencia y Seguimiento de Ciclo

Las muestras de voltaje instantáneo de cada fase se acumulan en los registros de 48 bit. Mientras que las muestras de corriente, potencia activa y potencia reactiva se acumulan en registros de 64 bits. Un contador de ciclo y un contador de muestras de seguimiento mantienen un registro del número de muestras acumuladas [4]. Cuando aproximadamente un valor de un segundo de muestras se han acumulado, el proceso en segundo plano almacena estos registros de acumulación y notifica al proceso de primer plano para producir los resultados intermedios como RMS y los valores de las potencias. Los límites de ciclos se utilizan para activar el proceso de promediado en primer plano ya que producen resultados muy estables. Para las mediciones de frecuencia, una línea de interpolación lineal se utiliza entre las muestras de tensión en el cruce por cero como se muestra en la Figura 3.8.

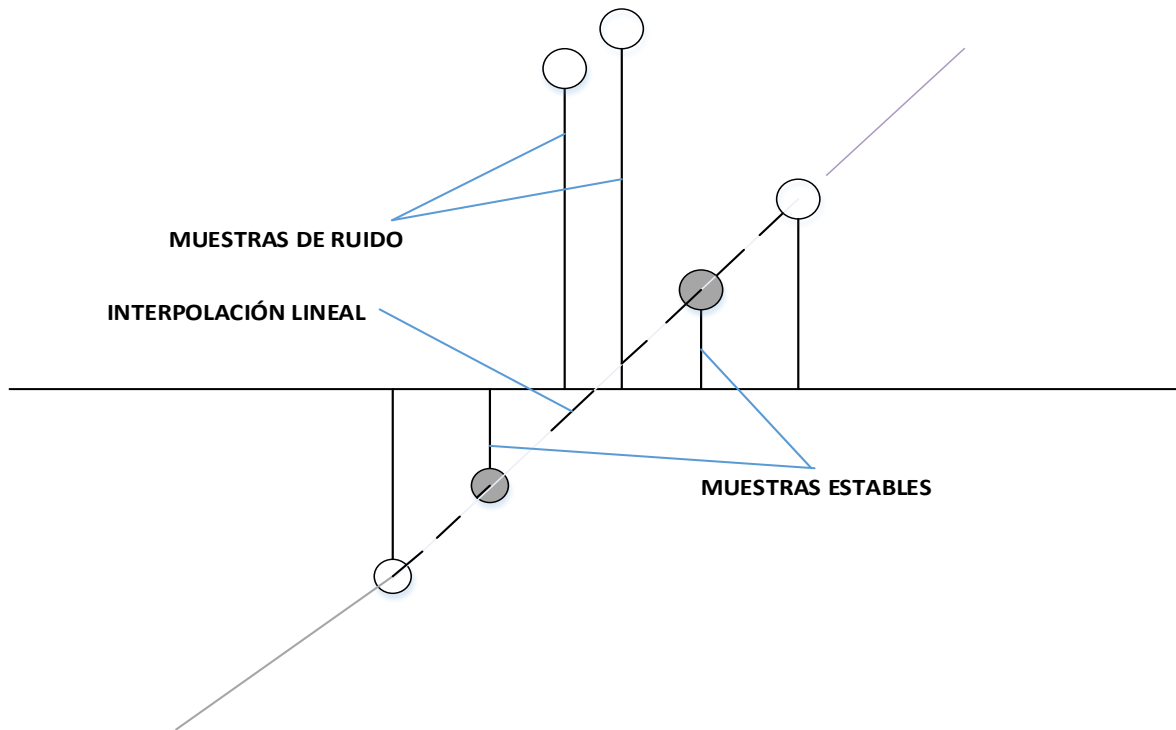


Figura 3.8 Muestreo de las señales cerca del cruce por cero y su interpolación lineal

Los picos de ruido pueden causar errores, para evitar estos errores se utiliza la aplicación de una tasa de cambio, para filtrar las posibles señales erróneas y asegúrese de que los dos puntos que se interpolan a partir de cero son puntos de cruce. El momento resultante de ciclo a ciclo pasa por un filtro pasa-bajas para suavizar más el ciclo de variaciones. Esto resulta en una medición de frecuencia estable y precisa que es tolerante de ruido.

Capítulo 4

Capítulo 4 Instalación, implementación y obtención de datos del módulo de evaluación del medidor de energía a través del sistema embebido

Arduino

4.1 Introducción

El módulo de evaluación del medidor de energía es capaz de hacer mediciones de potencia en tiempo real y transmitirlos por medio de pulsos, estos datos pueden ser visualizados en la PC con ayuda de la plataforma abierta de sistema embebido Arduino que se encarga de contar estos pulsos por segundo y por medio de fórmulas previamente programadas en el medidor, la información es procesada y acumulada, realizando así un conteo de la energía consumida, la cual es transmitida vía Ethernet para poder ser visualizada en una página web previamente diseñada. La Figura 4.1 muestra la vista superior del hardware del módulo de evaluación del medidor de energía.

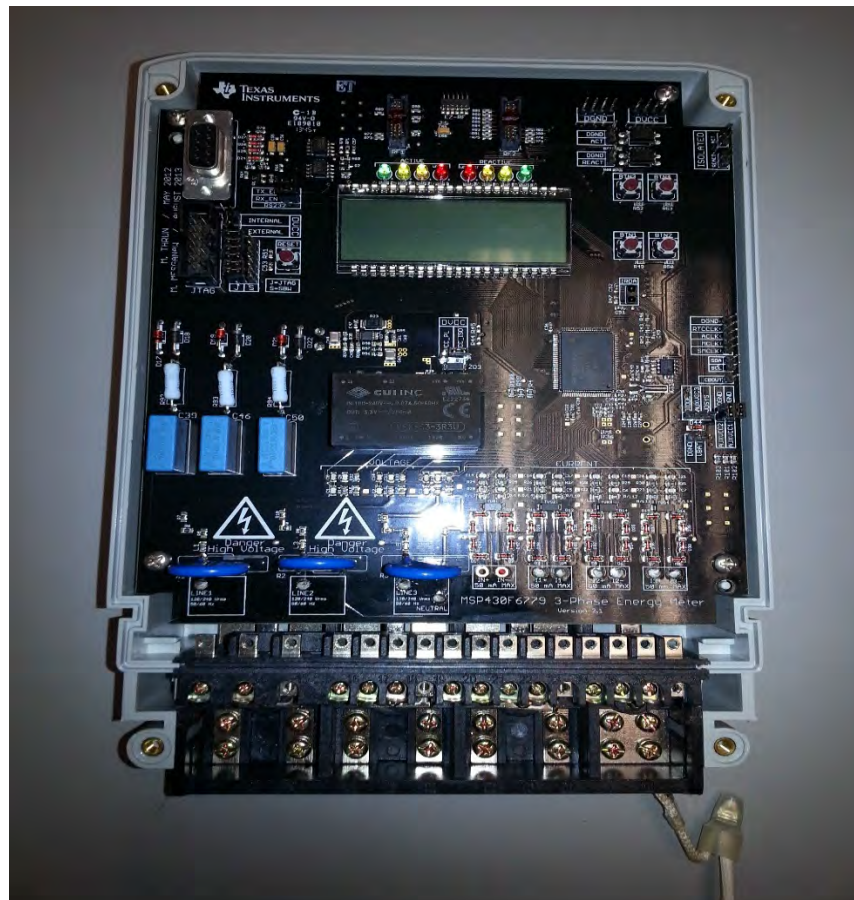


Figura 4. 1 Vista superior del módulo de evaluación del medidor de energía

El módulo de evaluación viene equipado con diferentes elementos que contribuyen a su correcto funcionamiento y le permite realizar mediciones precisas en tiempo real. En la Figura 4.2 se muestra la ubicación de los principales componentes del medidor de energía, basados en su funcionalidad.

