



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

Departamento de Eléctrica y Electrónica
Ingeniería Electrónica

RESIDENCIA PROFESIONAL

**SISTEMA PARA MONITOREO Y CONTROL DE LA CALIDAD DE LA
ENERGIA ELECTRICA**

ASESOR

ING. JOSÉ ANGEL ZEPEDA HERNÁNDEZ

PRESENTA:

JONATHAN ALEXIS GOMEZ TELLEZ

14270584

TUXTLA GUTIERREZ, CHIAPAS A 16 DE ENERO DEL 2019

INDICE

CAPITULO I	1
1. Introducción.....	1
1.1 Estado del arte	2
1.2 Justificación	5
1.3 Objetivo General	5
1.4 Objetivos específicos	5
CAPITULO II.....	6
2. Caracterización del área en que se participó.....	6
2.1 Problemas a resolver.....	7
2.2 Alcances y limitaciones	8
CAPITULO III.....	9
3. Fundamento teórico	9
3.1 Circuito integrado STPM01	9
3.2 Medidor trifásico basado en STPM01.....	10
3.3 Sistemas trifásicos	11
3.3.1 Alimentación en circuitos trifásicos de corriente alterna.	12
3.3.2 Técnicas de medición de potencia	13
3.4 Bobina Rogowski como sensor de corriente.....	15
3.5 Protocolo SPI (Serial Peripheral Interface)	16
3.6 Protocolo SPI para STPM01	18
3.6.1 Descripción del módulo SPI.....	18
3.6.2 Conexión al microcontrolador.	19
3.6.3 STPM01 Inicialización (enclavamiento) y lectura (desplazamiento).....	20
3.6.4 Estructura de registro de datos.....	21
3.7 Tecnología Arduino.....	23
3.8 Proteus Design Suite.....	27
4. Desarrollo.....	28
4.1 Diagrama de conexión del circuito.....	28
4.1.1 Señal de reloj.....	31
4.1.2 Circuito de fase.....	31
4.1.3 Circuito de detección de corriente	32

4.1.4	Filtro Anti-aliasing	33
4.1.5	Circuito sensor de voltaje	33
4.1.6	Red de cancelación de interferencias	33
4.1.7	Conectores	34
4.2	Diseño del PCB	36
4.3	Visualización 3D	37
4.4	Diseño PCB físico	37
4.5	Diagrama de conexión del sistema	40
4.6	Programación del sistema	41
CAPITULO IV		43
5.	Resultados	43
6.	Conclusiones	47
7.	Bibliografía	48

Tabla de ilustraciones

<i>Ilustración 1.1 Diagrama de bloques del circuito integrado STPM01</i>	9
<i>Ilustración 1.2 Configuración de los pines / empaquetado.....</i>	10
<i>Ilustración 2.1 Diagrama de bloques para un sistema trifásico.....</i>	10
<i>Ilustración 2.2 Condiciones de operación.</i>	11
<i>Ilustración 2.3 Diagrama general de conexión.....</i>	11
<i>Ilustración 3.1 Voltaje (o corriente) instantáneo en un ciclo de voltaje de un sistema trifásico.....</i>	12
<i>Ilustración 3.2 Potencias por fase en (a) carga conectada en delta y (b) carga conectada en estrella</i>	12
<i>Ilustración 3.3 Método de dos vatímetros en cargas conectadas en estrella o en delta</i>	14
<i>Ilustración 3.4 Conexión de los vatímetros en las cargas trifásicas de cuatro cables</i>	15
<i>Ilustración 4.1 Principio de la bobina Rogowski como sensor de corriente</i>	15
<i>Ilustración 5.1 Protocolo SPI.....</i>	17
<i>Ilustración 5.1 Funcionamiento del bus SPI.....</i>	17
<i>Ilustración 6.1 Tiempo de lectura de los registros de datos en un sistema trifásico</i>	21
<i>Ilustración 6.2 Reconstrucción de registro de datos.....</i>	22
<i>Ilustración 6.3. Estructura de registro de datos STPM01</i>	22
<i>Ilustración 7.1 Placa Arduino Uno R3.....</i>	23
<i>Ilustración 7.2 Nomenclatura de la placa Arduino UNO R3.....</i>	24
<i>Ilustración 7.3 Disposición de los pines del microcontrolador ATmega328P</i>	25
<i>Ilustración 8.1 Software PROTEUS.....</i>	28
<i>Ilustración 8.2 Ventana principal Schematic Capture</i>	28
<i>Ilustración 8.3 Representación del STPM01 con sus respectivos pines diseñado específicamente para este proyecto</i>	29
<i>Ilustración 8.5 Empaquetado de montaje superficial TSSOP20.....</i>	29
<i>Ilustración 8.6 Resistencia y capacitor con empaquetado 1206 tecnología SMD.....</i>	30
<i>Ilustración 8.7 Diagrama de conexión del circuito</i>	30
<i>Ilustración 9.1 Señal de reloj.....</i>	31
<i>Ilustración 9.2 Diagrama de fase.....</i>	32
<i>Ilustración 9.2 Conectores</i>	34
<i>Ilustración 10.1 PCB, dimensiones ancho: 9.65 cm, largo: 11.93 cm.....</i>	36
<i>Ilustración 10.2 Vista inferior / Vista superior</i>	37
<i>Ilustración 11.1 Vista superior.....</i>	37
<i>Ilustración 11.2 Vista inferior.....</i>	38
<i>Ilustración 12.1 Diagrama de conexión del sistema</i>	40
<i>Ilustración 13.1 Programación del sistema</i>	42
<i>Ilustración 14.1 Conexión física Arduino - Sistema.....</i>	43
<i>Ilustración 14.2 Conexión física Arduino – Sistema - Alimentación</i>	44
<i>Ilustración 14.3 Pruebas físicas.....</i>	44
<i>Ilustración 14.4 Indicador.....</i>	45
<i>Ilustración 14.5 Valores obtenidos</i>	45
<i>Ilustración 14.6 Voltaje suministrado (119.7 Vac).....</i>	46
<i>Ilustración 14.7 Características del aparato eléctrico</i>	46

CAPITULO I

1. Introducción

La utilización adecuada de los diferentes tipos de energía dentro del mundo actual hace posible la implementación de sistemas de monitoreo, estos sistemas son necesarios implementarlos en lugares en donde se requiera realizar gestión de recursos. Los equipos denominados Smart Meters o medidores inteligentes podrían apoyar estos propósitos al ser capaces de medir la energía consumida y realizar la gestión de la demanda de energía, además del beneficio medioambiental, su implementación mejora la eficiencia de las redes de transmisión y distribución energética, además de permitir el monitoreo de diferentes variables.

Estas acciones deben estar acompañadas en muchos casos de inversiones en tecnología, gestión de procesos y modificación de hábitos conductuales de los consumidores. Los sistemas de monitoreo en la actualidad poseen la ventaja de ser visualizados por los consumidores mediante servidores web, ya que con la tecnología disponible permite a los usuarios monitorear fácilmente su consumo de energía acorde a la tecnología existente, pues todas las personas pueden acceder a internet desde cualquier lugar del mundo.

En el aspecto ambiental existe un gran interés de los países en desarrollar políticas y reglamentaciones que incentiven la creación de conciencia social respecto de las consecuencias de los gases de efecto invernadero. El problema radica en el combustible utilizado por las plantas de generación de energía tradicionales y se produce durante los picos de demanda que obligan a activar plantas térmicas para poder suplir esas necesidades adicionales de energía.

El usuario final siempre está interesado en ahorrar dinero en la factura eléctrica, existen sistemas inteligentes de monitoreo de energía para los usuarios domésticos, con los cuales se puede monitorear y controlar el uso de energía de los diferentes aparatos en el hogar y dar una visión general del consumo de energía de cada dispositivo.

Si es posible conectar el sistema de monitoreo con las compañías de servicios públicos, éstas compañías van a ser capaces de ofertar un mejor servicio al usuario final, con la finalidad de conocer cuánta energía consumen los diferentes aparatos y la frecuencia con que se utilizan, la misma empresa puede actuar como poder consultor y asesorar a sus clientes a ahorrar dinero.

1.1 Estado del arte

El costo de los combustibles derivados del petróleo va en aumento y generar energía eléctrica a partir de ellos es una solución cada vez menos atractiva.

En los años anteriores al 2017, por su bajo costo, se incrementó el uso de las plantas termoeléctricas basadas en la combustión del gas natural. La producción de energía eléctrica por combustión contamina.

La contaminación afecta a todos y cambia al clima del planeta. De cualquier forma el costo de la energía eléctrica va en aumento y los aspectos de ahorro en el consumo eléctrico incrementan en importancia. Una forma para garantizar un consumo eléctrico racional y eficiente es desarrollar y aplicar sistemas inteligentes con capacidad de respuesta a la demanda. En la literatura de años recientes aparecen una serie de aportaciones que pueden ser aprovechadas de manera directa o indirecta en el desarrollo de dichos sistemas.

Sistemas de monitoreo que se han desarrollado

Mihaela Albu et al. (Albu et al., 2010) desarrollaron un sistema para monitorear la operación de una micro red de generación de corriente directa. El sistema incluye medición y comunicaciones de datos. Los autores, implementaron una aplicación segura. El cliente accede a la aplicación por medio de un dispositivo con navegador web. La aplicación fue desarrollada con código abierto para bases de datos y código PHP. El servidor web se comunica con el módulo de control a través de Ethernet y el protocolo de comunicaciones TCP/IP. El ingreso de comandos por un usuario remoto es a través de la página web alojada en el servidor web.

Iliche Georgievski et al. (Georgievski et al., 2012) implementaron un sistema de monitoreo y control del consumo de energía eléctrica en edificios. El sistema hace un ordenamiento de los dispositivos activados, con el objeto de que la menor cantidad de dispositivos sean activados a un mismo tiempo. Además toma en cuenta el momento en el cual el costo de la energía eléctrica es menor para hacer dicha activación, traduciéndose esto en optimización de costos. La desventaja es que el sistema ha sido puesto a prueba solo en prototipos.

Kelly Sean Dieter Tebje et al. (Tebje et al., 2013) desarrollaron un sistema para monitorear y controlar el consumo de energía en una casa. Las operaciones principales son el manejo remoto y control de cargas, por ejemplo: el encendido apagado de una lámpara eléctrica o de un calentador de agua. El sistema proporciona inteligencia para reducir el consumo de energía a través de la tecnología del Internet de las cosas. El servidor web del sistema recopila la información transmitida por los sensores y la almacena en una base de datos. Una vez que el usuario lo solicita, la información es procesada y mostrada vía Website. La información

es presentada, según lo solicite el usuario, en periodos de días, semanas o meses. Y también puede ser observada gráficamente.

He Dawei et al. (Dawei et al., 2013) crearon un sistema de monitoreo no intrusivo. Este sistema divide a los dispositivos en dos categorías. La primera está formada por dispositivos que demandan una carga alta: bombas de agua, aire acondicionado. La segunda categoría está formada por dispositivos que demandan una carga menor: TV, cafeteras, impresoras. El sistema monitorea y controla la activación y desactivación de los dispositivos según el grupo al que pertenecen, dando prioridad a los dispositivos del grupo dos para evitar que sean desactivados. La prioridad se basa en que la desactivación de dispositivos del grupo dos tiene mayor probabilidad de causar inconformidad al usuario. El sistema es interesante y se han hecho investigaciones del uso del mismo, pero aún se tienen retos por superar.

Han Jinsoo et al. (Jinsoo et al., 2014) reportaron un sistema inteligente para administrar la energía en un hogar considerando la generación de energía y su consumo. Para esto usaron un medidor inteligente del consumo de energía de los aparatos eléctricos de la casa. La información de la medición es enviada hacia un servidor web, para visualizarla en la red cuando el usuario lo solicite. El protocolo de comunicación es ZigBee. La alimentación de energía que requieren los aparatos eléctricos se controla con un PLC. Un panel solar y un aerogenerador se usan como fuentes para suministrar la energía eléctrica requerida.

Jianli Pan et al. (Pan et al., 2014) presentaron un estudio del estado de la técnica en edificios inteligentes. El estudio es acerca del Internet móvil y la eficiencia energética. Se analizaron los métodos usados en edificios que aplican tecnologías de red y control para reducir el uso irracional de la energía. Se hace énfasis en que la medición, en interacción con las redes inteligentes, es útil para calcular la respuesta a la demanda. Tal interacción ofrece información de precios en tiempo real y ayuda a los administradores a ejecutar acciones para reducir el uso de energía durante las horas pico.

Suryadevara Nagender Kumar et al. (Kumar et al., 2015) desarrollaron un sistema inteligente de control y monitoreo en tiempo real para calcular el consumo de energía eléctrica en una casa. El sistema monitorea el voltaje y la corriente para calcular la energía consumida. El protocolo de comunicaciones es ZigBee. La información recibida es almacenada en una base de datos. Se visualizan los valores de voltaje, corriente y energía en una página web. El objetivo es medir el nivel de uso de la electricidad en las horas pico para bajar su consumo y mejorar su utilización.

Vivekananthan Cynthujah et al. (Cynthujah et al., 2015) desarrollaron un sistema para administrar el consumo de energía de una casa. El sistema usa precios de energía obtenidos en tiempo real. El objetivo del sistema es reducir el pago por concepto del consumo de energía. La primera etapa del sistema se ocupa de monitorear, en tiempo real, el estado de

los dispositivos controlables. La segunda etapa aplica procesos de decisión de Markov para reducir el número de electrodomésticos en uso. La reducción se basa en el comportamiento estocástico del costo del consumo. La etapa de control en tiempo real incorpora las incertidumbres de los precios y el perfil del consumo del dispositivo para establecer una alternativa que ayude a la optimización del costo del consumo eléctrico.

1.2 Justificación

El presente proyecto es importante desde el punto de vista económico, social, de desarrollo tecnológico y del medio ambiente. Con el desarrollo del proyecto se genera un producto que representa una herramienta útil enfocada al análisis y control de cargas con fines de mejorar la eficiencia del uso de la energía eléctrica el cual se verá reflejado en la disminución del pago del recibo por el servicio de energía, mejorando los hábitos del consumo de energía eléctrica de los usuarios y disminuyendo el impacto ambiental.

1.3 Objetivo General

Aplicar los principios de diseño para construir un sistema que permita monitorear, analizar, controlar la calidad y mejorar el uso racional de la energía eléctrica.

