

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

**SISTEMA DE MONITOREO DE CONSUMO
ELÉCTRICO PARA ACTIVIDADES RESIDENCIALES
BASADO EN MICROCONTROLADOR**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA:

ANGEL PADILLA SALAZAR

DIRECTOR: DR. JUAN MARIO PEÑA CABRERA

Dedicado a *Juan Carlos Salazar Castellón*

Doy gracias por haberte conocido y porque siempre estarás a mi lado.

Nunca te olvidaré.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, porque orgullosamente forma parte de todo lo que soy y hago y porque a través de su Facultad de Ingeniería aprendí lo que es la disciplina, el trabajo y la indescriptible satisfacción que brinda cumplir con lo que sueñas.

Al Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales y Automatización, sección Electrónica y Automatización del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, por proporcionarme los medios para realizar este proyecto.

Al Doctor Juan Mario Peña Cabrera por la asesoría, apoyo, consejos y amistad que me ha brindado desde el momento en que lo conocí.

Al Ingeniero Ricardo Federico Villarreal Martínez por darme la oportunidad de ingresar al IIMAS y que, a través de su amistad, me hiciera considerarlo parte de mi familia.

A todo el equipo de la Secretaría Técnica del IIMAS, Rita Rodríguez Martínez, Mauricio Fuentes Peñaloza, Apolinar Calderón Segura y Álvaro Saldaña Nava, por toda la ayuda que me brindaron y por hacerme sentir que realmente pertenezco a su grupo.

A todos los profesores de la facultad, por haberme compartido sus conocimientos y experiencias.

A mi madre, Georgina Salazar Castellón

Porque aprendí que en ti tengo al amor en persona y porque además me honra el poder decirte Mamá. Gracias por todo el apoyo para lograr esta meta.

A mi padre, Ismael Padilla Ramírez

Por darme tanto sin pedir nada a cambio y aprender de ti que los errores siempre se pueden corregir. Gracias por todo.

A mi hermana Yessica

Por lo bien que nos llevamos y por los geniales y entrañables momentos que hemos pasado juntos. Por traer al mundo a esos dos hermosos angelitos.

A Catilina González Rendón

Porque me enseñaste que anduve por la vida sin saber que estaba incompleto.

Porque no hay día en que, el sólo mirarte, me arranque una sonrisa.

Porque compartes tu vida conmigo. Gracias por darme tanto, te amo.

A mi Abuelito Enrique

Por ser un personaje digno de admiración, cariño y respeto.

A mi Abuelita Beatriz

y a mis tíos Enrique, Ricardo, Beatriz, Sergio, Gustavo y Rodrigo

Por todos los instantes, apoyos y enseñanzas que siempre me han dado; pero sobre todo, por las incontables risas que hacen de ésta, una familia sin igual.

A Oscar Granados García

Por enseñarme que la vida te regala a personas únicas, que debemos cuidar por siempre.

A mis amigos

Por todos los geniales momentos que pasamos juntos, que me han hecho sentir la persona más afortunada del mundo.

Por esos tiempos en “ejidal” y esas tardes sabor durazno en “la línea” que me dieron incalculables carcajadas e historias para contar.

Y por último, a todas las personas que alguna vez cruzaron su camino con el mío y dejaron huella.

Índice

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| • Objetivo general | 1 |
| • Contenido | 2 |
| | |
| CAPÍTULO 1, PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 4 |
| 1.1. Objetivo específico | 4 |
| 1.2. Planteamiento del problema | 5 |
| 1.3. Alcances | 5 |
| 1.4. Análisis del problema | 6 |
| 1.5. Propuesta de solución | 7 |
| | |
| CAPÍTULO 2, ANTECEDENTES | 10 |
| 2.1. Voltajes y Corrientes alternos | 10 |
| 2.1.1. Formas de onda | 10 |
| 2.1.2. Valores instantáneos | 11 |
| 2.1.3. Ecuación de la señal senoidal | 12 |
| 2.1.4. Circuitos a. c. | 14 |
| 2.1.5. Medición de Voltaje y Corriente | 15 |
| 2.2. Potencia eléctrica | 15 |
| 2.2.1. Potencia promedio o real | 16 |
| 2.2.2. Factor de potencia | 18 |
| 2.2.3. Potencia aparente | 18 |
| 2.2.4. Potencia reactiva | 19 |
| 2.2.5. Triángulo de potencias | 20 |
| 2.2.6. Medición de potencia | 22 |

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| 2.3. | Energía eléctrica | 23 |
| 2.3.1. | Medición de la energía eléctrica | 23 |
| 2.3.1.1. | Medidores electromecánicos | 24 |
| 2.3.1.2. | Medidores electrónicos | 25 |
| 2.3.2. | Monitores de energía en aparatos eléctricos/electrónicos | 26 |
| 2.3.3. | Medidores residenciales de energía | 26 |
| 2.3.3.1. | Google PowerMeter | 27 |
| 2.3.4. | Comisión Federal de Electricidad | 27 |
| 2.3.4.1. | Tarifas | 27 |
| 2.3.4.2. | Lectura del medidor | 29 |
| 2.4. | Productos en el mercado | 29 |
| 2.4.1. | TED, The Energy Detective | 30 |
| 2.4.2. | WATTSON | 30 |
| 2.4.3. | ONZO | 31 |
| 2.4.4. | KILL A WATT | 32 |
| 2.4.5. | EM100 ENERGY SAVER SERIES POWER MONITOR | 32 |
| 2.5. | Herramientas de software para desarrollo | 33 |
| 2.5.1. | National Instruments LabVIEW | 33 |
| 2.5.2. | National Instruments Multisim | 34 |
| 2.5.3. | National Instruments Ultiboard | 34 |
| 2.5.4. | Microchip MPLAB Integrated Development Environment | 34 |
| 2.6. | Herramientas de hardware para desarrollo | 34 |
| 2.6.1. | MICROCHIP PICKit 2 | 35 |
| 2.6.2. | Transformador de voltaje | 35 |
| 2.6.3. | Transformador de corriente alterna Fluke Y8101 | 36 |
| 2.6.4. | MICROCHIP Controlador Digital de Señales de 16 bits de Alto Rendimiento dsPIC33FJ128GP802 | 38 |
| 2.6.4.1. | Descripción | 38 |
| 2.6.4.2. | Direct Memory Access, DMA | 38 |
| 2.6.4.3. | Módulos | 39 |
| 2.6.5. | MICROCHIP 512K I2C CMOS Serial EEPROM 24LC512 | 40 |
| 2.6.6. | LINX Technologies Módulo USB SDM-USB-QS-S | 40 |
| 2.6.7. | Computadora Personal | 41 |
| CAPÍTULO 3, | DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN | 44 |
| 3.1. | Descripción general | 44 |
| 3.2. | Alimentación | 47 |

| | | |
|--|--|------------|
| 3.3. | Sensado y acondicionamiento de señales | 48 |
| | 3.3.1. Medición de la señal de voltaje | 49 |
| | 3.3.2. Medición de la señal de corriente | 52 |
| 3.4. | Microcontrolador | 54 |
| | 3.4.1. Diseño y construcción | 54 |
| | 3.4.1.1. Requerimientos básicos de conexión | 54 |
| | 3.4.1.2. Almacenamiento | 56 |
| | 3.4.1.3. Comunicación USB | 57 |
| | 3.4.2. Funcionamiento | 59 |
| | 3.4.2.1. Conversión analógica-digital | 59 |
| | 3.4.2.2. Protocolo de comunicación I2C | 60 |
| | 3.4.3. Programa | 63 |
| | 3.4.3.1. Rutina principal | 63 |
| | 3.4.3.2. Modo monitor | 64 |
| | 3.4.3.3. Modo de transmisión a PC | 66 |
| 3.5. | PC | 67 |
| | 3.5.1. Programa | 68 |
| | 3.5.1.1. Instalación | 68 |
| | 3.5.1.2. Rutina principal | 73 |
| | 3.5.1.3. Modo de recuperación de datos almacenados y facturación | 77 |
| | 3.5.1.4. Modo en Tiempo-real | 83 |
| 3.6. | Ajuste del sistema | 86 |
| 3.7. | Manejo del sistema | 88 |
| | 3.7.1. Configuración de medidor de consumo eléctrico residencial | 88 |
| | 3.7.2. Configuración de monitor de energía en | 91 |
| | aparatos eléctricos/electrónicos | |
| CAPÍTULO 4, RESULTADOS EXPERIMENTALES | | 94 |
| 4.1. | Evaluaciones experimentales | 94 |
| | 4.1.1 Reajuste | 99 |
| CAPÍTULO 5, CONCLUSIONES | | 105 |
| CAPÍTULO 6, TRABAJO FUTURO | | 108 |

| | |
|---|------------|
| BIBLIOGRAFÍA | 111 |
| APÉNDICES | 116 |
| A. Conexión y carga de un programa en el Microcontrolador dsPIC33FJ128GP802 utilizando el programador PICKit 2 | 116 |
| B. Diagrama eléctrico del sistema | 119 |

Introducción

Objetivo general

A través de los años, los consumidores de energía eléctrica doméstica a lo largo del país, se han encontrado imposibilitados para cotejar su recibo de cobro mensual con respecto a su consumo real, dando pie a una incertidumbre que es imposible de superar por la falta de algún tipo de aparato o sistema que sea capaz de confirmar de manera práctica y confiable la cantidad real de dicho consumo y por lo tanto corroborar el precio que debe pagar.

El hecho de que cualquier persona pueda encontrarse en la situación descrita anteriormente, motivó la decisión de implementar en el presente trabajo de tesis un prototipo de sistema de monitoreo de consumo eléctrico doméstico que fuera capaz de obtener de forma robusta no invasiva, los datos necesarios para calcular el precio a pagar por el consumo real de energía eléctrica. Aunado a esto y más allá de solamente calcular el gasto de luz como lo haría cualquier medidor como los colocados en cualquier casa habitación, el proyecto busca sentar las bases de un sistema de monitoreo más complejo y con capacidades de comunicación, dándole al usuario el modo de interactuar en tiempo-real con las señales monitoreadas.

Contenido

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los capítulos que conforman la tesis.

En el capítulo 1, se establece el objetivo específico del proyecto, la definición formal y análisis del problema así como la propuesta de solución seleccionada.

En el capítulo 2, se abarcan los antecedentes necesarios para un mejor entendimiento del sistema como los conceptos teóricos, los prácticos y los instrumentos técnicos (hardware y software) utilizados.

En el capítulo 3, se describe el desarrollo e implementación del sistema. Incluyendo una descripción detallada de la electrónica y los algoritmos desarrollados e implementados en una computadora personal, PC.

En el capítulo 4, se describen los resultados y la evaluación del sistema para obtener su calidad de funcionamiento.

En el capítulo 5, se muestran las conclusiones del trabajo y en referencia con el objetivo del proyecto.

En el capítulo 6, se presenta el trabajo futuro y algunas sugerencias para mejorar u optimizar el sistema a mediano o largo plazo para poder alcanzar un producto potencialmente comercializable.

Aunado a los capítulos anteriores, se provee una lista que contiene todos los recursos bibliográficos utilizados durante el proyecto, incluyendo los recursos electrónicos.

Finalmente, se tiene una sección de apéndices en los que se anexa información necesaria para comprender detalles técnicos del sistema.

Capítulo 1

Planteamiento del Problema

En este primer capítulo se establece el objetivo específico del proyecto, la definición formal y análisis del problema y finalmente la propuesta de solución que consideramos mejor se adecuó a resolver los puntos anteriores.

1.1 Objetivo específico

Para proponer la solución del problema, es necesario definir claramente el objetivo, el cual se presenta a continuación:

“Diseñar y construir un prototipo de sistema de monitoreo del tipo *“standalone”* para el consumo de energía eléctrica en las casas habitación, que cuente con los sensores adecuados para obtener una medición confiable y robusta no invasiva, así como con una interface gráfica interactiva implementada en una computadora personal ó PC, para el acceso y adquisición de datos almacenados y el manejo y monitoreo en tiempo real, por parte del usuario, de las señales de voltaje y corriente sensadas. La parte de adquisición para la medición y comunicación para la obtención de la información en la PC, está basada en un Microcontrolador”.

1.2 Planteamiento del problema

La falta de personal calificado y de procedimientos y sistemas de medición confiables, así como los recientes cambios en las empresas que suministran energía eléctrica doméstica, han generado una incertidumbre en la credibilidad de los cobros y consumos de energía eléctrica en las casas habitación de la Ciudad de México y el centro del país, el consumidor está imposibilitado para corroborar su consumo de manera real y confiable; y por lo tanto a merced de la lectura de consumo que el proveedor le presenta.

Contar con un sistema que pueda ser implementado de manera práctica y factible en las casas habitación y basado en una computadora y un Microcontrolador, proporciona a los usuarios certidumbre y credibilidad en la adquisición y medición del consumo de esta energía.

En el Departamento de Electrónica y Automatización del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS) de la UNAM, se investigan y desarrollan tecnologías en las áreas de electrónica y computación para la solución de problemas reales. Con esto en mente, surgió la inquietud de diseñar e implementar un sistema de aplicación práctica y de fácil manejo para el usuario no experimentado, para que solamente con algo tan común en estos días como lo es una PC, pueda medir él mismo su consumo de energía eléctrica en la comodidad de su hogar. Sin embargo, también se pensó en la utilización del sistema para aplicaciones de monitoreo más complejas en tiempo real para usuarios más experimentados que fácilmente podrían escalar el sistema base para adecuarlo a sus propósitos, ya sean académicos o de investigación y explotar todo el potencial que representa el uso de un Controlador Digital de Señales como el utilizado en el desarrollo.

1.3 Alcances

Una vez definido el problema, es necesario establecer los alcances del proyecto para cumplir con los tiempos de desarrollo y conocimientos necesarios para un trabajo de esta naturaleza con oportunidades abiertas para trabajos futuros. Las siguientes especificaciones y limitaciones se tomaron en cuenta para el desarrollo.

- El sistema deberá poder, tanto imitar un medidor convencional de consumo eléctrico, como imitar un amperímetro y voltímetro digitales.
- El sistema deberá alimentarse de la línea (acometida) para evitar el uso de baterías.
- El sistema será capaz de obtener las señales de Voltaje, Corriente y Ángulo de desfase entre ellas.
- El sensado de las señales deberá ser lo menos invasivo posible.
- La forma de onda de las señales, se tomará como senoidal pura.
- Para todos los cálculos, la frecuencia de las señales se tomará como 60 Hz.

- El sistema podrá almacenar los datos de: promedios por hora de voltaje, corriente y ángulo de desfase así como también la fecha y hora del momento de almacenado.
- El sistema deberá poder comunicarse con una PC.
- La interface para la operación del sistema por el usuario deberá ser interactiva.
- El usuario podrá observar las gráficas en tiempo real de Voltaje, Corriente y Potencia, así como sus valores instantáneos.
- El sistema NO tomará en cuenta el Factor de Potencia en tiempo real pero SÍ lo hará en modo de consumo eléctrico.
- El usuario podrá consultar el consumo total tanto en kilowatts-hora como en moneda nacional, así como un desglose de su consumo diario.
- Para el cálculo en moneda del consumo total, se utilizará la tarifa 1 que utiliza la Comisión Federal de Electricidad¹ en el Distrito Federal.

1.4 Análisis del problema

Una vez definidos el objetivo específico y sus alcances y limitaciones, se procede a analizar el problema que conduzca a una propuesta de solución factible. Para esto se definieron las partes en que se divide el sistema, para resolver y desarrollar cada una de las etapas siguientes.

Etapas de sensado

Es la encargada de adquirir las señales necesarias para el cálculo del consumo eléctrico (voltaje y corriente), tomando en cuenta que el método utilizado debe ser lo mínimo invasivo posible.

Etapas de acondicionamiento

Se encarga de adecuar la amplitud de las señales para su consiguiente procesamiento.

Etapas de control y procesamiento de datos

En esta etapa se procesan los datos de información y control para ser utilizados de acuerdo a las necesidades.

Etapas de almacenamiento

Almacena los datos con una estructura determinada para que se encuentren disponibles en el momento en que se requiera accederlos.

¹ Véase Capítulo 2, Antecedentes, punto 2.3.4.1, Tarifas.

Etapa de comunicación

Se encarga de la comunicación entre la unidad de procesamiento de datos y la unidad de despliegue.

Etapa de despliegue

Esta etapa se encarga de desplegar todos los datos recolectados, ya sea los que se encuentran almacenados o los que se adquieren en tiempo real.

1.5 Propuesta de solución

Una vez definidas las partes y etapas del sistema, se prosigue a precisar los criterios de selección de todos los componentes que las integran.

- a) *Selección de sensores:* para el sensado del voltaje, se decidió utilizar un transformador de voltaje por ser la forma más fácil de tomar la señal muestra en línea así como por su fácil adquisición y precio. Por otro lado, para la corriente se utilizó un transformador de corriente que se adquirió por las mismas razones que el transformador de voltaje.
- b) *Selección de componentes para el acondicionamiento de señales:* debido a su bajo grado de complejidad, para esta tarea se utilizaron componentes electrónicos básicos como resistencias, diodos, capacitores y amplificadores operacionales, estos últimos en un solo circuito integrado TL084CN, que contiene los cuatro amplificadores que se necesitan para la implementación.
- c) *Selección de Microcontrolador:* el Microcontrolador seleccionado fue el Controlador Digital de Señales dsPIC33FJ128GP802 debido a su gran versatilidad y al interés que el autor de este trabajo tenía por introducirse al mundo de este tipo de componentes.
- d) *Selección del dispositivo de almacenamiento:* para esta tarea se escogió una memoria reprogramable EEPROM 24LC512 que es perfectamente compatible con el Microcontrolador seleccionado. En cuanto a la capacidad, se escogió una memoria de 512 kbytes, la cual resulta capaz de almacenar más de 3 meses de datos de consumo eléctrico.
- e) *Selección de comunicación Microcontrolador-PC:* para esta labor, se eligió el protocolo USB por ser uno de los más utilizados por las computadoras personales actuales, para esto, se implementó el módulo externo SDM-USB-QS-S que se encarga de acondicionar la comunicación serial del Microcontrolador debido a que el dsPIC no cuenta con uno propio.

- f) *Selección de despliegue*: en este caso se eligió utilizar un lenguaje de programación gráfico como LabVIEW por ofrecer una capacidad de generar pantallas de una calidad gráfica excelente, así como por su sencillez de programación.

Capítulo 2

Antecedentes

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos y prácticos necesarios para el entendimiento del sistema; además de un breve resumen de los productos que existen actualmente en el mercado, similares al desarrollado en este proyecto. Y por último, se entrega una descripción de las herramientas de *software* y *hardware* con las que se implementó el sistema.

2.1 Voltajes y corrientes alternos ^[A], ^[B]

La electricidad es producida en centrales generadoras termoeléctricas, hidroeléctricas o basadas en alguna otra fuente alternativa y distribuida por una vasta red de líneas de transmisión para su uso industrial o residencial. Es sabido que resulta más sencillo, barato y conveniente generar corrientes alternas (a.c.) que corrientes directas (d.c.)¹ ya que es más conveniente distribuir su voltaje con el uso de transformadores.

2.1.1 Formas de onda

Las formas de onda cuyos valores cambian continuamente de dirección (alternadamente positivos y negativos), son llamadas formas de onda *alternas*. Una gráfica de este tipo es la mostrada en la Figura 2.1, la cual es conocida como *onda senoidal* y es la representación de la forma de onda de las FEM producidas por un alternador, y por lo tanto, del suministro eléctrico.

¹ La Corriente Directa (CD) ó Corriente Continua (CC) es aquella cuyas cargas eléctricas o electrones fluyen siempre en el mismo sentido en un circuito eléctrico cerrado.

2.1.3 Ecuación de la señal senoidal

A un vector que gira en sentido anti-horario a una velocidad angular $\omega \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right]$, se le conoce como *fasor*, el cual, es utilizado para construir una señal senoidal como se expone en la Figura 2.2.

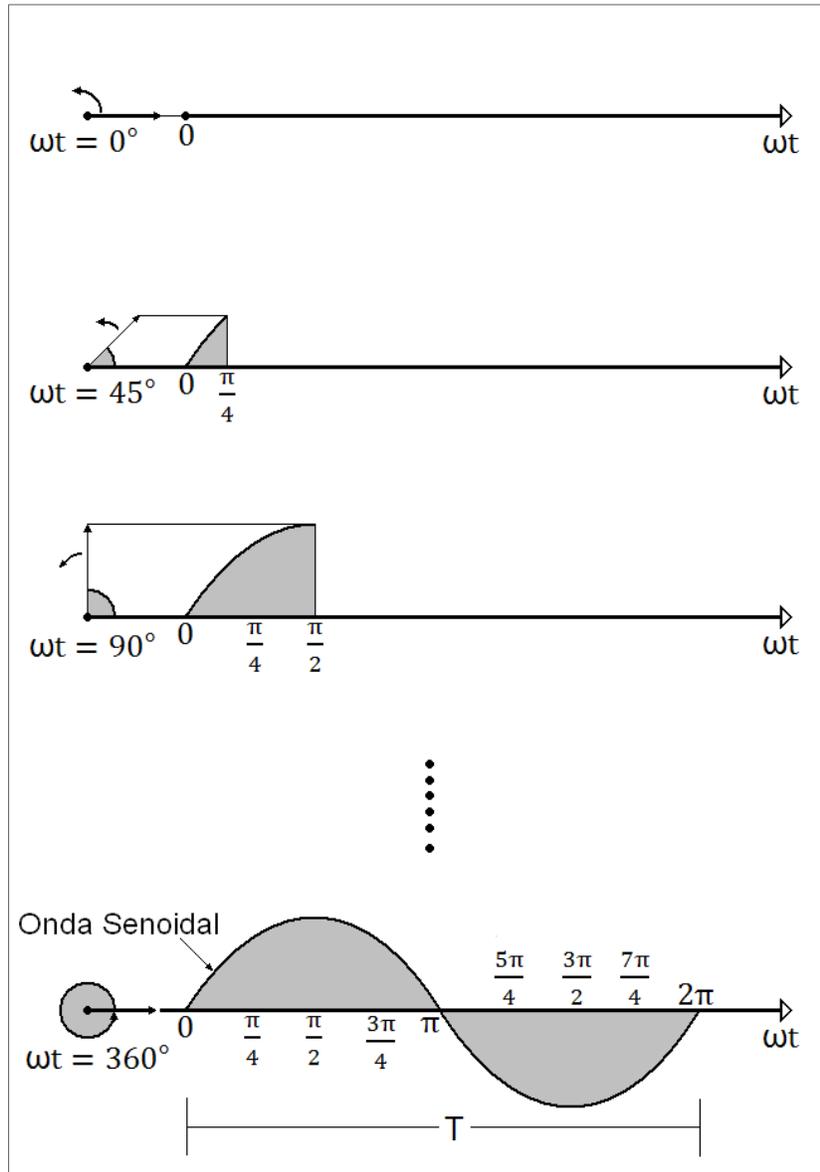


Figura 2.2 Generación de una onda senoidal mediante la proyección vertical de un fasor.

De lo anterior podemos concluir que toda magnitud que varía senoidalmente, puede ser representada como un fasor; de aquí que una de las formas más comunes de representar al voltaje y a la corriente alternas es mediante *fasores*.