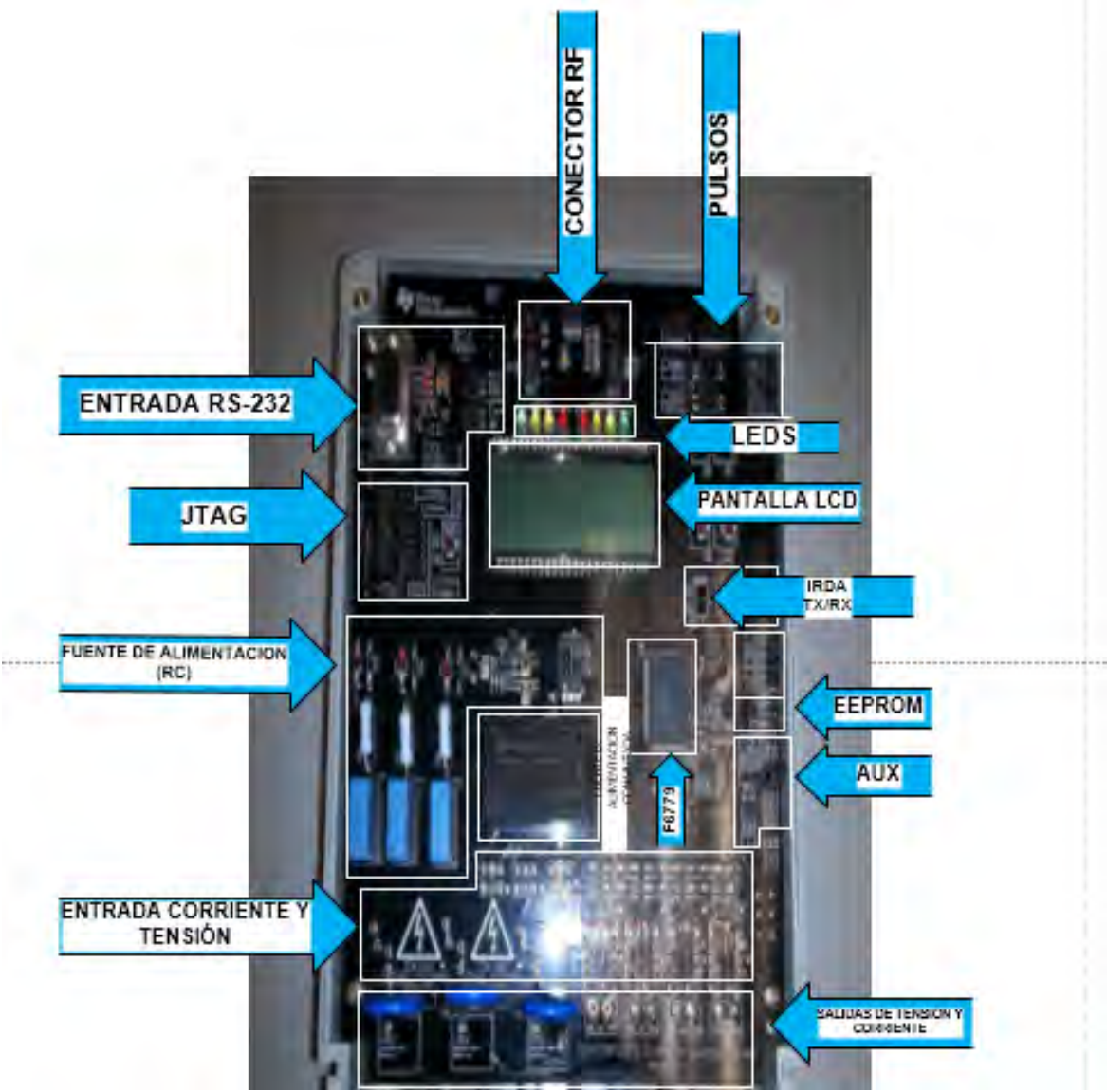


Figura 4.2 Ubicación de componentes del medidor de energía.

4.2 Entradas de tensión de corriente alterna AC

El módulo de evaluación del medidor de energía dispone de cuatro puertos o entradas de voltaje que corresponden a los voltajes de las fases del sistema trifásico y una más para la línea del neutro [4].

- Puerto 1 corresponde a la conexión de la línea de la fase A.
- Puerto 2 corresponde a la conexión de la línea de la fase B.
- Puerto 3 corresponde a la conexión de la línea para la fase C.
- Puerto N corresponde a la línea de tensión del neutro.

La tensión entre cualquiera de las tres conexiones de fase para la conexión del neutro puede ser de hasta 230 VAC a 50/60 Hz.

La Figura 4.3 muestra las conexiones desde la vista superior. Los puertos VA, VB, y VC que corresponden a las conexiones de las línea de voltaje para las fases A, B, y C, respectivamente. El puerto VN corresponde a la línea del neutro.

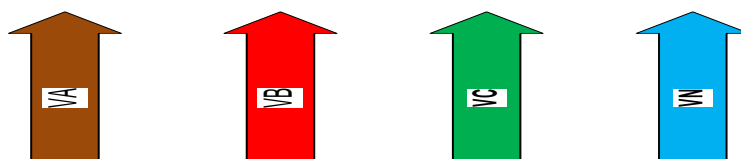


Figura 4. 3 Conexiones de las entradas de tensión

4.3 Entradas de corriente

Las entradas de corriente son físicamente diferentes a las entradas de tensión, las entradas de corriente se dividen en 2 por fase, una entrada positiva (+) y una negativa (-). El módulo de evaluación tiene ocho entradas de corriente que corresponden a las tres fases y a la línea del neutro.

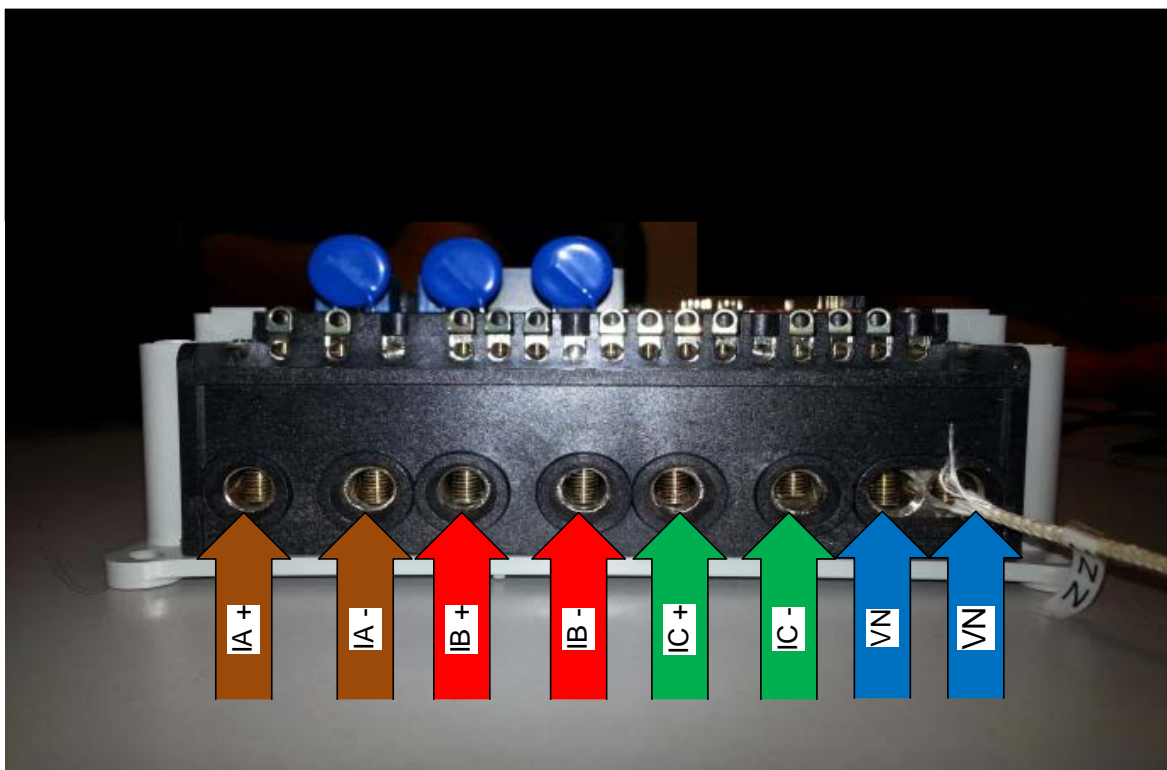


Figura 4. 4 Conexiones de las entradas de corriente

- (I1+ e I1-) son las entradas de corriente para la fase A.
- (I2+ e I2-) son las entradas de corriente para la fase B.
- (I3+ e I3-) son las entradas de corriente para la fase C.
- (IN + e IN) son las entradas para la línea de neutro.

La Figura 4.4 muestra las conexiones desde la vista frontal. (IA+ y IA-) que corresponden a las entradas de corriente para la fase A, IB + y IB- corresponden a las entradas de corriente de la fase B, e IC + y IC-corresponde a la entradas de corriente para la fase C. VN corresponde a la línea del neutro.

4.4 Generación de pulsos del módulo de evaluación del medidor de energía

En los medidores de energía eléctrica, la energía consumida se mide normalmente en fracciones de kilowatt-hora por medio de pulsos eléctricos. Esta información se puede utilizar para calibrar cualquier medidor de energía para obtener una medición precisa, en el módulo de evaluación del medidor de energía el microcontrolador MSP430 se encarga de generar pulsos proporcionales a la potencia conectada y a su vez por la energía consumida [4]. Para realizar estas dos funciones de manera eficiente, la generación de pulso debe ser precisa y con poca distorsión eléctrica.

En esta aplicación el medidor de energía utiliza la potencia media para generar estos impulsos de energía. La potencia media calculada en el proceso de primer plano se acumula en cada convertidor sigma-delta $\Sigma\Delta$, extendiendo de esta manera la energía acumulada por 1 segundo de tiempo de manera uniforme, esto es equivalente a su conversión a energía [4].

En esta aplicación, el número de pulsos generados por kilowatt-hora (KWh) se establece en 6400 para energías activa y reactiva. La energía de cada pulso en este caso es (1 kWh / 6400 pulsos). Estos pulsos son transmitidos por medio de un puerto integrado al módulo de evaluación del medidor de energía [4]. La Figura 4.5 muestra los puertos para las salidas de señal generada por los pulsos de energía.

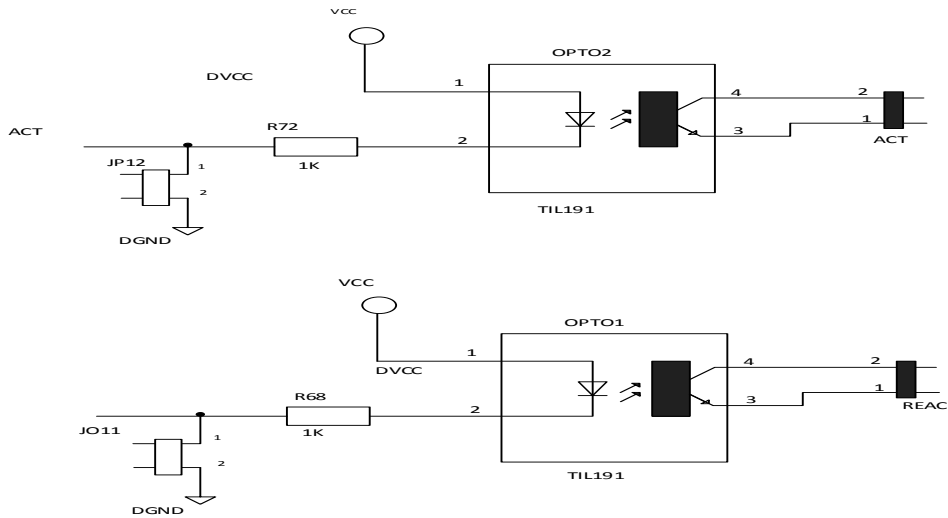


Figura 4. 5 Diagrama eléctrico de las salidas de pulsos eléctricos

Por medio de estos puertos de salida de señales de pulsos se obtiene la información sobre la energía consumida por unidad de tiempo; esto es posible por medio de un sistema embebido de Arduino programado previamente. El programa desarrollado consiste en que por medio de la cantidad de pulsos generado en un periodo de 1 segundo la placa identifique la potencia conectada. Para la lectura de los datos que genera el módulo de evaluación del medidor de energía se utiliza una entrada digital en el Arduino. La tarjeta Arduino tiene integrado en 6 puertos digitales, la función Interrupción-Adjunta (Attach-Interrupt), la cual se utiliza para realizar una acción específica automáticamente o para monitorear una señal proveniente del algún dispositivo externo al microcontrolador. La Figura 4.6 muestra la señal digital que activa la interrupción.