1.4 Objetivos específicos

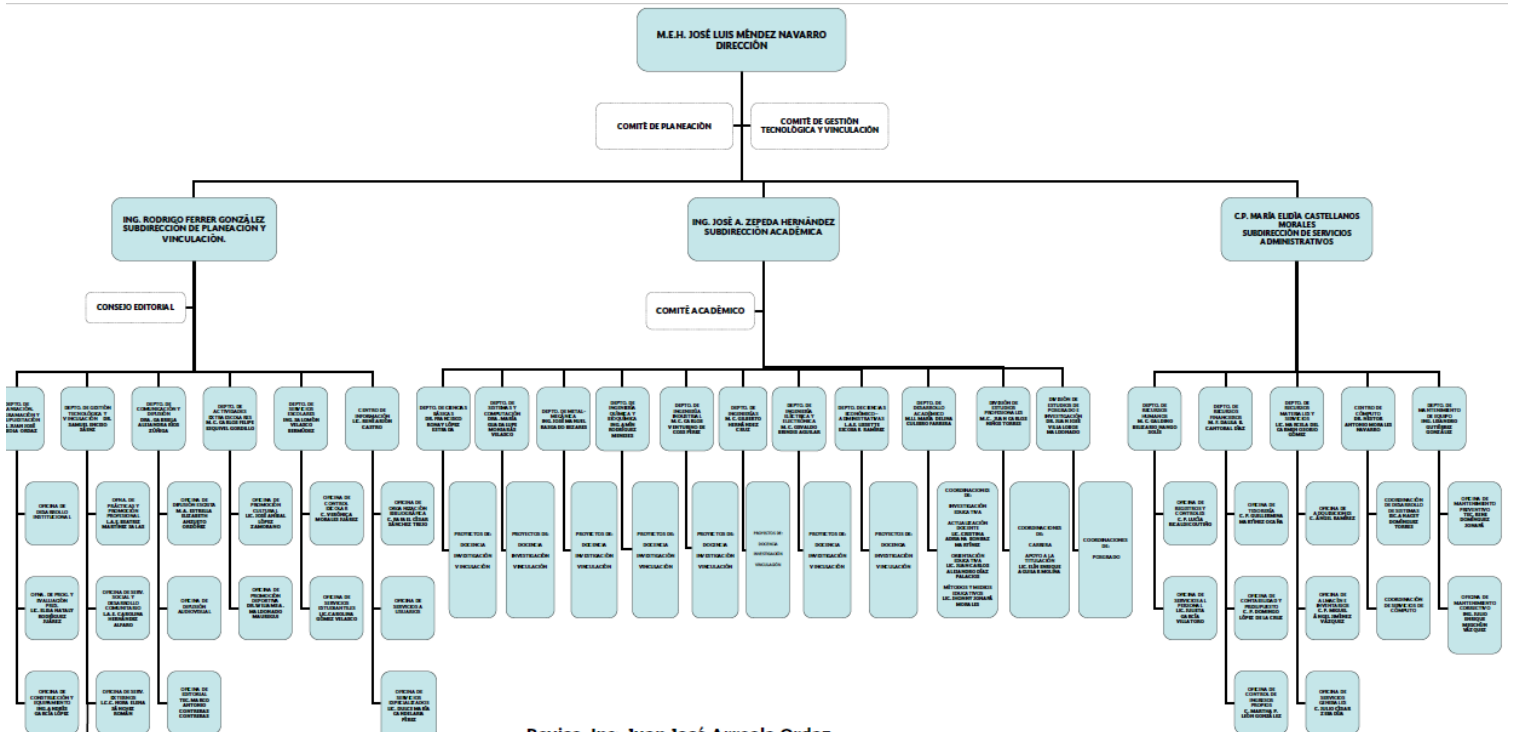
- Seleccionar las tecnologías apropiadas para obtener un sistema viable que permita atender las necesidades en el control y monitoreo de la energía eléctrica.
- Diseñar e implementar un circuito electrónico que sea capaz de obtener el consumo de voltaje y corriente de aparatos eléctricos de corriente alterna.
- Desarrollar un programa para un sistema de adquisición de datos que permita monitorear, analizar y controlar las señales eléctricas obtenidas del circuito electrónico.
- Desarrollar un programa que permita el cálculo de potencia activa, potencia reactiva, potencia eficaz, factor de potencia y señales de armónicos para determinar la eficiencia del consumo eléctrico.
- Hacer visible las variables obtenidas para realizar pruebas de operación.

CAPITULO II

2. Caracterización del área en que se participó

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

Organigrama de la empresa.



Este proyecto se realizó en el departamento de ingeniería eléctrica y electrónica, a cargo de M. en C. Osvaldo Brindis Velázquez. Este departamento se encuentra en el Edificio I, en el laboratorio de industrias 4.0 de dicho edificio.

2.1 Problemas a resolver

Cronograma de actividades

Actividad	Semana															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Estado del arte	X	X														
Identificar las variables a medir en el sistema de monitoreo			X	X												
Seleccionar los sensores para medir las variables seleccionadas					X	X										
Diseño del sistema de adquisición de variables a través de un sistema embebido.							X	X	X	X						
Implementación del sistema de monitoreo y control de la calidad										X	X	X	X	X	X	
Redactar resultados parciales				X				X				X				
Informe final.																X

Descripción detallada de las actividades

- Realizar consultas bibliográficas sobre el monitoreo y el uso eficiente de energía eléctrica, para identificar cuáles son las variables que nos ayudaran en la realización de este proyecto.
- Definir que variables se necesitan en el monitoreo para el uso eficiente de la energía eléctrica.
- Se eligen los sensores apropiados de medición en base a las características técnicas, así como también el microcontrolador para el manejo de la información.
- Se realiza el diseño de circuitos electrónicos, cableado y programación de todo el sistema para la adquisición y control de variables.
- Se elabora cada 4 semanas el informe de resultados para retroalimentar al asesor y que este de seguimiento de los objetivos alcanzados.
- Se integran los resultados obtenidos durante la estancia de la residencia en un reporte final para demostrar cada uno de los procesos realizados en cada una de las etapas correspondientes

2.2 Alcances y limitaciones

El principal problema en el consumo diario de la electricidad es el costo que se genera debido al uso constante de aparatos eléctricos, tanto en la industria como en el uso doméstico.

Este proyecto se pretende realizar con la finalidad de brindar información dadas en potencia activa, reactiva, aparente, voltaje y corriente de aparatos electricos para posteriores análisis de eficiencia.

Se ha optado por el uso de la tecnología SMD con el CI STPM01 que ofrece la ventaja de ser más compacto y ofrece además todas las mediciones de las distintas potencias ya mencionadas con un rango de error menor al 0.1%.

Las limitantes que se presentaron, es debido a la falta de materiales especiales para el diseño y construcción de las tarjetas electrónicas, por esta razón se decidió utilizar el CI STPM01 que cuenta con el empaquetado TSSOP20, lo suficientemente adecuado para poder aplicar la soldadura, ya que según las investigaciones existen otros dispositivos con mayor eficiencia pero con un alto nivel de construcción.

CAPITULO III

3. Fundamento teórico

3.1 Circuito integrado STPM01

El STPM01 está diseñado para la medición efectiva de la energía activa, reactiva y aparente en un sistema de línea eléctrica que usa la bobina Rogowski, el transformador de corriente y los sensores de derivación. Este dispositivo se puede implementar como un medidor de energía monofásico de un solo chip o como una medida periférica en un medidor de energía monofásico o trifásico basado en microcontrolador. El STPM01 consta esencialmente de dos partes: la parte analógica y la parte digital. El primero, está compuesto por un preamplificador y bloques convertidores $\Delta\Sigma$ A/D de 1er orden, referencia de voltaje de intervalo de banda, regulador de voltaje de baja caída, el último, está compuesto por control del sistema, oscilador, interfaz DSP cableada y SPI.

También hay un bloque OTP, que se controla a través del SPI por medio de un conjunto de comandos dedicado. Los bits configurados se utilizan para fines de prueba, configuración y calibración. A partir de un par de $\Delta\Sigma$ señales de salida provenientes de la sección analógica, una unidad DSP calcula la cantidad de energía consumida, reactiva y aparente, RMS y valores instantáneos de voltaje y corriente. Los resultados del cálculo están disponibles como frecuencia de pulsos y estados en las salidas digitales del dispositivo o como bits de datos en un flujo de datos, que se pueden leer desde el dispositivo mediante la interfaz SPI. Esta interfaz de bus de sistema se usa también durante las pruebas de producción del dispositivo y / o para la programación temporal o permanente de bits de OTP interna. En el STPM01 se genera una señal de salida con una frecuencia de pulso proporcional a la energía, esta señal se utiliza en la fase de calibración de la aplicación del medidor de energía, lo que permite un enfoque muy fácil. Cuando el dispositivo está totalmente configurado y calibrado, se puede escribir permanentemente un bit dedicado de bloque OTP para evitar el ingreso accidental en algún modo de prueba o el cambio de cualquier bit de configuración.

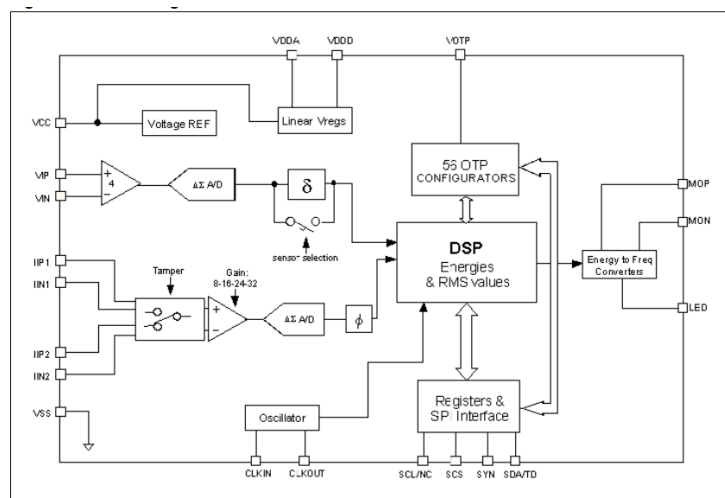


Ilustración 1.1 Diagrama de bloques del circuito integrado STPM01

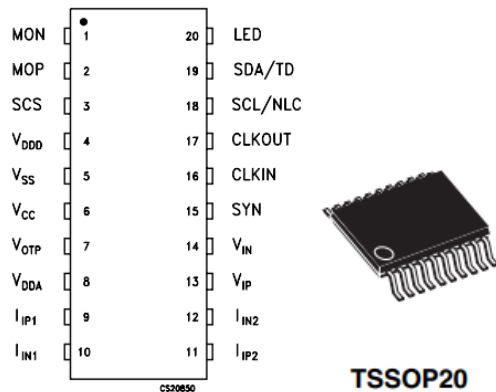


Ilustración 1.2 Configuración de los pines / empaquetado

3.2 Medidor trifásico basado en STPM01

STPM01 es un ASSP de medición implementado en una tecnología BCD6 avanzada de 0,35 μm . Está diseñado para la medición efectiva de potencias activas, reactivas y aparentes, Vrms, Irms, voltaje y corriente instantáneo, frecuencia en sistemas de líneas eléctricas que utilizan el transformador de corriente, la bobina de Rogowski y/o el principio de derivación.

Este dispositivo se puede utilizar como un dispositivo de medición de forma independiente en aplicaciones de medidores de energía monofásicos o como un periférico en un microprocesador basado en un medidor monofásico o trifásico.

En una configuración independiente, STPM01 emite una señal de tren de impulsos que tiene una frecuencia proporcional a la potencia activa utilizada, mientras que en modo periférico se usa STPM01 en una aplicación basada en microprocesador. En este caso, los datos medidos se leen en un intervalo de tiempo fijo desde los registros internos del dispositivo mediante la interfaz SPI procesada por un microcontrolador.

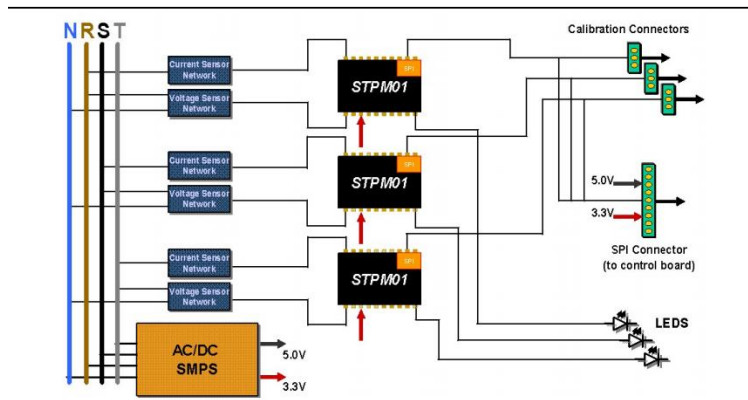


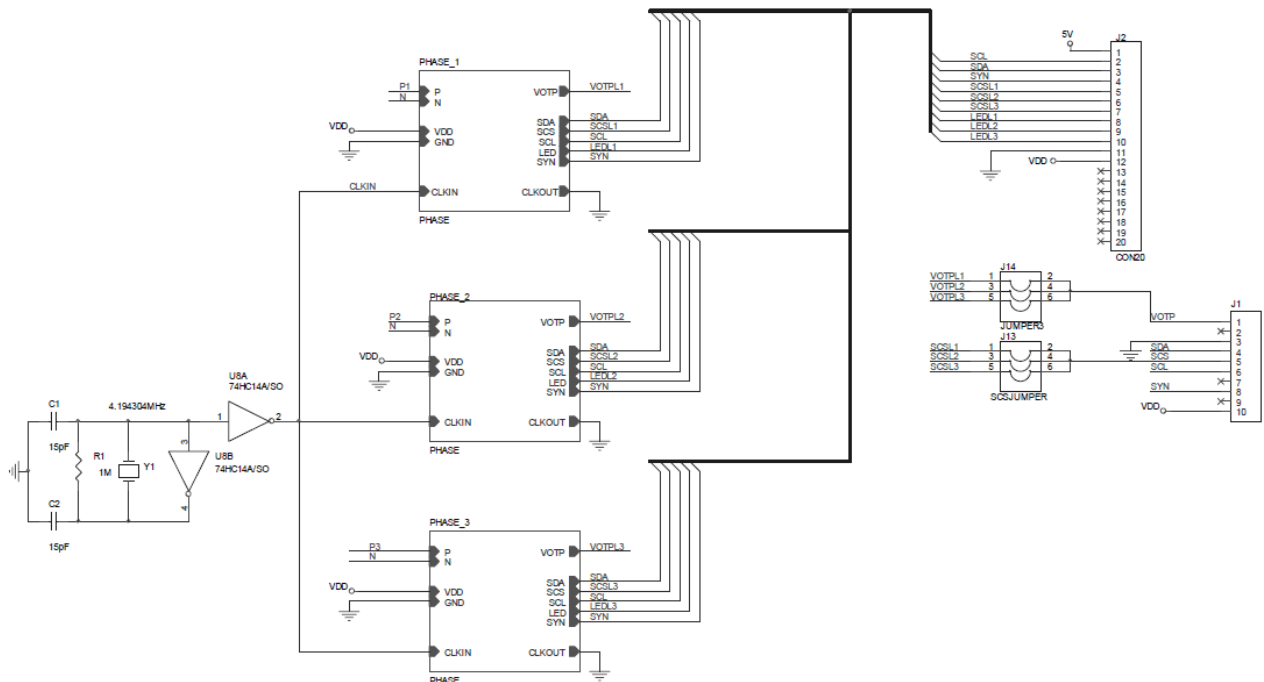
Ilustración 2.1 Diagrama de bloques para un sistema trifásico.

Este medidor trifásico se puede usar como un tablero de referencia para construir un medidor trifásico de clase 0,5 basado en microprocesador para los sistemas de línea de alimentación de 3-Wire DELTA, 4-Wires DELTA y WYE. Utiliza una topología de múltiples chips, en la que cada fase se monitorea utilizando un dispositivo monofásico. De esta manera, tres STPM01 se han utilizado con una red de reloj común.

Ilustración 2.2 Condiciones de operación.

Value	Min	Max	Unit
V_{NOM}	80	480	V_{RMS}
I_{NOM}/I_{MAX}	5	30	A_{RMS}
f_{LIN}	45	65	Hz
T_{AMB}	- 40	+85	$^{\circ}C$

Ilustración 2.3 Diagrama general de conexión



3.3 Sistemas trifásicos

El sistema trifásico es un método común de transmisión de energía eléctrica. Es un tipo de sistema polifásico utilizado para alimentar motores y muchos otros dispositivos.

Las corrientes son funciones sinusoidales del tiempo, todas con la misma frecuencia pero con diferentes fases. En un sistema trifásico, las fases están espaciadas igualmente, dando una

separación de fase de 120° . La frecuencia es típicamente 50 Hz en Europa y 60 Hz en los Estados Unidos y México.