Una señal senoidal puede no comenzar en 0° , para mostrar esto, en la Figura 2.3a se muestran dos funciones periódicas representadas por $y_1 = \sin(\omega t)$ y $y_2 = \sin(\omega t + \phi)$, donde y_2 comienza ϕ radianes antes que y_1 o más comúnmente dicho: y_2 adelanta a y_1 en ϕ radianes. Los fasores y_1 y y_2 se muestran en la Figura 2.3b en el tiempo $t = 0$.

Para el caso opuesto en el que $y_2 = \sin(\omega t - \phi)$, se dice que y_2 atrasa a y_1 en ϕ radianes.

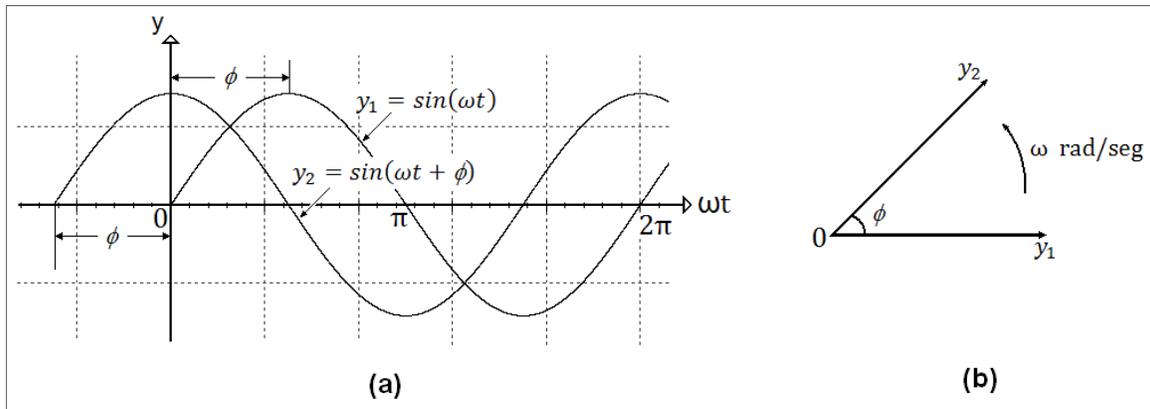


Figura 2.3 Señales senoidales. (a) y_2 adelanta a y_1 ϕ radianes. (b) Fasores.

Con todos los conceptos anteriores, ahora es posible establecer la ecuación senoidal general del voltaje:

$$v = V_m \sin(\omega t \pm \phi_v) \quad (2.3)$$

Donde,

- Amplitud o valor pico V_m
- Valor pico-pico $2V_m$
- Velocidad angular ω [rad/seg]
- Periodo $T = 2\pi/\omega$ [seg]
- Frecuencia $f = \omega/2\pi$ [Hz]; $\omega = 2\pi f$
- Ángulo de desfaseamiento ϕ (con respecto a $v = V_m \sin \omega t$)

Y la ecuación senoidal general de la corriente es:

$$i = I_m \sin(\omega t \pm \phi_i) \quad (2.4)$$

2.1.4 Circuitos a. c.

En la práctica y en la teoría, es común representar juntas las señales del voltaje y la corriente (siempre y cuando tengan la misma frecuencia), a continuación se muestran en la Figura 2.4 los circuitos con los 3 componentes eléctricos básicos:

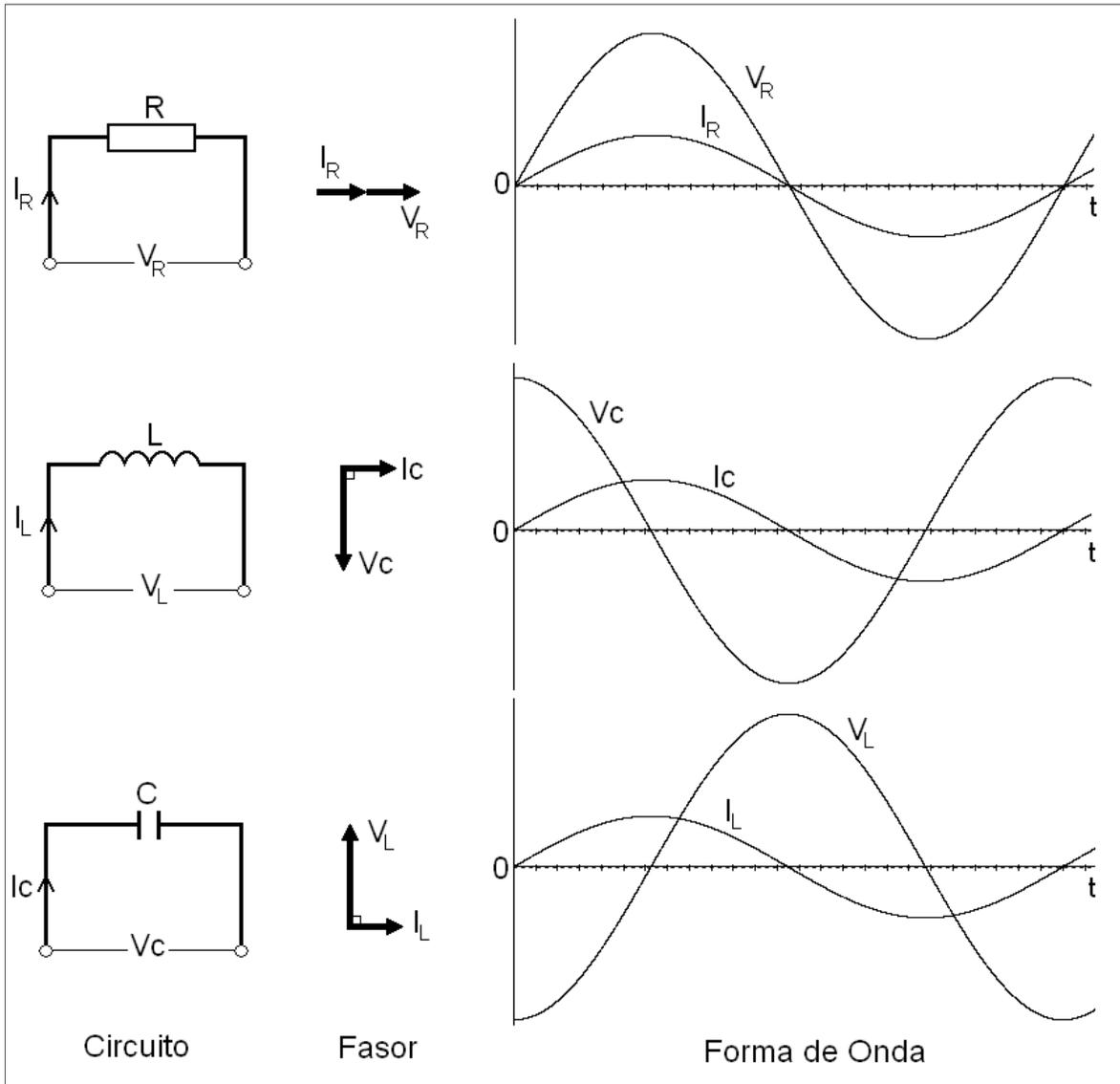


Figura 2.4 (a) Circuito puramente resistivo. (b) Circuito puramente inductivo. (c) Circuito puramente capacitivo.

Como puede observarse en la Figura 2.4a, la corriente y el voltaje están en fase ($\phi = 0^\circ$); en la Figura 2.4b, la corriente atrasa 90° al voltaje y por último, en la Figura 2.4c, la corriente adelanta 90° al voltaje.

2.1.5 Medición de Voltaje y Corriente

En la práctica, resulta importante tener la posibilidad de medir los niveles de corriente y de voltaje de un sistema eléctrico, ya sea para verificar su operación, aislar problemas de funcionamiento o investigar efectos difíciles de predecir teóricamente. Como su nombre lo indica, los amperímetros se utilizan para medir niveles de corriente, y los voltímetros para medir diferencias de potencial entre dos puntos; sin embargo, el medidor más común en el laboratorio y sobre todo en el campo, es el multímetro digital (DMM: Digital Multimeter) en el que se agrega la medición de resistencia en Ohms.

La forma de medir la diferencia de potencial entre 2 puntos es simplemente conectar cada una de las puntas del voltímetro en cada uno de dichos puntos a medir (en paralelo). Por otro lado, los amperímetros se conectan abriendo la trayectoria de corriente que será medida (en serie). Ambos tipos de mediciones se muestran en la Figura 2.5.

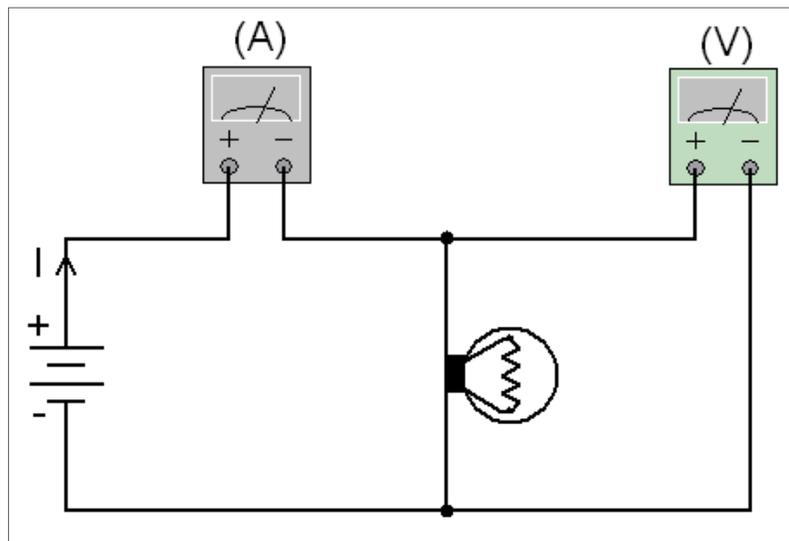


Figura 2.5 Medición de voltaje y corriente en un circuito serie simple.

2.2 Potencia eléctrica ^{[A], [B]}

Cuando una corriente de I amperes fluye por un circuito eléctrico y el voltaje a través de dicho circuito es V volts, entonces la potencia, en Watts es:

$$P = VI \quad [W] \quad (2.5)$$

2.2.1 Potencia promedio o real

En cualquier carga dentro de una red senoidal de a.c., el voltaje y la corriente a través de la carga variarán con una naturaleza senoidal. Entonces resulta necesario saber cómo varía la potencia con la carga y qué valor fijo puede asignarse a la potencia dado que ésta varía con el tiempo. Para esto, se sustituyen las ecuaciones (2.3) y (2.4) en la ecuación (2.5) y mediante el uso de la identidad trigonométrica $\sin A \sin B = \frac{\cos(A-B) - \cos(A+B)}{2}$, se obtiene la siguiente ecuación:

$$P = \left[\frac{V_m I_m}{2} \cos(\phi_v - \phi_i) \right] - \left[\frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t + \phi_v + \phi_i) \right] \quad (2.6)$$

Obsérvese que el segundo término de la ecuación es una onda cosenoidal con una frecuencia del doble que de la corriente o el voltaje. El valor promedio de este término es nulo durante un ciclo y por ende no genera transferencia neta de energía en cualquier dirección.

Sin embargo, el primer término de la ecuación posee magnitud constante (no depende del tiempo) y por lo tanto proporcionará alguna transferencia neta de energía. Este término se conoce como *potencia promedio, real o activa* y es la potencia entregada a, y disipada por, la carga. El ángulo $(\phi_v - \phi_i)$ es el ángulo de fase entre v e i y dado que $\cos(-\alpha) = \cos \alpha$, la magnitud de la potencia real no toma en cuenta si el voltaje adelanta o atrasa a la corriente.

Por otro lado, si se define $\phi = |\phi_v - \phi_i|$, indica que solamente la magnitud es importante y que el signo es irrelevante, lo que lleva a la ecuación para obtener la potencia real:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi \quad [W] \quad (2.7)$$

Si utilizamos (2.2), la ecuación anterior se convierte en:

$$P = V_{RMS} I_{RMS} \cos \phi \quad [W] \quad (2.8)$$

Ahora, aplicando las ecuaciones (2.7) y (2.8) a los elementos básicos R, L y C. En un circuito puramente resistivo donde $\phi = 0^\circ$, véase la Figura 2.6a:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} = V_{RMS} I_{RMS} \quad [W] \quad (2.9)$$

O, dado que $I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$:

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R} = I_{RMS}^2 R \quad [W] \quad (2.10)$$

En un circuito puramente inductivo donde $\phi = 90^\circ$, véase la Figura 2.6b:

$$P = 0 \text{ [W]}$$

Lo anterior quiere decir que la potencia promedio (real) o potencia disipada por el inductor ideal (sin resistencia asociada) es cero.

En un circuito puramente capacitivo donde $\phi = 90^\circ$, véase la Figura 2.6c:

$$P = 0 \text{ [W]}$$

Lo anterior quiere decir que la potencia promedio (real) o potencia disipada por el capacitor ideal (sin resistencia asociada) es cero.

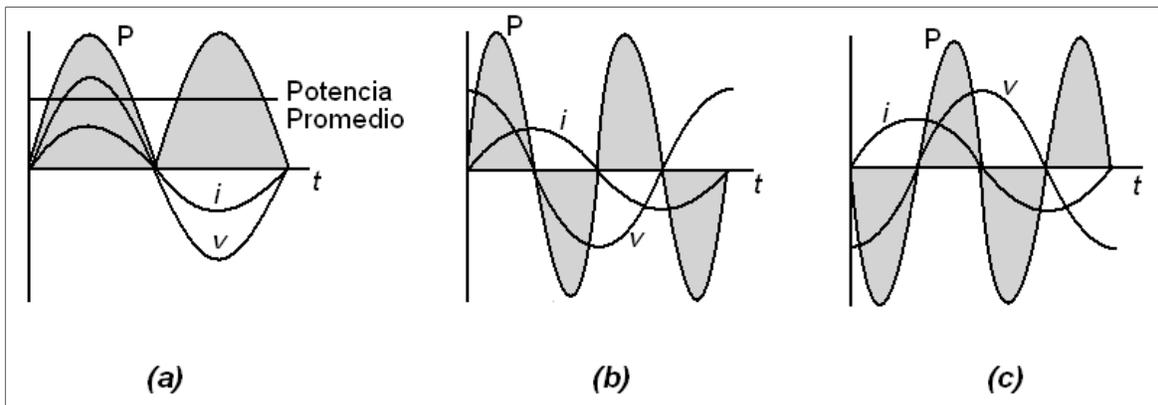


Figura 2.6 Potencia promedio. (a) Circuito puramente resistivo, potencia = VI . (b) Circuito puramente inductivo, potencia = 0. (c) Circuito puramente capacitivo, potencia = 0.

A manera de ejemplo, en la Figura 2.7 se muestran las formas de onda del voltaje y corriente para un circuito $R-L$, donde la corriente atrasa al voltaje un ángulo ϕ . La forma de onda de la potencia se muestra con la línea punteada.

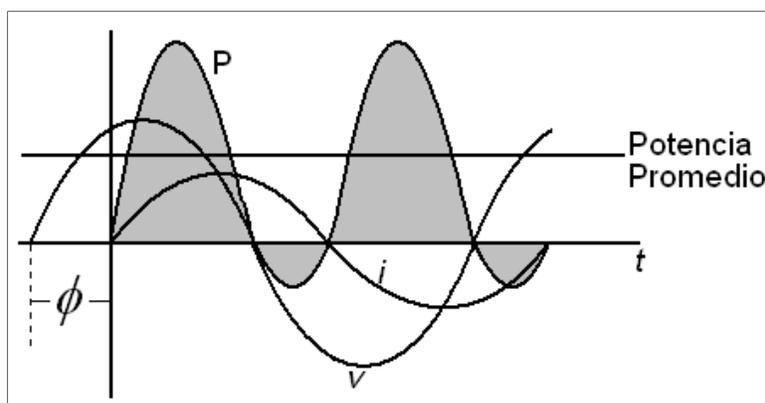


Figura 2.7 Potencia promedio en un circuito $R-L$.

2.2.2 Factor de potencia

En la ecuación (2.7), el factor que tiene un importante control sobre el nivel de potencia entregado es $\cos \phi$. Sin importar lo grande que sea la corriente o el voltaje, cuando $\cos \phi = 0$, la potencia es cero, en cambio si $\cos \phi = 1$, la potencia entregada es máxima.

Dado que tiene tal control, a dicha expresión se le llama *factor de potencia* y se define de la siguiente manera:

$$\text{Factor de Potencia} = FP = \cos \phi \quad [1] \quad (2.11)$$

Para las situaciones donde la carga es una combinación de elementos resistivos y reactivos, el factor de potencia variará entre 0 y 1 ya que mientras más resistiva sea la impedancia total, el factor de potencia será más cercano a 1.

Junto con el factor de potencia, es común que se utilicen los términos *adelanto* y *atraso*, los cuales están definidos por la corriente a través de la carga. Si la corriente adelanta al voltaje, el factor de potencia será adelantado y viceversa; por consiguiente, es posible establecer los siguientes enunciados:

- En una red *inductiva* el factor de potencia está *atrasado* (*i* atrasa a *v*).
- En una red *capacitiva* el factor de potencia está *adelantado* (*i* adelanta a *v*).

2.2.3 Potencia aparente

Al observar la Figura 2.8, resulta *aparente* que la potencia entregada está simplemente determinada por $P = VI$, sin importar los componentes de la carga; sin embargo, se sabe que el factor de potencia $\cos \phi$ de la carga tiene un efecto significativo sobre la potencia disipada.

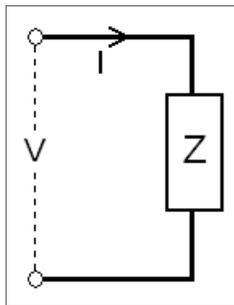


Figura 2.8 Definición de la potencia aparente.

Aunque el producto del voltaje y la corriente no siempre es la potencia entregada, sí resulta ser un indicador de potencia de gran utilidad para la descripción y el análisis de redes de a.c. senoidales; por lo que, a dicho producto se le denomina potencia aparente y está representada por la ecuación (2.12).

$$S = VI \text{ [VA]} \quad (2.12)$$

Por otra parte, la potencia real (promedio) para la carga de la Figura 2.8 es:

$$P = VI \cos \phi$$

Pero tomando en cuenta la ecuación (2.12), se tiene que:

$$P = S \cos \phi \text{ [W]} \quad (2.13)$$

Y el factor de potencia FP de un sistema es:

$$FP = \cos \phi = \frac{P}{S} \text{ [1]} \quad (2.14)$$

Por lo tanto, el factor de potencia de un circuito es la razón de la potencia promedio a la potencia aparente.

2.2.4 Potencia reactiva

Si se toma en cuenta la curva de potencia de una carga puramente inductiva P_L , como se muestra en la Figura 2.9a, se infiere que durante un ciclo la potencia entregada por la fuente al inductor es igual a la devuelta a la fuente por el inductor. De la misma forma, para el caso de una carga puramente capacitiva P_C (Figura 2.9b), se presenta el mismo fenómeno que para el caso inductivo donde el flujo neto de potencia es cero durante un ciclo completo y no se pierde energía en la transacción.

En general, la potencia reactiva asociada a cualquier circuito está definida como:

$$Q = VI \sin \phi \text{ [VAR, volt - ampere reactivo]} \quad (2.15)$$

Pero, ¿por qué es importante la potencia reactiva? Si utilizamos la Figura 2.9a, en todo instante durante el cual la curva de potencia se encuentre por encima del eje (parte positiva del ciclo), la energía deberá ser suministrada al inductor, aún cuando será devuelta durante la parte negativa del ciclo. Tal requerimiento de potencia durante la parte positiva exige que la planta de generación proporcione dicha energía durante ese intervalo; por consiguiente, el efecto de elementos reactivos tales como el inductor, puede ser la elevación del requerimiento de potencia de la planta de generación, aún cuando la potencia reactiva no sea disipada sino simplemente “prestada”. Por lo tanto, la mayor demanda de potencia durante estos intervalos es un factor de costo que deberá ser transferido al consumidor.

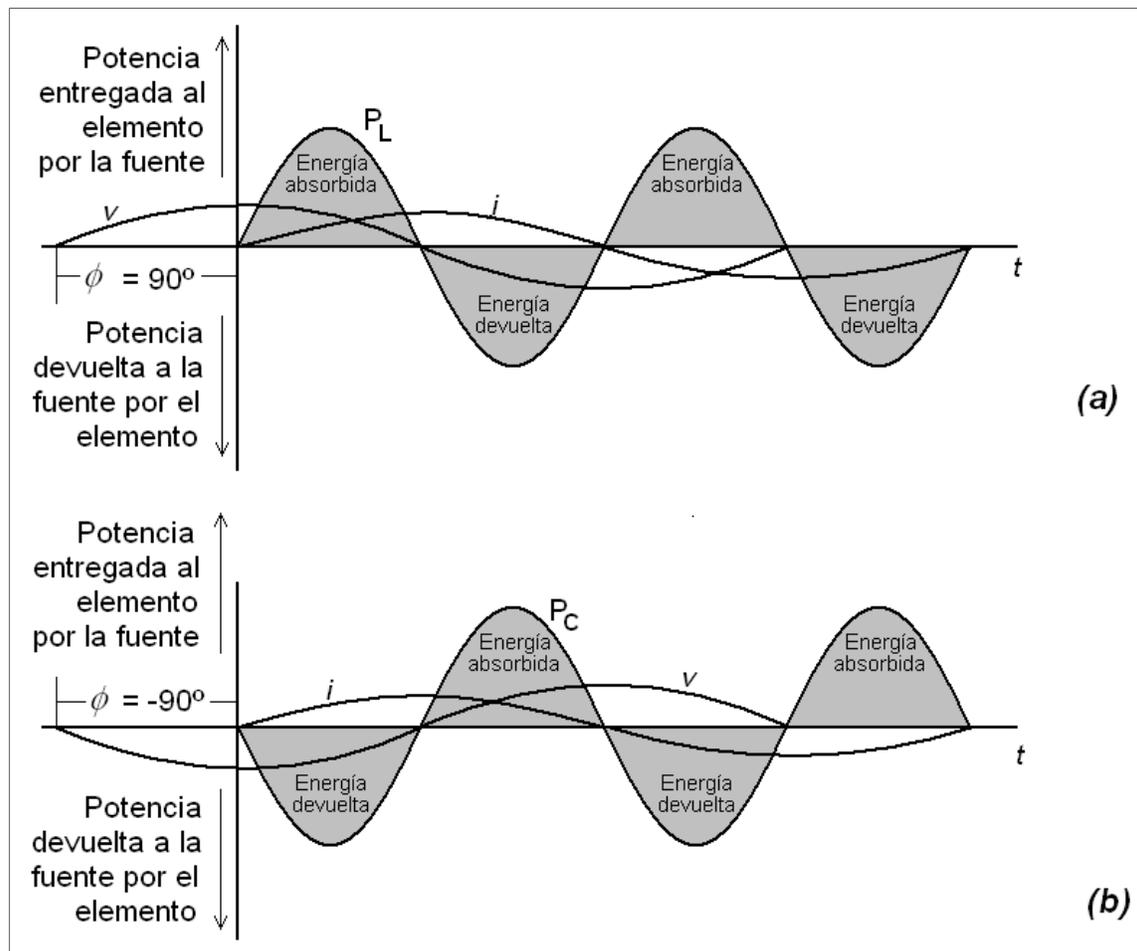


Figura 2.9 Curva de potencia. (a) Para una carga puramente inductiva. (b) Para una carga puramente capacitiva.