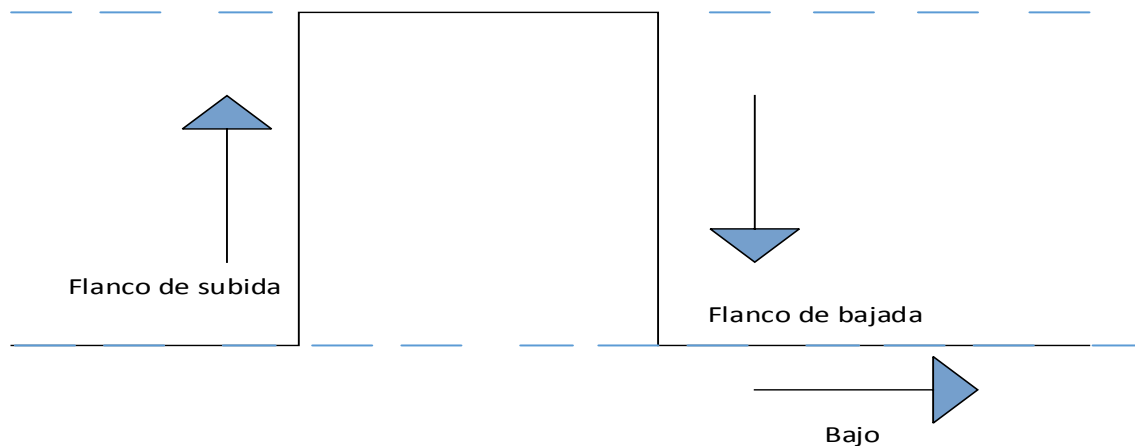


Figura 4.6 Interrupción adjunta

La acción o función que es llamada por la interrupción está conformada por cuatro casos específicos [6]:

- Flanco de subida (RISING), se realiza en el momento en el que la transición de la onda pasa del valor mínimo de cero a 5 volts, el valor máximo de amplitud.
- Flanco de Bajada (FALLING), se genera cuando la transición de la onda pasa de un valor máximo al mínimo.
- Flanco Bajo (LOW), es cuando la onda cuadrada se encuentra en un valor mínimo cero.
- Cambio de flanco (CHANGE), este modo es activado en el momento en el que la onda realice cualquier tipo de transición.

4.5 Comunicación y obtención de datos del medidor a través del sistema embebido Arduino

El sistema embebido Arduino está constituido por dos partes, hardware y software. La placa Arduino pertenece al hardware, esta placa utiliza un microcontrolador AVR que dispone de un grupo de entradas y salidas específico en donde se construyen los circuitos. El ambiente de desarrollo Arduino IDE, corresponde a la parte del software, esta parte es la que facilita el desarrollo de aplicaciones [6]. Los sistemas Arduino basan su programación en lenguaje C. La placa Arduino se conecta a la PC a través del puerto USB, por lo tanto no

necesita un equipo adicional para sus programación. En la Figura 4.7 se muestran la placa Arduino MEGA 2560 y la tarjeta accesorio Ethernet shield que le permite la conexión a Ethernet.

Arduino Mega 2560

Arduino Ethernet Shield

Figura 4. 7 Placa Arduino MEGA2560 y la tarjeta Ethernet Shield

El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de Arduino basado en Wiring y el entorno de desarrollo Arduino basado en (Processing). Una vez cargado el programa en la memoria del microcontrolador, ya no es necesario conectar la placa a una computadora.

Existen otras placas con otros microprocesadores, sin embargo, la plataforma Arduino ha tenido mayor impacto debido a su manejo como plataforma abierta de desarrollo. Las principales ventajas de los sistemas Arduino son:

- Simplifican el proceso de estar trabajando directamente con un microcontrolador.
- El Arduino contiene un programador incorporado, a diferencia de otras plataformas en donde es necesario la compra del programador por separado.
- Todo el software y librerías son gratis y de fácil aprendizaje, ya que se basan en un lenguaje de programación C, más conocido y sencillo que el ensamblador.

- Es multiplataforma, es decir que la placa Arduino funciona en cualquier sistema operativo (Windows, Mac, Linux) sin ningún costo adicional por el IDE.

Existen varias versiones de la plataforma ARDUINO, dependiendo las necesidades que requiera cada proyecto y todas usan microcontroladores ATmega168 y en algunos casos ATmega8.

4.5.1 Sistema embebido Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 es una plataforma de hardware y software libre basada en el Atmega2560. Cuenta con 54 pines digitales de entrada y salida de los cuales 15 se pueden utilizar para el uso de modulación por anchos de pulso (por sus siglas en ingles PWM), 16 entradas analógicas, 4 puertas seriales UARTs, un oscilador de 16MHz, una conexión USB, y un grupo de 6 pines dedicados para la programación del Bootloader del microcontrolador llamados ICSP (In Circuit Serial Programming) [7]. El Bootloader es la parte lógica de un Arduino que hace la programación de un proyecto más sencilla, sin la necesidad de algún programador externo. La Figura 4.8 muestra los componentes principales del Arduino MEGA 2560

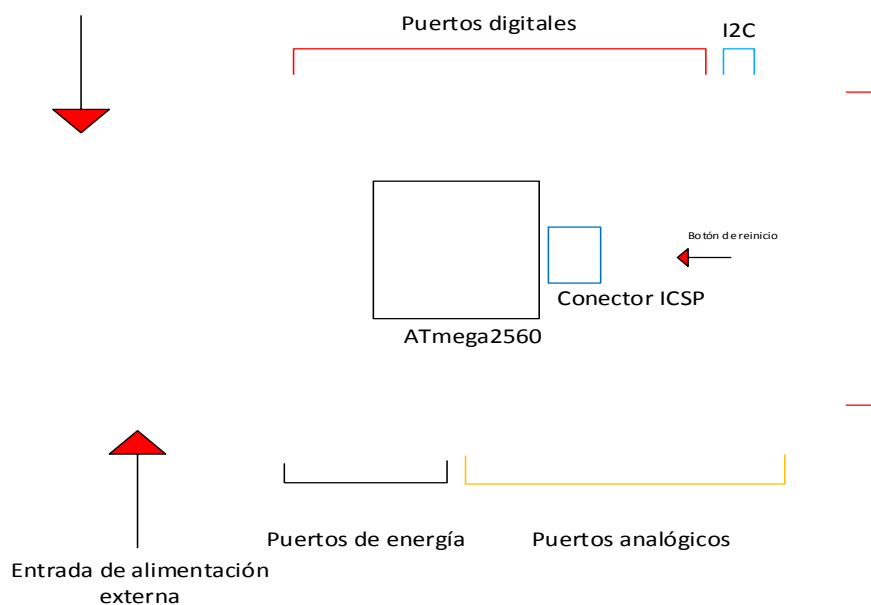


Figura 4. 8 Arduino Mega 2560

Para la comunicación con una PC la plataforma Arduino mega incluye un microcontrolador ATmega16U2 programado para convertir señal de USB a serial, lo que permite mayores velocidades de transmisión por el puerto USB y no requiere drivers adicionales para sistemas Linux o MAC. El Arduino Mega 2560 también soporta las tecnologías I2C y SPI para la comunicación entre microcontroladores y otras placas Arduino o tarjetas de función específica.

4.5.2 Arduino Ethernet Shield

La tarjeta Arduino Ethernet Shield permite a una placa Arduino conectarse a internet. Se basa en el chip Ethernet Wiznet W5100. El Wiznet W5100 proporciona una enlace de red (IP) capaz de apilar TCP y UDP [8]. La tarjeta Arduino Ethernet Shield soporta hasta cuatro conexiones de usuarios simultáneamente. Se utiliza la librería Ethernet para generar programas que se conectan a Internet a través de la pantalla.

La placa Arduino Ethernet Shield tiene un conector hembra RJ45 para la conexión a Internet y una ranura para tarjeta de memoria micro-SD, en la cual se pueden almacenar archivos.