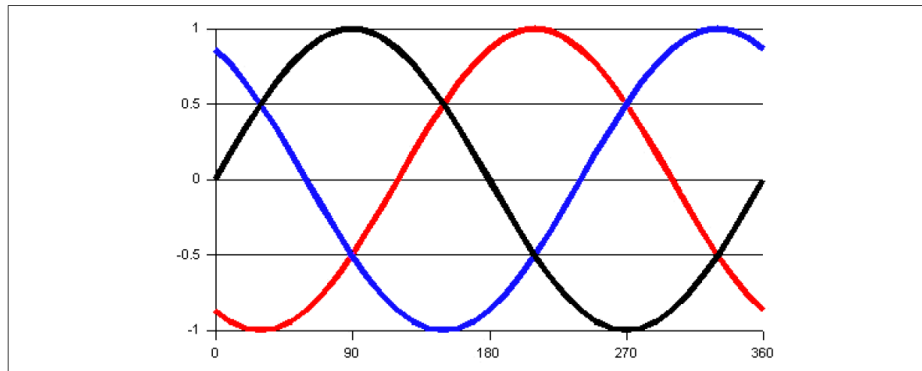


Ilustración 3.1 Voltaje (o corriente) instantáneo en un ciclo de voltaje de un sistema trifásico

Las tres fases podrían suministrarse a través de seis cables, con dos cables reservados para el uso exclusivo de cada fase. Sin embargo, generalmente se suministran a través de tres o cuatro cables:

- Servicio DELTA de 3 cables, tres fases que no tiene neutro y 220 V entre fases.
- Servicio trifásico de 4 cables DELTA y WYE que tiene 220 V entre la fase neutra y 380 V fase-fase.

3.3.1 Alimentación en circuitos trifásicos de corriente alterna.

Supongamos que el ángulo entre la tensión de fase y la corriente de fase es θ , que es igual al ángulo de la impedancia de carga. Teniendo en cuenta las configuraciones de carga que se muestran en la ilustración 3.2, la potencia de fase y la potencia total se pueden estimar fácilmente.

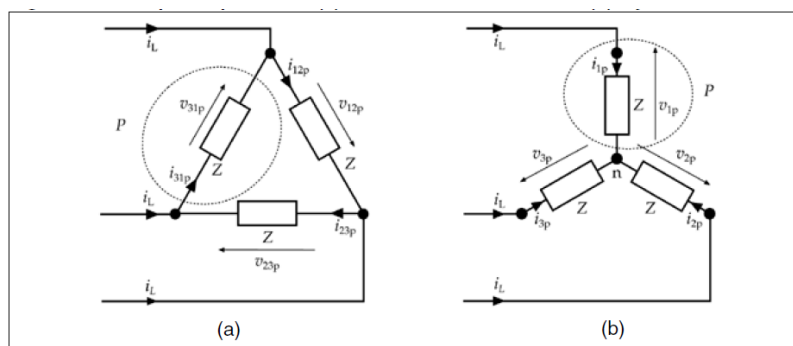


Ilustración 3.2 Potencias por fase en (a) carga conectada en delta y (b) carga conectada en estrella

En el caso de la ilustración 3.2 (a), la potencia activa total es igual a tres veces la potencia de una fase:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P = V_{\text{line}} \cdot I_{\text{phase}} \cdot \cos\theta \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$P_{\text{Total}} = 3P = 3V_{\text{line}} \cdot I_{\text{phase}} \cdot \cos\theta \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dado que la corriente de línea en las cargas equilibradas delta conectadas es:

$$I_{\text{line}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{phase}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Si esta ecuación se sustituye en la ecuación 2, la carga activa total se convierte en:

$$P_{\text{Total}} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{line}} \cdot I_{\text{line}} \cdot \cos\theta \quad (\text{Ecuación 4})$$

En la ilustración 3.2 (b), sin embargo, las impedancias contienen las corrientes de línea I_{line} (igual a la corriente de fase, I_{phase}) y los voltajes de fase.

$$V_{\text{phase}} = \frac{V_{\text{line}}}{\sqrt{3}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Por lo tanto, la potencia activa de fase y la potencia activa total son:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P = V_{\text{phase}} \cdot I_{\text{line}} \cdot \cos\theta \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$P_{\text{Total}} = 3P = 3V_{\text{phase}} \cdot I_{\text{line}} \cdot \cos\theta \quad (\text{Ecuación 7})$$

Si se usa la relación entre el voltaje de fase y el voltaje de línea, la potencia activa total se vuelve idéntica a la Ecuación 4 desarrollada. Esto significa que la potencia total en cualquier carga trifásica balanceada (Δ o Y) viene dada por la Ecuación 4. Del mismo modo, la potencia reactiva total y la potencia aparente total en los circuitos de CA balanceados trifásicos se puede dar por:

$$Q_{\text{Total}} = \sqrt{3}V_{\text{line}} \cdot I_{\text{line}} \cdot \sin\theta \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$S_{\text{Total}} = \sqrt{3}V_{\text{line}} \cdot I_{\text{line}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

3.3.2 Técnicas de medición de potencia

En los sistemas de alimentación trifásicos, se pueden usar uno, dos o tres vatímetros para medir la potencia total. Un vatímetro se puede considerar como un voltímetro y un amperímetro combinados en la misma caja, que tiene una desviación proporcional a $V_{\text{rms}}I_{\text{rms}}\cos\theta$, donde θ es el ángulo entre el voltaje y la corriente. Un vatímetro tiene dos terminales de voltaje y dos de corriente, que tienen signos de polaridad + o -. A continuación se describen tres métodos de medición de potencia que utilizan los vatímetros y se aplican a la carga de CA trifásica equilibrada.

Método de dos vatímetros

Este método se puede usar en un sistema de carga trifásica de tres cables con carga balanceada o no balanceada que se puede conectar Δ o Y . Para realizar la medición, se conectan dos vatímetros como se muestra en la ilustración 3.3.

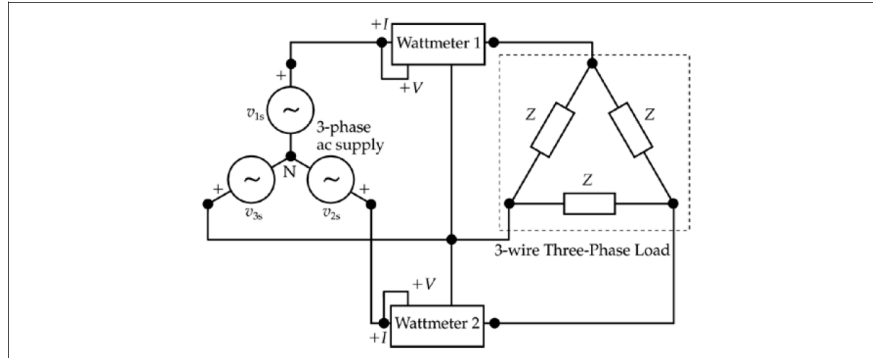


Ilustración 3.3 Método de dos vatímetros en cargas conectadas en estrella o en delta

En las cargas equilibradas, la suma de las dos lecturas del vatímetro da la potencia total. Esto se puede probar en una carga conectada en estrella matemáticamente utilizando la lectura de potencia de cada medidor como:

$$P_1 = V_{12} \cdot I_1 \cdot \cos(30^\circ - \theta) = V_{\text{line}} \cdot I_{\text{line}} \cdot \cos(30^\circ - \theta) \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$P_2 = V_{32} \cdot I_3 \cdot \cos(30^\circ - \theta) = V_{\text{line}} \cdot I_{\text{line}} \cdot \cos(30^\circ - \theta) \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$P_{\text{Total}} = P_1 + P_2 = \sqrt{3} V_{\text{line}} \cdot I_{\text{line}} \cdot \cos \theta \quad (\text{Ecuación 12})$$

Si la diferencia de las lecturas es calculada,

$$P_2 - P_1 = V_{\text{line}} \cdot I_{\text{line}} \cdot \cos(30^\circ - \theta) - V_{\text{line}} \cdot I_{\text{line}} \cdot \cos(30^\circ - \theta) = V_{\text{line}} \cdot I_{\text{line}} \sin \theta \quad (\text{Ecuación 13})$$

El cual es $1/\sqrt{3}$ veces la potencia reactiva trifásica total. Esto significa que el método de los dos vatímetros puede también indicar la potencia reactiva total en las cargas trifásicas y también el factor de potencia.

Método de los tres vatímetros

Este método es usado en un sistema trifásico de cuatro cables con cargas balanceadas o no balanceadas. Las conexiones se realizan con un medidor en cada línea como se muestra en la ilustración 3.4. En esta configuración, la potencia activa total suministrada a la carga es igual a la suma de las lecturas de los tres vatímetros.

$$P_{\text{Total}} = P_1 - P_2 - P_3 \quad (\text{Ecuación 14})$$

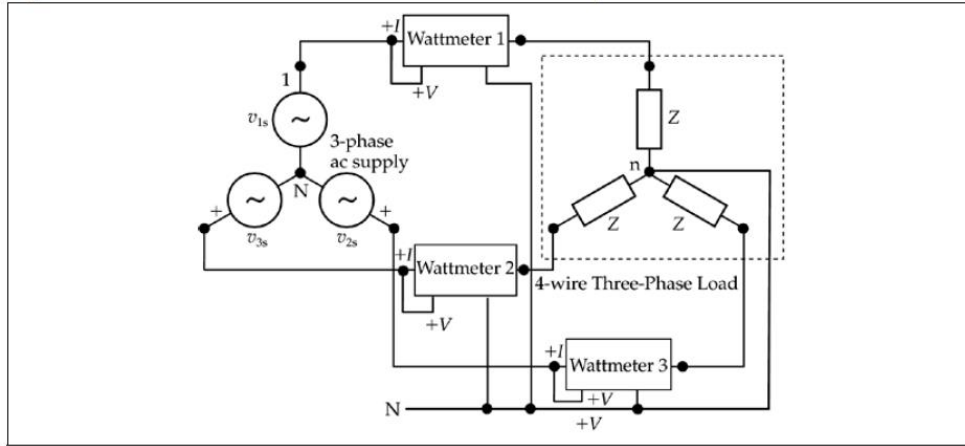


Ilustración 3.4 Conexión de los vatímetros en las cargas trifásicas de cuatro cables

Método de un vatímetro

Este método es adecuado solo en cargas trifásicas de cuatro cables balanceadas. La conexión del vatímetro es similar al dibujo que se muestra en la ilustración 3.4. La potencia total es igual a tres veces la lectura de solo un vatímetro que está conectado entre una fase y el neutro.

3.4 Bobina Rogowski como sensor de corriente

Como se ilustra en la Figura 4.1, el principio de la bobina de Rogowski establece que un conductor que transporta una corriente de CA $i(t)$ y pasa a través de una bobina helicoidal, induce un voltaje a través de la bobina que es proporcional a la tasa de cambio de la corriente (di/dt) en el inductor.

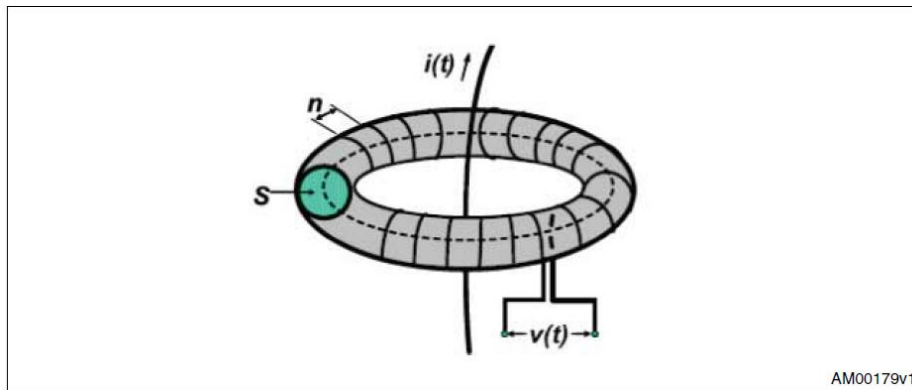


Ilustración 4.1 Principio de la bobina Rogowski como sensor de corriente

La tensión $v(t)$ es una función del factor de bobinado (Kr) y la frecuencia (Fr) de la forma de onda sinusoidal $i(t)$.

$$v(t) = Kr \times Fr \times i(t) \quad (\text{Ecuación 15})$$

Kr está determinado por las características del devanado, como el área (s) de sección transversal, el número de vueltas por unidad de longitud (n) y la simetría de la bobina. Una integración de $v(t)$ da una medida, proporcional a Kr, de la corriente RMS instantánea en el conductor.

3.5 Protocolo SPI (Serial Peripheral Interface)

SPI es un bus de tres líneas, sobre el cual se transmiten paquetes de información de 8 bits. Cada una de estas tres líneas porta la información entre los diferentes dispositivos conectados al bus. Cada dispositivo conectado al bus puede actuar como transmisor y receptor al mismo tiempo, por lo que este tipo de comunicación serial es full duplex. Dos de estas líneas transfieren los datos (una en cada dirección) y la tercer línea es la del reloj.

Algunos dispositivos solo pueden ser transmisores y otros solo receptores, generalmente un dispositivo que transmite datos también puede recibir.

Los dispositivos conectados al bus son definidos como maestros y esclavos. Un maestro es aquel que inicia la transferencia de información sobre el bus y genera las señales de reloj y control.

Un esclavo es un dispositivo controlado por el maestro. Cada esclavo es controlado sobre el bus a través de una línea selectora llamada **Chip Select o Select Slave**, por lo tanto el esclavo es activado solo cuando esta línea es seleccionada. Generalmente una línea de selección es dedicada para cada esclavo.

En un tiempo determinado T1, solo podrá existir un maestro sobre el bus. Cualquier dispositivo esclavo que no esté seleccionado, debe deshabilitarse (ponerlo en alta impedancia) a través de la línea selectora (**chip select**).

El bus SPI emplea un simple registro de desplazamiento para transmitir la información.

Las tres líneas comunes entre los dispositivos son:

- **MISO (Master In Slave Out)**: por la cual el esclavo envía datos al maestro,
- **MOSI (Master Out Slave In)**: por la cual el maestro envía datos al esclavo,
- **SCK (Serial Clock)**: línea de pulsos de clock emitidos por el maestro que sincronizan la transmisión de datos.

Y una línea específica para cada periférico o esclavo:

- **SS (Slave Select)**: pin a través del cual el maestro habilita o deshabilita la comunicación.

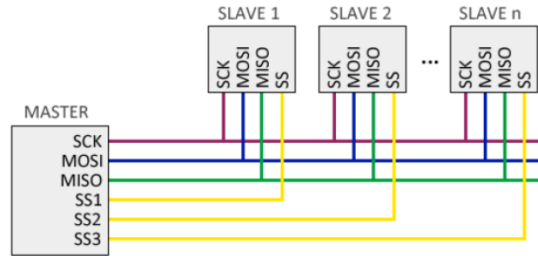


Ilustración 5.1 Protocolo SPI

La comunicación de datos entre maestro y esclavo se realiza en dos líneas independientes, una del maestro a los esclavos, y otra de los esclavos al maestro. Por tanto la comunicación es Full Duplex, es decir, el maestro puede enviar y recibir datos simultáneamente.

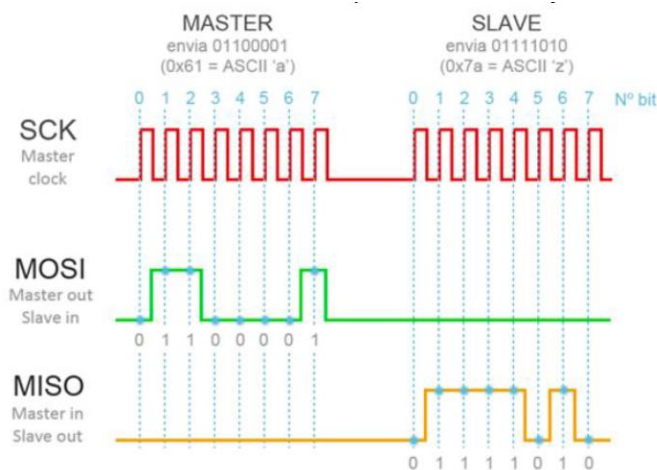


Ilustración 5.1 Funcionamiento del bus SPI

Por defecto el maestro mantiene en estado HIGH todas las líneas SS. Cuando el maestro quiere establecer comunicación con un esclavo pone a LOW la línea SS correspondiente, lo que indica al esclavo que debe iniciar la comunicación.

En cada pulso de la señal de reloj, normalmente en el flanco de subida, el dispositivo maestro envía un bit al esclavo a la vez que puede recibir un bit del esclavo seleccionado.