Por último, si comparamos ambas curvas de potencia en la Figura 2.9, se observa que son las mismas formas de onda pero invertidas entre sí, por lo que los efectos de la potencia de una carga inductiva pueden ser contrarrestados por los efectos de una carga capacitiva, esto se observa más claramente utilizando el llamado triángulo de potencias presentado a continuación.

2.2.5 Triángulo de potencias

La Figura 2.10a plasma un diagrama fasorial en el cual la corriente I atrasa al voltaje aplicado V por un ángulo ϕ . La componente horizontal de V es $V \cos \phi$ y la componente vertical $V \sin \phi$. Ahora, si cada uno de los fasores de voltaje se multiplican por I , se obtiene el llamado "triángulo de potencias" (Figura 2.10b), el cual, relaciona los 3 tipos de potencia, además del factor de potencia.

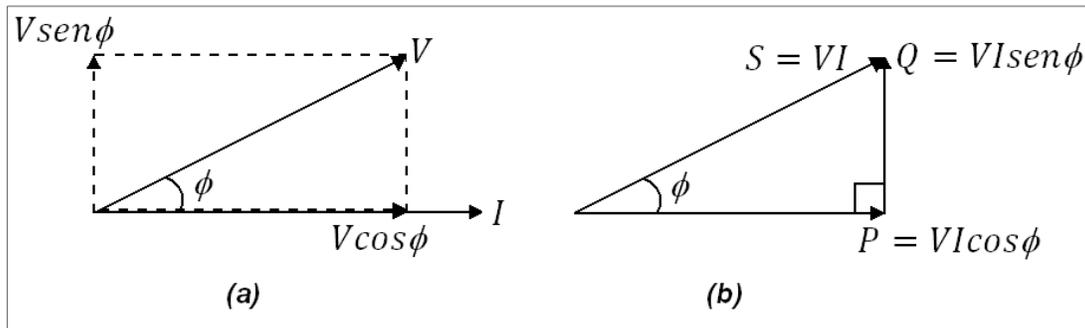


Figura 2.10 (a) Diagrama fasorial. (b) Triángulo de potencias.

A continuación, para circuitos puramente inductivos y capacitivos, el triángulo de potencias queda como lo muestra la Figura 2.11:

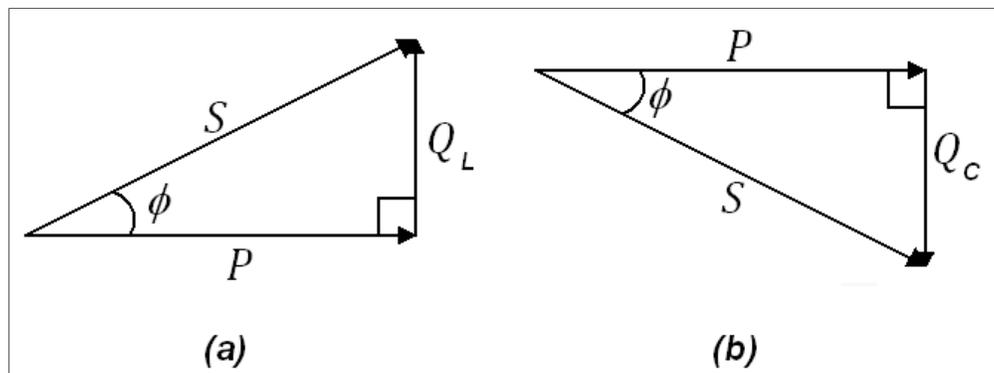


Figura 2.11 Triángulo de potencias. (a) Para una carga puramente inductiva. (b) Para una carga puramente capacitiva.

De lo anterior es posible inferir que si una red tiene elementos tanto capacitivos como inductivos, el componente reactivo del triángulo de potencias estará determinado por la diferencia entre la potencia reactiva entregada a cada elemento. Esto puede comprenderse fácilmente si se observa la Figura 2.12, en la cual, los elementos reactivos se eligieron de tal forma que la reactancia¹ inductiva sea mayor que la capacitiva ($X_L > X_C$).

¹ Reactancia [B]: se denomina a la oposición ofrecida al paso de la corriente alterna por inductores o capacitores y se mide en Ohms. Reactancia capacitiva: $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ Reactancia inductiva: $X_L = \omega L = 2\pi f L$

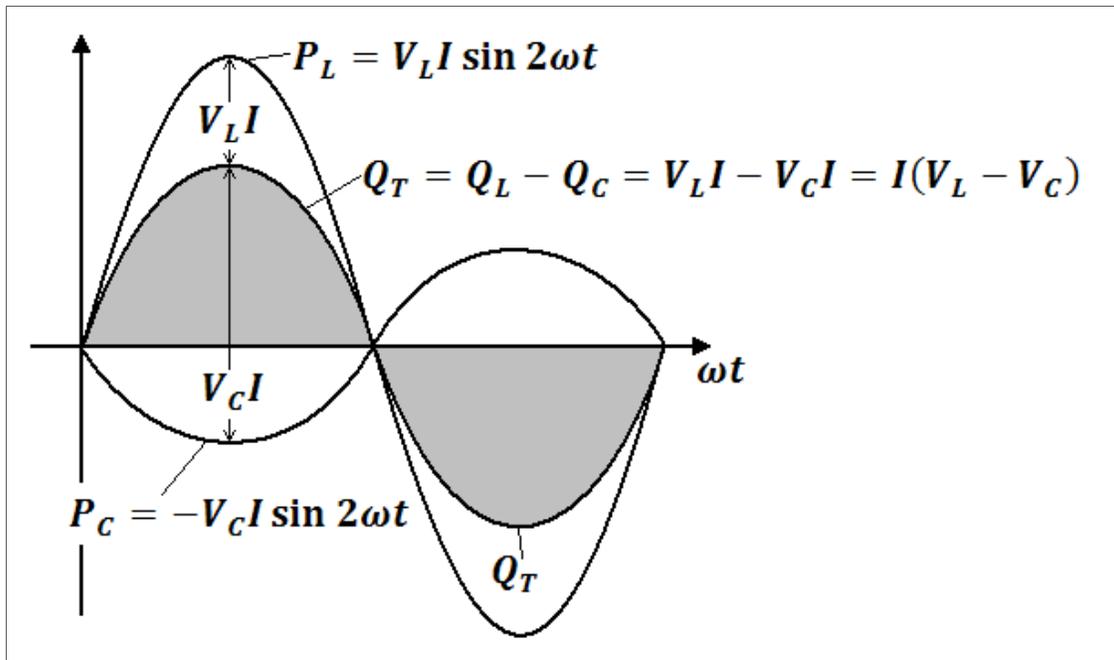


Figura 2.12 Potencia reactiva neta en un circuito con elementos capacitivos e inductivos.

2.2.6 Medición de potencia

Un *wattmetro* es un instrumento que se utiliza para medir la potencia eléctrica en un circuito. La Figura 2.13 muestra la conexión típica de un wattmetro. El instrumento cuenta con dos bobinas:

- a) una bobina de corriente, conectada en serie con la carga (como un amperímetro) y
- b) una bobina de voltaje, conectada en paralelo con la carga (como un voltímetro).

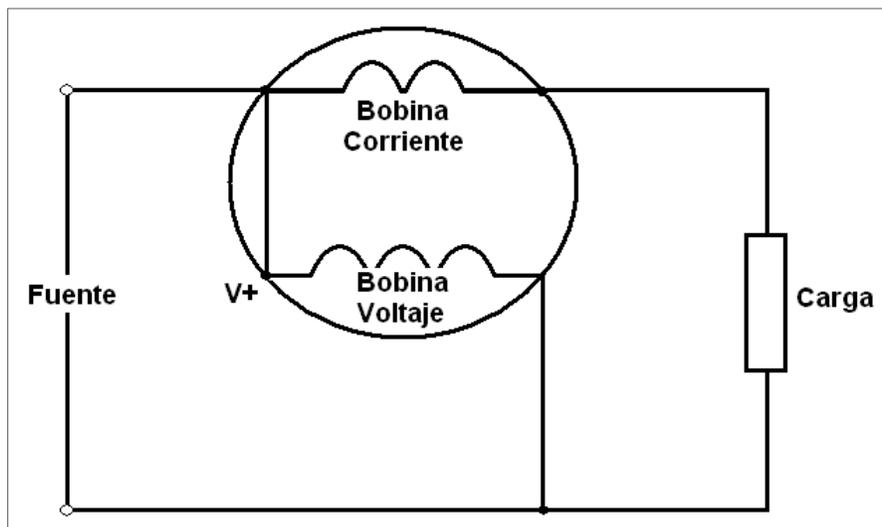


Figura 2.13 Medición de potencia empleando un wattmetro.

2.3 Energía eléctrica ^[B]

Para que la potencia produzca una conversión de energía de cualquier tipo, debe ser utilizada durante un periodo determinado y establecido; además, entre mayor sea el tiempo, mayor será la energía gastada (o perdida). Por lo tanto, la energía eléctrica se puede establecer como el producto de la potencia y del tiempo:

$$\text{Energía eléctrica} = \text{potencia} \times \text{tiempo} \quad (2.16)$$

Si la potencia se mide en Watts y el tiempo en segundos, entonces la unidad de la energía son *Watt-segundos* o *Joules*; pero, si la potencia se mide en kilowatts y el tiempo en horas se obtiene la llamada “unidad de electricidad”, los *kilowatts-horas [kWh]*.

$$1 \text{ [kWh]} = 3,600,000 \text{ [J]}$$

2.3.1 Medición de la energía eléctrica

El medidor de kilowatts-hora (o *watthorímetro*) es un instrumento para medir la cantidad de energía eléctrica suministrada al usuario residencial o comercial.

Por lo general, dicho medidor está conectado directamente a las líneas distribuidoras en un punto ubicado justo antes de entrar al tablero de distribución de potencia del sitio de uso, normalmente denominado la *acometida*.

La gran mayoría de medidores que existen en México son del tipo electromecánico (Figura 2.14a); sin embargo, en la actualidad la Comisión Federal de Electricidad ha extendido el uso de medidores electrónicos de estado sólido ^[1] como el mostrado en la Figura 2.14b.

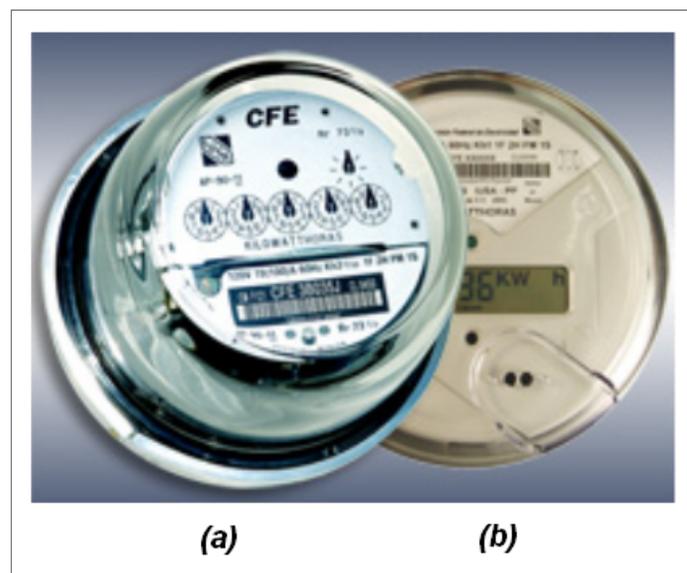


Figura 2.14 Watthorímetros. (a) Electromecánico. (b) Electrónico de estado sólido.

2.3.1.1 Medidores electromecánicos ^[D]

Los *medidores de energía por inducción* siguen presentes en la mayoría de las casas a través del territorio nacional a pesar de sus varias desventajas, siendo la principal que su lectura no pueda ser tomada automáticamente sino que es necesario que una persona con conocimientos previos la realice; por lo tanto, actualmente se está buscando su reemplazo por los medidores electrónicos aunque resulta una tarea titánica ya que se trata de millones de aparatos.

La Figura 2.15 presenta el principio de operación de un medidor de energía eléctrica por inducción. A muy grandes rasgos, el sistema cuenta con un disco de aluminio entre dos bobinas que producen un campo magnético proporcional al voltaje y a la corriente aplicadas (ϕ_v y ϕ_i , respectivamente), cuya interacción provoca corrientes de eddy en el disco, las cuales a su vez provocan una rotación proporcional al producto de la corriente y el voltaje instantáneos.

Adicionalmente, existe un imán permanente que ejerce una fuerza opuesta proporcional a la velocidad de rotación del disco (ϕ_h) para frenarlo. La influencia de ambas rotaciones, genera una velocidad angular proporcional a la potencia usada.

Finalmente, el disco está conectado a un sistema de engranes que cuentan el número de revoluciones en un determinado tiempo (kWh).

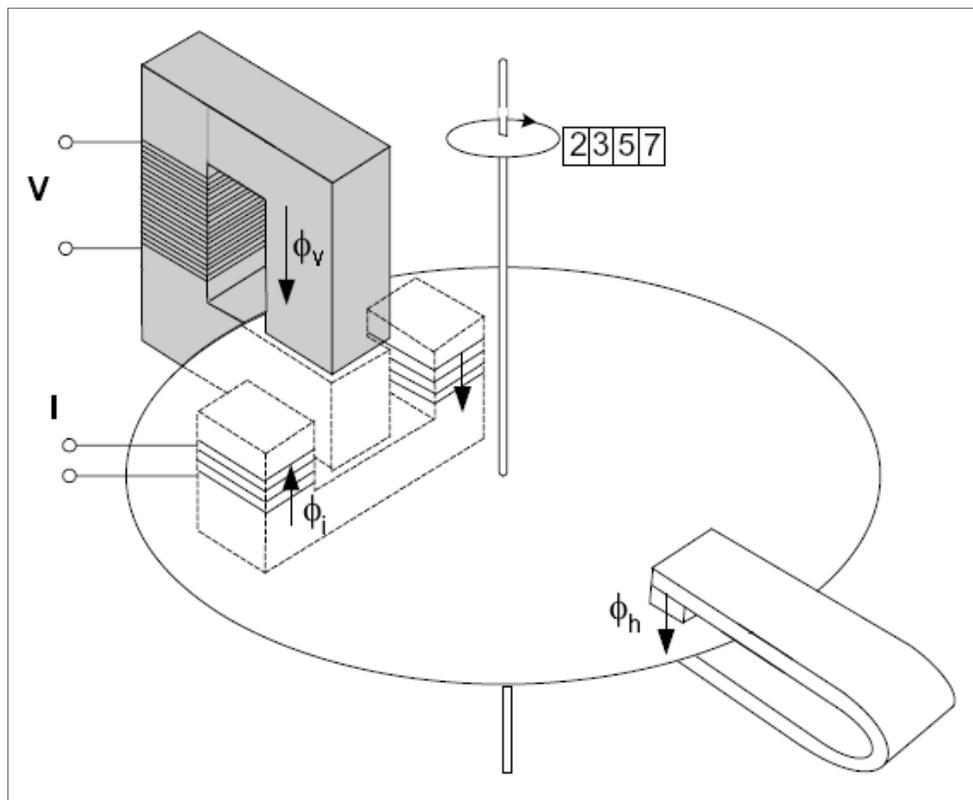


Figura 2.15 Principio de operación de un medidor de energía eléctrica por inducción.

Este tipo de medidores presentan muchos problemas de error en la medición, por lo que necesitan de un complejo sistema de corrección, cuyo rendimiento lamentablemente decrece conforme pasa el tiempo, lo que presenta un riesgo tanto para el consumidor como para el distribuidor.

2.3.1.2 Medidores electrónicos ^[E]

Las desventajas de los medidores electromecánicos es que consumen energía y están sujetos al desgaste, así como el problema que resulta de compensar su no linealidad. Estas desventajas pueden ser eliminadas con el uso de *medidores de energía eléctrica de estado sólido*.

A grandes rasgos, los medidores electrónicos constan de una fuente de alimentación, una etapa de medición, una etapa de procesamiento y comunicación (p. ej. un Microcontrolador) y otros módulos complementarios como un reloj en tiempo real (RTC), una pantalla de visualización de cristal líquido o puertos de comunicación.

En la etapa de medición, básicamente se da el sensado, acondicionamiento y la conversión analógica-digital de las señales (corriente y voltaje) para obtener sus equivalentes digitales, los cuales, son inyectados en un Procesador Digital de Señales (DSP) para calcular los parámetros de medición como la potencia, energía, etc.

La etapa de procesamiento y comunicación, tiene la tarea de calcular las cantidades derivadas de la etapa de medición pero trabajando ya con señales digitales, así como la responsabilidad de comunicación con los módulos complementarios utilizando varios protocolos e interfaces.

Entre los módulos complementarios, se encuentran el Reloj en Tiempo Real (RTC), el controlador LCD, sensores de temperatura, módulos de comunicación serial o los convertidores analógicos-digitales.

Por último, algunas fuentes de errores en este tipo de medidores son las inclemencias del tiempo, ya que regularmente son instalados al aire libre, y el desgaste de los componentes con el paso del tiempo. Por lo tanto, la caracterización y compensación de estos errores pueden ser etapas más complicadas en el diseño de este tipo de medidores.

2.3.2 Monitores de energía en aparatos eléctricos/electrónicos

Este tipo de monitores se encargan de calcular la energía consumida por cualquier tipo de aparato electrónico o eléctrico y además pueden ser capaces de medir voltaje, corriente, potencia, frecuencia y factor de potencia¹. El monitor es conectado directamente a la toma de corriente, y a su vez el aparato a medir es conectado al monitor como se observa en la Figura 2.16.

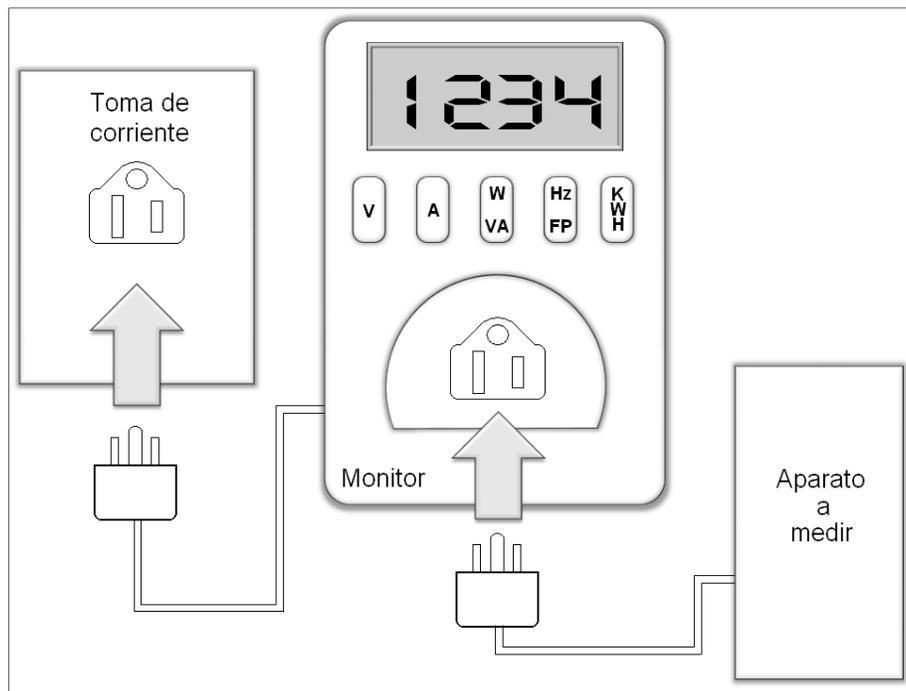


Figura 2.16 Forma de operación de un monitor de energía en aparatos eléctricos/electrónicos.

Tales monitores pueden ayudar en el ahorro de energía eléctrica al identificar los principales usuarios de ésta o los dispositivos que consuman una cantidad excesiva de potencia debido, por ejemplo, a un mal funcionamiento.

2.3.3 Medidores residenciales de energía

Un medidor residencial de energía, se encarga de proveer una realimentación pronta y conveniente de datos acerca del consumo de energía eléctrica (o de cualquier otro tipo).

El gasto de electricidad puede ser medido utilizando ganchos conectados directamente a la línea del sistema eléctrico o tal vez con sensores (p.ej. ópticos) acoplados sobre el medidor ya instalado por la compañía proveedora del servicio.

¹ Véase el punto 2.4.4, Kill a Watt.

La parte del despliegue de datos puede lograrse vía alámbrica o inalámbrica para ser recibidos por el mismo medidor o una PC¹. Aunado a esto, ahora es posible tener disponibles los datos por medio del internet en cualquier parte del mundo utilizando, por ejemplo, la aplicación gratuita *Google PowerMeter*.

2.3.3.1 Google PowerMeter ^[2]

Esta aplicación es una herramienta de monitoreo de energía gratuita que ayuda a los usuarios a ahorrar energía y dinero. Google PowerMeter permite a los usuarios observar su consumo de energía desde cualquier parte del mundo a través de internet mediante el uso de la información proporcionada por los dispositivos de monitoreo de energía o los llamados medidores inteligentes compatibles con esta tecnología.

2.3.4 Comisión Federal de Electricidad ^[3]

En México, la empresa gubernamental encargada de la generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica es la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Dicha empresa brinda servicio a más de 34.0 millones de clientes, lo que representa a más de 100 millones de habitantes, e incorpora anualmente más de un millón de clientes nuevos. Lo anterior se logra mediante 178 centrales generadoras, con una capacidad instalada de 51,571 megawatts (MW).

2.3.4.1 Tarifas

Las tarifas domésticas que cobra la CFE por el consumo de energía eléctrica se dividen en “Domésticas, 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E y 1F” y “Domésticas de alto consumo, DAC”.

Las tarifas domésticas de alto consumo se consideran cuando se registra un consumo mensual promedio superior a los siguientes límites:

| | | |
|------------|-------|----------|
| Tarifa 1: | 250 | kWh/mes. |
| Tarifa 1A: | 300 | kWh/mes. |
| Tarifa 1B: | 400 | kWh/mes. |
| Tarifa 1C: | 850 | kWh/mes. |
| Tarifa 1D: | 1,000 | kWh/mes. |
| Tarifa 1E: | 2,000 | kWh/mes. |
| Tarifa 1F: | 2,500 | kWh/mes. |

¹ Véase el punto 2.4, Productos en el mercado.

Las tarifas domésticas se dividen en 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E y 1F, de las cuales la 1 es la tarifa básica y las demás corresponden a localidades del país donde se toma en cuenta la temperatura media mensual en verano.

Tarifa 1

Esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, para cargas que no sean consideradas de alto consumo de acuerdo a lo establecido en la Tarifa DAC, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda.

Dependiendo del consumo mensual, esta tarifa se divide en:

Consumos de hasta 140 kWh

| | |
|--------------------|--|
| Consumo básico | por cada uno de los primeros 75 kWh. |
| Consumo intermedio | por cada uno de los siguientes 50 kWh. |

Consumos mayores a 140 kWh

| | |
|--------------------|--|
| Consumo básico | por cada uno de los primeros 75 kWh. |
| Consumo intermedio | por cada uno de los siguientes 50 kWh. |
| Consumo excedente | por cada kWh adicional a los anteriores. |

Tarifas 1A, 1B, 1C, 1D, 1E y 1F

Estas tarifas se aplicarán a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, para cargas que no sean consideradas de alto consumo de acuerdo a lo establecido en la Tarifa DAC, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda, en localidades cuya temperatura media mensual en verano sea como mínimo de:

- 1A 25°C
- 1B 28°C
- 1C 30°C
- 1D 31°C
- 1E 32°C
- 1F 33°C

Debido a que el presente trabajo se realizó en el Distrito Federal, la tarifa utilizada para los cálculos del sistema es la tarifa 1.