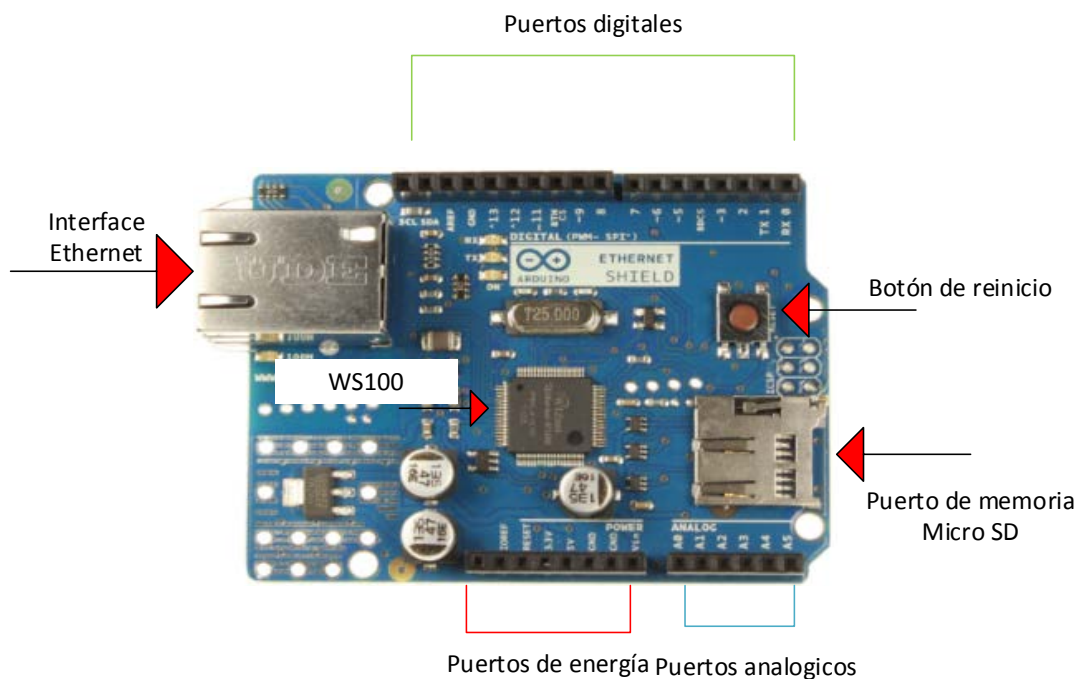


Figura 4. 9 Arduino Ethernet Shield

La placa Arduino Ethernet Shield se comunica con el módulo W5100 y con la tarjeta microSD utilizando el bus SPI a través del conector ICSP. Esta conexión se realiza en los pines 50, 51 y 52 de la tarjeta Arduino Mega 2560. El acceso a la placa Arduino Ethernet o a la tarjeta microSD se realiza de forma multiplexada, de esta forma el pin 10 se usa para seleccionar el módulo W5100 y el pin 4 para la tarjeta microSD. Estos pines son reservados, por lo que no pueden ser usados para entrada o salidas genéricas.

El módulo Wiznet W5100 está diseñado para facilitar la ejecución de la conexión a Internet sin necesidad de un sistema operativo. El módulo Wiznet W5100 es compatible con el estándar de comunicación IEEE 802.3 10BASE-T y 802.3U 100BASE-TX.

El W5100 tiene un stack de TCP/IP y un Ethernet MAC y PHY Ethernet. El stack TCP/IP soporta los protocolos de comunicación más utilizados. El W5100 tiene un buffer interno de 16Kbytes para la transmisión de datos.

Características:

- Protocolos TCP/IP admitidos: TCP, UDP, ICMP, IPv4, ARP, IGMP, PPPoE y Ethernet.
- Admite Negociación Automática (Full-duplex y Half-duplex)
- Admite conexión ADSL (con soporte de protocolo PPPoE con Modo de Autenticación PAP/CHAP)
- Admite 4 clientes independientes simultáneamente
- Admite Interfaz Periférica Serial (MODO SPI)

El W5100 admite tres interfaces diferentes de acceso a memoria, por bus directo o indirecto y por SPI [9]. El diagrama de bloques del módulo Wiznet con la placa Arduino Mega se muestra en la Figura 4.10.

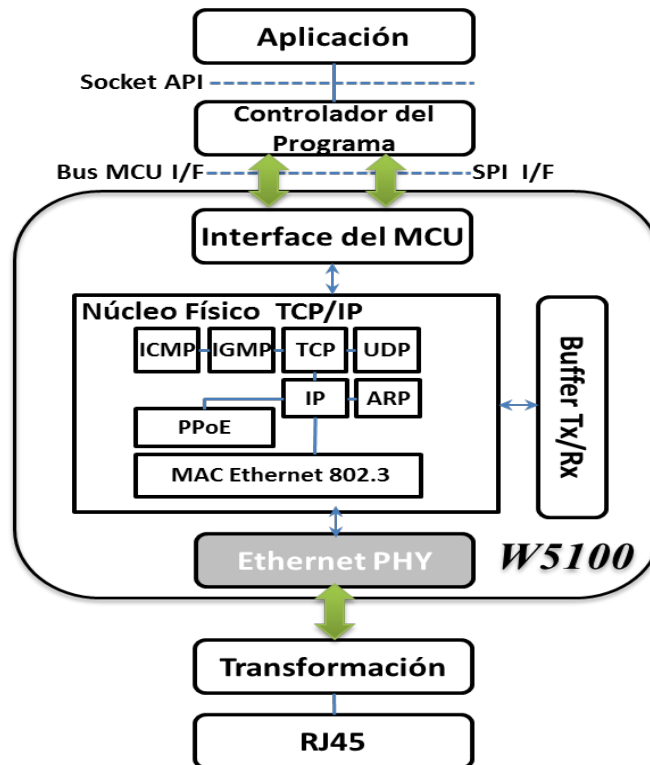


Figura 4. 10 Diagrama de bloques del servidor web

4.6 Configuración física del sistema embebido Arduino Mega 2560.

Para la configuración física de la placa Arduino Mega2560 es necesario insertar la tarjeta Arduino Ethernet Shield sobre el Arduino Mega2560. La tarjeta Arduino Mega debe estar conectada a una batería de 9 volts o a un adaptador de CA-CD (Corriente Alterna a Corriente Directa) con un voltaje entre los 7 y 12 volts [9]. La placa Arduino cuenta con una etapa de regulación de voltaje que provee un voltaje de salida por cada puerto digital de 5 volts y 40 mA, además de una salida regulada de 5 volts. Para la conexión con la red Ethernet es necesario conectar la entrada RJ45 del Arduino Ethernet Shield a un modem o roseta con un cable de conexión directa CAT5 o CAT6.

Para la lectura de los datos que genera el medidor de energía, la tarjeta Arduino tiene integrado en 6 puertos digitales la función Interrupción-Adjunta (Attach-Interrupt), la cual es utilizada para realizar una acción específica automáticamente o para monitorear una señal proveniente del algún dispositivo externo al microcontrolador [10]. La Figura 4.11 muestra la señal digital que activa la interrupción.

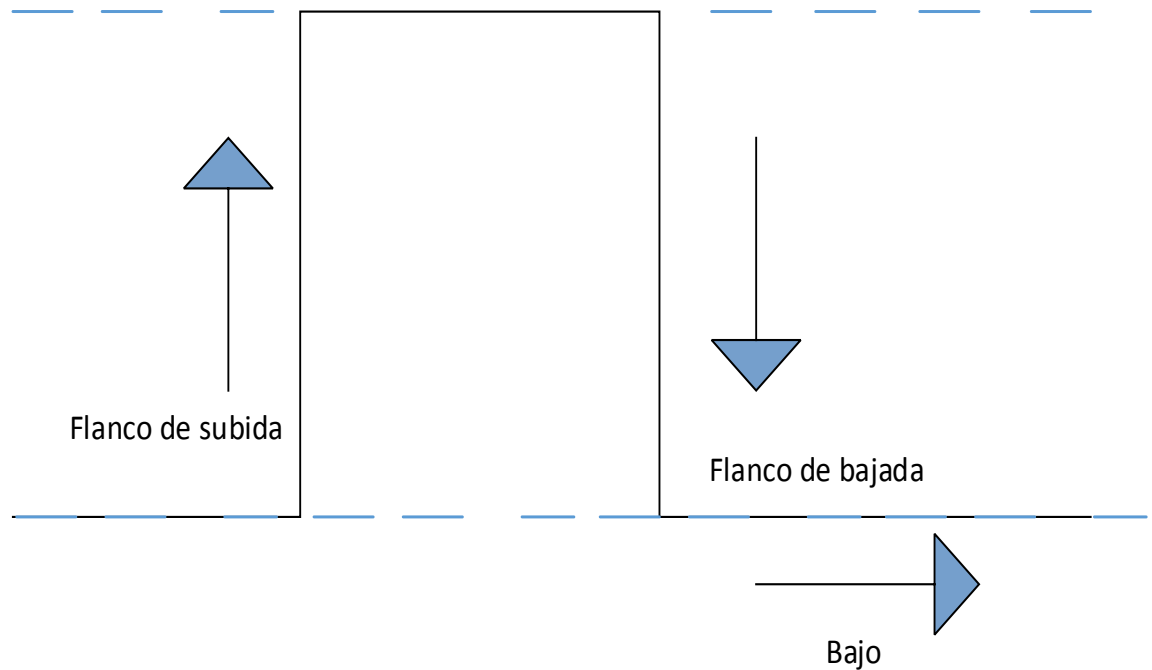


Figura 4. 11 Señal de activación de la función de interrupción

La acción o función que es llamada por la interrupción está conformada por cuatro casos específicos:

1. Flanco de subida (RISING), se realiza en el momento en el que la transición de la onda pasa del valor mínimo de cero a 5 volts, el valor máximo de amplitud.
2. Flanco de Bajada (FALLING), se genera cuando la transición de la onda pasa de un valor máximo al mínimo.
3. Flanco Bajo (LOW), es cuando la onda cuadrada se encuentra en un valor mínimo cero.
4. Cambio de flanco (CHANGE), este modo es activado en el momento en el que la onda realice cualquier tipo de transición.

4.7 Pruebas experimentales del módulo de evaluación del medidor de energía

Se realizaron 3 diferentes tipos de pruebas para llevar a cabo la implementación del módulo de evaluación del medidor de energía, en las pruebas se utilizaron una carga trifásica resistiva conectada para comprobar su correcto funcionamiento.

La Figura 4.9 muestra la conexión del medidor a una fuente de CA que dispone de salidas de tensión trifásica en corriente alterna y salidas de corriente directa. En la Figura 4.9 también se pueden apreciar las salidas de la fuente de CA que disponen de cuatro hilos, tres para cada una de los voltajes y una más para el neutro. Las tres líneas de voltaje y la línea del neutro van conectadas a las entradas positivas de corriente de medidor y a la del neutro respectivamente, las salidas negativas del medidor van conectadas a la carga trifásica.