La trama (los datos enviados) no sigue ninguna regla, es decir, se puede enviar cualquier secuencia arbitraria de bits. Esto hace que los dispositivos conectados necesiten tener pre-acordado la longitud y significado de lo que van a enviar y recibir.

Ventajas:

- Alta velocidad de transmisión y Full Duplex.
- Integrado en muchos dispositivos.
- Permite enviar secuencias de bit de cualquier tamaño.

Desventajas:

- Se requieren 3 cables (SCK, MOSI y MISO) + 1 cable adicional (SS) por cada dispositivo esclavo.

- Solo es adecuado a distancias cortas (hasta 30cm).
- No se dispone de ningún mecanismo de control que permita saber si el mensaje ha sido recibido correctamente.
- La longitud de los mensajes enviados y recibidos tiene que ser conocida por ambos dispositivos.

3.6 Protocolo SPI para STPM01

El microcontrolador debe leer los datos medidos (como energía activa, reactiva y aparente, VRMS, IRMS, voltajes y corrientes instantáneos, frecuencia lineal, estado del dispositivo, etc.) en un intervalo de tiempo fijo para seguir procesándolos.

3.6.1 Descripción del módulo SPI

La interfaz STPM01 SPI admite un protocolo serial simple, que se implementa para permitir una comunicación entre un sistema host (microcontrolador o PC) y el dispositivo.

Con esta interfaz es posible realizar las siguientes tareas:

- Reinicio remoto del dispositivo.
- Programación temporal de la configuración interna / datos de calibración y señales del sistema.
- Programación permanente en la memoria OTP de la configuración interna / datos de calibración.
- Lectura de registros de datos internos (que se muestra en la Figura 5).

Cuatro pines del dispositivo están dedicados a este propósito: SCS, SYN, SCL y SDA.

SCS, SYN y SCL son pines de entrada, mientras que SDA puede ser entrada o salida de acuerdo si el SPI está en modo de escritura o lectura.

No se puede acceder directamente al registro interno, en lugar de eso, se utilizan unos 32 bits de latches de transmisión para cargar previamente los datos antes de leerlos o escribirlos en los registros internos.

La condición en la que las entradas SCS, SYN y SCL se configuran en nivel alto determina el estado inactivo de la interfaz SPI y no se produce transferencia de datos. Cualquier operación SPI debe comenzar desde estado inactivo.

- SCS: habilita la operación SPI cuando está bajo. El microcontrolador utiliza este pin para multiplexar la lectura de los tres dispositivos.
- SYN: cuando SCS está bajo, el estado del pin SYN selecciona si el SPI está en modo de lectura (SYN = 1) o escritura (SYN = 0). Cuando SCS es alto y SYN también es alto, los resultados de los datos de entrada o salida se transfieren a los latches de transmisión.

- SCL: es el pin del reloj de la interfaz SPI. Esta función de pin también es controlada por el estado SCS. Si SCS es bajo, SCL es la entrada de la señal de reloj de sincronización de bits en serie. Cuando SCS es alto, SCL también es alto, lo que determina el estado inactivo del SPI.
- SDA: es el pin de datos. Si SCS es bajo, la operación de SDA depende del estado del pin SYN. Si SYN es alto, SDA es la salida de los datos de bits en serie (modo de lectura), si SYN es bajo, SDA es la entrada de la señal de datos de bits en serie (modo de escritura). Si SCS es alto, SDA está inactivo. Cuando SCS está activo (bajo), la señal SDA debe cambiar su estado en el borde posterior de la señal SCL y la señal SDA debe ser estable en el siguiente borde anterior de la señal SCL. El primer bit válido de SDA siempre se inicia con la activación de la señal SCL.

Una señal de nivel alto para estos pines significa un nivel de voltaje superior a $0.75 \times VCC$, mientras que una señal de nivel bajo significa un valor de voltaje inferior a $0.25 \times VCC$.

3.6.2 Conexión al microcontrolador.

El SPI maestro debe ser implementado por un sistema host, una PC o un microcontrolador.

El bus SPI de microcontroladores suele ser un bus de cuatro hilos con funcionalidad full dúplex, cuyas señales suelen denominarse como:

- SCLK: Reloj serial (salida del maestro)
- MOSI: Master Output, Slave Input (salida del maestro)
- MISO: Master Input, Slave Output (salida del esclavo)
- SS: Slave Select (bajo activo; salida del maestro)

La mejor manera de conectar este puerto SPI estándar al SPI STPMxx es tener SCS y SYN controlados desde algún puerto de E/S de propósito general y SCL y SDA controlados desde los pines SPI.

La conexión sugerida entre el microcontrolador y STPMxx es la siguiente:

- MISO conectado a SDA;
- MOSI no conectado;
- SCLK conectado a SCL;
- SS conectado a SCS;
- Un pin de E/S de propósito general conectado a SYN.

De esta manera, la unidad periférica SPI del microprocesador debe funcionar como SPI de 2 cables (transferencias síncronas simple).

El periférico micro SPI se puede utilizar durante la lectura del dispositivo STPMxx, mientras que durante el proceso de escritura es posible implementar el protocolo SPI a través del firmware.

De hecho, en aplicaciones reales con STPM01, el medidor se calibra y configura durante la producción del medidor, por lo que la tarea principal del microcontrolador es leer desde el dispositivo y, muy raramente, restablecer el dispositivo.

En los medidores basados en STPM10, el dispositivo de medición debe configurarse al inicio desde el microcontrolador, pero también en este caso el proceso de escritura se realiza de vez en cuando, mientras que la lectura es un proceso continuo durante la vida útil del medidor.

En ambos casos, dado que el tiempo de lectura es crucial para una evaluación correcta de los datos del dispositivo, es recomendable emular el procedimiento de escritura por firmware y leer usando la funcionalidad periférica SPI, aprovechando así todas las funciones del puerto para alcanzar una lectura muy rápida.

3.6.3 STPM01 Inicialización (enclavamiento) y lectura (desplazamiento)

Hay dos fases en la lectura de los datos de STPM01 llamados enclavamiento (latching) y desplazamiento (shifting).

El enclavamiento se utiliza para muestrear resultados en enclavamientos de transmisión al iniciar un pulso activo en SYN mientras SCS está inactivo. La duración del impulso de SYN debe ser más larga que 2 períodos del reloj de medición (es decir, $t_2 - t_1$ más de 500 ns).

La fase de enclavamiento debe realizarse al mismo tiempo para todos los dispositivos STPM01 que mantienen las líneas SCSLx en estado inactivo para poder leer la información proveniente de cada fase en el mismo momento.

El cambio comienza cuando SCS se activa (bajo). Al comienzo de esta fase, se debe aplicar a SYN otro pulso mucho más corto ($t_5 - t_4 = 30$ ns). Una forma alternativa de leer los datos desplazados es extender el pulso en SYN a la segunda fase de lectura (de t_1 a t_5).

Acabado de enclavamiento y desplazamiento en la última subida de SYN (mostrada por la línea t_5 en la Figura 6.1). Una vez completadas estas lecturas, se restablece el STPM01.

Es posible leer datos aplicando 32 relojes seriales por registro de datos. De esta forma se pueden leer hasta 8 registros de datos desde cada dispositivo. Es posible cambiar a otro dispositivo habilitando la línea SCS correspondiente. Tenga en cuenta que, al habilitar varias líneas SCS, se corrompe la información recibida causando un error de paridad. Entonces, en cualquier caso, dos o más dispositivos no se pueden habilitar al mismo tiempo.

Para maximizar la confiabilidad de las lecturas, cada estructura de datos puede leerse dos veces y compararse. Esto es posible simplemente reiniciando el procedimiento de cambio, luego aplicando la señal de reloj en el pin SCL una vez más, manteniendo el pin SCS correspondiente en estado activo (bajo).

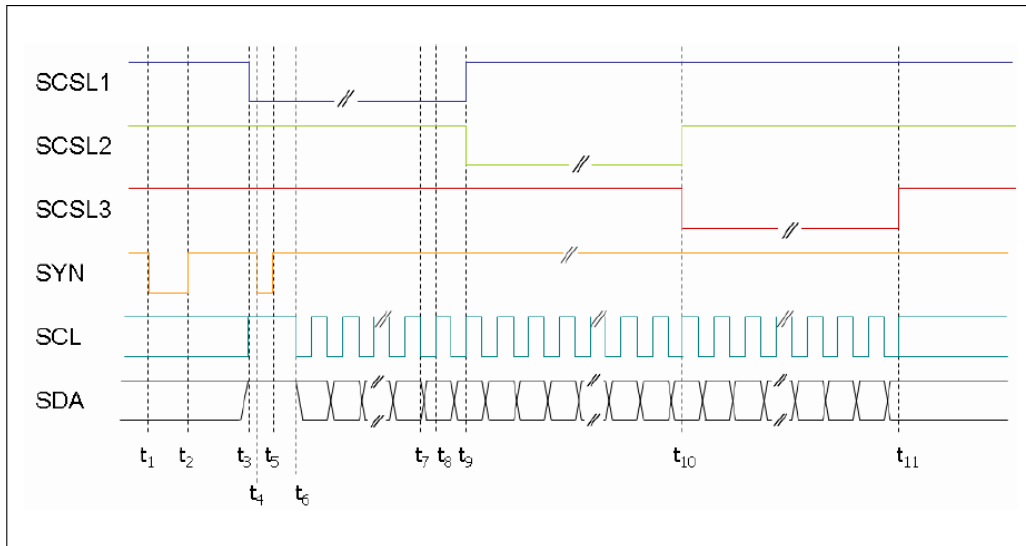


Ilustración 6.1 Tiempo de lectura de los registros de datos en un sistema trifásico

- $t_1 \rightarrow t_2$: Fase de enclavamiento. Valor de intervalo $> 2 / f_{CLK}$
- $t_2 \rightarrow t_3$: Datos bloqueados, SPI inactivo. Valor de intervalo $> 30 \text{ ns}$
- $t_3 \rightarrow t_4$: habilite SPI para la operación de lectura. Valor de intervalo $> 30 \text{ ns}$
- $t_4 \rightarrow t_5$: el contador del reloj de serie se restablece. Valor de intervalo $> 30 \text{ ns}$
- $t_5 \rightarrow t_6$: restablecimiento de SPI y habilitado para la operación de lectura. Valor de intervalo $> 30 \text{ ns}$
- t_7 : Datos internos transferidos a SDA
- t_8 : Los datos de SDA son estables y se pueden leer
- t_9 : Fin de la lectura de la fase 1, comienzo de la lectura de la fase 2.
- t_{10} : Fin de la lectura de la fase 2, comienzo de la lectura de la fase 3
- t_{11} : Fin de la lectura de la fase 3, parada de cambio de STPM01

3.6.4 Estructura de registro de datos

Cada registro de datos tiene una longitud de 4 bytes. El primer byte de lectura del registro de datos es el byte menos significativo (LSB). Cada byte se puede dividir en un nibble más y menos significativo (msn, lsn). El msn del 4to byte de valor de datos contiene el código de paridad en lugar de datos útiles. De hecho, cada registro de datos consta de un código de paridad de 4 bits y un valor de datos de 28 bits donde el código de paridad se calcula a partir del valor de datos que hace un total de 32 bits o 4 bytes.

La Figura 6.2 a continuación muestra de arriba a abajo cómo los bytes del registro de datos se emiten desde el SDA y cómo el host debe reorganizarlos para recuperar información útil.

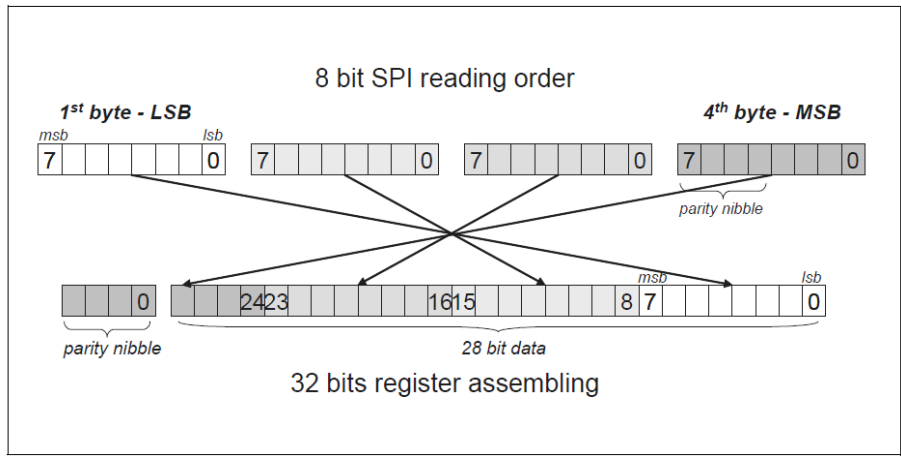


Ilustración 6.2 Reconstrucción de registro de datos

Los registros de datos tienen una posición fija de lectura y no se necesita direccionamiento de registros. Depende del anfitrión decidir cuántos registros se deben leer desde el dispositivo.

La Figura 6.3 muestra la posición de los registros dentro de la secuencia predeterminada de lectura, su nombre e información contenida.

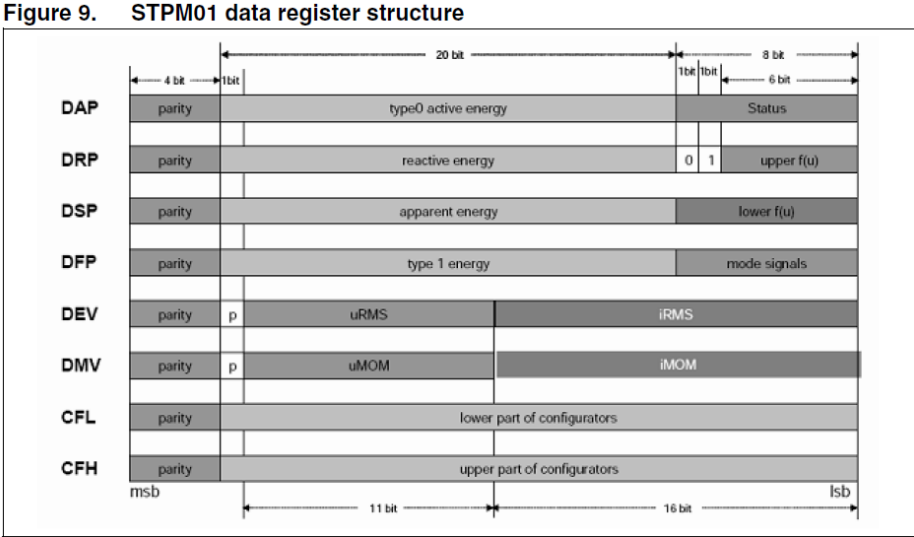


Ilustración 6.3. Estructura de registro de datos STPM01

3.7 Tecnología Arduino



Ilustración 7.1 Placa Arduino Uno R3

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basado en hardware y software fácil de usar. Este tipo de tecnología está dedicada para personas con intereses en proyectos interactivos y aplicaciones con el uso de microcontroladores y aditamentos del mismo.

Placa Arduino UNO R3.

La placa Arduino UNO R3 es la última versión de la placa Arduino UNO, esta placa electrónica cuenta con el microcontrolador ATmega328P, el cual está constituido por 14 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 6 pueden utilizarse como salidas PWM “Modulación de Ancho de Pulso”), cuenta con 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16MHz, una conexión USB para conectarlo al ordenador (PC), un conector de alimentación, una cabecera ICSP, cuenta con 2 pines para comunicación en base al protocolo (I2C) y un botón de reinicio.

Nomenclatura de la placa Arduino UNO R3.

En la figura 1.5 se muestra la nomenclatura correspondiente a la placa Arduino UNO R3, en donde se observa la numeración de cada una de las componentes que integran a dicha placa, los cuales son los siguientes:

- (1): Botón de reinicio.
- (2): Pines de comunicación (I2C).
- (3): Pin “AREF”.
- (4): Pin “GND”.
- (5): Pines de entrada/salida (3, 5, 6, 9, 10 y 11 son para PWM “modulación de ancho de pulso”).
- (6): Pines de transmisión “1” y recepción “0”.
- (7): Cabecera ICSP.
- (8): Microcontrolador ATmega328P.
- (9): Pines analógicos
- (10): Pin “Vin”.
- (11): Pines de “GND”.
- (12): Pin de alimentación a 5V.