2.3.4.2 Lectura del medidor

Una forma de mantener un registro propio del cobro que hace CFE del consumo de energía eléctrica, podría ser el saber cómo leer el medidor como se muestra a continuación; esto, para medidores electromecánicos que son los más comunes y que a diferencia de los medidores electrónicos no es posible tener una medición directa.

Medidores de 4 o 5 carátulas

Con base en la Figura 2.17, la lectura se comienza por la carátula de la extrema derecha tomando en cuenta que el sentido de giro de cada carátula corresponde al indicado por las flechas encontradas encima de las carátulas.

Si la manecilla está entre dos números, se anota siempre el menor. Si se encuentra entre el 0 y el 9, se anota siempre el 9.

Si la manecilla está sobre un número, se consulta la posición de la manecilla en la carátula de la derecha. Si ésta última ha rebasado el cero, se toma el número señalado; en caso contrario, se considera el número anterior al señalado.

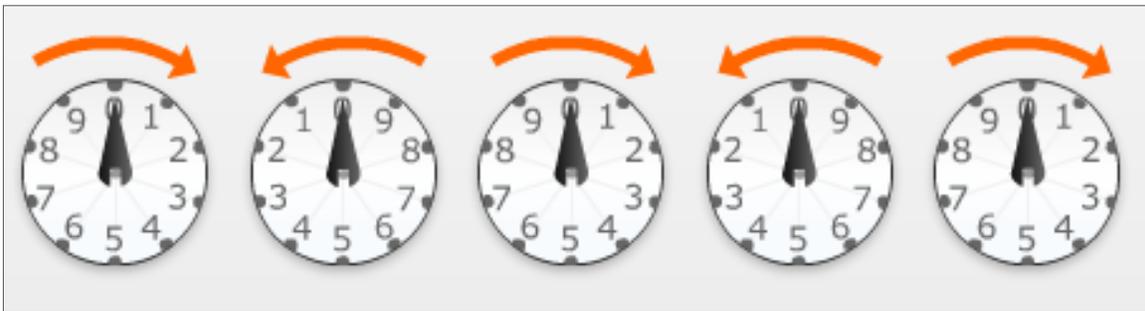


Figura 2.17 Medidor de consumo electromecánico de 5 carátulas.

2.4 Productos en el mercado

Para tener una idea de los productos que actualmente están disponibles en el mercado, se realizó un estudio buscando sistemas comerciales que realicen funciones similares a las planteadas en este proyecto.

En el caso de los sistemas de monitoreo de consumo eléctrico para actividades residenciales hechos en México, no fue posible encontrar alguno ya que en su mayoría se tratan de sistemas para uso industrial muy especializados.

2.4.1 TED, The Energy Detective ^[4]

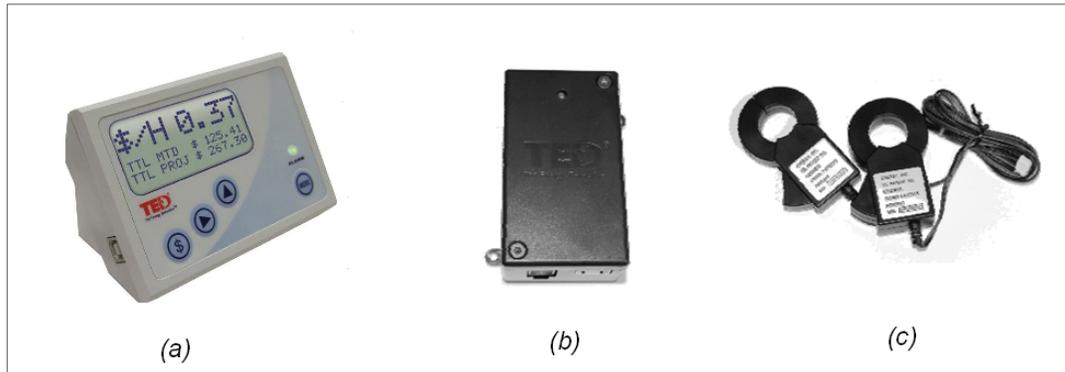


Figura 2.18 Sistema TED-1002 FP. (a) Monitor. (b) Transmisor. (c) Sensores.

Este sistema es construido por la compañía estadounidense Energy.Inc y consta de las partes mostradas en la Figura 2.18. Sus características principales son:

- Conexión y alimentación directa al tablero central mediante 2 sensores tipo gancho y 3 cables conectados directamente a la acometida.
- Transmite los datos de forma inalámbrica a la PC o al display digital inalámbrico que despliega consumo de energía eléctrica y total a pagar.
- Memoria no volátil para almacenar datos.
- Software para monitoreo propio desde PC o por internet utilizando Google PowerMeter.
- Precio: \$200.00 USD ^[5].

2.4.2 WATTSON ^[6]

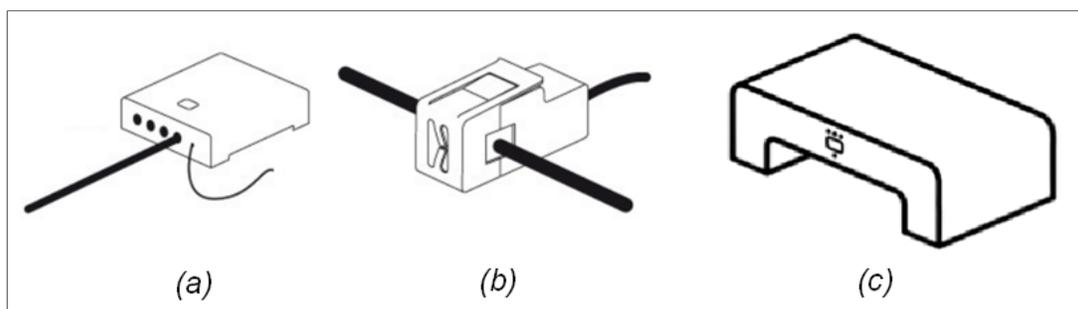


Figura 2.19 Sistema Wattson. (a) Transmisor. (b) Sensor. (c) Receptor.

Este sistema es construido por la compañía inglesa Diy Kyoto y consta de un sensor, un transmisor y un receptor con las siguientes características:

- Conexión del transmisor directa a la línea mediante un sensor tipo gancho.
- Alimentación del transmisor y receptor a base de baterías recargables.
- Transmite los datos de forma inalámbrica al receptor.
- Display digital que despliega consumo de energía eléctrica y el monto a pagar.
- Memoria no volátil para almacenar datos en el receptor.
- Transmite los datos vía USB del receptor a la PC.
- Software para monitoreo desde PC.
- Precio: £88.00 [7].

2.4.3 ONZO [8]



Figura 2.20 Sistema ONZO.

Este sistema es construido por la compañía inglesa ONZO Ltd. y consta de un sensor-transmisor y un receptor con las siguientes características (Figura 2.20):

- Conexión del transmisor directa a la línea mediante un sensor tipo gancho.
- Alimentación del transmisor a través de la línea y del receptor a base de baterías recargables.
- Transmite los datos de forma inalámbrica al receptor.
- Display digital que despliega consumo de energía eléctrica y el monto a pagar, la potencia y el factor de potencia.
- Transmite los datos vía USB del receptor a la PC.
- Software para monitoreo desde PC.
- Precio: No Disponible.

2.4.4 KILL A WATT [a], [9]



Figura 2.21 Sistema P4320 Kill A Watt PS.

A diferencia de los anteriores, este dispositivo es un monitor de energía en aparatos eléctricos/electrónicos fabricado por la compañía estadounidense P3 international. En particular, su modelo P4320 (Figura 2.21) es además un regulador para proteger a los aparatos contra descargas eléctricas. Su funcionamiento es igual al descrito en la Figura 2.16 y es capaz de medir lo siguiente:

- Voltaje [V].
- Corriente [A].
- Potencia real [W].
- Potencia aparente [VA].
- Factor de potencia.
- Consumo de energía [KWH].
- Tiempo transcurrido [Días, Horas]
- Precio: \$66.83 USD ^[10].

2.4.5 EM100 ENERGY SAVER SERIES POWER MONITOR [b], [11]



Figura 2.22 Sistema B&D EM100 Power Monitor. (a) Transmisor. (b) Display receptor.

Este sistema es construido por la compañía estadounidense Black&Decker y consta de un transmisor y un receptor con las siguientes características:

- Conexión del transmisor directa al medidor de la compañía proveedora de energía eléctrica por medio de un sensor óptico.
- Alimentación del transmisor y receptor a base de baterías no recargables.
- Transmite los datos de forma inalámbrica al receptor.
- Display digital en el receptor que despliega consumo de energía eléctrica y precio a pagar.
- Precio: \$63.99 USD ^[12].

2.5 Herramientas de software para desarrollo

Para este proyecto, se decidió recurrir a 2 lenguajes de programación, LabVIEW y C (MPLAB IDE). El primero, debido a su facilidad de uso y a sus amplias herramientas enfocadas hacia la presentación visual. Y el segundo, debido a su muy conocido potencial y flexibilidad.

Aparte de estos lenguajes de programación, se utilizaron otras aplicaciones de ingeniería para distintas tareas como: hacer pruebas durante el acondicionamiento de las señales, dibujar los diagramas eléctricos o hacer los diagramas de los circuitos impresos.

2.5.1 National Instruments LabVIEW ^[13]

LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) es un entorno de programación gráfica usado para desarrollar sistemas sofisticados de medición, pruebas y control usando íconos gráficos y cables que aparentan un diagrama de flujo y así mejora la interacción con el usuario final. Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo y el permitir la entrada a la informática a profesionales de otros campos. También ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos.

Cada uno de los programas realizados en LabVIEW son llamados VI's o Instrumentos Virtuales y constan de 2 partes: el panel frontal, el cual es la interfaz con el usuario y el diagrama de bloques, que es la parte donde se incluye el código y el cual puede ser transparente al usuario final.

Otra parte interesante de LabVIEW es la posibilidad de incluir un VI dentro de otro, lo cual hace posible realizar programas muy complejos que con otro lenguaje de programación serían casi imposibles.

También se utilizó un módulo especial de LabVIEW llamado VISA (Virtual Instrument Software Architecture ^[14]) que sirve para implementar una comunicación serial y/o USB entre la PC y dispositivos tales como Microcontroladores.

2.5.2 National Instruments Multisim ^[15]

NI Multisim es básicamente un programa para diseñar y simular circuitos eléctricos/electrónicos para analizar su comportamiento mediante cientos de componentes e instrumentos de medición incluidos en las librerías aparte de hacer posible que el usuario haga sus propios componentes para que se ajusten a sus necesidades.

2.5.3 National Instruments Ultiboard ^[16]

NI Ultiboard es una herramienta intuitiva para el diseño de tarjetas de circuitos impresos (o en inglés PCB, Printed Circuit Board) que está perfectamente integrada con el NI Multisim ya que es posible exportar los circuitos entre estas dos herramientas. Una característica muy útil de este programa es la visión en tercera dimensión de los circuitos, que permite observar la tarjeta en un estado de armado casi final.

2.5.4 Microchip MPLAB Integrated Development Environment ^[17]

MPLAB IDE es una herramienta para desarrollar aplicaciones embebidas que utilicen los microcontroladores PIC y dsPIC de la empresa Microchip en un ambiente Windows. Aparte de depurar y crear los archivos hex, MPLAB permite simular cualquier tipo de entradas y salidas analógicas o digitales por medio de la herramienta llamada Stimulus.

Otra particularidad interesante, es la posibilidad de programar directamente el Microcontrolador; sin embargo, la característica más útil para este proyecto reside en la posibilidad de programar en lenguaje C y no solamente en lenguaje ensamblador ya que MPLAB cuenta con todas las librerías necesarias, cosa que ahorra tiempo y esfuerzo.

2.6 Herramientas de hardware para desarrollo

En la presente sección se mencionan las características generales del hardware que compone el sistema desarrollado en este trabajo de tesis.

2.6.1 MICROCHIP PICKit 2 ^[c]

El Programador/Depurador PICKit 2 es un programador de desarrollo de bajo costo capaz de programar la mayoría de microcontroladores y memorias seriales EEPROM de Microchip.

En la Figura 2.23 se muestra el programador PICKit 2 y las partes que lo conforman.



Figura 2.23 Programador PICKit 2. (1) LEDs de status. (2) Push-button. (3) Asa. (4) Conexión USB. (5) Marcador de pin 1. (6) Conector de programación.

El programador incluye una aplicación¹ que se encarga de cargar en el Microcontrolador el archivo realizado en MPLAB IDE.

2.6.2 Transformador de voltaje

El transformador de voltaje utilizado es un modelo genérico de la marca mexicana Steren con las siguientes especificaciones:

| Derivación (TAP) central | |
|--------------------------|---------------------|
| Voltaje de entrada | 127 V _{CA} |
| Voltaje de salida | 12 V _{CA} |
| Corriente de salida | 1.2 A |

Tabla 2.1 Especificaciones del transformador de Voltaje.

¹ Véase el Apéndice A, para conocer el proceso detallado de conexión y carga de un programa en el Microcontrolador dsPIC33FJ128GP802 utilizando el programador PICKit 2.

2.6.3 Transformador de corriente alterna Fluke Y8101 ^[d]

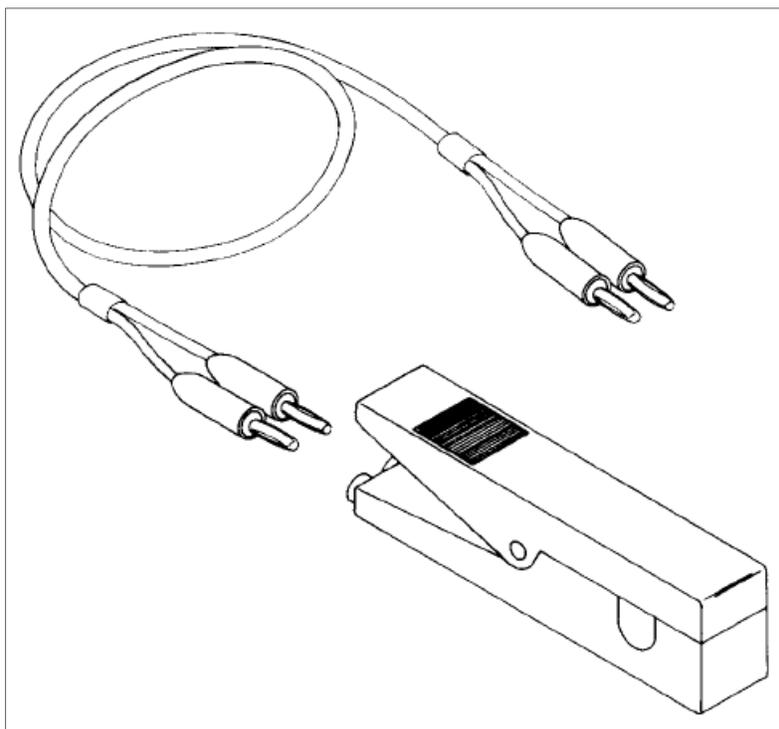


Figura 2.24 Transformador de corriente alterna Fluke Y8101.

El Y8101 (Figura 2.24) es un pequeño transformador de pinza diseñado para incrementar la capacidad de medición de un amperímetro de a.c. arriba de 15 amperes. Dicha pinza es una bobina que permite hacer las mediciones sin necesidad de abrir el circuito y al mismo tiempo funciona como el secundario de un transformador de relación 1000:1, cuyo primario es el conductor que se va a medir.

A continuación se enlistan sus especificaciones en la Tabla 2.2:

| | |
|-------------------------------------|--|
| Rango de corriente | 1 – 150 A |
| Precisión | $\pm(2\% + 0.15^a)$ 48 – 62 Hz $\pm(3\% + 0.15^a)$ 62 – 1200 Hz |
| Relación de transformación | 1000:1 |
| Voltaje de trabajo | 300 V _{ac} RMS max |
| Diámetro máximo de conductor | 1.11 cm |

Tabla 2.2 Especificaciones del transformador Fluke Y8101.

Para ahondar más en el cómo trabaja el transformador, es necesario mencionar brevemente su principio de funcionamiento.

Principio de funcionamiento^[F]

Al igual que cualquier otro transformador, un transformador de corriente tiene un devanado primario, un núcleo magnético y un devanado secundario. La corriente alterna que fluye por el primario, produce un campo magnético B en el núcleo, lo cual induce una corriente en el devanado secundario de magnitud:

$$I_{\text{secundario}} = \frac{1}{N} I_{\text{primario}} \quad (2.17)$$

donde N corresponde al número de vueltas del devanado secundario (Figura 2.25).

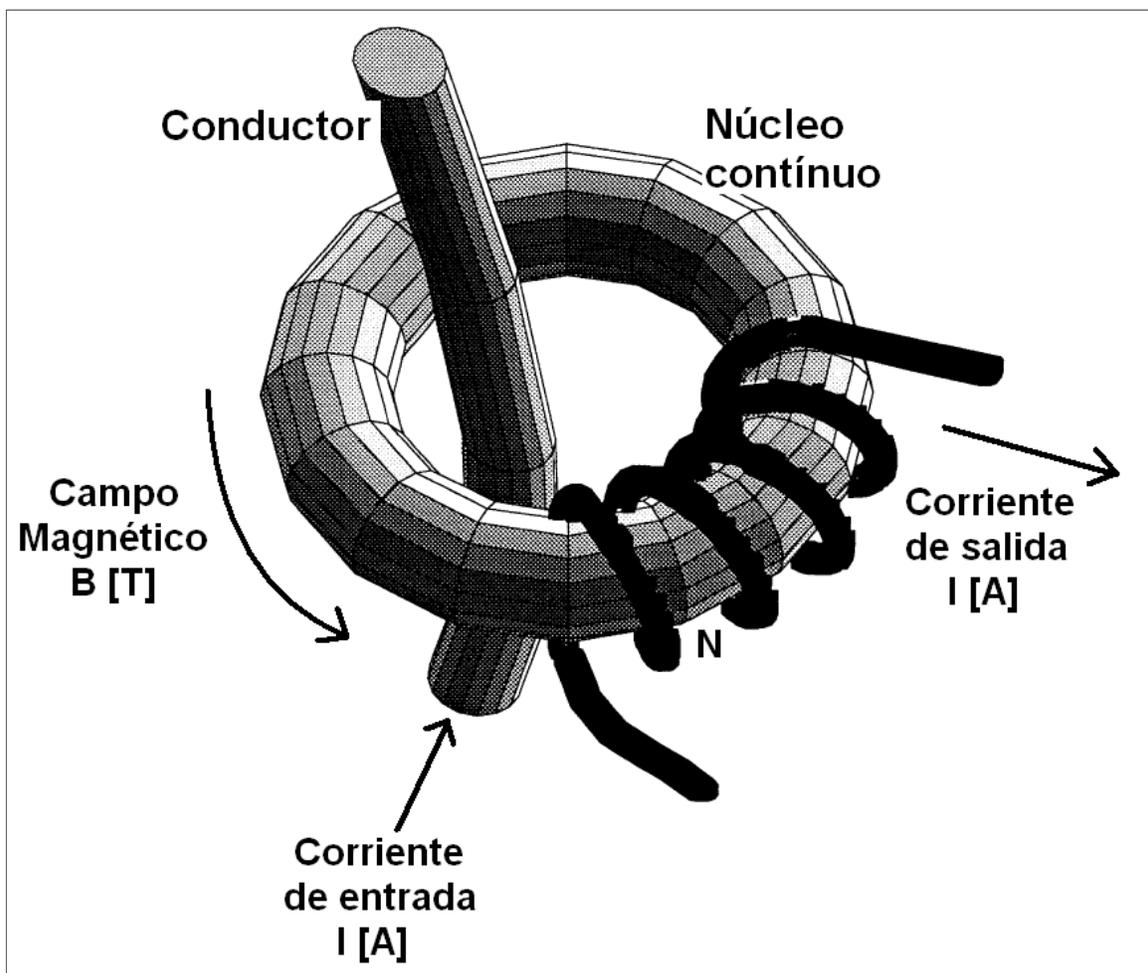


Figura 2.25 Principio de funcionamiento de un transformador de corriente.

2.6.4 MICROCHIP Controlador Digital de Señales de 16 bits de Alto Rendimiento dsPIC33FJ128GP802¹

El Microcontrolador utilizado para el proyecto es fabricado por la compañía estadounidense Microchip Technology Inc., que es líder en este tipo de dispositivos electrónicos.

2.6.4.1 Descripción

El dsPIC33FJ128GP802 (Peripheral Interface Controller) es un Microcontrolador diseñado pensando en los requerimientos de alto rendimiento necesarios para el procesamiento digital de señales desarrollado por la empresa estadounidense Microchip Technology Inc.

Un punto importante en este tipo de dispositivos, es la existencia de un controlador de acceso directo a memoria.

2.6.4.2 Direct Memory Access, DMA

El controlador DMA es un subsistema que facilita la transferencia de datos entre el CPU y sus periféricos sin asistencia del CPU, y está optimizado para aplicaciones embebidas de alto desempeño en tiempo real.

El controlador DMA transfiere datos entre los registros de los periféricos y el espacio en SRAM, así, el CPU y el controlador DMA pueden leer y escribir hacia/desde direcciones dentro del espacio de datos sin interferencia alguna (véase Figura 2.26), lo que da pie a un funcionamiento en tiempo real.

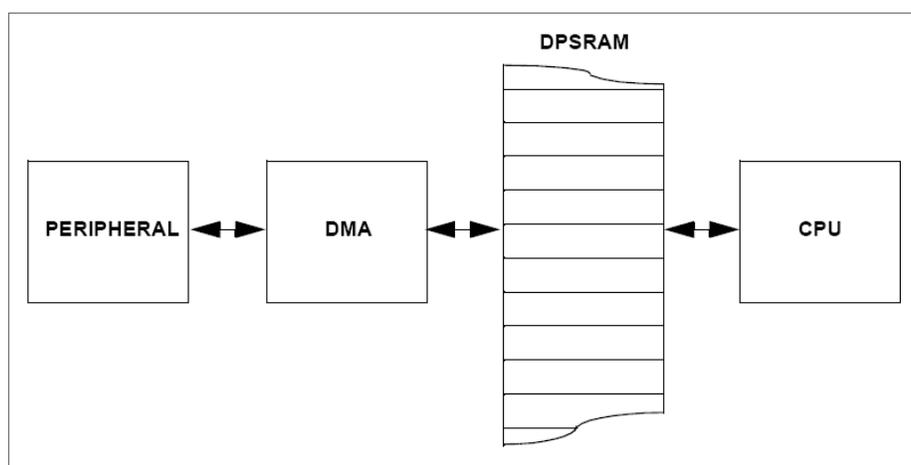


Figura 2.26 Controlador DMA.

¹ Para información relacionada con las características técnicas del dsPIC33FJ128GP802, consúltese la bibliografía [e], [f] y [18].

El controlador DMA soporta ocho canales independientes que pueden ser configurados para transferencias de o para los periféricos seleccionados (ECAN, DCI, ADC, SPI, UART, Comparadores, Captura de entrada). Además, las transferencias del DMA pueden ser disparadas por Timers o interrupciones externas y cada canal es unidireccional. Cabe recordar que dos canales de DMA deben ser reservados para lectura y escritura del periférico.