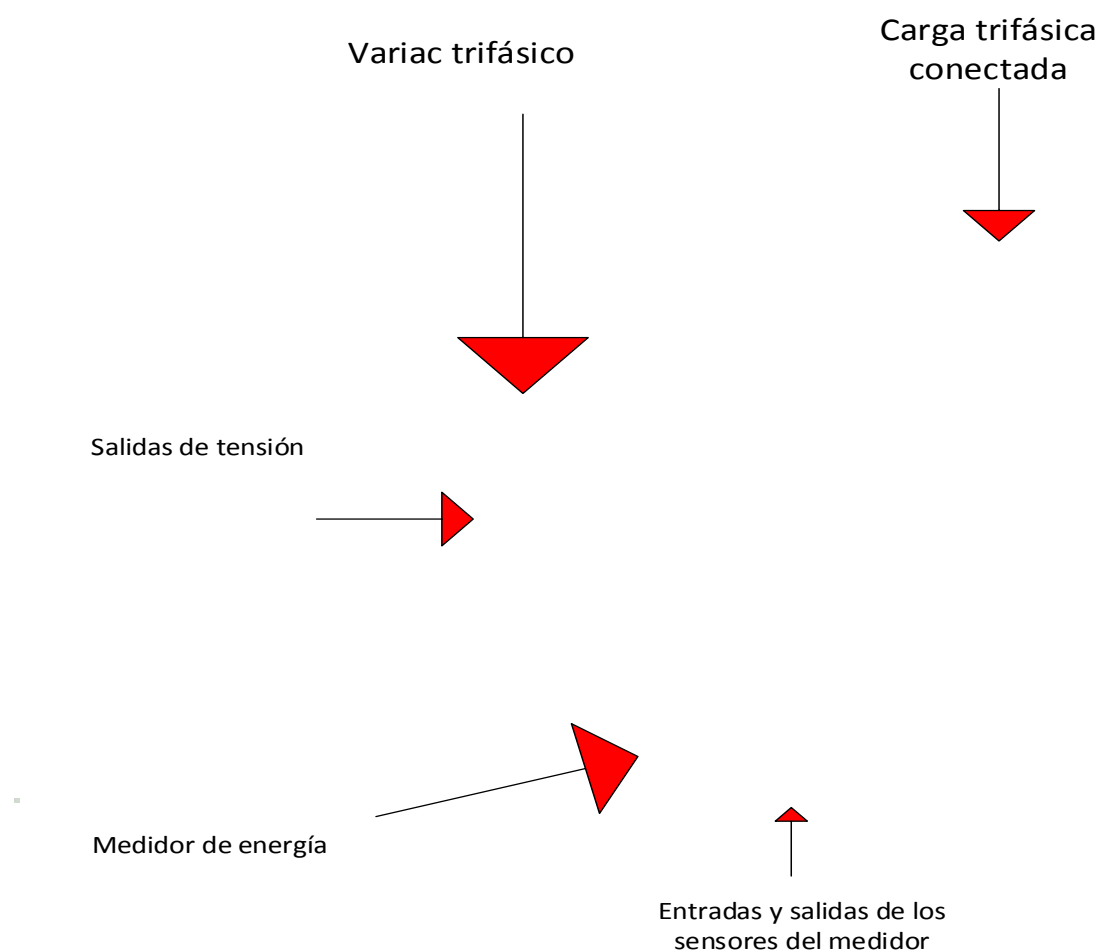


Figura 4. 12 Conexión del medidor de energía a una carga trifásica resistiva

4.7.1 Prueba n° 1 visualización de resultados en el display del módulo evaluación

La primera prueba consistió en encender las tres cargas conectadas durante un tiempo determinado con la finalidad de observar los resultados por medio del display del módulo de evaluación, obteniendo los siguientes valores instantáneos:

Tabla 4. 1 Prueba experimental n° 1 carga trifásica conectada.

PRUEBA N° 1 (3 CARGAS CONECTADAS)			
	Voltaje	Corriente	Potencia
	Volts	Amperes	Watts
L1	124.54	1.46	183
L2	128.5	1.49	191.71
L3	129.74	1.457	189.03

En la Figura 4.13 se muestran los valores instantáneos de voltaje, corriente y potencia para la fase A, las mediciones corresponden a una carga resistiva conectada.



Figura 4. 13 Valores de voltaje, corriente y potencia en la fase A

En la Figura 4.14 se muestran los valores instantáneos de voltaje, corriente y potencia para la fase B, las mediciones corresponden a una carga resistiva conectada.



Figura 4. 14 Valores de voltaje, corriente y potencia en la fase B.

En la Figura 4.15 se muestran los valores instantáneos de voltaje, corriente y potencia para la fase C. Las mediciones corresponden a una carga resistiva conectada.



Figura 4. 15 valores de voltaje, corriente y potencia en la fase c.

Con la primera prueba se pudo comprobar que el módulo de evaluación trabaja correctamente, se obtuvieron los valores de voltaje, corriente y potencia de cada una de las líneas conectadas, siendo estos los valores esperados.

4.7.2 prueba n°2 Visualización de pulsos por medio de un equipo de osciloscopio

La segunda prueba consistió en conectar el módulo de evaluación del medidor de energía nuevamente a la carga trifásica con la finalidad de poder visualizar los pulso de energía por medio de un osciloscopio y determinar la temporización de estos pulsos. La prueba se dividió en tres partes alternando las tres cargas conectadas para aumentar o disminuir la potencia conectada. En la Figura 4.16 se muestra el tiempo que hay entre cada pulso generado por el medidor de energía cuando únicamente una carga está conectada.

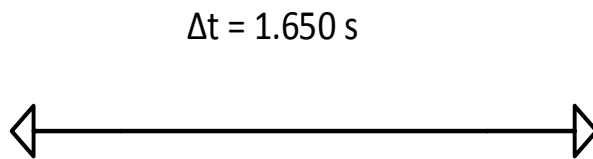


Figura 4. 16 Distancia de pulso en función de tiempo con una carga conectada

La segunda parte de la prueba se realizó con dos de las tres cargas conectadas, en espera de que la distancia en función de tiempo entre pulsos sea menor. En la Figura 4.17 se observa la distancia en función de tiempo entre pulsos, en esta prueba se encuentran dos cargas conectadas

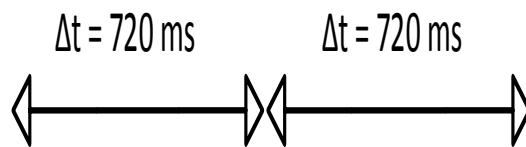


Figura 4. 17 Distancia de pulso en función de tiempo con dos cargas conectadas

En la última parte de las pruebas de pulsos con el osciloscopio, se encendieron las 3 cargas conectadas para aumentar al máximo los pulsos generados por segundo y con esto acortar la distancia en función de tiempo de los pulsos de energía. En la Figura 4.19 se aprecian los pulsos obtenidos con las tres cargas funcionando al mismo tiempo, también se observa que la distancia en función de tiempo es menor, al igual que se observó en las pruebas con una y dos cargas conectadas respectivamente.

$\Delta t = 460 \text{ ms}$ $\Delta t = 460 \text{ ms}$ $\Delta t = 460 \text{ ms}$ $\Delta t = 460 \text{ ms}$

$\Delta t = 460 \text{ ms}$



Figura 4. 18 Distancia de pulso en función de tiempo con tres cargas conectadas

Después de realizar las pruebas con el osciloscopio se pudo comprobar que entre mayor sea la carga conectada mayor serán los números de pulsos por segundo y en consecuencia la distancia en función de tiempo entre pulsos será menor. El módulo de evaluación del medidor de energía viene programado previamente en función de 6400 pulsos por segundo por cada kilowatt de potencia conectada. Por medio de la función de generación de pulsos es posible determinar la potencia conectada y el consumo de energía por unidad de tiempo, esto es llevado a cabo por medio del sistema embebido de tipo Arduino programado que lleva una cuenta de la cantidad de pulsos por unidad de tiempo. En el programa del Arduino se declara un contador que tiene la función de llevar el conteo de las fracciones de segundo que existen entre cada pulso, siempre y cuando exista alguna carga conectada en el sistema. Después de que el contador determina la distancia en función de tiempo entre cada pulso se realizan una serie de funciones matemáticas en función a la cantidad de pulsos que

proporciona el medidor, y se obtiene la cantidad de potencia total conectada, esta lectura de potencia es acumulada para hacer el conteo de la energía consumida por unidad de tiempo. Estos resultados son enviados vía Ethernet por el sistema Arduino a través de la tarjeta Ethernet shield. En el anexo A de este trabajo de tesis se presenta el programa desarrollado.

La programación de placa Arduino Mega2560 se realiza con el software gratuito Arduino y se descarga desde la página web de Arduino. El lenguaje de programación es un pseudo código en C basado en el lenguaje de programación Java.

La estructura básica del lenguaje Arduino es muy simple y se compone básicamente de dos bloques fundamentales que contienen declaraciones de variables e instrucciones para que el programa (denominado sketch en el ambiente de Arduino) sea grabado en el microcontrolador. Esta estructura tiene la siguiente distribución:

```
void setup()
{
    instrucciones;
}

void loop()
{
    instrucciones;
}
```

El bloque de la función setup() es la parte que se encarga de realizar la configuración de las variables del programa, en donde se encuentran la declaración de variables, solo se ejecuta una vez e inicia o configura los periféricos para que sean entradas o salidas. En tanto la función loop() contiene el código que se ejecutará continuamente, esta función es la parte central o núcleo de todos los programas de Arduino y la que realiza la mayor parte del trabajo.

4.8 Visualización de resultados vía web

El servidor web es una aplicación remota que brinda un servicio de información en forma de página web en la red a uno o varios usuarios. Para tener acceso al dispositivo con el servidor web se necesita de una dirección IP que tiene establecida el servidor y un número de puerto.

El servidor web está en un estado abierto y pasivo, por lo que en cualquier momento un usuario puede tener acceso. El servidor web siempre se encuentra en estado de espera para establecer un vínculo o conexión, el usuario debe crear una solicitud y esperar la respuesta por parte de la aplicación. Si la conexión es exitosa el usuario podrá realizar consultas en el servidor. Para finalizar el enlace de usuario-servidor, el servidor web cuenta con un tiempo límite de conexión, además de la que puede tomar por decisión el usuario final. En la Figura 4.19 se muestra el diagrama de flujo del servidor web empleado en este trabajo de tesis.