- (13): Pin de alimentación a 3.3V.
- (14): Pin “RESET”.
- (15): Pin “IOREF”.
- (16): Conector de alimentación externa.
- (17): Conector USB.

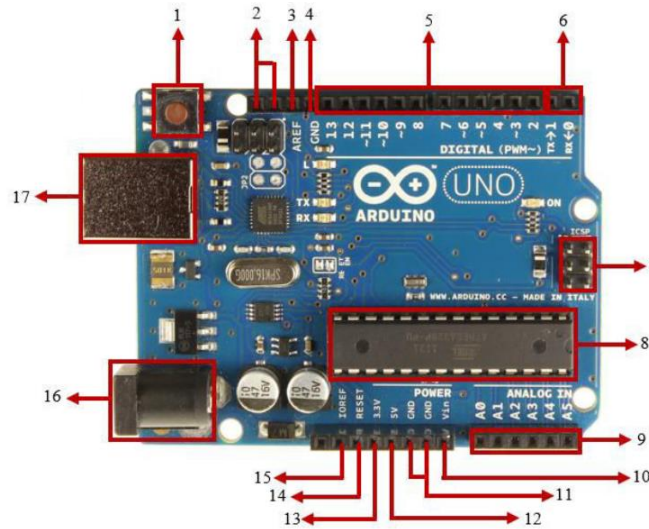


Ilustración 7.2 Nomenclatura de la placa Arduino UNO R3

Microcontrolador ATmega328P.

La placa Arduino UNO R3 utiliza este microcontrolador de la marca Atmel para realizar y efectuar varias tareas u operaciones programadas. Este microcontrolador cuenta con tres tipos de memoria las cuales son:

- Memoria Flash:** La función de esta memoria en el microcontrolador es la de almacenar permanentemente el programa que se desea ejecutar, tiene una capacidad de 32 KB, de los cuales 512 Bytes los ocupa un programa pre-grabado llamado (gestor de arranque) el cual permite el funcionamiento adecuado del microcontrolador.
- Memoria SRAM:** Es una memoria de tipo volátil, la cual permite almacenar programas y utilizarlos en el instante en que se graban en el microcontrolador, siempre y cuando este mismo esté conectado a una fuente de alimentación, es decir, que al momento de que la placa Arduino UNO R3 no reciba energía de la fuente de alimentación el programa grabado se eliminara. La capacidad de esta memoria es de 2 KB.
- Memoria EEPROM:** A diferencia de la memoria SRAM, la EEPROM permite almacenar y utilizar los datos grabados sin la necesidad de que el microcontrolador este energizado a través de una fuente de alimentación. Para la placa Arduino UNO R3 esta memoria tiene la capacidad de 1 KB, es decir, 1024 posiciones de un byte cada una.

En la figura 1.6 se muestra la disposición de los pines que integran al microcontrolador ATmega328P.

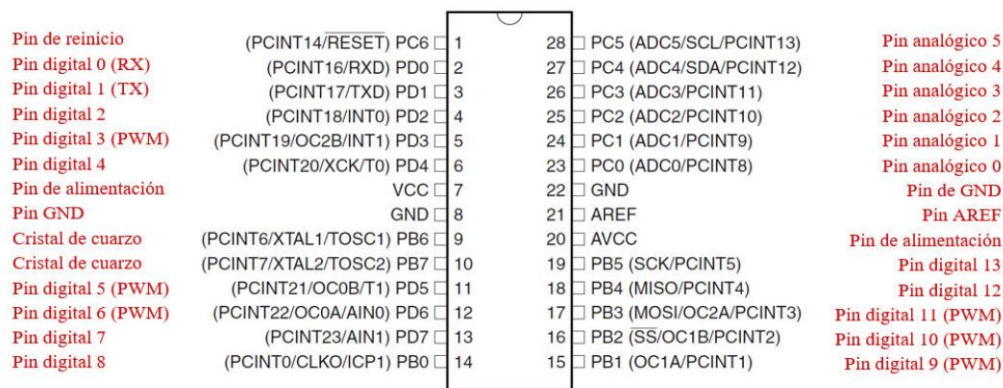


Ilustración 7.3 Disposición de los pines del microcontrolador ATmega328P

Pines de alimentación.

El microcontrolador tiene varias entradas de alimentación las cuales son las siguientes:

- Pin a 5V:** Este pin nos sirve para poder conectar dispositivos electrónicos que funcionen a una tensión de 5 volts.
- Pin a 3.3 V:** A diferencia del pin de 5 volts, este pin demanda una tensión de 3.3 volts.
- Pin Vin:** Cuando la placa Arduino UNO R3 está conectada al ordenador a través del cable USB, este pin aportará 5 volts.

Pines a tierra o GND.

El microcontrolador ATmega328P cuenta con dos pines a tierra, los cuales sirven para poder conectar dispositivos electrónicos que estén conectados a la placa Arduino UNO R3 a tierra.

Pines digitales de entrada/salida.

El microcontrolador ATmega328P cuenta con 14 pines hembra digitales de entrada/salida los cuales van del pin 2 al 13, estos funcionan a 5 volts y pueden soportar una corriente máxima de 40 mA.

Pines digitales PWM (Modulación de Ancho de Pulso).

Los pines del microcontrolador ATmega328P que cumplen con esta función son los que tienen la etiqueta (~), estos pines son: 3, 5, 6, 9, 10 y 11, y sirven para poder manipular los niveles de tensión del microcontrolador. Tienen una resolución de 8 bits, es decir, que pueden tomar 256 valores diferentes de tensión que pueden estar dentro de un rango de 0 a 5 volts. Además de esto, estos pines son controlados por 3 timers, los pines 3 y 11 son controlados por el timer 1, los pines 5 y 6 por el timer 2 y los pines 9 y 10 por el timer 3.

Pines analógicos.

El microcontrolador ATmega328P cuenta con 6 entradas analógicas que están etiquetadas de A0 a A5, sirven para poder manipular valores de tensión continuos dentro de un rango de 0

a 5 volts. La única diferencia de los pines analógicos es que estos necesitan de un conversor analógico-digital, el cual viene incorporado en la misma placa, y permite convertir los valores analógicos a digitales para que así el microcontrolador pueda interpretarlos. Este convertidor tiene una resolución de 10 bits.

Pines de transmisión y recepción.

El microcontrolador ATmega328P tiene 2 pines etiquetados como 0 y 1, el pin con la etiqueta 0 permite la función de recepción de datos, mientras que el pin con la etiqueta 1 cuenta con la función de transmisión de datos.

Pines de comunicación en base al protocolo SPI.

Los pines del ATmega328P que sirven para poder llevar a cabo una comunicación a través del protocolo SPI son los pines: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) y 13 (SCK).

Pines de comunicación en base al protocolo I^2C /TWI.

Los pines que pueden realizar este tipo de comunicación son los pines de entrada analógicos A4 (SDA) y A5 (SCL). La placa Arduino UNO R3 cuenta con otros dos pines hembra adicionales para poder llevar a cabo este tipo de comunicación, estos se encuentran después del pin con la etiqueta AREF.

Pin AREF.

Este pin permite un voltaje de referencia externo, el cual ocasiona que los pines analógicos tengan una mayor precisión.

Pin IOREF.

Este pin es una duplicación del pin Vin. Cuando dos placas Arduino se conectan entre sí, este pin les indica a ambas placas la tensión a la que deben de trabajar, la cual es de 5 volts.

Pin RESET.

A este pin se le puede agregar un botón adicional, el cual cumple con la misma función del botón de reinicio que se encuentra implementado en la placa Arduino UNO R3.

Protocolos compatibles con la placa Arduino UNO R3.

Los protocolos que utiliza la placa Arduino UNO R3 son los siguientes:

Protocolo I^2C /TWI

El microcontrolador ATmega328P utiliza el protocolo de comunicación I^2C (Inter-Integrate Circuit) también conocido como TWI (TWO-wire “Dos cables”). Utiliza dos líneas que permiten la transmisión de datos, una de ellas es la línea “SDA” la cual permite la transferencia de datos y esta se encuentra en el pin A4 y la otra es la línea “SCL” la cual envía la señal de reloj y se ubica en el pin A5. La señal de reloj permite la coordinación y sincronización de los elementos que lleven a cabo la comunicación.

Protocolo SPI.

A diferencia del protocolo de comunicación I^2C/TWI , este utiliza 4 líneas para poder llevar a cabo la comunicación, la línea “SCK” viene del elemento maestro y permite enviar la señal de reloj a los demás dispositivos que interfieran en la comunicación, esta línea se encuentra ubicada en el pin 13 del microcontrolador, la línea “SS” le permite al elemento maestro con que elemento esclavo desea comunicarse, está línea se encuentra ubicada en el pin 10, la línea “MOSI” permite transmitir los datos del elemento maestro al elemento esclavo, esta línea se encuentra en el pin 11 y la línea “MISO” permite la transmisión de datos del elemento esclavo al elemento maestro, está línea se encuentra en el pin 12.

3.8 Proteus Design Suite

Proteus Design Suite es una solución de software completa para simulación de circuitos y diseño de PCB. Comprende varios módulos para captura esquemática, firmware IDE y diseño de PCB que aparecen como pestañas dentro de una aplicación única e integrada. Esto proporciona un flujo de trabajo ágil sin problemas para el ingeniero de diseño y ayuda a que los productos lleguen al mercado más rápido.

Los productos Proteus PCB Design incluyen tanto módulos de captura esquemática como de diseño de PCB y están diseñados para que sean fáciles de usar y potentes. Las características tales como un enrutador automático basado en clase mundial, visualización 3D, ajuste automático de red, fragmentos de diseño y variantes de ensamblaje le ahorran tiempo durante el diseño del producto. Mientras tanto, un potente sistema de reglas de diseño impone todas las reglas y permisos que pueda necesitar para su PCB. El enrutamiento de las pistas es completamente consciente de las reglas de diseño y la verificación del espacio en vivo facilita la localización y la corrección de cualquier infracción.

Todos los productos de simulación Proteus utilizan el módulo de captura esquemática como circuito electrónico y nuestro motor SPICE de modo mixto personalizado para ejecutar la simulación. Proteus VSM permite que el microcontrolador también se simule en el esquema, mientras que Proteus IoT Builder permite el diseño y la prueba de la interfaz de usuario remota para el circuito.

Todos los productos de simulación Proteus utilizan el módulo de captura esquemática como circuito electrónico y nuestro motor SPICE de modo mixto personalizado para ejecutar la simulación. Proteus VSM permite que el microcontrolador también se simule en el esquema, mientras que Proteus IoT Builder permite el diseño y la prueba de la interfaz de usuario remota para el circuito.

4. Desarrollo

4.1 Diagrama de conexión del circuito

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó el software ISIS PROTEUS que es una herramienta muy útil para simulación de circuitos electrónicos y diseño de PCB que ofrece además una visualización previa del diseño.

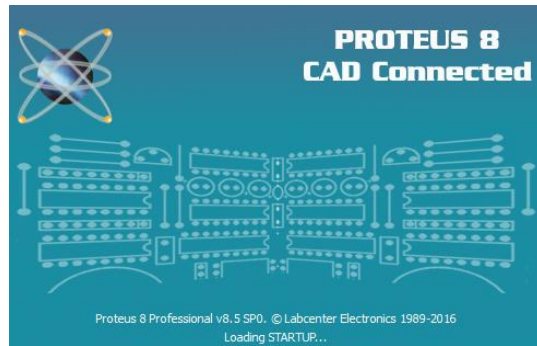


Ilustración 8.1 Software PROTEUS

Se realizó todo el conexionado del circuito en la opción de *Schematic Capture*.

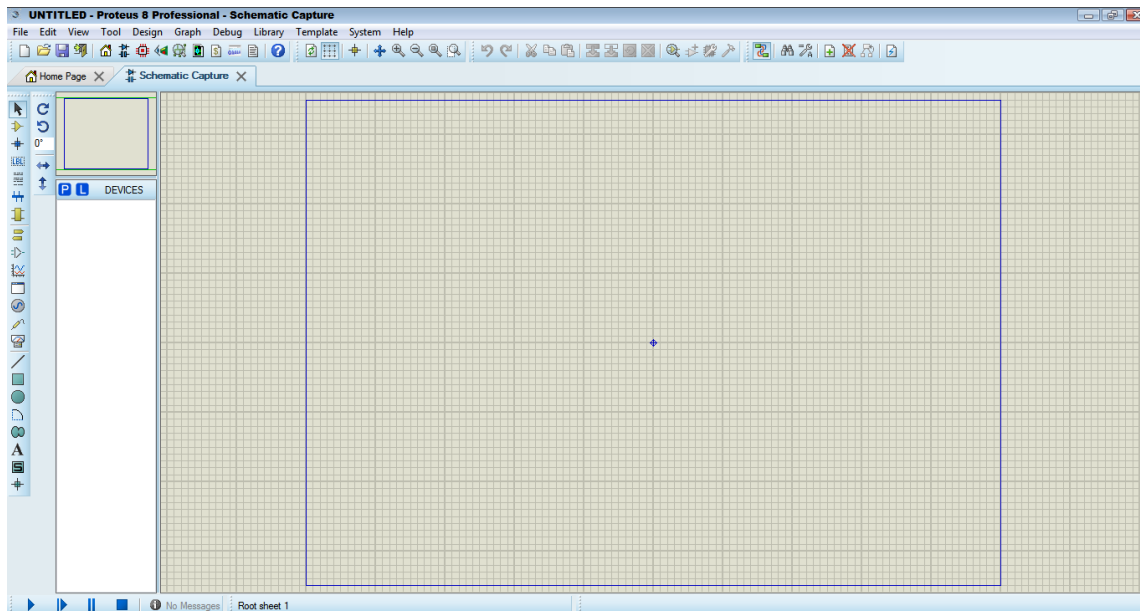


Ilustración 8.2 Ventana principal Schematic Capture

Los circuitos integrados encargados de hacer las mediciones de corriente y voltaje (SPTM01) no existen dentro de este software, por lo que el circuito no se puede simular.

Y para poder continuar con el diseño del PCB se creó una representación del SPTM01 con las herramientas que ofrece PROTEUS.

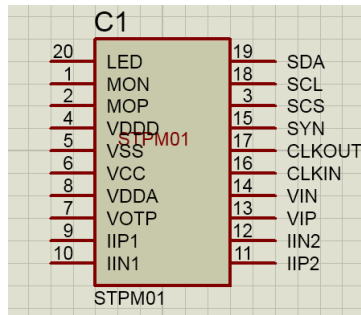


Ilustración 8.3 Representación del STPM01 con sus respectivos pines diseñado específicamente para este proyecto

Se tuvo que diseñar además el empaquetado específico del STPM01 para poder incluirlo en el PCB.

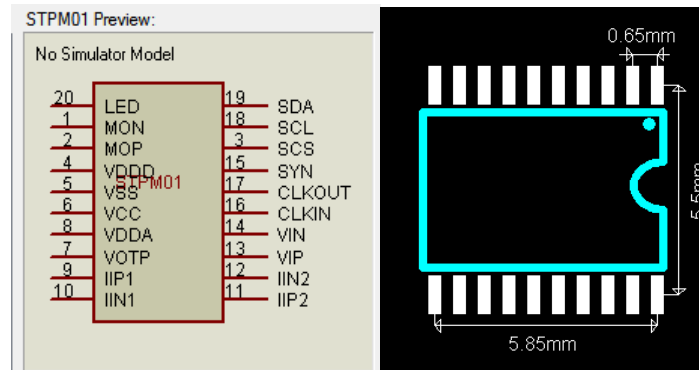


Ilustración 8.5 Empaquetado de montaje superficial TSSOP20

Se realizó la búsqueda de los componentes necesarios para el diseño del PCB con las características específicas de los componentes reales.