2.6.4.3 Módulos

Para el desarrollo del proyecto, fueron utilizados los siguientes módulos del Microcontrolador:

Convertidor Analógico Digital, ADC

El modelo dsPIC33FJ128GP802 cuenta con un módulo de conversión analógica-digital con 13 pines de entrada (designadas por AN0 a AN12) y puede realizar conversiones de 10bits y 12 bits según la configuración del usuario.

Las entradas analógicas son multiplexadas a cuatro amplificadores “sample/hold” (CH0-CH3) de los cuales uno, dos o cuatro pueden ser habilitados.

Es posible activar el modo de escaneo de entradas analógicas para el amplificador CH0 donde un registro de control especifica qué canales de entrada se incluyen en la secuencia de escaneo.

Para acceder a los resultados de la conversión, el módulo cuenta con un *búfer* de una palabra; sin embargo, es posible almacenar múltiples resultados en el *búfer* de RAM del DMA. Cada resultado de la conversión es convertido en uno de cuatro formatos de salida de 16 bits.

Receptor-Transmisor Asíncrono Universal, UART

El UART es uno de los módulos de E/S serial disponibles en este dispositivo. Se trata de un canal de comunicación asíncrono full-duplex que se comunica con periféricos o computadoras personales a través de protocolos como el RS-232. Este módulo también soporta la opción de control de flujo utilizando los pines \neg UxCTS y UxRTS.

Reloj y Calendario en Tiempo-Real, RTCC

Este módulo provee un reloj-calendario en Código Binario Decimal (BCD) y algunas de sus características clave son:

- Reloj militar (24 horas)
- Calendario hasta el año 2099.

- Cuenta de segundos, minutos, horas, días de la semana, día del mes, mes y año incluyendo compensación de año bisiesto.
- Representación BCD del tiempo, calendario y alarma.
- Alarma programable para generar interrupciones.
- Generación de salida de señal de reloj de 1 Hz (pin RTCC).
- Calibración RTCC.

Este módulo brinda una referencia de tiempo, para alguna aplicación que se lleve a cabo en el dispositivo, con mínima o nula intervención del CPU.

Circuito Inter-Integrado, I²C

El módulo I²C (Inter-Integrated Circuit) es una interface serial útil para comunicarse con otros periféricos o dispositivos Microcontroladores. Dichos periféricos pueden ser EEPROMs¹, displays, convertidores A/D, etc.

2.6.5 MICROCHIP 512K I²C CMOS Serial EEPROM 24LC512 ^[g]

Esta memoria serial EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) con un tamaño de 512 Kbits, es capaz de operar en un amplio rango de voltaje (1.8V a 5.5V) y ha sido desarrollada para aplicaciones de baja potencia como la adquisición de datos. Este dispositivo es capaz de trabajar con ocho dispositivos en el mismo bus.

2.6.6 LINX Technologies Módulo USB SDM-USB-QS-S ^[h]

El módulo USB de la serie Linx QS permite la rápida implementación de USB a virtualmente cualquier dispositivo.

¹ Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory (Memoria de solo lectura programable y borrrable eléctricamente).

Este módulo provee una solución completa para convertir entre USB y fuentes de niveles lógicos seriales CMOS/TTL, y puede conectarse directamente a prácticamente cualquier dispositivo incluyendo microcontroladores, convertidores de nivel RS-232/RS-485 o módulos RF inalámbricos. Este circuito no requiere componentes externos (excepto un conector USB) e incluye todos los controladores necesarios, librando al diseñador de programaciones complicadas.

La Tabla 2.3 muestra las principales características de este circuito:

| |
|--|
| Conversión USB-serial asíncrona en un solo chip |
| Bajo costo |
| Velocidad de transmisión 3Mbps |
| Soporta USB de baja velocidad |
| Soporte de “handshaking” para RS-232 y RS-485 |
| Alimentación por bus o auto alimentación |
| VID, PID, número serie y descriptores programables vía USB |
| No necesita componentes externos |
| Drivers y firmware incluidos |
| Soporte para Windows 98/2000/ME/XP |
| Compatible con USB 1.1 y 2.0 |

Tabla 2.3 Características del Módulo USB SDM-USB-QS-S

2.6.7 Computadora Personal

Los requerimientos mínimos del equipo de cómputo utilizado para desarrollar las aplicaciones del proyecto difieren de los necesarios para correr la aplicación final; por lo tanto, en la Tabla 2.4, se enlistan los requisitos mínimos con los que se contó para llevar a cabo el desarrollo del sistema y en la Tabla 2.5 los que debe de tener la computadora donde se correrá la interface gráfica.

| | | |
|--------------------------|---|---------|
| Procesador | Intel Pentium 4 a 1.0 GHz | |
| Disco duro | 40 GB | |
| Memoria RAM | 1 GB | |
| Sistema operativo | Microsoft Windows XP Professional / SP2 | |
| Software | LabVIEW | v. 8.5 |
| | Workbench | v. 10.0 |
| | MPLAB IDE | v. 8.40 |
| Otros | Puerto USB | |
| | Cable USB Tipo A – Tipo B | |

Tabla 2.4 Requisitos mínimos de la PC para desarrollo del sistema.

| | |
|--------------------------|---|
| Procesador | Intel Pentium 4 a 1.0 GHz |
| Disco duro | 40 GB |
| Memoria RAM | 512 MB |
| Sistema operativo | Microsoft Windows XP Professional / SP2 |
| Otros | Puerto USB |
| | Cable USB 2.0 Tipo A – Tipo B |

Tabla 2.5 Requisitos mínimos de la PC para el usuario.

El cable USB 2.0 Tipo A – Tipo B ^[19] se muestra en la Figura 2.27:



Figura 2.27 Cable USB 2.0 Tipo A – Tipo B.

Capítulo 3

Desarrollo e Implementación

A lo largo de este capítulo se presenta de forma detallada el desarrollo y la implementación del proyecto y para su mejor entendimiento se basa en la utilización de todos los conceptos vistos en los capítulos anteriores.

3.1 Descripción general

La arquitectura del sistema desarrollado se muestra en la Figura 3.1, cuyos módulos se describen a continuación:

Alimentación.- Para el funcionamiento del sistema, se requiere del suministro de 3 niveles de voltaje (+5V, +3.3V y -5V), obtenidos con una fuente de regulación lineal.

Sensado.- En esta etapa, para el caso de la señal de voltaje, la toma de muestras se lleva a cabo con un transformador de voltaje conectado directamente a las líneas de energía. Para el caso de la corriente, se utilizó un transductor de gancho que a su salida entrega una señal de voltaje.

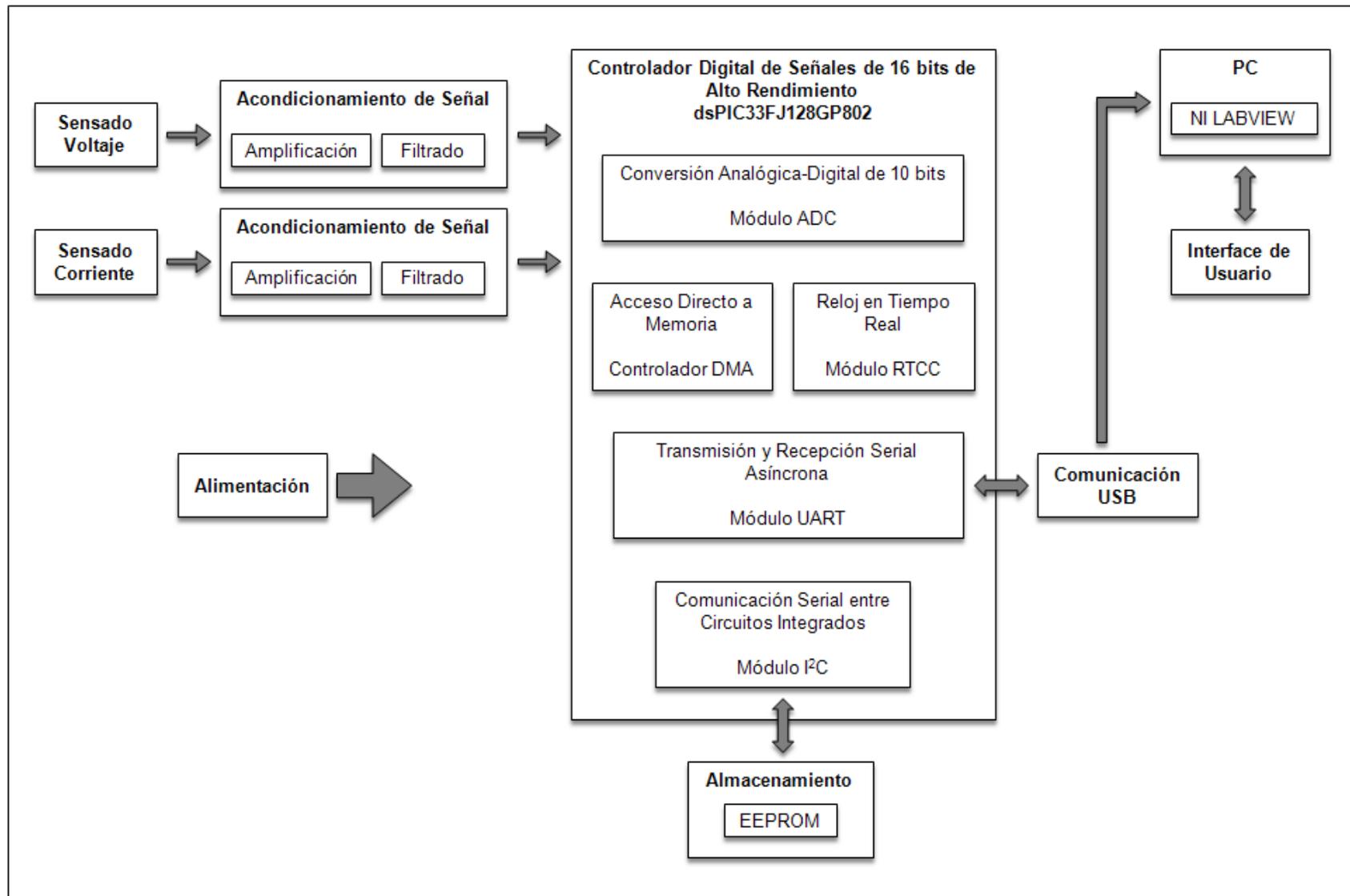


Figura 3.1 Diagrama de bloques general del sistema.

Acondicionamiento.- De acuerdo a las características propias de la etapa de digitalización, es necesario adecuar las señales eléctricas obtenidas en la etapa de sensado así como agregar algún tipo de filtrado para que las señales una vez digitalizadas sean lo más fieles posibles a la realidad.

Para la señal de voltaje y de corriente, se hizo un escalamiento de nivel utilizando divisores de tensión y configuraciones básicas con amplificadores operacionales.

Para ambos casos, el filtrado consiste en la implementación de un filtro de primer orden RC paso-bajas para limitar la entrada de señales a frecuencias aproximadamente del doble de la utilizada por nuestras señales de entrada.

Controlador Digital de Señales.- Este dispositivo se encarga de efectuar las siguientes funciones:

- Conversión Analógica Digital. Esta etapa consiste en transformar las señales eléctricas analógicas a un formato binario para hacer posible su manejo en cualquier dispositivo digital.
- Acceso Directo a Memoria. Dentro del Microcontrolador se cuenta con un módulo especial que realiza la transferencia de los datos resultantes de la conversión Analógica-Digital directamente hacia la memoria RAM para tenerlos disponibles sin necesidad de utilizar el CPU.
- Reloj en Tiempo Real. Se dispone también de un reloj que permite obtener la fecha y hora reales para que las muestras tomadas cobren significado al ligarlas con un momento preciso en el tiempo, lo que resulta vital para el proyecto.
- Transmisión y Recepción Serial Asíncrona. Cuando es requerida, el Microcontrolador puede establecer una comunicación serial asíncrona con cualquier dispositivo que soporte dicho proceso.
- Comunicación Serial entre Circuitos Integrados. Por medio de un módulo especial, es posible establecer una comunicación con dispositivos de seriales como memorias programables o EEPROMs para el almacenamiento de datos no volátil.

Almacenamiento.- Debido a que el sistema trabaja de forma independiente, es necesario contar con un dispositivo de almacenamiento o memoria que guarde los resultados para que se encuentren disponibles en cualquier momento.

Comunicación USB.- Para controlar las acciones del sistema es necesario contar con una comunicación entre el Microcontrolador y la PC la cual se lleva a cabo por medio de un circuito integrado que convierte la salida serial de datos del Microcontrolador al protocolo de comunicación USB, que en la actualidad es uno de los más utilizados por las computadoras personales.

Computadora Personal (PC).- La PC representa una de las partes más importantes del sistema ya que ofrece herramientas de análisis, procesamiento, almacenamiento y despliegue de datos que proporcionan versatilidad y amplían los alcances del sistema.

El uso de la PC consiste en la implementación de una interface para el usuario en lenguaje gráfico que contiene rutinas para realizar las siguientes funciones:

- **Procesamiento.** Los datos recibidos son decodificados y tratados para que correspondan con las muestras analógicas reales y se encuentren listos para las siguientes fases. También en esta fase se obtienen los valores de la potencia eléctrica y los datos del consumo y su facturación, que podrán ser cotejados con el recibo real.
- **Graficación.** Es la forma visual de representación de los datos y corresponde a las formas de onda reales del voltaje, la corriente y la potencia. Estas gráficas pueden representar los datos en tiempo real o pueden representar los datos históricos tomados mientras el sistema trabaja de forma independiente.
- **Almacenamiento.** Consiste en la generación de archivos de mediciones anteriores para su futura utilización y análisis.

3.2 Alimentación ^{[G], [H]}

La alimentación de todo el sistema se toma de la línea de energía por medio de una fuente de regulación lineal con salidas de voltaje de +5V, +3.3V y -5V.

Los voltajes de $\pm 5V$ son necesarios para alimentar al circuito integrado que contiene los amplificadores operacionales, así como el integrado de comunicación USB (solamente +5V). El voltaje de +3.3V es necesario para alimentar el Microcontrolador. La tierra para todo el sistema se obtiene del transformador de la fuente como se ve en la Figura 3.3.

La construcción de la fuente de alimentación de D.C. bipolar consta de un rectificador, un filtro y un regulador como se muestra en la Figura 3.2, donde también se observa las señales de entrada y salida de cada etapa.

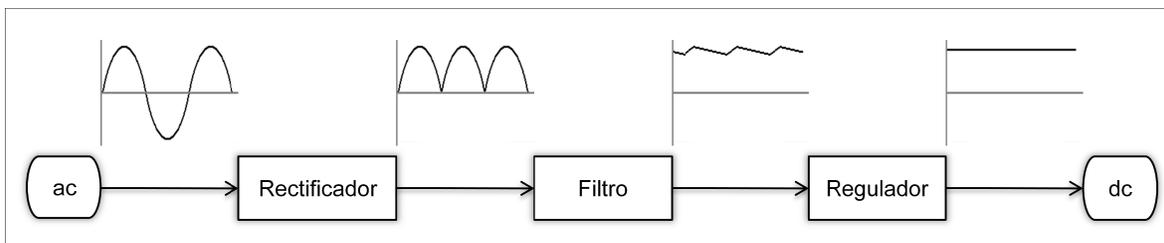


Figura 3.2 Diagrama de bloques de una fuente de D.C.

La fuente del sistema final se observa en la Figura 3.3 donde para rectificar la señal de entrada del transformador se utilizó un rectificador de onda completa conocido como *rectificador puente*, que es la forma más aceptada y eficiente de rectificación. La etapa de filtrado se lleva a cabo con un par de capacitores de $220\mu\text{F}$ y se utilizó un regulador LM7805 para el voltaje de +5V y un LM7905 para el de -5V. Los capacitores de $1\mu\text{F}$ que se encuentran a la salida de los reguladores sirven para eliminar el *voltaje de rizo*¹.

Para la obtención de los +3.3V, se utilizó un regulador de bajo voltaje de *dropout*² KA78M33.

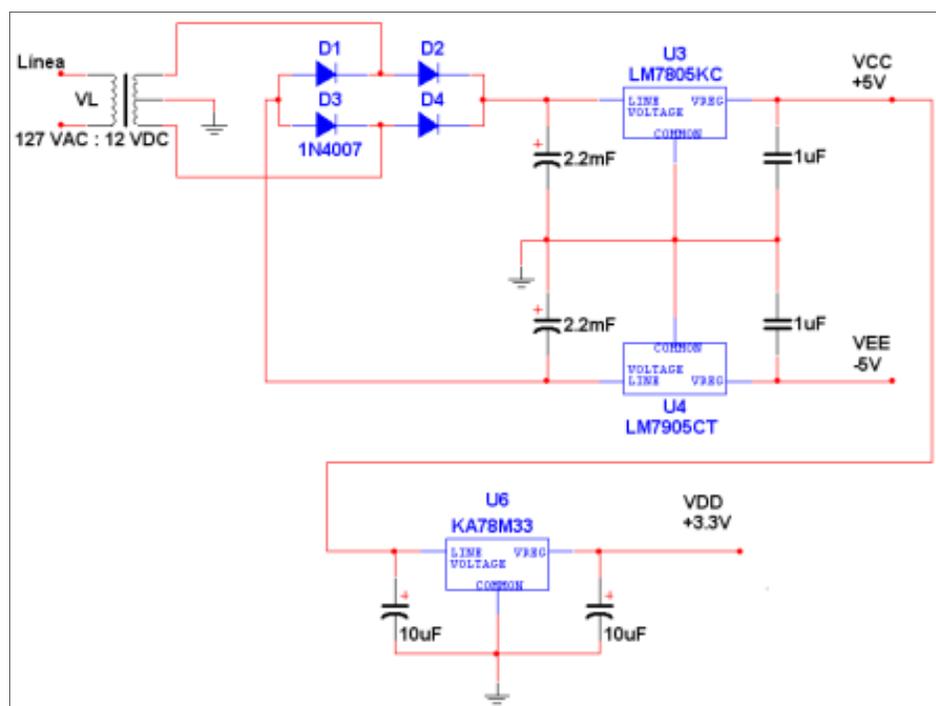


Figura 3.3 Fuente de alimentación del sistema.

3.3 Sensado y acondicionamiento de señales

Uno de los elementos más importantes para cualquier proceso de instrumentación lo constituye el sensor o transductor, ya que es el elemento que tiene contacto directo con la propiedad física que se quiere cuantificar. Como sucede en la medición de cualquier variable, existen muchos modelos de sensores disponibles en el mercado que se pueden diferenciar tanto en el principio de funcionamiento, el precio, la exactitud, el tamaño, etc. y por lo tanto es necesario tomar en cuenta las necesidades muy particulares de la aplicación a realizar.

¹ Voltaje de rizo (*ripple*): es la pequeña componente de alterna que queda tras rectificarse una señal a corriente continua.

² Voltaje de dropout: es la mínima diferencia de tensión entre la entrada no regulada y la salida regulada, dentro de la que el circuito es capaz de regular dentro de sus especificaciones.

3.3.1 Medición de la señal de voltaje

Para la instrumentación electrónica del voltaje muestra, lo único necesario para sensar la señal es un transformador reductor que nos permita, además de protegernos contra descargas y regular la entrada de corriente, trabajar con un valor más pequeño de voltaje y hacer más sencillo que se cumplan las características necesarias para su entrada al Microcontrolador. La Figura 3.4 ilustra el circuito para la medición de voltaje, el cual consta de las siguientes etapas:

- Toma de muestras
- Escalamiento
- Filtrado

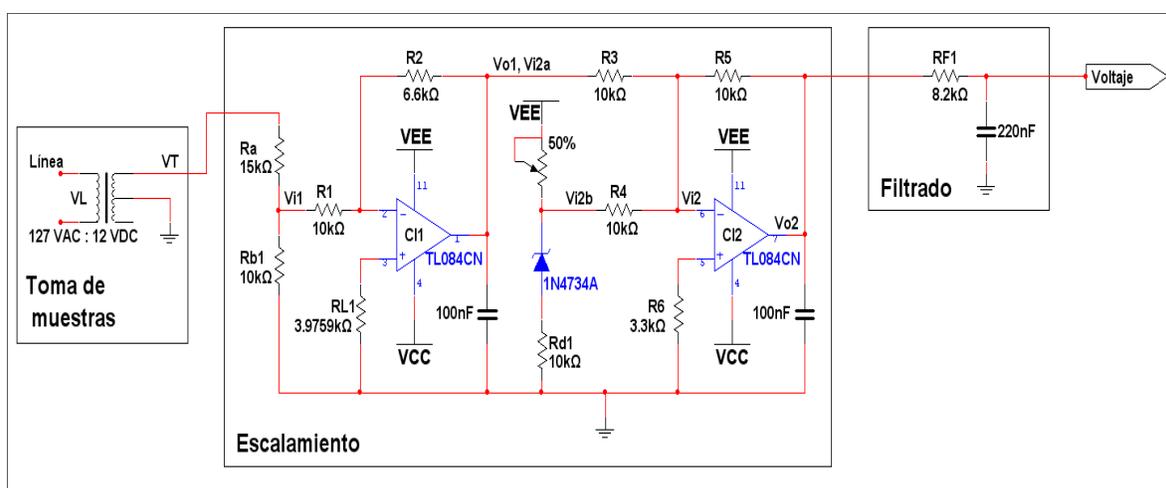


Figura 3.4 Circuito electrónico para la instrumentación de la señal de voltaje.

Toma de muestras

Debido a que la señal de entrada al Microcontrolador debe cumplir con un rango de voltaje de 0 a 3.3 Volts ^[e], es necesario reducir el voltaje de línea con un transformador, el cual a su vez dará protección y alimentará a todo el sistema. Para este caso, se utilizó un transformador con las siguientes características:

- Derivación (TAP) central
- 127 Vca de entrada
- 12 Vca de salida
- 1.2 A de corriente

A la salida de dicho transformador, se tomaron las muestras de voltaje (V_T) cuyo valor nominal máximo es de 6 Vac, sin embargo como dicho valor no es exacto, fue necesario medir dicho voltaje para obtener la relación de transformación real. Para esto, fue utilizado un multímetro digital cuyas mediciones se encuentran contenidas en la Tabla 3.1.

| | |
|---|-------------------------|
| | Fluke 16 ^[i] |
| $V_{\text{Línea}} [V_{\text{RMS}}]$ | 118.30 |
| $V_T [V_{\text{RMS}}]$ | 6.62 |
| Relación $\left(\frac{V_L}{V_T}\right)$ | 17.87 |

Tabla 3.1 Relación de transformación experimental.

Por otro lado, para saber qué tipo de escalamiento es necesario para la señal de voltaje, es preciso escoger el rango en el secundario del transformador de 0 a 127 V_{acRMS} , por lo tanto, el valor máximo de V_T es:

$$V_{T\text{máx}} = \frac{127 V_{\text{RMS}}}{17.87} = \frac{179.605 V_{\text{pico}}}{17.87} = 10.051 \cong 10 V_{\text{pico}}$$

Valor que será utilizado para los cálculos de escalamiento posteriores y cuya forma de onda se muestra en la Figura 3.5a.

Escalamiento

Con el fin de escalar correctamente la señal de voltaje tomada de las muestras a la salida del transformador, es necesario disminuirla aún más debido a que los amplificadores operacionales utilizados ^[k] serán energizados con $\pm 5 V_{\text{DC}}$ y por lo tanto la señal en su entrada no puede ser mayor a dichos valores. Esto se logró utilizando un divisor de tensión con la siguiente relación:

$$\frac{V_{i1}}{V_T} = \frac{R_b}{R_a + R_b} = 0.25 \quad (3.1)$$

Utilizando la ecuación 3.1 para el valor $V_{T\text{máx}}$, se obtuvo que $V_{i1} = 2.5 V_{\text{pico}}$, (Figura 3.5b).