4.8.1 Diagrama de flujo del servidor web.

El programa principal inicia con la detección de algún problema físico en la memoria micro SD. En el bloque de setup() se declaran las configuraciones de los periféricos del microcontrolador que son utilizados por el sistema, así como también se declaran e inicializan las variables del programa[11].

La configuración de las direcciones física y lógica del servidor web se realiza con la librería Ethernet de Arduino y se declaran fuera del módulo. Las direcciones son las siguientes:

- Dirección física del Servidor web (MAC)
- Dirección IP.
- Mascara de red.
- Puerta de salida.
- El puerto de salida.

El módulo de Loop() es el encargado de dar inicio al servidor web al presentarse algún usuario que requiera su servicio, el servidor web presentará los valores generados hasta el momento. La Figura 4.19 muestra el diagrama de flujo del programa principal.

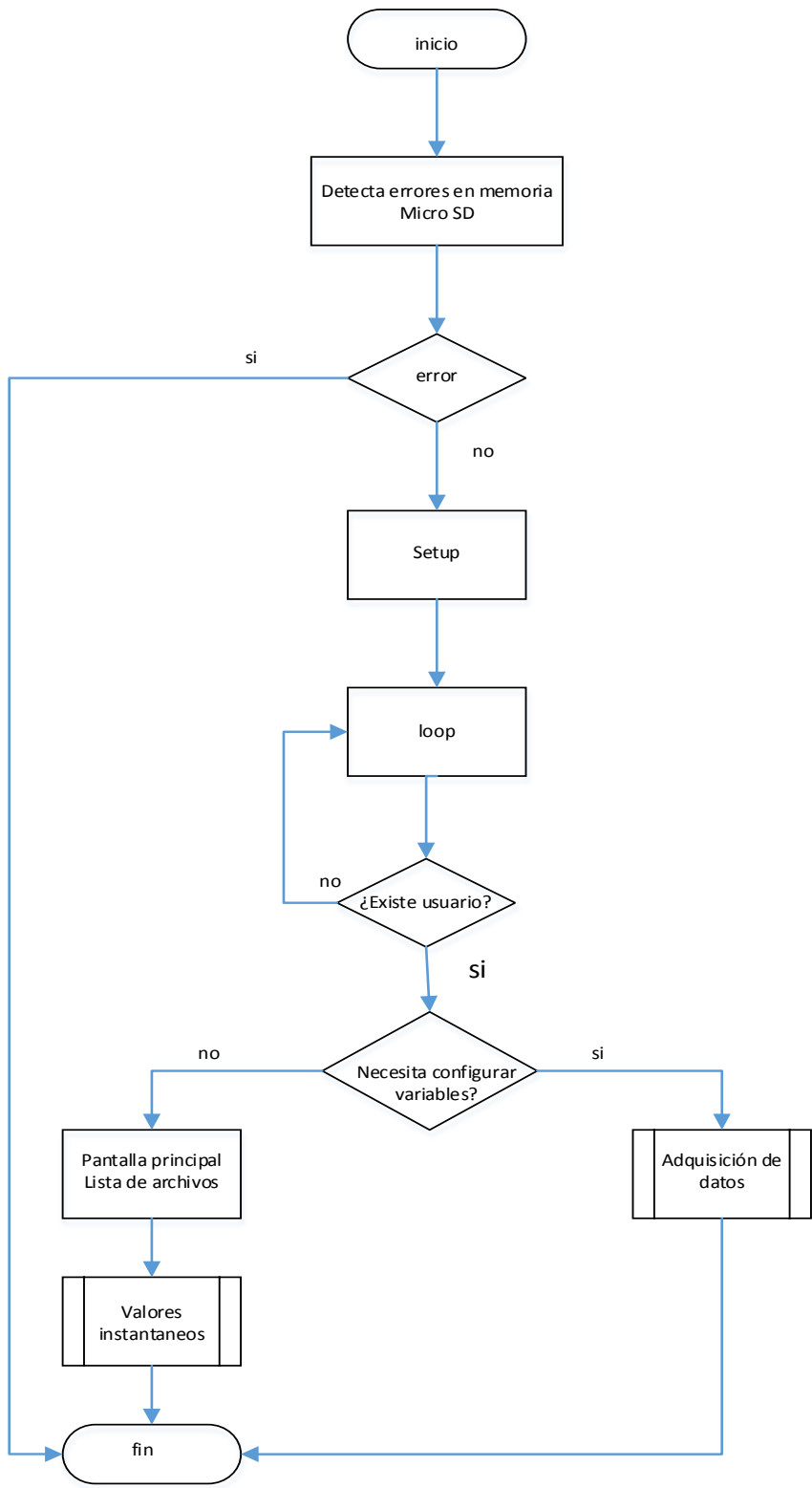


Figura 4. 19 Diagrama de flujo del servidor web

4.8.2 Instalación física del Servidor Web.

La Figura 4.20 muestra el esquema general del sistema de adquisición de datos con servicio Web desarrollado en este trabajo de tesis.

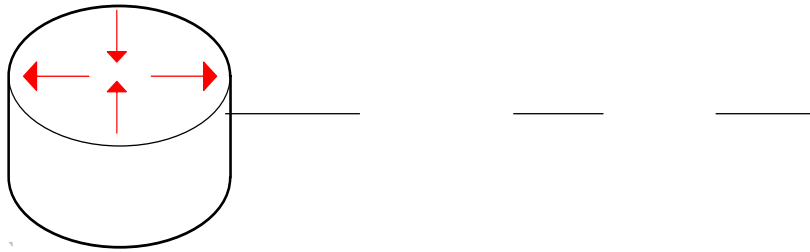


Figura 4. 20 Instalación física del Servidor Web

El servidor web y el medidor de energía se localizan en las instalaciones de la Universidad de Quintana Roo de esta forma, el servicio web está disponible en la intranet en las instalaciones de la Universidad. La Figura 4.21 muestra la instalación

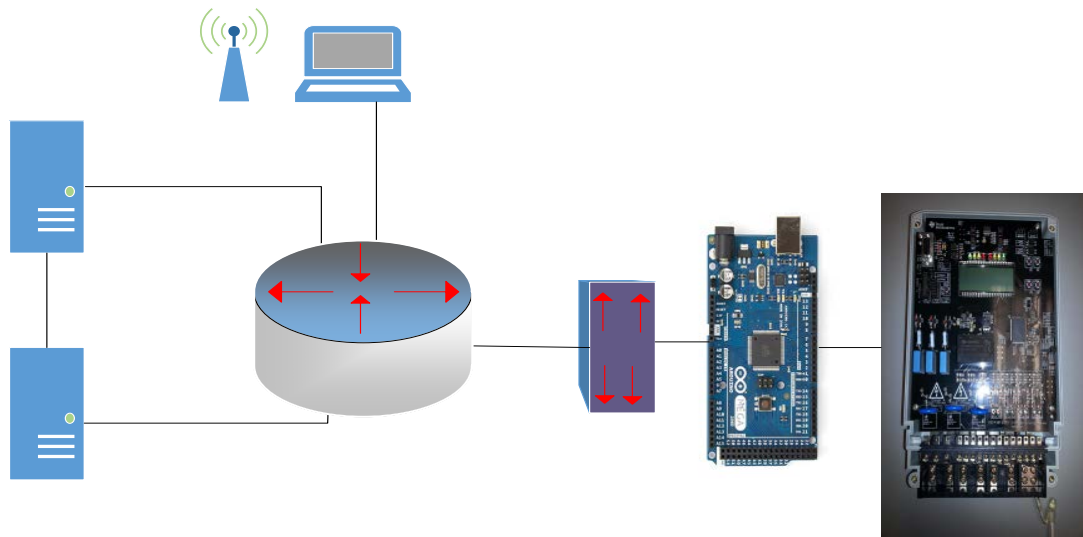


Figura 4. 21 Instalación física vía intranet de la Universidad

4.9 Pruebas experimentales con el sistema embebido Arduino

Se realizaron 3 pruebas con el mismo sistema trifásico conectado, con la diferencia que en estas pruebas se ha conectado más carga para poder visualizar esta carga conectada en la página web desplegada por el sistema Arduino. En la Figura 4.22 se muestra la conexión del sistema embebido Arduino al módulo de evaluación del medidor de energía por medio del puerto de generación de pulso. Mediante esta configuración se transmite la información necesaria para que el Arduino realice las funciones programadas