Se trabajó principalmente con el empaquetado 1216 de la tecnología SMD para resistencias y capacitores.

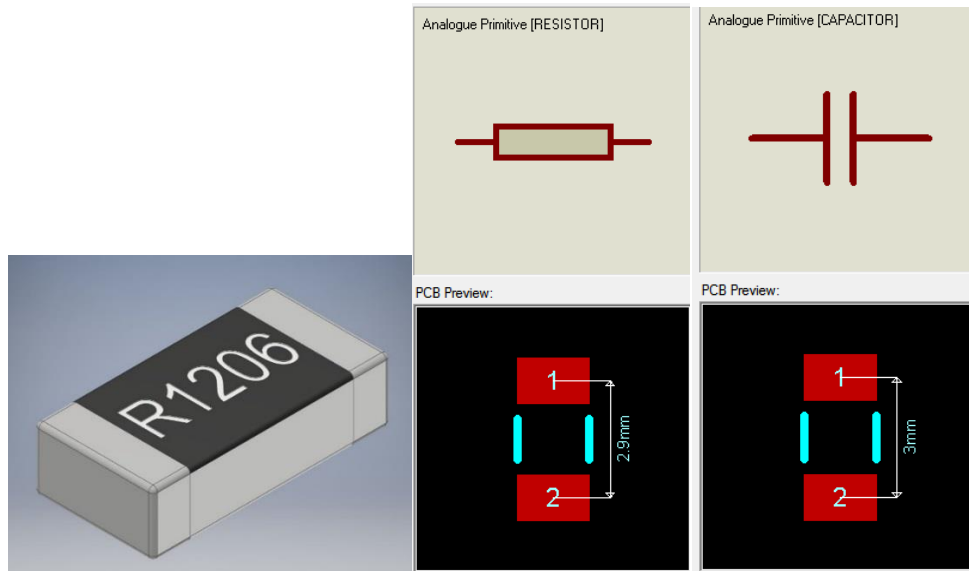


Ilustración 8.6 Resistencia y capacitor con empaquetado 1206 tecnología SMD

De acuerdo con la investigación se realizó el diseño esquemático del sistema.

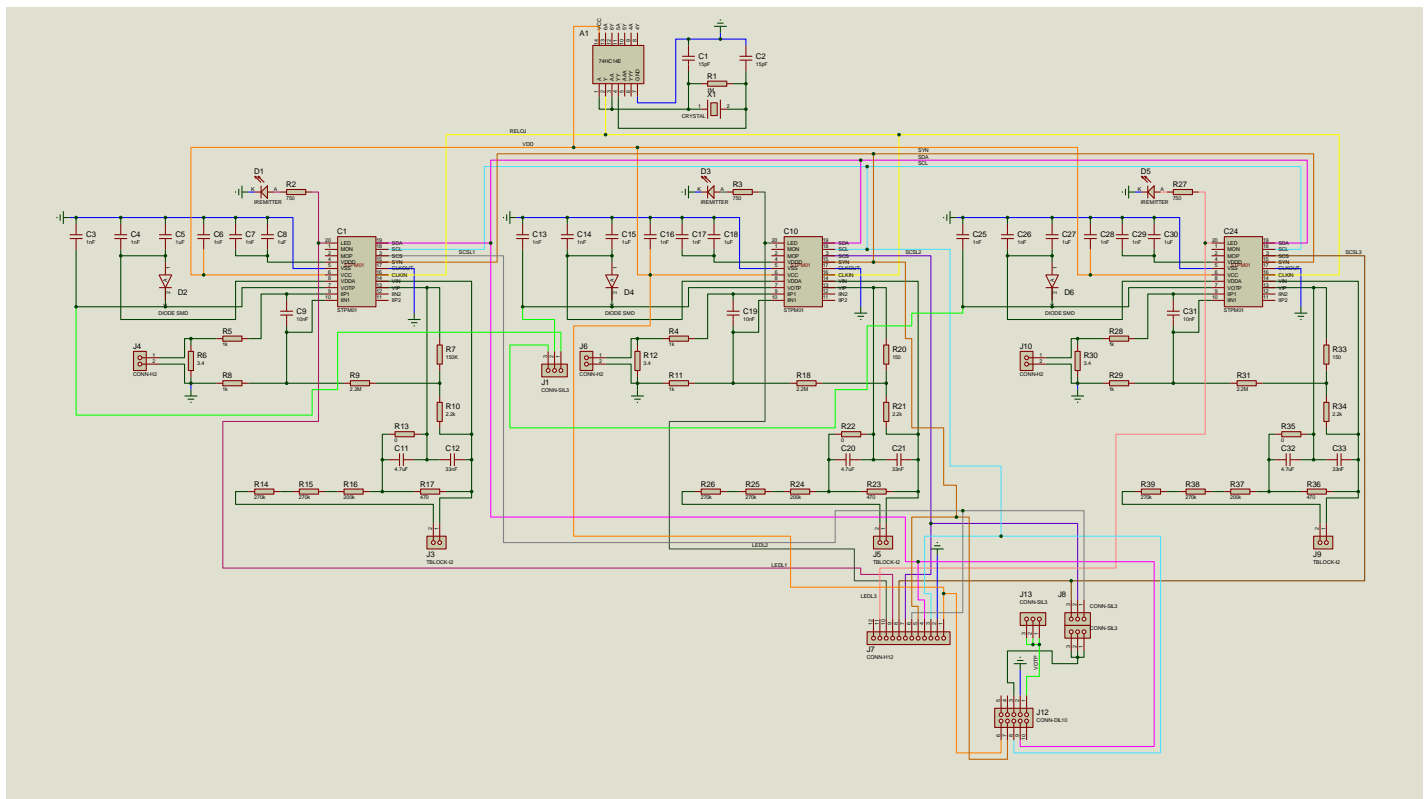


Ilustración 8.7 Diagrama de conexión del circuito

El diagrama anterior se compone de las siguientes etapas:

4.1.1 Señal de reloj

Se utiliza un cuarzo de 4.194 MHz para suministrar el reloj a los tres dispositivos STPM01. La Figura 4 muestra el esquema de la red de reloj mejorada que evita las influencias de EMI.

Se utiliza una red de inversores discretos para cambiar la impedancia del nodo común de los tres bloques. La salida del inversor evita el efecto de antena de segundo orden del nodo.

Los pines CLKOUT están conectados a tierra para garantizar el bucle de corriente.

Para seleccionar el rango de frecuencia de medición, MDIV debe establecerse en 0 en el registro de configuración del STPM01. Si se utiliza un cuarzo de 8 MHz, este bit debe cambiarse a 1.

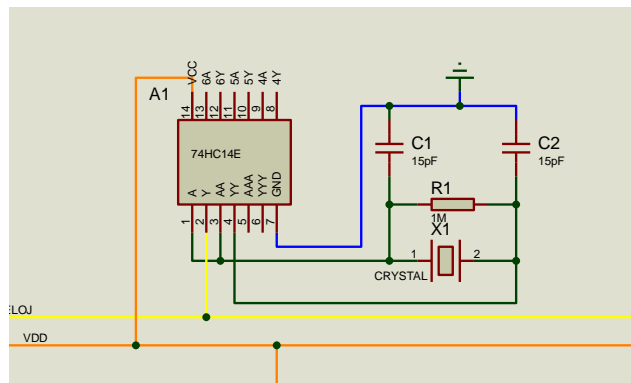


Ilustración 9.1 Señal de reloj

4.1.2 Circuito de fase

Las tres fases son idénticas. La imagen muestra la implementación del STPM01 utilizado para el cálculo de energía de cada fase.

El esquema se puede dividir en los siguientes subconjuntos:

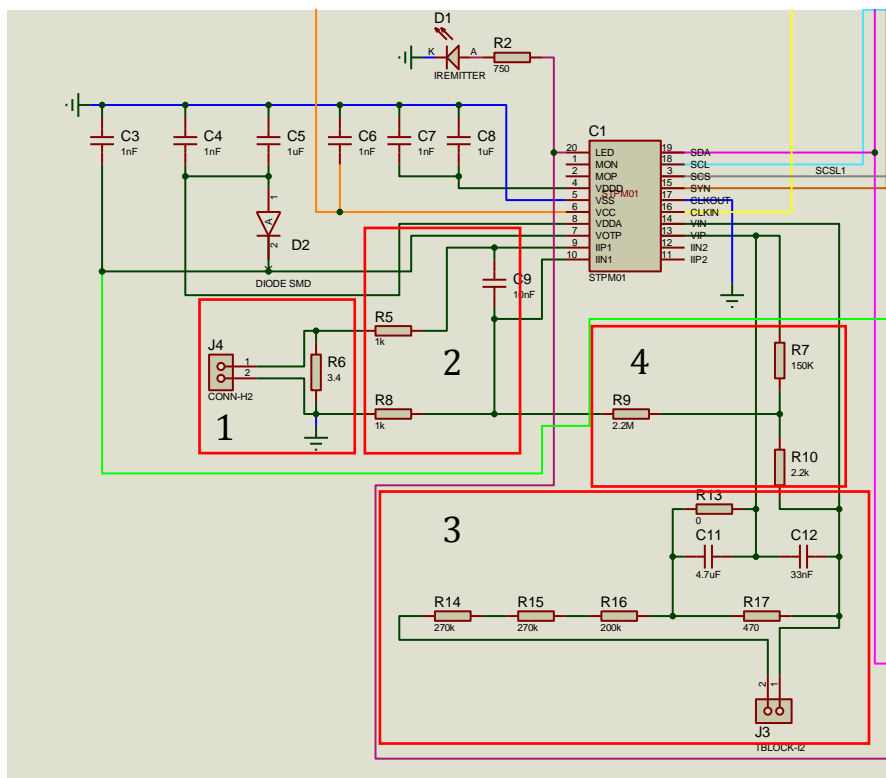


Ilustración 9.2 Diagrama de fase

- Circuito de detección de corriente (1)
- Filtro anti-aliasing (2)
- Circuito de detección de voltaje (3)
- Red de cancelación de diafonía (4)

4.1.3 Circuito de detección de corriente

El STPM01 tiene dos circuitos de detección de corriente externos, canales de corriente primarios y secundarios.

Normalmente, el segundo circuito de corriente se usa en la implementación del medidor monofásico cuando se requiere la función anti-manipulación. De esta manera, es posible leer también la corriente que fluye en el cable neutro para tener una comparación con la corriente que fluye en el cable de línea y detectar posibles manipulaciones.

En esta aplicación solo se ha utilizado el canal primario. Como consecuencia, la configuración de STPM01 es:

- PST = 2 si se usa un transformador de corriente (este es el caso de este medidor);
- PST = 0 (o 1) si se utiliza una bobina Rogowski.

En este último caso, el bit ADDG puede usarse para obtener una ganancia adicional de x8.

El canal actual utiliza un transformador de corriente para detectar la corriente de red. La resistencia de carga se usa para producir un voltaje entre VIN1 y VIP1 proporcional a la corriente medida.

4.1.4 Filtro Anti-aliasing

El filtro anti-aliasing es un filtro de paso bajo. Tiene una influencia insignificante en la caída de voltaje entre IIN1 y IIP1. Su objetivo es reducir la distorsión causada por el muestreo, también denominado aliasing, eliminando las frecuencias fuera de banda de la señal de entrada antes de muestrearla con el convertidor analógico a digital.

El filtrado se implementa fácilmente con un circuito monopolar de resistencia-condensador (RC) que obtiene una atenuación de -20dB / dec.

4.1.5 Circuito sensor de voltaje

Se utiliza un divisor de resistencia como sensor de voltaje.

La resistencia de 740 k Ω se divide en tres resistencias en serie de 2x270 k Ω y 1x200 k Ω , lo que garantiza que un transitorio de alto voltaje no pase por alto la resistencia. Esto también reduce el potencial a través de las resistencias, disminuyendo así la posibilidad de formación de arco. Las siguientes resistencias se utilizan para implementar divisor de resistencia:

- $R=R14+R15+R16=740\text{ K}\Omega$
- $R5=470\ \Omega$

El condensador C11 y la resistencia (R19 + R15) crean un filtro que evita la interferencia electromagnética (EMI).

4.1.6 Red de cancelación de interferencias

El extremo frontal del voltaje maneja voltajes de amplitud considerable, lo que lo convierte en una fuente potencial de ruido. Las perturbaciones se emiten fácilmente en los circuitos de medición de corriente donde interfieren con la señal real que se va a medir. Normalmente, esto produce un error no lineal en pequeñas amplitudes de señal y factores de potencia no unitarios. En el factor de potencia de la unidad, las señales de voltaje y corriente están en fase y la interferencia entre los canales de voltaje y corriente simplemente aparece como un error de ganancia, que puede ser calibrado. Cuando el voltaje y la corriente no están en fase, la interferencia tiene un efecto no lineal en las mediciones, que no se pueden calibrar.

La interferencia cruzada se minimiza mediante una buena planificación de PCB y el uso adecuado de los componentes de filtro en la red de interferencia. Los componentes de filtro recomendados se muestran en la Figura 3. La red resta una señal proporcional a la entrada de voltaje de la entrada de corriente. Esto evita las interferencias en el STPM01.

4.1.7 Conectores

Se debe conectar una tarjeta de control con microprocesador incorporado al conector J7 del módulo mediante un cable plano de 12 hilos. La tabla 2 a continuación describe el pin-out del conector.

Cada STPM01 tiene un puerto de comunicación SPI implementado por cuatro pines multiuso. A través del conector J7, la placa de control puede leer registros de datos o puede acceder al modo o las señales de configuración de cada dispositivo de medición mediante un protocolo dedicado.

Cada pin puede extraer hasta 4 mA a +3.0 V del módulo de control. La selección del dispositivo a leer se realiza en uno de los tres pines SCSLx (selección de dispositivo STPM01).

De forma predeterminada, el STPM01 se configura en modo periférico configurando los bits de configuración APL = 0.

Esto implica también las siguientes configuraciones de salida:

- Señal de reinicio del watchdog en el pin MON;
- Cruce por cero (ZCR) en el pin MOP;
- Un tren de pulsos con frecuencia proporcional al consumo de energía en el pin LED.

Para mostrar la información sobre el consumo de energía, es posible alimentar tres LED, cada uno mostrando la información en una fase, desde los pines LED de los tres dispositivos de medición, o la placa de control puede generar una señal LED para mostrar el indicador global de consumo de energía mediante la lectura y manipulación de información de energía de los tres registros STPM01. En este caso, el panel de control también puede recalibrar cualquier resultado leído del módulo a través del software apropiado.