A continuación, se hace pasar a la señal por un amplificador operacional en configuración no inversora ^[j] para disminuirla aún más¹, cuya función de transferencia es:

$$V_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} V_{i1} \quad (3.2)$$

Ecuación con la cual se obtiene la ganancia (G_1) tal que cumpla con los 3.3 V requeridos:

$$G_1 = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{6.6\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} = -0.66$$

¹ Recuérdese que con la configuración no inversora no se logran ganancia menores a uno.

La Figura 3.5c muestra la señal de voltaje obtenida a la salida (V_{o1} o V_{i2a}).

Por último (Figura 3.5d), se inyecta la señal de voltaje (V_{o1}) a un segundo amplificador operacional en configuración sumadora inversora¹ para invertirla de nuevo y además sumarle un offset¹ de $1.65 V_{DC}$ sin ninguna ganancia ($R_3 = R_4 = R_5$) utilizando la siguiente función de transferencia:

$$V_{o2} = -\frac{R_5}{R_3} (V_{o1} + V_{i2b}) \quad (3.3)$$

$$G_2 = \frac{V_{o2}}{(V_{o1} + V_{i2b})} = -\frac{R_5}{R_3} = -\frac{10k\Omega}{10k\Omega} = 1$$

La Resistencia R_6 se obtuvo con $R_3 \parallel R_4 \parallel R_5$.

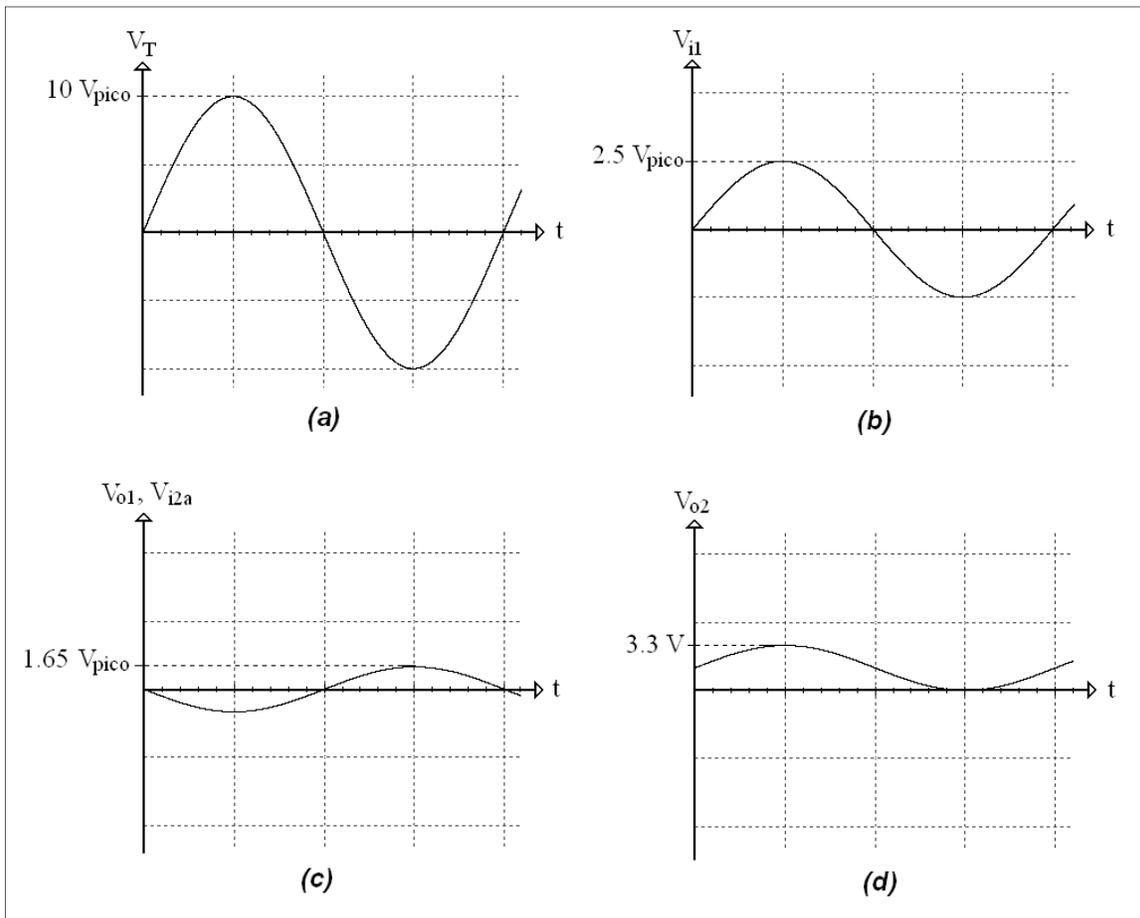


Figura 3.5 Acondicionamiento de la señal de voltaje. (a) A la salida del transformador. (b) A la salida del divisor de tensión. (c) A la salida de la configuración inversora. (d) A la salida de la configuración sumadora inversora.

¹ Utilizando un diodo zener para mayor estabilidad.

Filtrado

En todo proceso de instrumentación pueden existir señales indeseables que contaminan nuestra variable a las que se les conoce con el término genérico de ruido eléctrico y es importante tomar en cuenta las técnicas para su eliminación en la medida de lo posible.

Ya que la frecuencia que se maneja en este trabajo es baja (60 Hz) e igual para las 2 señales (Voltaje y Corriente), se decidió añadir un filtro RC paso-bajas para eliminar frecuencias mayores a 90 Hz aproximadamente, lo cual ayudó bastante a reducir el ruido presente en las señales.

La frecuencia de corte del filtro se calculó de la siguiente manera:

$$f_c = \frac{1}{2\pi(8200\Omega)(220\text{nF})} = 88.223 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

3.3.2 Medición de la señal de corriente

Para el acondicionamiento de la señal de Corriente, es necesario pasar por las siguientes etapas (Figura 3.6):

- Toma de muestras
- Escalamiento
- Filtrado

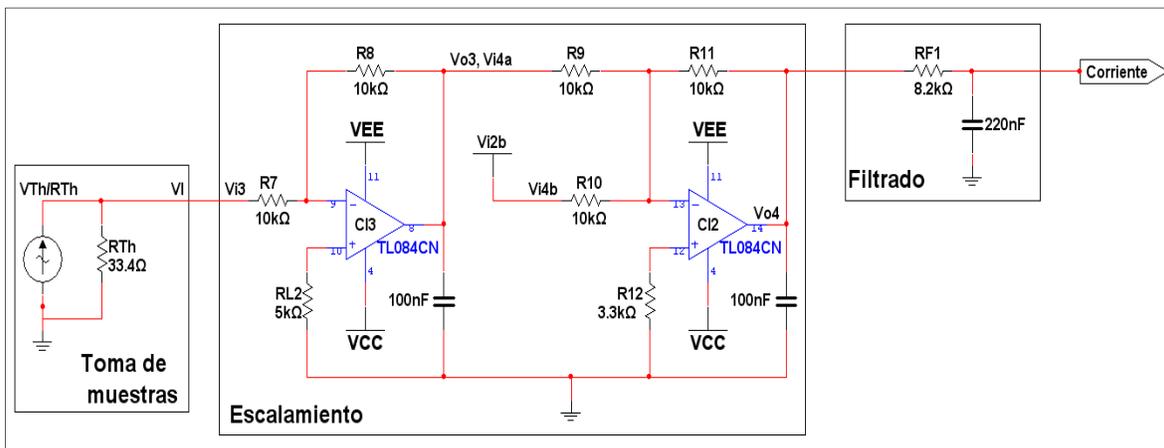


Figura 3.6 Circuito electrónico para la instrumentación de la señal de corriente.

Toma de muestras

Ya que al transformador de corriente se le puede considerar como una fuente de corriente, es posible agregarle una resistencia en paralelo (Figura 3.7a) para obtener un circuito Norton ^[H], el cual, al aplicarle el teorema de Thévenin ^[H] da como resultado el circuito expuesto en la Figura 3.7b, que resulta ser una fuente de voltaje de donde obtendremos las muestras (V_i).

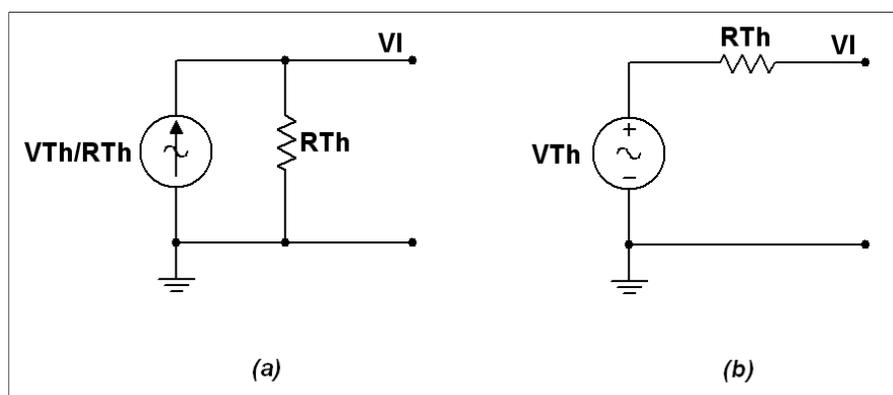


Figura 3.7 Toma de muestras de la señal de corriente. (a) Circuito Norton. (b) Circuito Thévenin.

A continuación, es necesario establecer que el rango de corriente es de 0 a $35 A_{acRMS}^1$, y por lo tanto, el valor máximo es:

$$I_{m\acute{a}x} = 35 A_{RMS} = 49.497 A_{pico} \cong 50 A_{pico}$$

Ahora para obtener el voltaje V_I máximo equivalente solamente se aplica la siguiente conversión:

$$V_{Im\acute{a}x} = \left(\frac{I_{m\acute{a}x}}{1000} \right) R_{Th} \quad (3.5)$$

Que da como resultado:

$$V_{Im\acute{a}x} = \left(\frac{50 A_{pico}}{1000} \right) 33 \Omega = 1.65 V_{pico}$$

Valor que será utilizado para los cálculos de escalamiento posteriores y cuya forma de onda se muestra en la Figura 3.8a.

Escalamiento

Cabe subrayar que el valor equivalente al máximo de corriente ($V_{Im\acute{a}x}$) ya cumple con los 3.3 Volts necesarios para la entrada del Microcontrolador y no es necesario ningún escalamiento ($R_7 = R_8 = R_9 = R_{10} = R_{11}$), sin embargo al igual que en el acondicionamiento de la señal de voltaje, se decidió hacer pasar a la señal de corriente por dos amplificadores operacionales en configuraciones inversora y sumadora inversora respectivamente, para obtener a la salida una señal con un offset de $1.65 V_{DC}$, ya que la señal debe ser mayor a cero volts como se muestra en la Figura 3.8b.

La Resistencia R_{12} se obtuvo con $R_9 \parallel R_{10} \parallel R_{11}$.

¹ Valor suficiente para la mayoría de usos residenciales.

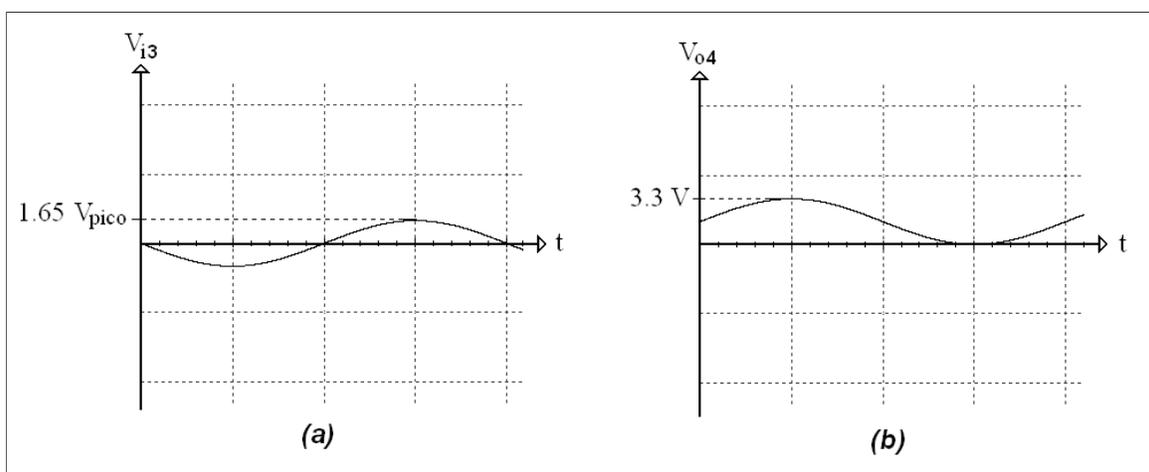


Figura 3.8 Acondicionamiento de la señal de corriente. (a) A la salida del transformador. (b) A la salida de la configuración sumadora inversora.

Filtrado

El filtro utilizado para la señal de corriente es el mismo que el utilizado para la señal de voltaje.

3.4 Microcontrolador

Una de las partes básicas del sistema de monitoreo la representa el Microcontrolador, el cual se encarga de coordinar las etapas de sensado, almacenamiento y comunicación con la PC.

3.4.1 Diseño y Construcción

Para cumplir con las especificaciones del proyecto, es necesario construir las etapas de hardware en las que tenga que ver el Microcontrolador para permitir desarrollar posteriormente el algoritmo de control. Para esto, se decidió armar el sistema en una protoboard y no en una placa impresa para facilitar el cambio y adición de componentes.

3.4.1.1 Requerimientos básicos de conexión

El diseño de cualquier aplicación con el Microcontrolador dsPIC33FJ128GP802, necesita que se tomen en cuenta una serie de requerimientos de conexión para algunos de sus pines (Figura 3.9):

- Es necesario añadir capacitores de desacople de 100nF a todos los pines de V_{DD} , V_{SS} , AV_{DD} , AV_{SS} y V_{DDCORE} alejados un máximo de 6mm.
- Para el pin \overline{MCLR} , cuyas funciones principales son el reinicio y programación del dispositivo, es necesario agregar el arreglo de resistencias R13 y R14 junto con el botón (J1).
- Los osciladores deben estar siempre del mismo lado y a una distancia menor a 12mm que sus respectivos pines. Los capacitores de carga de 22pF deben conectarse junto al oscilador mismo. Como el oscilador primario es de alta frecuencia, se debe conectar una resistencia de 1MΩ en paralelo.
- Los pines de entrada/salida sin utilizar deben ser siempre configurados como salidas y llevados a un estado lógico bajo. Opcionalmente pueden conectarse a V_{SS} por medio de resistencias de 1kΩ a 10 kΩ.

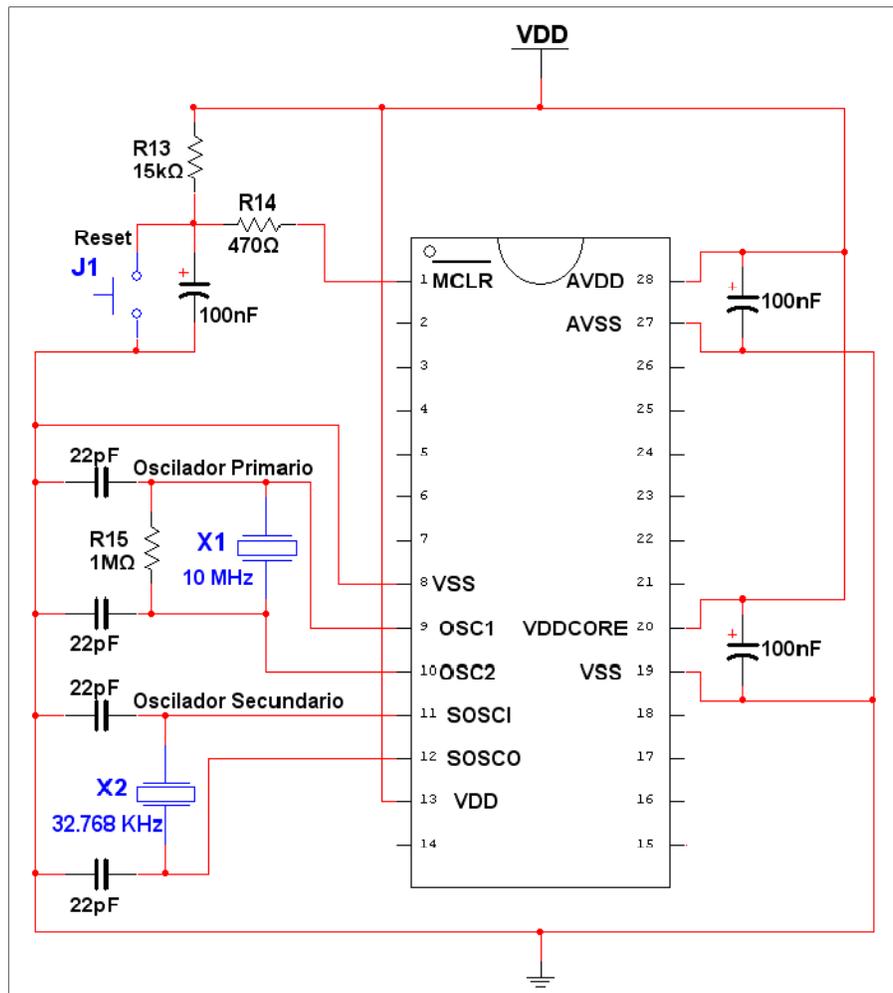


Figura 3.9 Diagrama eléctrico de la conexión básica para el desarrollo de cualquier aplicación en el Microcontrolador dsPIC33FJ128GP802.

3.4.1.2 Almacenamiento

Para la etapa de almacenamiento, es necesario realizar las conexiones de la memoria EEPROM 24LC512 al Microcontrolador siguiendo las especificaciones y recomendaciones del fabricante ^[f], como lo muestra la Figura 3.10.

- Los pines de dirección del chip A0, A1 y A2 (pines 1, 2 y 3 respectivamente) se conectan directamente a tierra, lo que nos indica que la dirección de la memoria es 000, lo cual sirve más adelante para implementar el protocolo de comunicación.
- El pin 4 es V_{SS} y por supuesto también se conecta directo a tierra.
- El pin 5 (Serial Data, SDA) es un pin bidireccional utilizado para transferir direcciones y datos hacia y desde el dispositivo. Requiere una resistencia de pull-up hacia V_{DD} de $10k\Omega$.
- El pin 6 (Serial Clock, SCL) es utilizado para sincronizar la transferencia de datos hacia y desde el dispositivo. También requiere de una resistencia de pull-up hacia V_{DD} de $10k\Omega$.
- El pin 7 (Write-Protect, WP) sirve para permitir o no la operación de escribir en la memoria según su conexión a V_{SS} o V_{DD} . En este caso se conectó a V_{SS} para permitir la escritura de datos.
- Por último el pin 8 es V_{DD} y se conecta directamente a la entrada de voltaje del mismo nombre.

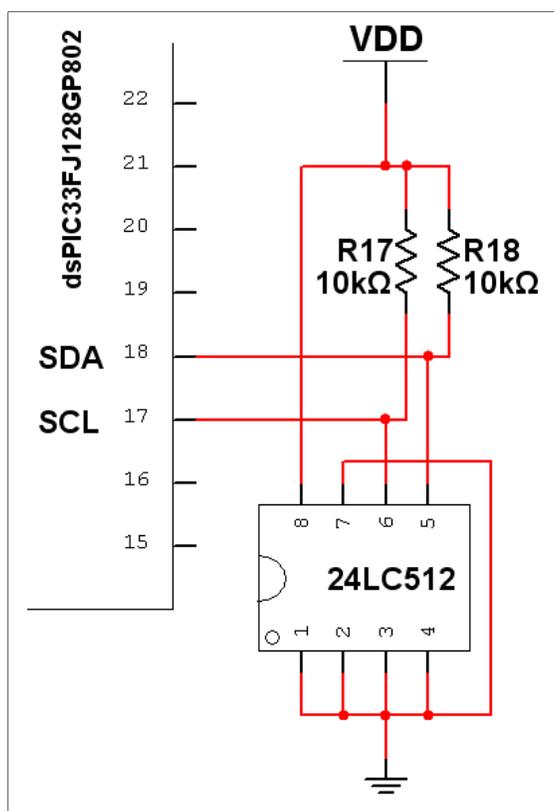


Figura 3.10 Diagrama eléctrico de la conexión entre la memoria EEPROM 24LC512 y el Microcontrolador dsPIC33FJ128GP802.

3.4.1.3 Comunicación USB

La etapa de comunicación entre el Microcontrolador y la PC requiere del uso de un circuito integrado especialmente encargado de agregar una conexión USB para mejorar la compatibilidad del sistema al hacer posible su comunicación con la gran mayoría de equipos de cómputo actuales.

La conexión entre el módulo SDM-USB-QS-S y el Microcontrolador se llevó a cabo siempre siguiendo las recomendaciones del fabricante ^[9], como se observa en la Figura 3.11; sin embargo, se tuvo que tomar en cuenta que dicho módulo viene en un empaque tipo SMD que no cuenta con pines que puedan ser insertados en la protoboard junto con los demás componentes y por lo tanto fue necesario implementarlo en una placa impresa aparte (Figura 3.12a).

- El pin 1 (USB data signal plus, USBDP) se conecta directamente al pin D+ del conector USB tipo b.
- El pin 2 (USB data signal minus, USBDM) se conecta directamente al pin D- del conector USB tipo b.
- El pin 3 (GND) se conecta directamente a la tierra de todo el sistema.
- El pin 4 (V_{CC}) se conecta al voltaje V_{CC} de +5V.
- El pin 6 (RX_IND) se trata de un indicador conectado a un LED que muestra un pulso cuando se reciben datos desde el bus USB.
- El pin 7 (TX_IND) se trata de otro indicador conectado a un LED que muestra un pulso cuando se transmiten datos del bus USB.
- El pin 12 (DATA_OUT) se encarga de transmitir los datos asíncronos al Microcontrolador, mientras que el pin 13 (DATA_IN) se encarga de recibirlos.
- Los pines 5, 8, 9, 10, 11, 14, 15 y 16 no se utilizan para el sistema; sin embargo, en la construcción del circuito impreso se dejaron conectados a bornes (con tornillo) para que estén disponibles para otras aplicaciones (Figura 3.12b).

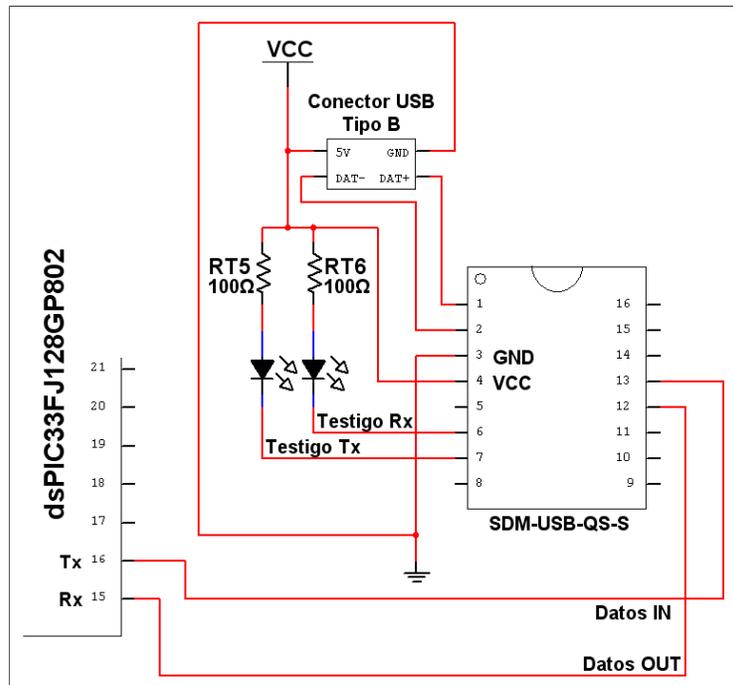


Figura 3.11 Diagrama eléctrico de la conexión entre el módulo USB SDM-USB-QS-S y el Microcontrolador dsPIC33FJ128GP802.