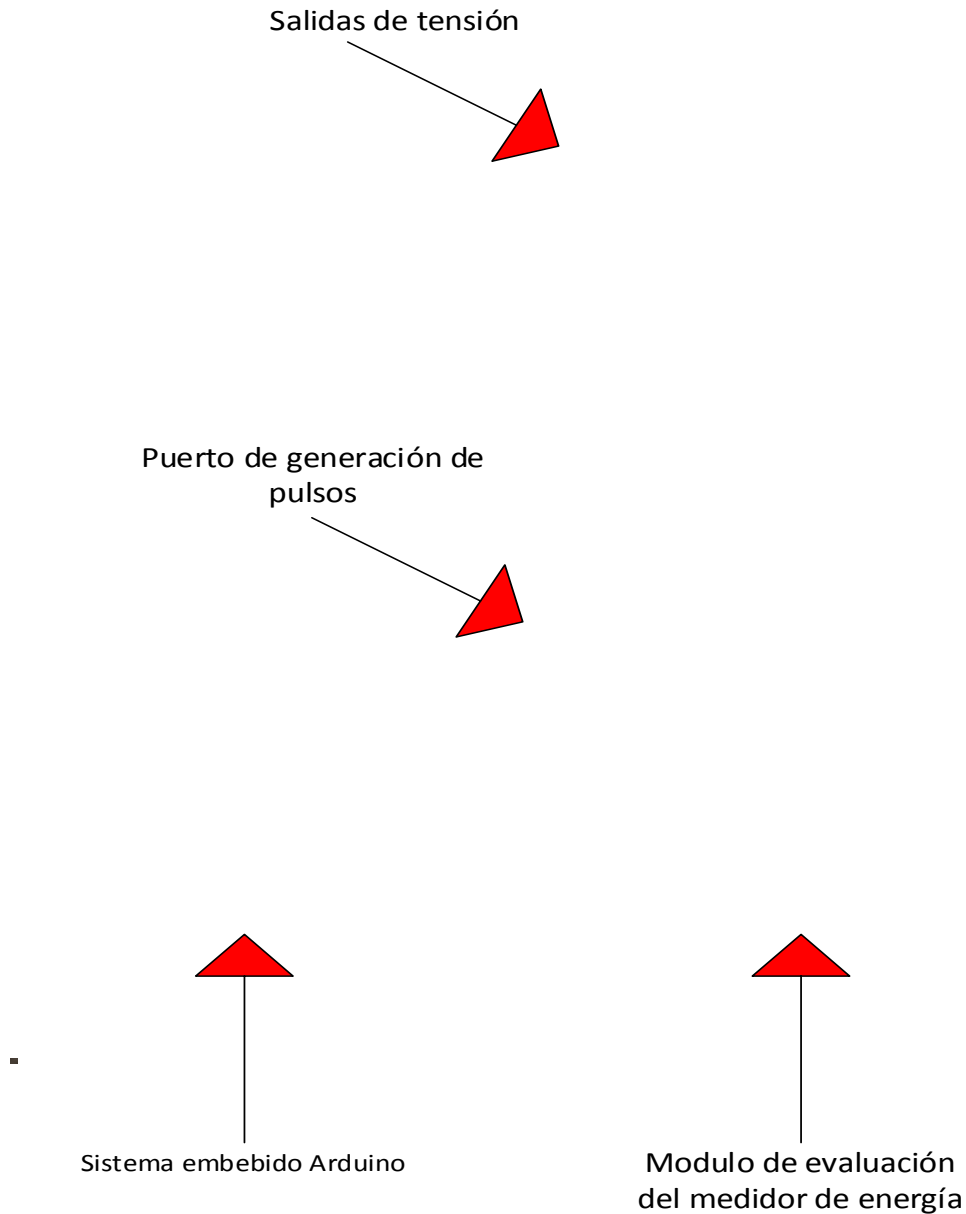


Figura 4. 22 conexion del sistema Arduino

4.9.1 Pruebas con el sistema Arduino con una carga conectada

Se realizaron tres pruebas experimentales con el sistema Arduino cada una con una carga distinta conectada, con esto se pretende probar el correcto funcionamiento del programa en el sistema. En la tabla 4.2 se muestran los valores instantáneos del medidor de energía que son comparados con los resultados desplegados en la web por el sistema Arduino

Tabla 4. 2 Resultados de medición de energía

PRUEBA N° 1 Carga únicamente en Fase A			
	Voltaje	Corriente	Potencia
	Volts	Amperes	Watts
L1	128.54	2.64	336.77
L2	128.5	0	0
L3	128.74	0	0
			337.77

En la Figura 4.23 se muestran los datos de potencia y energía desplegados en la web por el sistema Arduino.

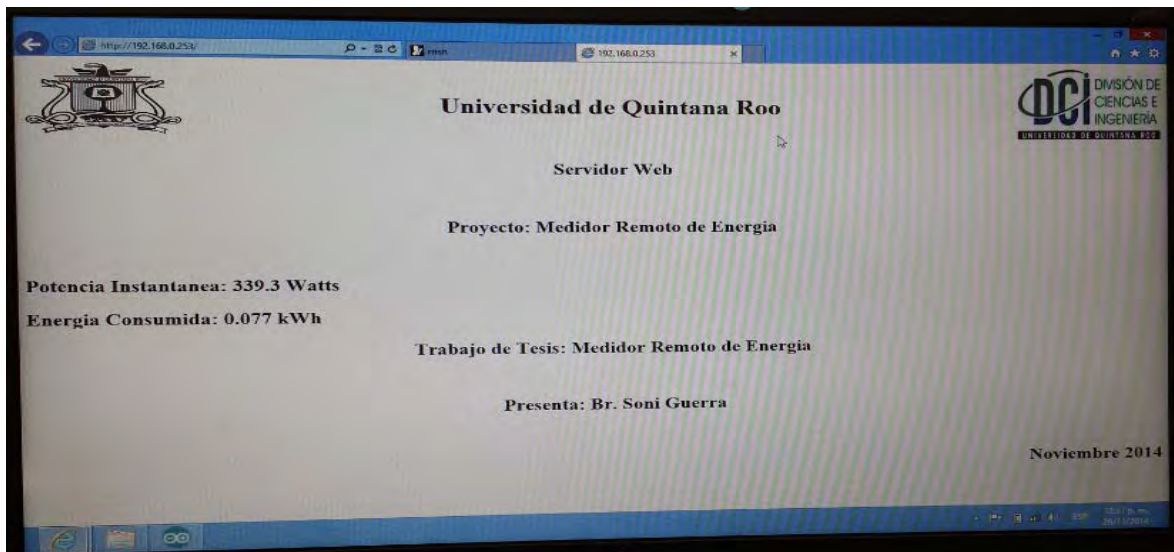


Figura 4. 23 Datos de potencia y energía desplegados en la web por el sistema Arduino

Como se observa en la Fig. 4.3, existe una diferencia de alrededor de 2W. Esta diferencia es debido al redondeo de valores realizados por el programa del Arduino. Sin embargo, la magnitud de esta diferencia no es significativa.

En la tabla 4.3 se muestran los valores instantáneos del medidor de energía que son comparados con los resultados desplegados en la web por el sistema Arduino

4.9.2 Pruebas con el sistema Arduino con dos cargas conectada

Tabla 4. 3 Resultados del medidor de energía con dos cargas conectadas.

PRUEBA N° 2 SIN CARGA ELECTRICA (C)			
	Voltaje	Corriente	Potencia
	Volts	Amperes	Watts
L1	128.5	2.64	339.24
L2	128.5	3.46	444.61
L3	129.74	0	0
			783.85

En la Figura 4.24 se muestran los datos de potencia y energía desplegados en la web por el sistema Arduino en esta prueba.

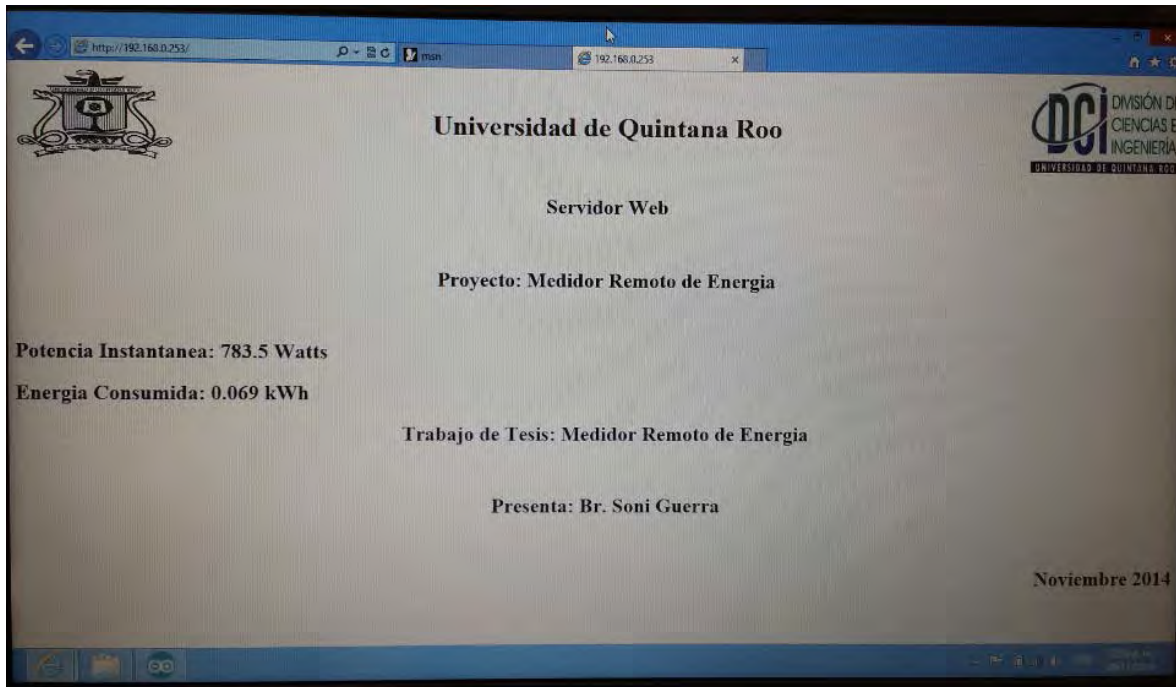


Figura 4. 24 Datos de potencia y energía desplegados en la web por el sistema Arduino con dos cargas conectadas

Como se observa en la Figura 4.24, la diferencia entre la potencia reportada por el servidor web y la contabilizada por el medidor de energía es menor a 2 W.

4.9.3 Pruebas con el sistema Arduino con tres cargas conectadas

En la tabla 4.4 se muestran los valores instantáneos del módulo de evaluación que son comparados con los resultados desplegados en la web por el sistema Arduino

Tabla 4. 4 Resultados del medidor de energía con tres cargas conectadas

PRUEBA N° 1 (3 CARGAS CONECTADAS)			
	Voltaje	Corriente	Potencia
	Volts	Amperes	Watts
L1	128.5	5.1	655.35
L2	128.5	5.1	655.35
L3	128.5	5.1	655.35
		Total watts	1966.05

En la Figura 4.25 se muestran los datos de potencia y energía desplegados en la web por el sistema Arduino.