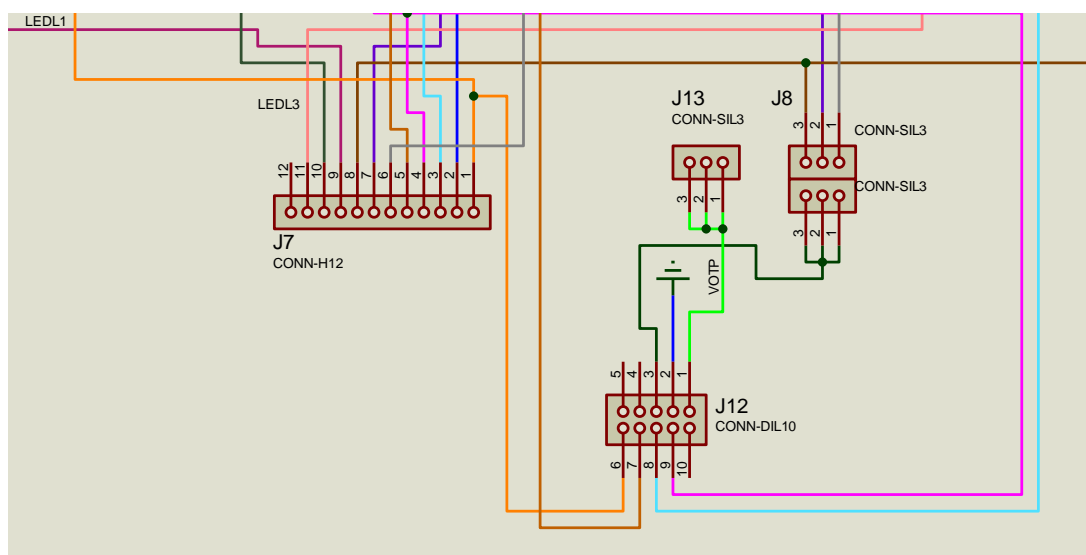















Ilustración 9.2 Conectores

Código de colores

 VDD	 SCSL2
 GND	 SCSL3
 CLK	 LEDL1
 SCL	 LEDL2
 SDA	 LEDL3
 SYN	 VOTP
 SCSL1	

Descripción del pin conector J7

Pin No.	Nombre del Pin	Descripción
1.	VDD	Alimentación 3.3 V
2.	GND	Señal de referencia de 0 V
3.	SCL	Pin de interfaz SPI
4.	SDA	Pin de interfaz de datos SPI
5.	SYN	Pin de interfaz SPI
6.	SCSL1	Habilitar señal SPI fase No.1
7.	SCSL2	Habilitar señal SPI fase No.2
8.	SCSL3	Habilitar señal SPI fase No.3
9.	LEDL1	Salida Led de la fase No.1
10.	LEDL2	Salida Led de la fase No.2
11.	LEDL3	Salida Led de la fase No.3
12.	-----	NC

Un sistema host puede comunicarse con cada módulo de medición (en realidad, con STPM01) mediante la interfaz SPI, a través del conector J7. El STPM01 siempre actúa como un esclavo SPI mientras que el sistema host actúa como un maestro SPI. Una placa de control de la aplicación o un sistema externo se pueden considerar como host.

El conector J12 se utiliza en la fase de evaluación para conectar el módulo de medición a una PC a través de la interfaz de hardware del Programador / Lector en paralelo STPM01.

Esto permite al usuario configurar temporalmente o permanentemente los registros internos de STPM01. Los puentes J13 y J8 seleccionan a cuál de los tres dispositivos se accederá.

El pin VOTP en el conector J12 se usa cuando un host desea escribir permanentemente algunos bits de configuración en el dispositivo de medición. En este caso, debe haber un nivel de tensión de +15 V en el VOTP. Este nivel se debe entregar desde el propio host porque el módulo no tiene una fuente de carga a bordo.

La tabla 3 muestra la descripción del pin del conector J12.

Descripción del pin conector J12

Pin No.	Nombre del Pin	Descripción
1.	VOTP	Alimentación de entrada de +15 V durante la escritura permanente a la celda OPT
2.	GND	Señal de referencia de 0 V
3.	SCS	Habilitar señal SPI
4.	-----	NC
5.	-----	NC
6.	VDD	Alimentación 3.3 V
7.	SYN	Habilitar señal SPI
8.	SCL	Señal de reloj para interfaz SPI
9.	SDA	Pin de interfaz de datos SPI
10.	-----	NC

4.2 Diseño del PCB

Se diseñó el PCB en la opción de PCB Layout de PROTEUS a partir del diagrama ya elaborado y con el empaquetado de los componentes previamente seleccionados.

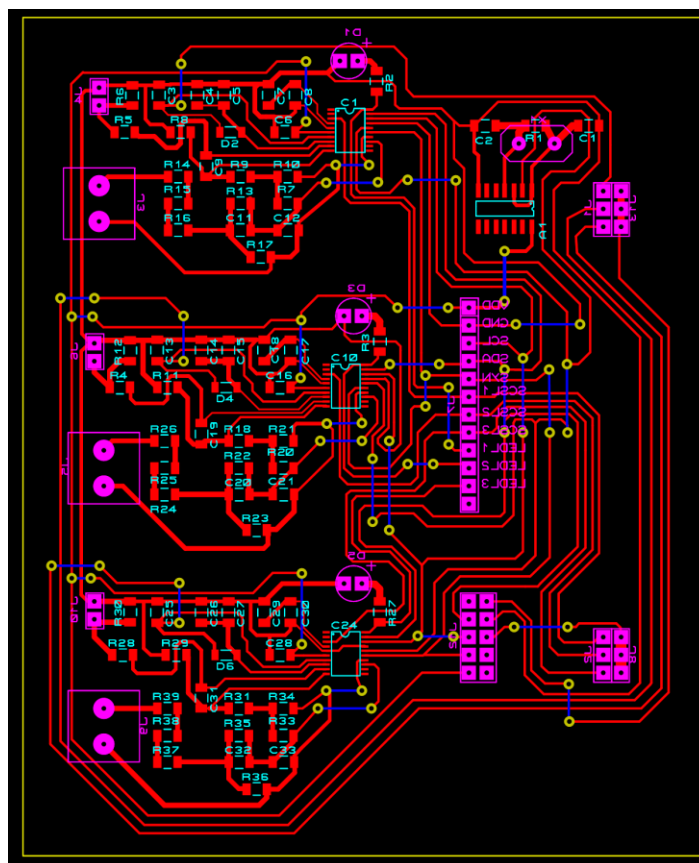


Ilustración 10.1 PCB, dimensiones ancho: 9.65 cm, largo: 11.93 cm

4.3 Visualización 3D

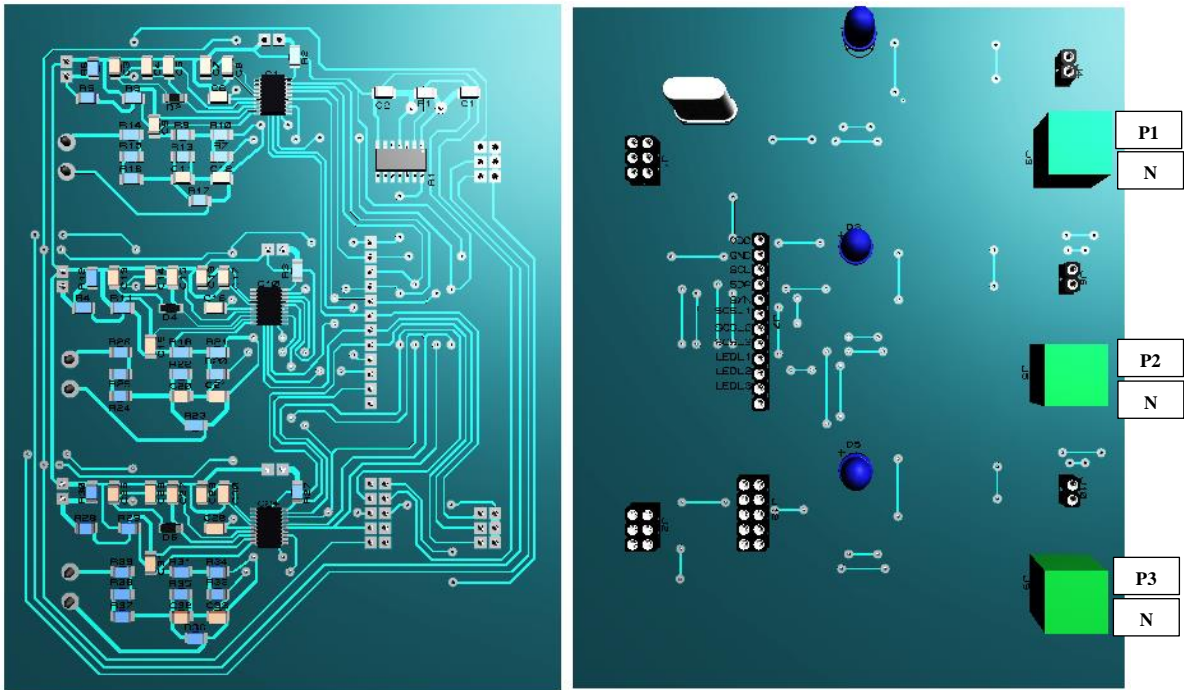
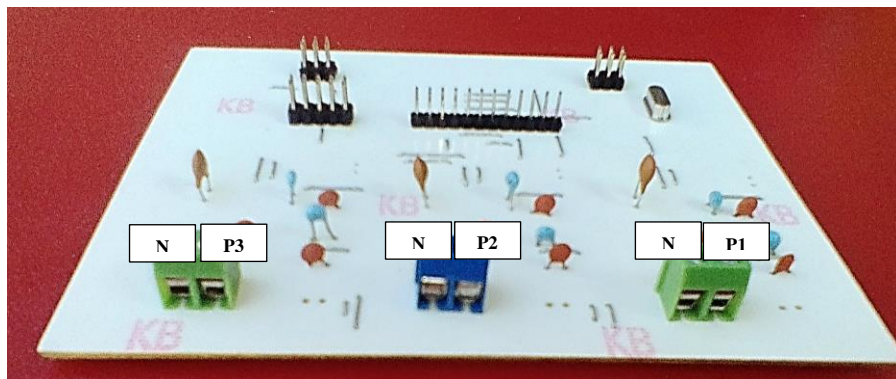


Ilustración 10.2 Vista inferior / Vista superior

4.4 Diseño PCB físico

Se muestra a continuación el resultado de la fabricación del sistema:

Ilustración 11.1 Vista superior



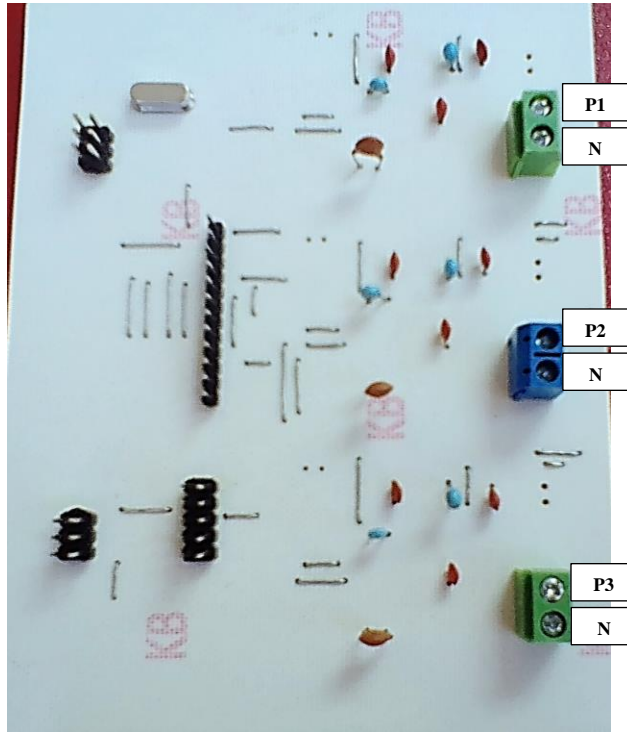
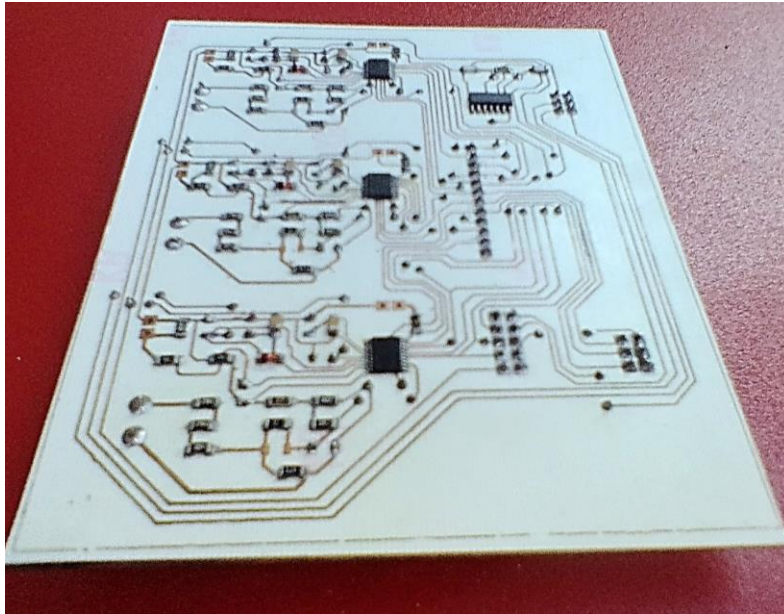
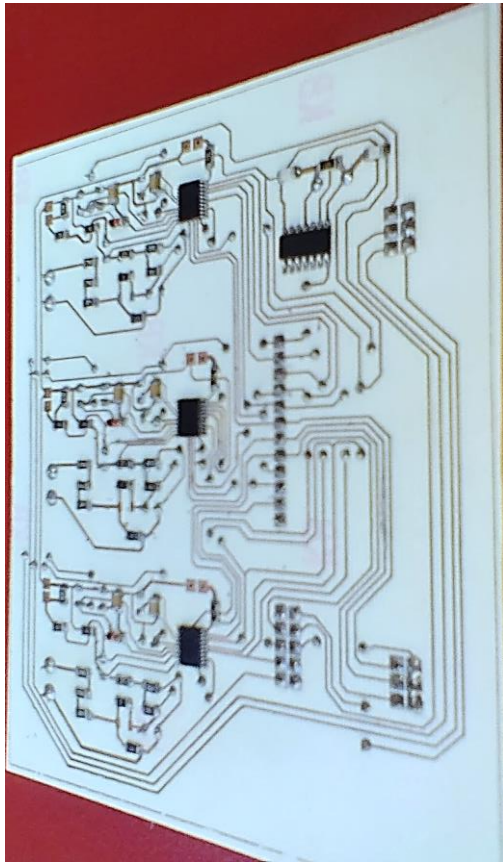


Ilustración 11.2 Vista inferior





4.5 Diagrama de conexión del sistema

La lectura de información se hace mediante la comunicación SPI descrita anteriormente, a continuación se muestra la tarjeta diseñada, con la conexión adecuada.