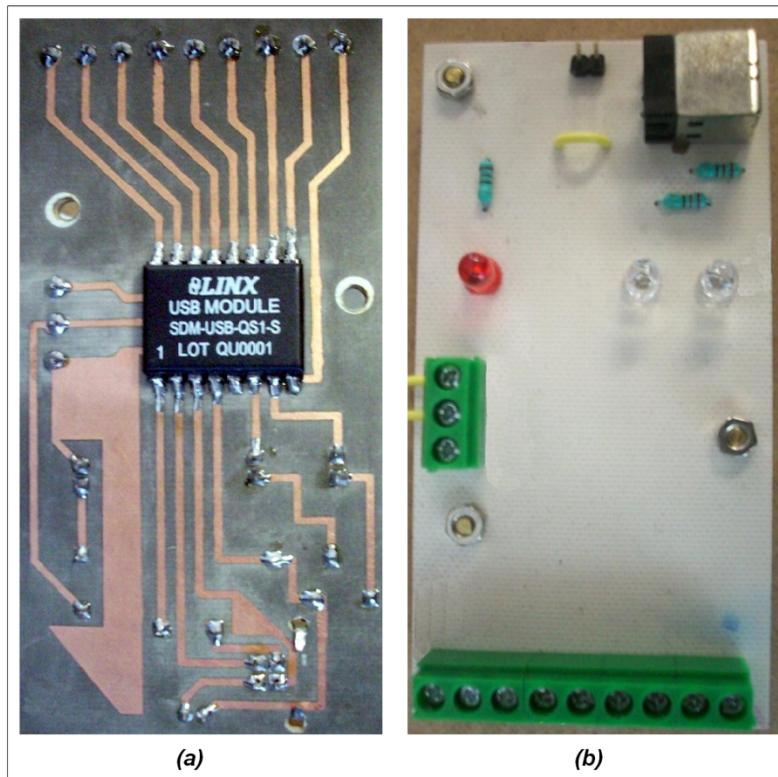


Figura 3.12 Módulo de comunicación USB. (a) Vista superior. (b) Vista inferior.

Finalmente, para ver el diagrama eléctrico completo del sistema, véase el Apéndice B.

3.4.2 Funcionamiento

A continuación, se cubren aspectos acerca de otras fases del desarrollo del sistema muy importantes, que son la conversión analógica-digital, la comunicación del Microcontrolador con dispositivos de almacenamiento, así como con la computadora personal. Lo anterior nos dará los puntos restantes necesarios para desarrollar el algoritmo de control.

3.4.2.1 Conversión analógica-digital

La etapa de conversión de las señales analógicas en digitales es una de las más importantes en el desarrollo de cualquier sistema de medición, por lo cual es necesario tomar decisiones acerca del modo de conversión, tiempo y forma de muestreo, el tipo de conversión y las referencias de voltajes que tomará el convertidor.

Modo de conversión

Para el desarrollo del sistema se escogió una conversión de 10 bits, lo que tomando las referencias de voltaje de 0 a +3.3V, nos lleva a un rango de valores completo (*full range*) de:

$$2^{10} = 1024 \text{ bits} \quad \rightarrow \quad \frac{3.3}{1024} = 3.2227 \left[\frac{mV}{bit} \right]$$

Forma de muestreo

Debido a que es necesario tomar muestras de ambas señales de entrada en el mismo instante, se hizo uso de una conversión simultánea en vez de una conversión secuencial para asegurar que la toma del voltaje y la corriente se llevara a cabo exactamente al mismo tiempo.

Tiempo de muestreo

El tiempo de muestreo utilizado se hizo pensando en que cada ciclo de la señal fuera muestreado 1000 veces, lo que da como resultado (tomando en cuenta que la frecuencia nominal es de 60Hz) que en cada segundo se tomarán 60,000 muestras. Esto nos lleva a calcular el tiempo de muestreo necesario:

$$\frac{1}{60 * 1000} = 1.67 \mu s$$

Por lo tanto, la rutina de muestreo y conversión queda de la siguiente forma:

- Comienza muestreo de ambos canales simultáneamente.
- Espero 1.67 μ s.
- Termina muestreo e inicia conversión.
- Espero 100ns.
- Termina conversión.

Conversión con DMA

Debido a que la conversión requiere ser simultánea, fue necesario el uso del módulo DMA, el cual, sin embargo, nos brinda la ventaja de realizar automáticamente el número de conversiones seguidas que se requieran (hasta un máximo de 1024) ya que cuenta con dos búferes para almacenar datos y puede trabajar en modo “ping-pong” pasando de uno a otro. Lo anterior se logra con una interrupción que se genera cada número determinado de conversiones indicadas por el programador. Para este caso, se decidió que el DMA generara una interrupción cada dos conversiones.

La forma en la que el módulo DMA guarda los datos en RAM es llamada Register Indirect Addressing y se ilustra en la Figura 3.13, donde se trata de una conversión de 4 señales (AN0-AN3).

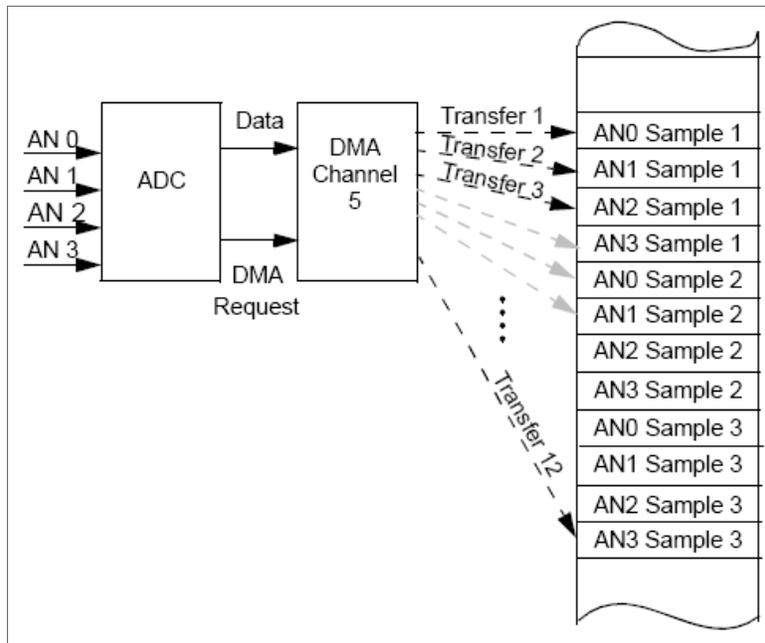


Figura 3.13 Transferencia de datos desde el módulo ADC con Register Indirect Addressing.

3.4.2.2 Protocolo de comunicación I²C

Otra parte importante en cualquier sistema de medición es el almacenamiento de datos, el cual resulta imprescindible en el caso del sistema de monitoreo desarrollado ya que brinda la libertad de poder trabajar en forma independiente con una memoria externa de mucho mayor tamaño que con la que cuenta el Microcontrolador.

El trabajo desarrollado con la memoria EEPROM 24LC512 y el módulo I2C se realizó pensando en un ambiente de comunicación entre solamente un Maestro y solamente un Esclavo (Microcontrolador y memoria respectivamente) y un modo de operación de 10 bits de tamaño de dirección.

Escritura

El proceso de escritura en memoria se muestra en la Figura 3.14.

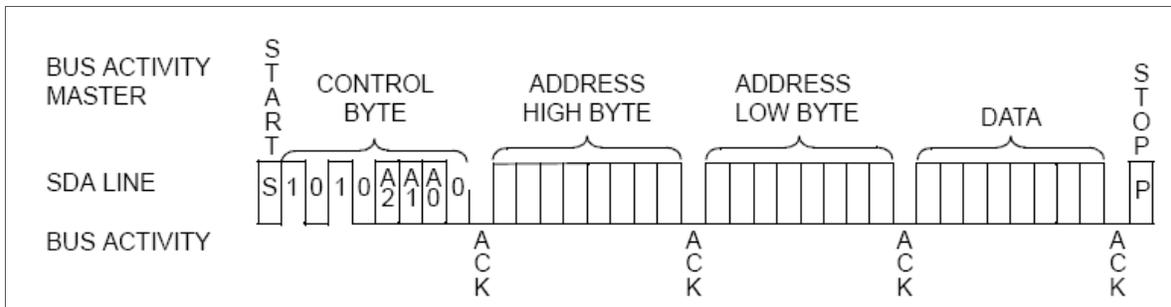


Figura 3.14 Secuencia para la escritura de datos en memoria EEPROM.

- El proceso comienza con una señal de comienzo (S) por parte del maestro
- El maestro manda el byte de control que consiste en:
 - 1010 – código de control genérico
 - A2, A1 y A0 – bits de selección de dispositivo (000 en este caso)
 - 0 – bit de selección de lectura/escritura (RW)
 - RW = 0 maestro transmite, esclavo recibe
 - RW = 1 esclavo transmite, maestro recibe
- El esclavo manda señal de reconocimiento (ACK)
- El maestro manda el byte más significativo de la dirección de la memoria a la que quiere escribir
- El esclavo manda señal de reconocimiento (ACK)
- El maestro manda el byte menos significativo de la dirección de la memoria a la que quiere escribir
- El esclavo manda señal de reconocimiento (ACK)
- El maestro manda el dato a guardar
- El esclavo manda señal de reconocimiento (ACK)
- El proceso termina con una señal de término (P) por parte del maestro

Cabe mencionar que en el algoritmo desarrollado se programó una subrutina en donde si llega a fallar la lectura o escritura, se realice un reintento. Esto con la finalidad de que si existe algún problema momentáneo con el dispositivo, no se pierda el dato que se planea almacenar.

Lectura

Por otra parte, el proceso de lectura desde la memoria se muestra en la Figura 3.15.

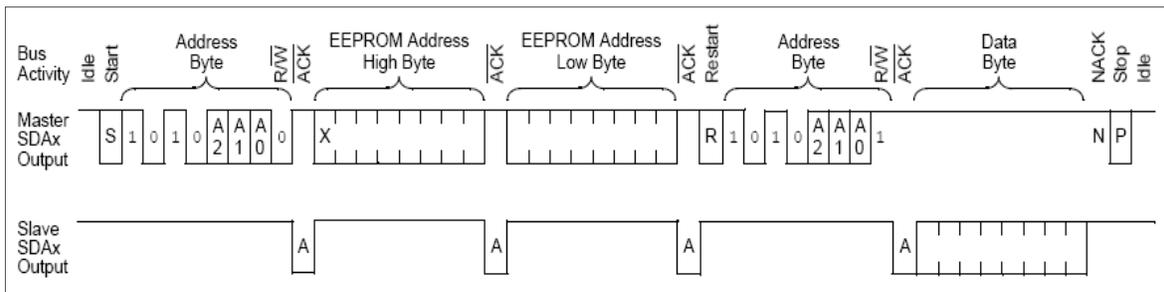


Figura 3.15 Secuencia para la lectura de datos en memoria EEPROM.

- El proceso comienza con una señal de comienzo (S) por parte del maestro
- El maestro manda el byte de control que consiste en:
 - 1010 – código de control genérico
 - A2, A1 y A0 – bits de selección de dispositivo (000 en este caso)
 - 0 – bit de selección de lectura/escritura (RW)
 - RW = 0 maestro transmite, esclavo recibe
 - RW = 1 esclavo transmite, maestro recibe
- El esclavo manda señal de reconocimiento (ACK)
- El maestro manda el byte más significativo de la dirección de la memoria a la que quiere escribir
- El esclavo manda señal de reconocimiento (ACK)
- El maestro manda el byte menos significativo de la dirección de la memoria a la que quiere escribir
- El esclavo manda señal de reconocimiento (ACK)
- El maestro manda una señal de reinicio (R)
- El maestro manda el byte de control pero esta vez RW = 1 esclavo transmite, maestro recibe
- El esclavo manda señal de reconocimiento (ACK) y el dato almacenado
- El maestro manda señal de reconocimiento (NACK)
- El proceso termina con una señal de término (P) por parte del maestro

Debido a que los datos que se reciben del convertidor son de 10 bits y en la memoria solamente es posible almacenar datos de 8 bits, fue necesario dividir los números en sus partes más y menos significativa. Esto conlleva que en la parte de lectura, se tengan que recuperar dos datos y luego se tengan que concatenar.

3.4.3 Programa ^[J]

En esta sección se hace una descripción del algoritmo desarrollado para el Microcontrolador que abarca las etapas de configuración e inicialización de los diferentes módulos, la conversión de las señales analógicas a digitales, el almacenamiento de los datos del gasto de energía eléctrica y el flujo bidireccional de datos con la PC.

La operación general del sistema se controla por medio de la rutina principal (Main) y el manejo de la interrupción que genera el algoritmo implementado en la PC por medio del módulo de recepción de datos asíncronos UART Rx.

3.4.3.1 Rutina principal

A continuación se presenta una explicación de los bloques que componen la rutina principal o Main, con base en la Figura 3.16.

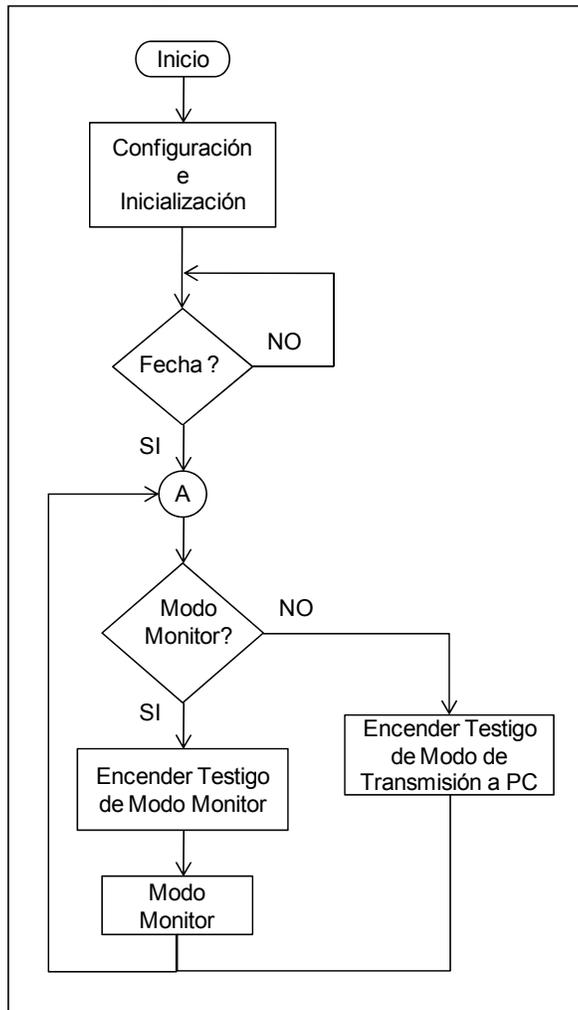


Figura 3.16 Diagrama de flujo de la rutina principal del algoritmo del Microcontrolador.

Configuración e Inicialización

Este bloque ejecuta las instrucciones que inicializan las condiciones generales de funcionamiento del sistema por medio de la manipulación de sus respectivos registros. Esta inicialización comprende las siguientes operaciones:

- Configuración del reloj del sistema (osciladores externos primario y secundario).
- Configuración del módulo Reloj y Calendario en Tiempo Real (RTCC).
- Configuración del módulo Convertidor Analógico Digital (ADC).
- Configuración del módulo Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (UART).
- Configuración del módulo de Circuitos Inter-Integrados (I²C).
- Puesta a cero de todas las variables utilizadas.
- Puesta a cero de las entradas iniciales.

Programación de la fecha del sistema

En este bloque se espera la interrupción que genera la PC al solicitar al usuario que proporcione la fecha real. Así, al atenderse la petición de interrupción, el Microcontrolador llama a la rutina encargada de programar la fecha.

Modo de Trabajo

Una vez que se tiene la Fecha y la inicialización ha sido completada, existen dos posibilidades de que trabaje el sistema: en modo monitor o en transmisión a PC. Esto se logra sabiendo la posición de un botón conectado al Microcontrolador¹.

3.4.3.2 Modo monitor

En el modo medidor, el sistema se encontrará en todo momento recolectando muestras de las señales analógicas de voltaje y corriente para calcular, por medio de una subrutina, el valor pico de ambas señales e ir calculando a la vez su promedio.

Por otro lado, otra subrutina se encarga de medir el ángulo de desfase entre las señales junto con su respectivo promedio.

La obtención del desfase se logra de la siguiente manera:

- Como se tomarán 1000 muestras por ciclo de señal y tomando en cuenta que dichas muestras equivalen a 360°, se tiene que cada muestra equivale a 0.36°.
- Como base de tiempo, se tiene un contador que cada que se toma una muestra del convertidor analógico-digital aumenta una unidad y se reinicia cada hora.

¹ Véase el punto 3.7, Manejo del sistema.

- Cuando se encuentre un pico de voltaje, se seguirán tomando muestras hasta que haya un cruce por cero, en ese momento, se toma el número de muestras (tiempo 1).
- Cuando se encuentre un pico de corriente, se seguirán tomando muestras hasta que haya un cruce por cero, en ese momento, se toma el número de muestras (tiempo 2).
- Una vez encontrados ambos tiempos, se obtiene el desfase mediante el valor absoluto de su diferencia, lo cual permite que se calcule el desfase correcto aunque la corriente adelante (Figura 3.17a) o atrase (Figura 3.17b) al voltaje.

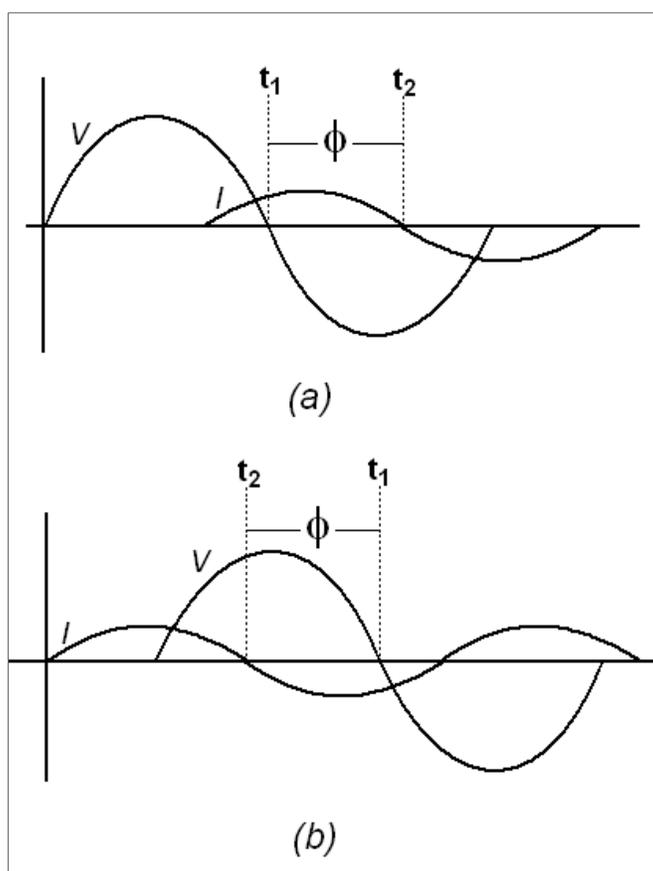


Figura 3.17 Obtención del ángulo de desfase. (a) La corriente adelanta al voltaje. (b) La corriente atrasa al voltaje.

Finalmente, cada hora el módulo RTCC generará una interrupción para que en ese momento los datos de *Fecha*, *Promedio de Voltajes Pico*, *Promedio de Corrientes Pico* y *Promedio de Desfase*, se almacenen en la memoria EEPROM para ser recuperados más adelante por la PC.

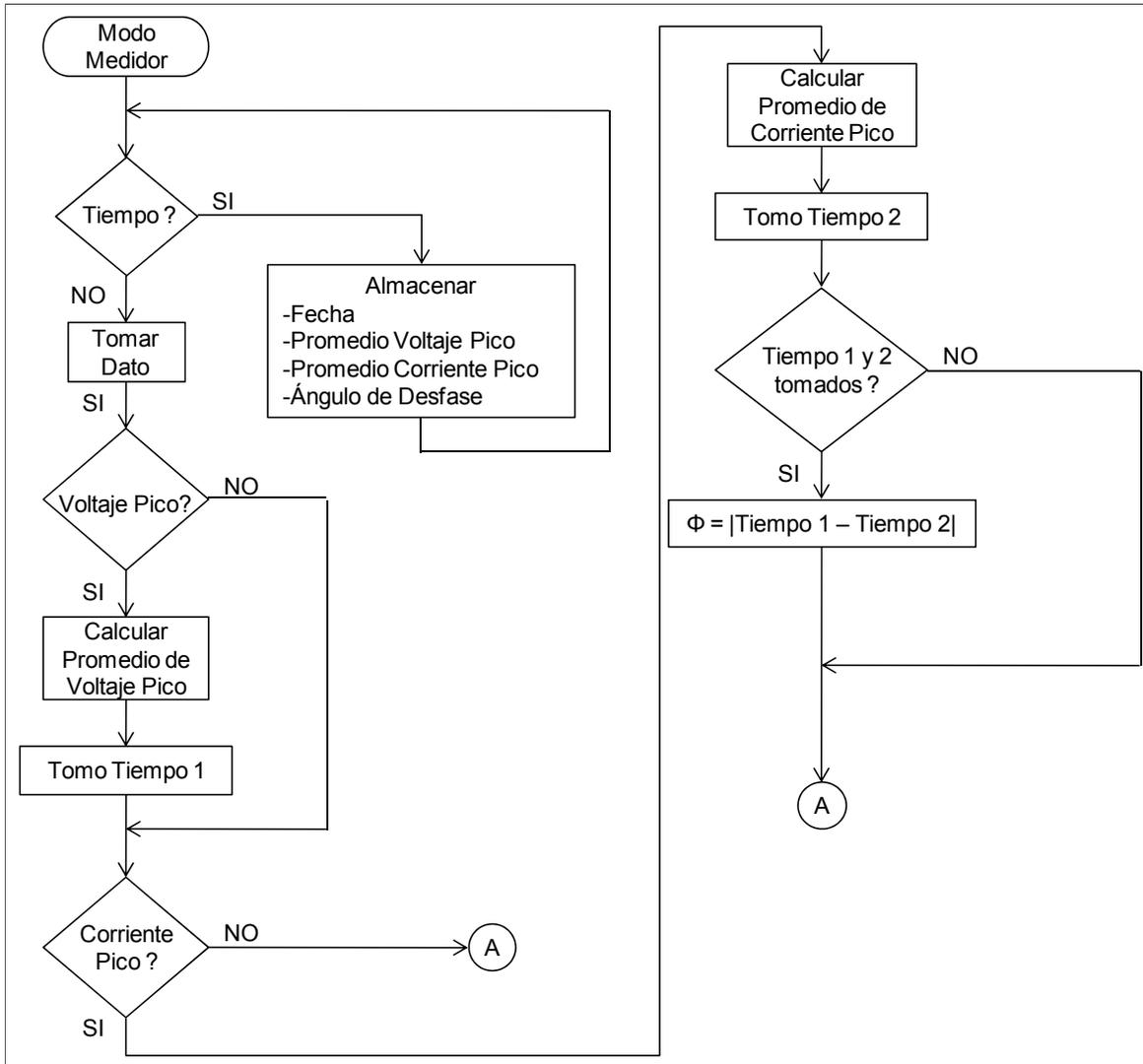


Figura 3.18 Diagrama de flujo de la rutina en modo embebido.