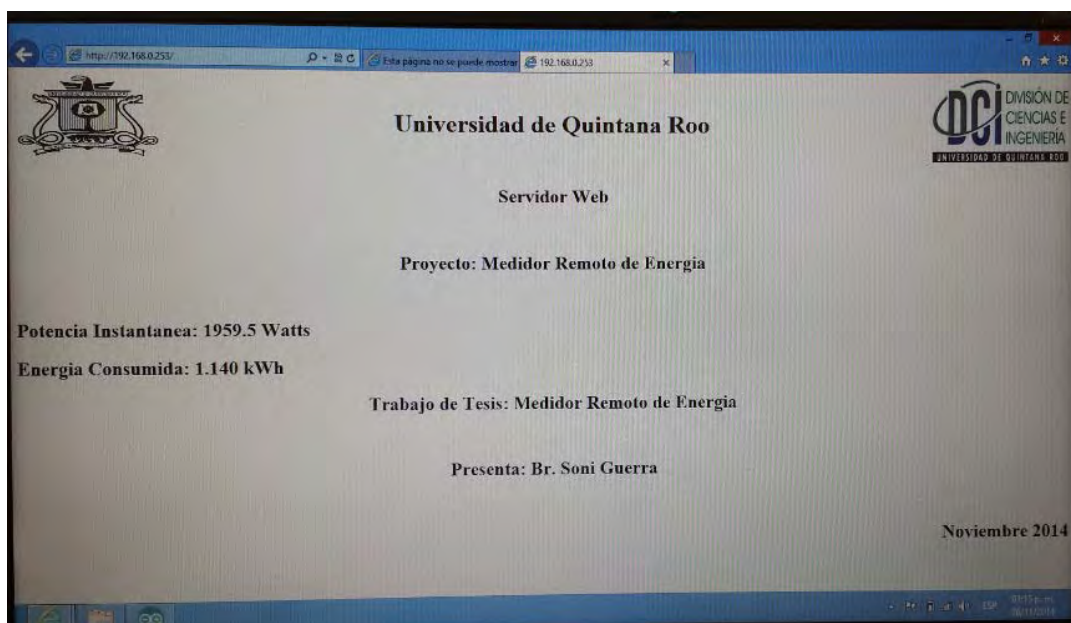


Figura 4. 25 Datos de potencia y energía desplegados en la web por el sistema Arduino con tres cargas conectadas

Capítulo 5

5.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se pudo comprobar que con el paso del tiempo y el constante avance de la tecnología es cada vez más posible tener acceso a datos de consumo de que antes solo era posible por la información que era recibida de nuestros proveedores en este caso en específico de la comisión federal de electricidad (CFE), empresa que se encarga de producir y transmitir la energía eléctrica. Por medio de la implementación del módulo de evaluación del medidor de energía descrito en este trabajo de tesis, es posible cotejar los datos recabados por los medidores de energía de instalados por la (CFE) con la confianza de que el módulo de evaluación cuenta con la arquitectura y los elementos necesarios para entregar medidas de energía de alta precisión. Además después de obtener los valores de medición requeridas, estas mediciones pueden ser monitoreadas por el usuario desde su la comodidad de su hogar u oficina por medio de su computadora personal.

Se espera que en poco tiempo esta tecnología esté al alcance de usuarios domésticos en aplicaciones de domótica, con la finalidad de que el usuario tenga conocimiento de la potencia conectada al igual que de su consumo de energía, por lo tanto el usuario podrá comparar sus lecturas con las lecturas proporcionadas por la (CFE) y así comprobar que le están cobrando lo justo y en caso de tener fuga de energía poder localizar más fácilmente la causa del problema.

Referencias

- [1] Analog Devices Energy (ADE) Products: Frequently Asked Questions (FAQs); Analog Devices U.S.A.
- [2] MEASURING HARMONIC ENERGY WITH A SOLID-STATE ENERGY METER; Analog Devices U.S.A.
- [3] TRANSFORMADORES DE CORRIENTE TC; FACULTAD DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD DON BOSCO. Agosto 2011
- [4] Implementation of a Three-Phase Electronic Watt-Hour Meter Using the MSP430F677x; Texas instruments, U.S.A 2013.
- [5] How delta-sigma ADCs work; Texas Instruments; U.S.A. 2011.
- [6] Arduino. <http://arduino.cc/en/>.
- [7] Arduino. <http://arduino.cc/en/>; <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>
- [8] Arduino. <http://arduino.cc/en/>; <http://arduino.cc/en/Main/arduinoEthernetShield>
- [9] Hoja de Datos W5100 (Wiznet Hardwired TCP/IP Embedded Ethernet Controller); Wiznet Technology. Korea, 2013.
- [10] trabajo de tesis Diseño de un sistema de automatización y adquisición de datos vía web basado en un sistema embebido; Emmanuel Cerón Lagos 2013.

Anexo A programa Arduino

```
/*-----
```

```
Programa: eth_websrv_page
```

```
Description: Servidor web Arduino que sirve una página web básica. Almacenamiento de la tarjeta SD desactivado.
```

```
-----*/
```

```
// declarar librerias
```

```
#include <SPI.h>
```

```
#include <Ethernet.h>
```

```
//parametros programados. De potencia //////////////////////////////////////
```

```
//Numeros de pulsos, los pulsos son usados para la medición de energia.
```

```
long pulseCount = 0;
```

```
// Se declaran las variables utilizadas para medir la potencia.
```

```
unsigned long pulseTime,lastTime;
```

```
// variables de potencia y energía
```

```
double power, elapsedkWh; //ORIGINAL
```

```
// Número de pulsos por wh - encontrado .
```

```
int ppwh = 64; //1000 pulses/kwh = 1 pulse per wh
```

```
////////////////////////////////////
```

```

// se declara dirección MAC de Ethernet

//byte mac[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED };

//IPAddress ip(10, 0, 0, 20); // IP address, may need to change depending on network

byte mac[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED };

byte ip[] = { 192, 168, 0, 253 };

byte subnet[] = { 255, 255, 255, 0 };

byte gateway[] = { 192, 168, 0, 1 };

EthernetServer server(80); // crear un servidor en el puerto 80 (este puerto se encuentra definido
por default).

void setup()

{

Ethernet.begin(mac, ip); // inicializar dispositivo Ethernet

server.begin(); // inicio de comunicación con el usuario

//////////Programación del medidor //////////

Serial.begin(9600);

// interrupcion IRQ 1 = pin3

attachInterrupt(1, onPulse, FALLING);

//Para deshabilitar la SD card

pinMode(4, OUTPUT);

```

```

digitalWrite(4, HIGH);

}

void loop()
{
// // potencia y energia

// double power, elapsedkWh; //ORIGINAL

EthernetClient client = server.available(); // intento por conseguir usuario.

if (client) { // se declara la condicional por si existe algún usuario

boolean currentLineIsBlank = true;

while (client.connected()) {

if (client.available()) { // client data available to read

char c = client.read(); // read 1 byte (character) from client

// Última línea de la petición del cliente está en blanco y termina con \n

// Responder a cliente sólo después de la última línea recibida

if (c == '\n' && currentLineIsBlank) {

// se declaran los comandos del diseño de la pagina web.

client.println("HTTP/1.1 200 OK");

client.println("Content-Type: text/html");

client.println("Refresh: 10"); // refresca pagina c/10 s

```



```

client.println();

client.print("<p><img src='http://redturismo.uqroo.mx/Uqroo%20logo.jpg' width='180' height='108'
align='left' /></p>");

client.println("<p><img src='http://anca.uqroo.mx/Images/Picture3.jpg' width='180' height='108'
align='right' /></p>");

client.println("<br />");

client.println(F("<h1 align='center'>Universidad de Quintana Roo</h1>"));

client.println("<br />");

client.println(F("<h2 align='center'>Servidor Web</h2>"));

client.println("<br />");

client.println(F("<h2 align='center'>Proyecto: Medidor Remoto de Energia</h2>"));

client.println("<br />");

client.print(F("<h2>Potencia Instantanea: "));

//client.print(F("<h2>(power,4)</h2>"));

client.print(power,1);

client.print(F(" Watts</h2>"));

client.print(F("<h2>Energia Consumida: "));

//client.print(F("<h2>(elapsedkWh,3)</h2>"));

client.println(elapsedkWh,3);

client.print(F(" kWh</h2>"));

client.println(F("<h2 align='center'>Trabajo de Tesis: Medidor Remoto de Energia</h2>"));

```

```

client.println("<br />");

client.println(F("<h2 align='center'>Presenta: Br. Soni Guerra</h2>"));

client.println("<br />");

client.println(F("<h2 align='right'>Noviembre 2014</h2>"));

client.println("<br />");

break;

}

// every line of text received from the client ends with \r\n
if (c == '\n') {

// último carácter en la línea de texto recibido

// comenzando con la nueva línea siguiente carácter leer
currentLineIsBlank = true;

}

else if (c != '\r') {

// un carácter de texto se ha recibido desde el cliente

currentLineIsBlank = false;

}

} // end if (client.available())

} // end while (client.connected())

delay(1); // dar tiempo al navegador web para recibir los datos

client.stop(); // cerrar conexion

} // end if (client)

}

```

```

//////////////////// Programación del medidor //////////////////////

// rutina de interrupción

void onPulse()

{

// utilizado para medir el tiempo entre pulsos

lastTime = pulseTime;

pulseTime = micros();

// Contador de pulsos

pulseCount++;

//formulas para calcular la potencia

// power = (3600000000.0 / (pulseTime - lastTime))/ppwh;      //Original

power = (36000000000.0 / (pulseTime - lastTime))/ppwh;

// Encuentra kwh consumidos

// elapsedkWh = (1.0*pulseCount/(ppwh*1000)); //multiply by 1000 to pulses per wh to kwh
convert wh to kwh ORIGINAL

elapsedkWh = (1.0*pulseCount/(ppwh*100)); //multiply by 1000 to pulses per wh to kwh convert
wh to kwh

//impresion de resultados.

Serial.print(power,4);

Serial.print(" ");

Serial.println(elapsedkWh,3);

}

```