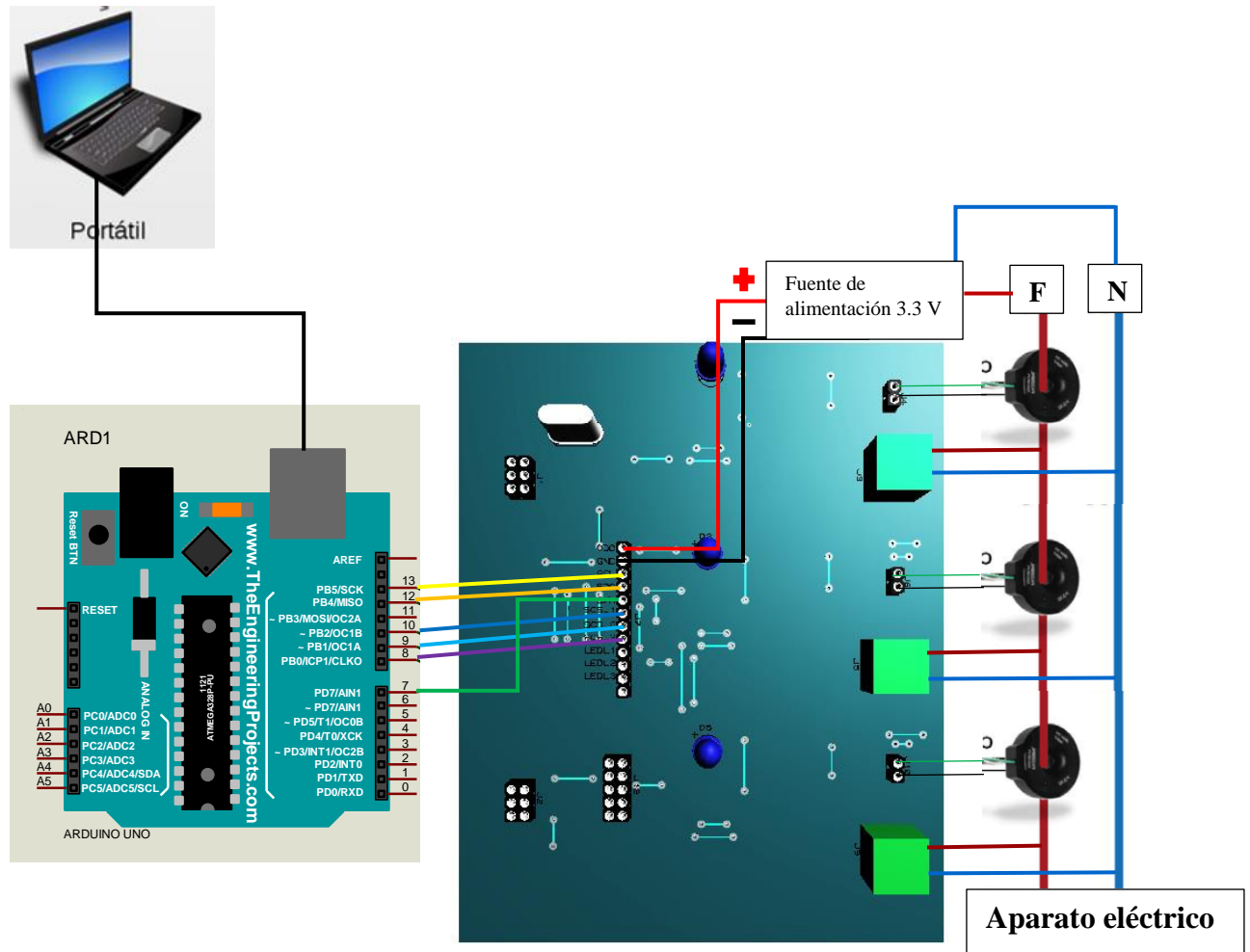


Ilustración 12.1 Diagrama de conexión del sistema

4.6 Programación del sistema

Se muestran en las siguientes imágenes la programación en el IDE de Arduino, utilizado en el proyecto.



```
RESI
#include <SPI.h> //se incluye la libreria SPI

const int SSuno = 10; //Se determinan los pines para cada esclavo
const int SSdos = 9;
const int SStres = 8;

float Puno=0; //se definen las variables que contendran la informacion segun cada fase
float Suno=0;
float Quno=0;

float Pdos=0;
float Sdos=0;
float Qdos=0;

float Ptres=0;
float Stres=0;
float Qtres=0;

float Iuno=0;
float Vuno=0;

float Idos=0;
float Vdos=0;

float Itres=0;
float Vtres=0;
int SYN = 7;

void setup() {
  Serial.begin(9600); // se inicia el puerto serial
  SPI.begin(); //se inicia la comunicacion SPI
  pinMode(SSuno,OUTPUT); //se definen los SS
  pinMode(SSdos,OUTPUT);
  pinMode(SStres,OUTPUT);
  pinMode(SYN,OUTPUT);
  SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV4); //se define la velocidad de comunicacion
  digitalWrite(SSuno,HIGH); //todos los esclavos en modo HIGH (inactivos)
  digitalWrite(SSdos,HIGH);
  digitalWrite(SStres,HIGH);
}

void loop() {
  //Lectura para la primera fase
  digitalWrite(SSuno,LOW);
  Puno = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Quno = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Suno = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Vuno = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Iuno = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  //Lectura para la segunda fase
  digitalWrite(SSuno,HIGH);
  digitalWrite(SSdos,LOW);
  Pdos = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Qdos = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Sdos = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Vdos = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Idos = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  //Lectura para la tercera fase
  digitalWrite(SSdos,HIGH);
  digitalWrite(SStres,LOW);
  Ptres = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Qtres = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Stres = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Vtres = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  Itres = SPI.transfer(0x00);
  delay(10);
  digitalWrite(SStres,HIGH);

  /*Si el valor de voltaje y corriente en alguna fase
  es mayor a cero se imprimen los resultados segun sea el caso, si no el programa
  se inicia nuevamente leyendo cada fase*/

  if (Vuno && Iuno > 0)
  {
    Serial.println("V= I=");
    Serial.println(Vuno);
    Serial.println(Iuno);
    Serial.println("P= Q= S=");
  }
}
```

```

Serial.println(Puno);
Serial.println(Quno);
Serial.println(Suno);
delay(100);
}

if (Vdos && Idos > 0)
{
Serial.println("V=      I=");
Serial.println(Vdos);
Serial.println(Idos);
Serial.println("P=      Q=      S=");
Serial.println(Pdos);
Serial.println(Qdos);
Serial.println(Sdos);
delay(100);
}

if (Vdos && Idos > 0)
{
Serial.println("V=      I=");
Serial.println(Vdos);
Serial.println(Idos);
Serial.println("P=      Q=      S=");
Serial.println("V=      I=");
Serial.println(Vdos);
Serial.println(Idos);
Serial.println("P=      Q=      S=");
Serial.println(Pdos);
Serial.println(Qdos);
Serial.println(Sdos);
delay(100);
}

if (Vtres && Itres > 0)
{
Serial.println("V=      I=");
Serial.println(Vtres);
Serial.println(Itres);
Serial.println("P=      Q=      S=");
Serial.println(Ptres);
Serial.println(Qtres);
Serial.println(Stres);
delay(100);
}
}
}

```

Compilado

Ilustración 13.1 Programación del sistema

CAPITULO IV

5. Resultados

El diseño de la tarjeta es exclusivo para este proyecto, y fue realizado en base a las características de los dispositivos electrónicos de medición utilizados.

De esta forma se alcanzaron los objetivos deseados y se realizaron pruebas de funcionamiento primeramente realizando el conexionado mostrado en la *ilustración 12.1* y se puede observar físicamente en la siguiente imagen.

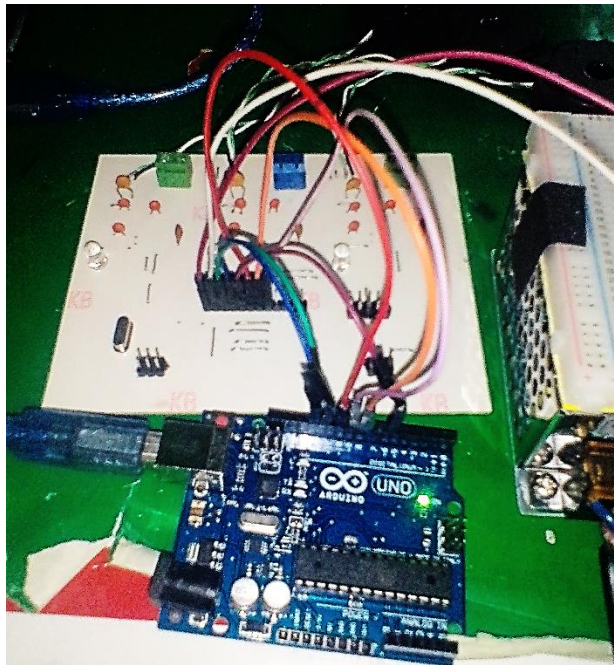


Ilustración 14.1 Conexión física Arduino - Sistema

Se conecta también la fuente para la tarjeta, en este caso una fuente de 12V reducida a 3.3 V que es el voltaje con el que trabajan los integrados y para el Arduino es este caso el voltaje de alimentación viene directamente de la PC (5v).

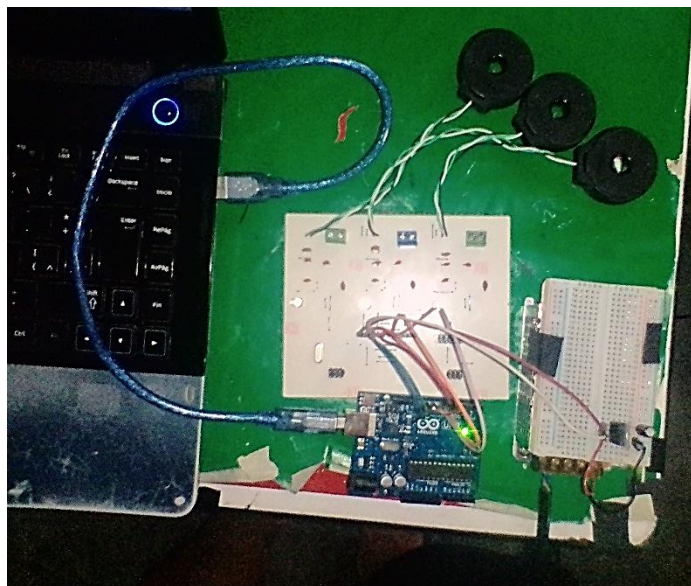


Ilustración 14.2 Conexión física Arduino – Sistema - Alimentación

Para obtener las lecturas es necesario abrir la interfaz de Arduino y conectar a la entrada de la tarjeta que se diseñó el aparato que en este caso se desea monitorear.

Para cuestiones de pruebas y establecer así las conclusiones, se analizara el consumo de una plancha que es de tipo monofásica y es uno de los aparatos que más energía consume dentro del uso doméstico, por lo tanto solo se utiliza una de las entradas de nuestra tarjeta como se muestra en la imagen siguiente:

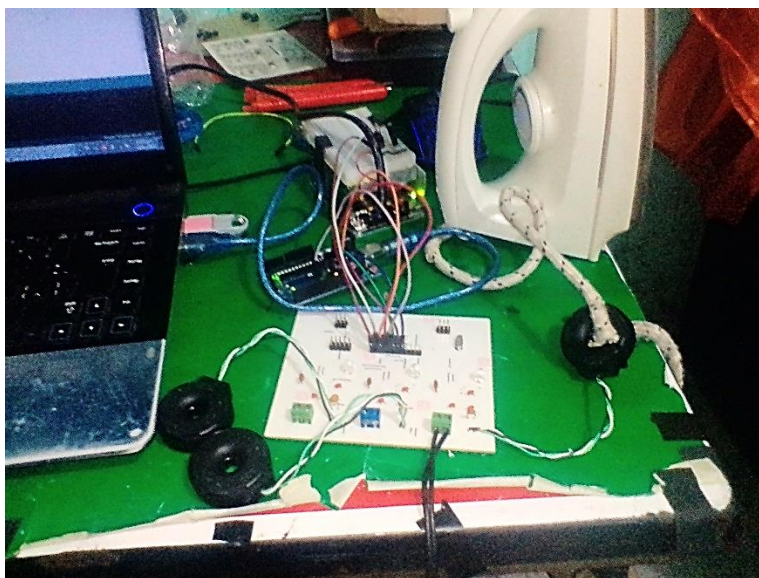


Ilustración 14.3 Pruebas físicas

Podemos observar también el indicador led parpadeante como indicador

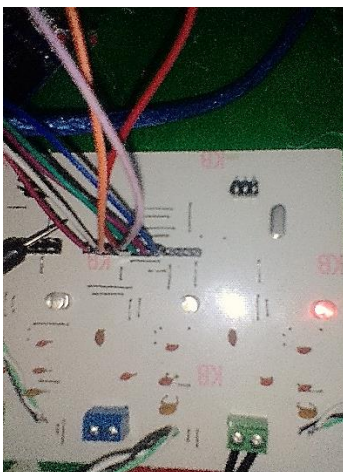


Ilustración 14.4 Indicador

Ahora nos dirigimos a la interfaz de arduino donde se muestran los valores leídos:

```
COM11 (Arduino/Genuino Uno)
V= 119.8Vac      I=8.5A
P = 1018.30 W   Q = 0.00 VAR   S = 1018.35 VA
V= 119.8Vac      I=8.5A
P = 1018.30 W   Q = 0.00 VAR   S = 1018.35 VA
V= 119.8Vac      I=8.5A
P = 1018.30 W   Q = 0.00 VAR   S = 1018.35 VA
V= 119.9Vac      I=8.5A
P = 1019.15 W   Q = 0.00 VAR   S = 1019.13 VA
V= 119.9Vac      I=8.5A
P = 1019.15 W   Q = 0.00 VAR   S = 1019.13 VA
V= 119.9Vac      I=8.5A
P = 1019.15 W   Q = 0.00 VAR   S = 1019.13 VA
V= 119.9Vac      I=8.5A
P = 1019.15 W   Q = 0.00 VAR   S = 1019.13 VA
V= 119.9Vac      I=8.5A
```

Ilustración 14.5 Valores obtenidos

La imagen anterior muestra las lecturas realizadas en la plancha, como se puede observar, no existe potencia reactiva debido a que la carga es puramente resistiva y por lo tanto toda la energía se transforma en calor.

En la siguiente imagen se muestra la medición del voltaje que se le suministra a la plancha:



Ilustración 14.6 Voltaje suministrado (119.7 Vac)

Y si nos fijamos en la etiqueta de la plancha podemos determinar la corriente suministrada:



Ilustración 14.7 Características del aparato eléctrico

Sabiendo que:

$$P = VI$$

Entonces:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1000}{120} = 8.333 \text{ A}$$

Lo cual concuerda con la medición hecha con arduino y la tarjeta diseñada.

6. Conclusiones

Hoy en día es más fácil diseñar sistemas de monitoreo con mayor exactitud a un bajo costo, tal es el caso de este proyecto que con apoyo de la tecnología SMD y Arduino se logró desarrollar un prototipo funcional con información importante sobre el consumo eléctrico de los aparatos con la finalidad de que se puedan analizar y posteriormente tomar decisiones en la que el usuario pueda de manera sencilla manipular que aparatos eléctricos encender o apagar ya sea para uso doméstico o industrial.

Surgieron muchas limitantes durante el desarrollo de este sistema, como lo son, el proceso de fabricación del PCB, porque debido a que las líneas de conducción son muy delgadas, no se pudo hacer uso de la maquina CNC que existe dentro del laboratorio de electrónica de esta institución. Se ocupó el método tradicional de “planchado” para resolver este conflicto.

Otra de las limitantes que surgieron de trabajar con tecnología SMD fue que no se pudieron hacer simulaciones como comúnmente se hacen con protoboard, y tampoco se pudo hacer uso de ningún software para simulación lo que llevo a tener especial cuidado a la hora de diseñar y programar el sistema.

Una de las ventajas que proporciona la tecnología Arduino es que se pueden realizar diferentes tipos de protocolos de comunicación de manera sencilla, como los son I2C, UART, SPI entre otros.

En este caso la comunicación SPI que es con la que funciona la lectura del integrado STMP01 se facilitó mucho con el uso de Arduino.

Existen muchas formas de mejorar aun este sistema, pero se concluye que con lo desarrollado en este proyecto se pude trabajar de manera eficiente para futuras mejoras.

7. Bibliografía

- Alexander, M. N.-C. (2006). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*. Mexico, D.F: Mc Graw Hill.
- Boylestad, R. L. (2011). *Introducción al Análisis de Circuitos*. Estado de México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Diego Ortiz Villalba, O. R. (s.f.). Diseño e Implementación de un Sistema de Monitoreo Energético en el Campus Rodríguez Lara . Latacunga, Ecuador .
- Electronics, P. (2017). Current Sensor .
- Pérez, I. E. (s.f.). Ingeniería en microcontroladores - Protocolo SPI. Distrito Federal , México .
- Plata, U. N. (2017). Instrumentación Avanzada .
- Rocha, B. D. (09 de Junio de 2016). Monitoreo del consumo de la energía eléctrica por medio de una aplicacion Android. Distrito Federal, Mexico .
- Semiconductors, V. (14 de Julio de 2017). Small Signal Fast Switching Diodes.
- STMicroelectronic´s. (31 de Enero de 2006). Fast digital calibration procedure for STPM01 based energy meters.
- STMicroelectronic´s. (14 de Abril de 2006). STPM01 Programmable, Single-Phase Energy Metering IC External Circuits .
- STMicroelectronic´s. (17 de Abril de 2007). Three-phase meter based STPM01, VIPer12A.
- STMicroelectronic´s. (05 de Noviembre de 2010). Current sensing in metering applications using a pulse current sensor and ST metering devices .
- STMicroelectronic´s. (26 de Julio de 2010). SPI protocol for STPM01/STPM10 metering devices .
- STMicroelectronic´s. (09 de Junio de 2011). Programmable single phase energy metering IC with tamper detection .
- STMicroelectronic´s. (27 de Agosto de 2013). The STPM01 and STPM1x evaluation software.