3.4.3.3 Modo de transmisión a PC

La rutina de interrupción del módulo UART Rx se encarga de llevar a cabo el control de este modo de operación mediante el caracter que sea recibido desde la PC.

Como se observa en el diagrama de flujo de la Figura 3.19, si el caracter es 'T', el Microcontrolador comenzará a transmitir los datos de las señales de *Voltaje* y *Corriente* hacia la PC hasta que se reciba una 'S' que detenga la transmisión.

Para el caso de la transmisión hacia la PC de los datos guardados en la EEPROM, primero se recibe una 'D' para enviar el número de datos y a continuación el caracter 'M' transmitirá los datos de *Fechas*, *Promedios de Voltajes Pico*, *Promedios de Corrientes Pico* y *Promedios de Ángulos de Desfase* almacenados en la memoria EEPROM.

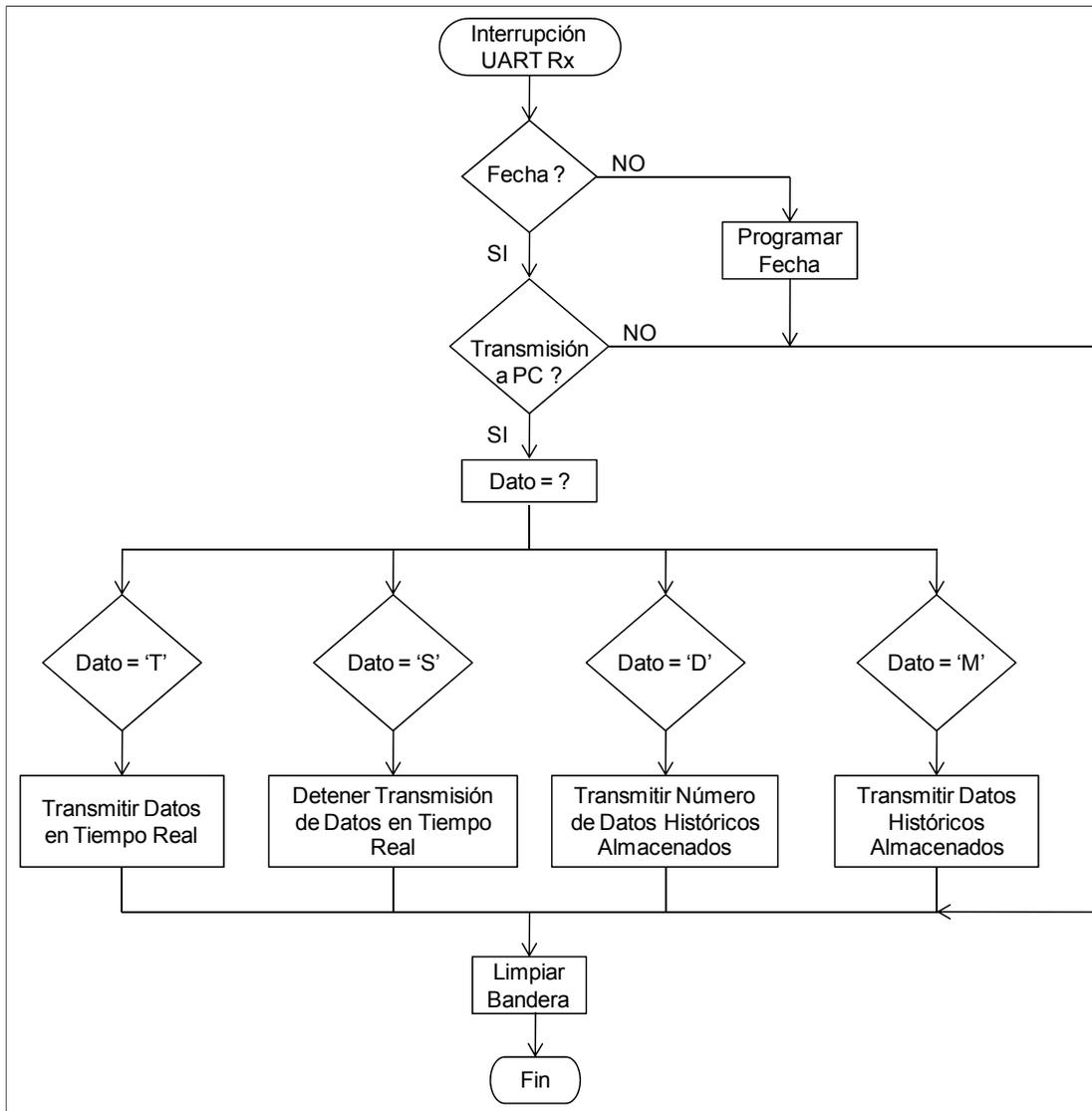


Figura 3.19 Diagrama de flujo de la rutina de interrupción del módulo UART Rx.

3.5 PC

La otra parte básica del sistema es la computadora personal, la cual se encarga de llevar a cabo las etapas de comunicación con el Microcontrolador, la recuperación de datos almacenados durante el monitoreo, el despliegue de datos en tiempo-real de las señales sensadas, el almacenamiento de datos en archivos para su posterior análisis y el cálculo de las tarifas a pagar por el consumo de energía eléctrica; todo esto, por medio de una interface gráfica interactiva.

Los archivos ejecutables de los que consta el sistema son dos:

- Fecha.exe
- Principal.exe

3.5.1 Programa

En esta sección se hace una descripción del algoritmo desarrollado para la PC que provoca la interacción del usuario con el sistema de monitoreo.

La operación desde la PC consta de cuatro fases:

- Instalación de los drivers o controladores necesarios para la comunicación USB y la programación de la fecha necesaria para que el sistema cuente con los parámetros de tiempo reales.
- Interface en modo de recuperación, encargada de la recuperación de datos almacenados en la memoria EEPROM del sistema, el despliegue de estos por medio de gráficas y su posterior almacenamiento en un archivo previamente seleccionado por el usuario.
- Interface en modo de comunicación en tiempo-real que se encarga de desplegar las señales sensadas, así como sus valores eficaces emulando un multímetro. Esta fase también se encarga de almacenar los datos de las señales en un archivo también previamente seleccionado por el usuario.
- Interface en modo de facturación donde el usuario podrá observar el gasto total de energía y su monto correspondiente.

3.5.1.1 Instalación

Instalación de controladores

Como en todo sistema que trabaje en conjunto con una PC, el primer paso a seguir para su correcto funcionamiento, es la instalación de los drivers necesarios para que el hardware sea reconocido por la computadora.

En este caso, al conectar por primera vez el sistema de monitoreo, la PC instantáneamente reconocerá el módulo de comunicación SDM-USB-QS-S y desplegará la ventana del asistente para nuevo hardware encontrado, por lo que damos clic en “Siguiente >” en las dos ventanas siguientes como lo muestran las Figuras 3.20a y 3.20b.

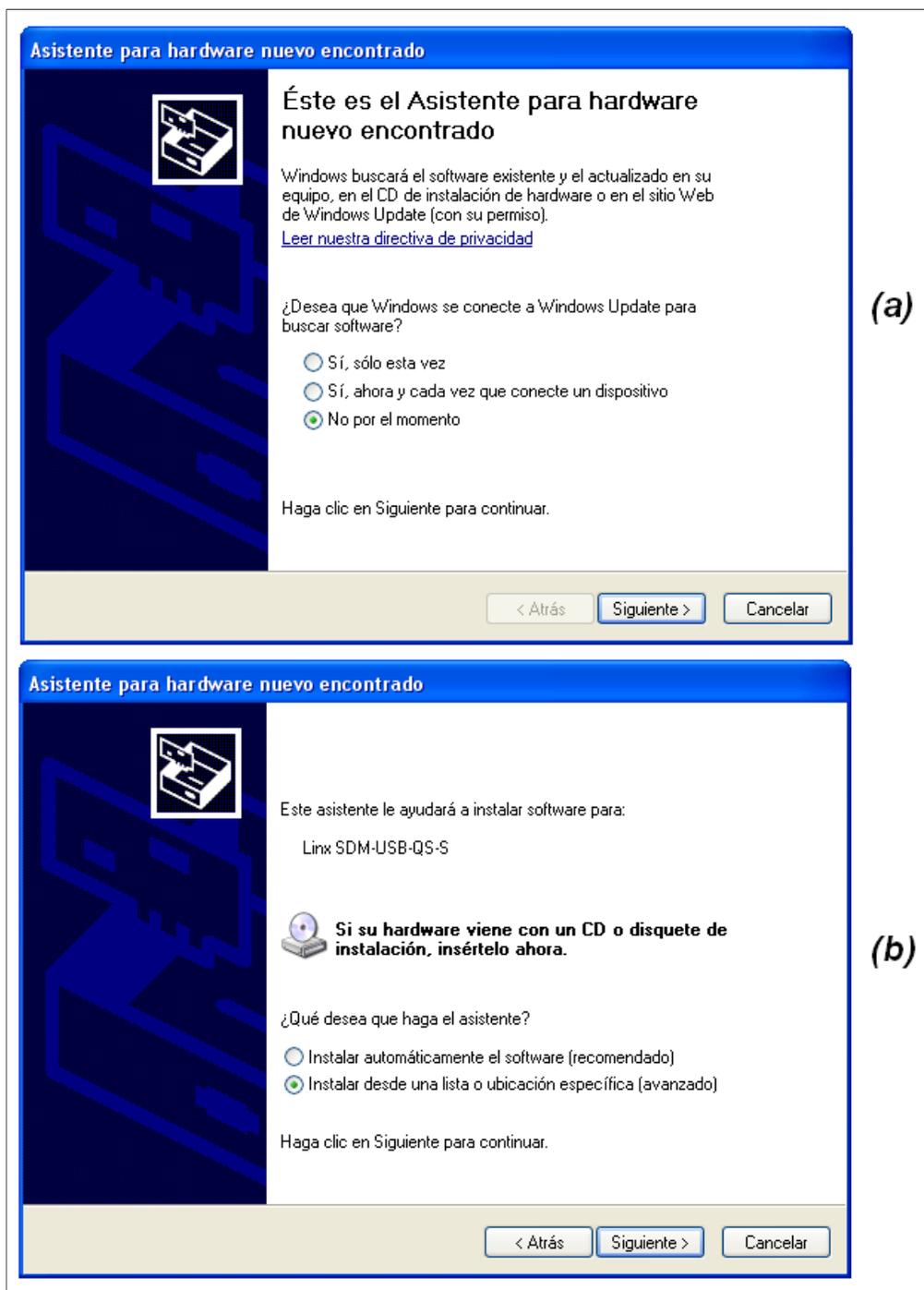


Figura 3.20 Instalación de controladores.

A continuación, se debe proporcionar el lugar donde se encuentra la carpeta que contiene los controladores (“Drivers SDM-USB-Qs1-S”) como se ve en la Figura 3.21a y dar clic en “Siguiente >”. Por último damos clic en “Finalizar” cuando todo ha salido correctamente (Figura 3.21b).

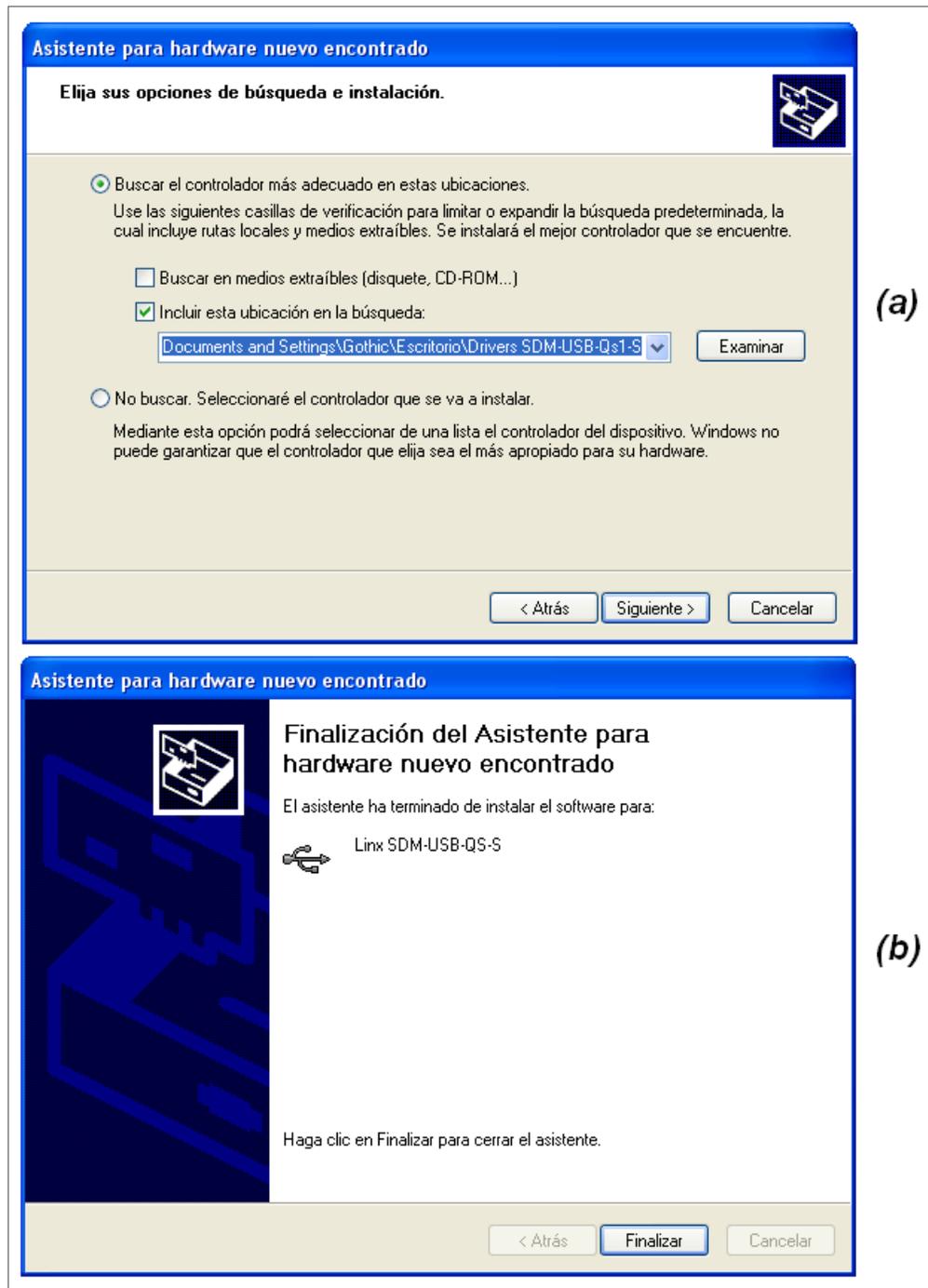


Figura 3.21 Instalación de controladores.

Si durante la instalación aparece el mensaje de la Figura 3.22 solamente se dará clic en “Aceptar”.

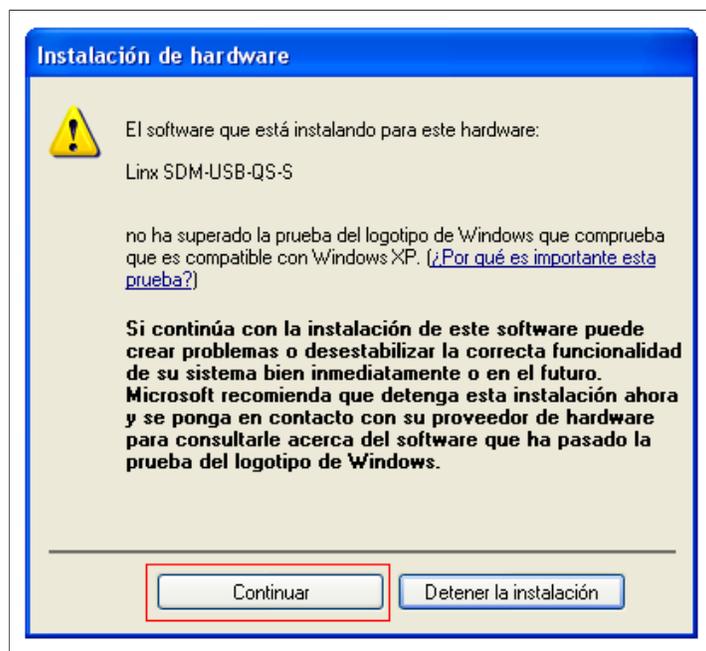


Figura 3.22 Instalación de controladores.

Programación de la fecha y hora

Ya que el sistema se encarga de medir el gasto de energía eléctrica, resulta necesario que se cuente con la fecha y hora reales para que los datos medidos tengan coherencia y así poder obtener el monto total en pesos correspondiente a un periodo de tiempo dado.

Para esto, se realizó un algoritmo (archivo ejecutable "Fecha.exe") que transmitiera la hora y fecha escogidas por el usuario de una forma interactiva, como lo muestra la Figura 3.23.

El proceso para la programación de la hora y fecha es el siguiente:

- El usuario deberá escoger el puerto USB correspondiente al sistema (Figura 3.24a).
- El usuario seleccionará el año, mes, día, día de la semana, horas y minutos utilizando los botones deslizables respectivos.
- El usuario presionará el botón "Aceptar" para enviar al Microcontrolador los datos (Figura 3.24b).
- El usuario recibirá un aviso de que la Fecha ha sido programada con éxito y deberá presionar el botón de "OK", véase la Figura 3.25.

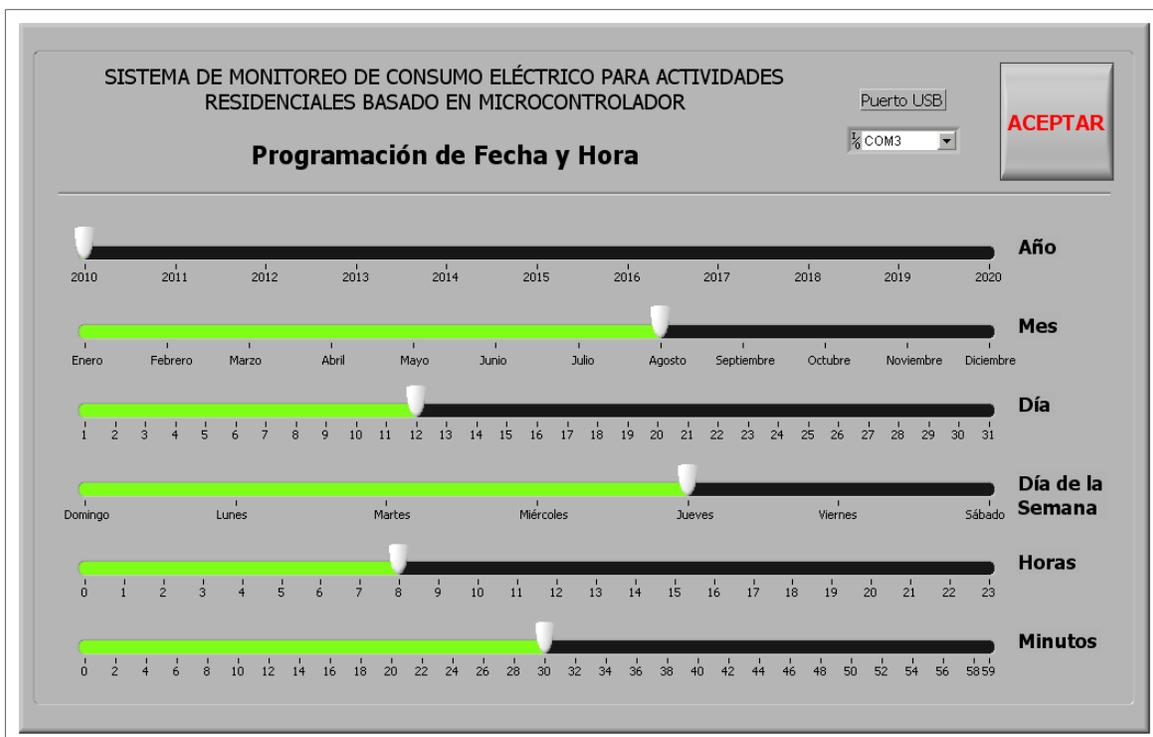


Figura 3.23 Interface gráfica interactiva para la programación de la fecha y hora del sistema.

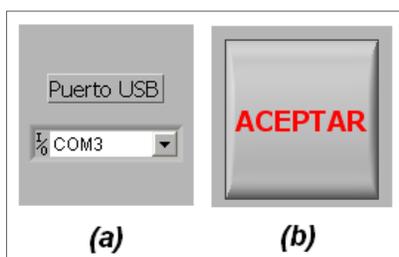


Figura 3.24 Programación de la fecha y hora del sistema. (a) Selección del puerto USB. (b) Botón para transmisión.



Figura 3.25 Aviso de programación exitosa.

Con esto, la fecha del sistema ya ha sido recibida, lo que permitirá comenzar con el funcionamiento de monitoreo¹.

¹ Véase el punto 3.7, Manejo del sistema.

3.5.1.2 Rutina principal

Al ejecutar el archivo “Principal.exe”, el funcionamiento del algoritmo de la PC es controlado por una función principal cuyo diagrama de flujo se encuentra plasmado en la Figura 3.26.

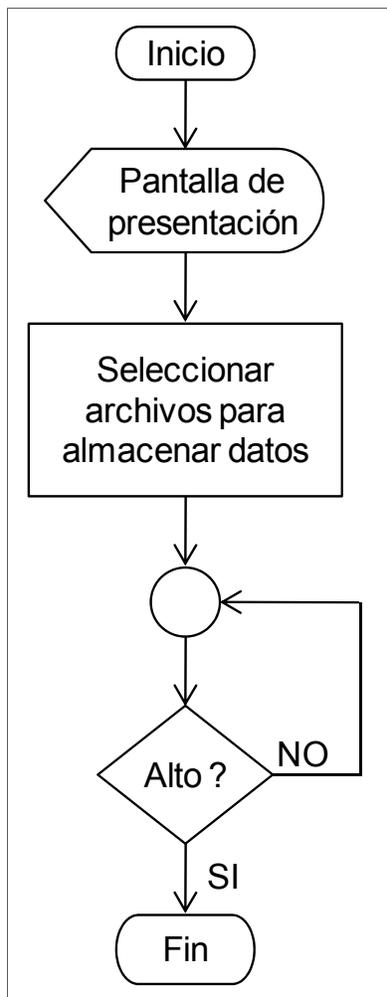


Figura 3.26 Diagrama de flujo de la rutina principal de la interface gráfica para la PC.

A continuación se presenta una explicación de los bloques que componen la rutina principal.

Pantalla de presentación

Al ejecutar el programa, el primer paso es el despliegue de una pantalla de presentación, mostrada en la Figura 3.27, la cual se cierra al presionar el botón “Aceptar”.

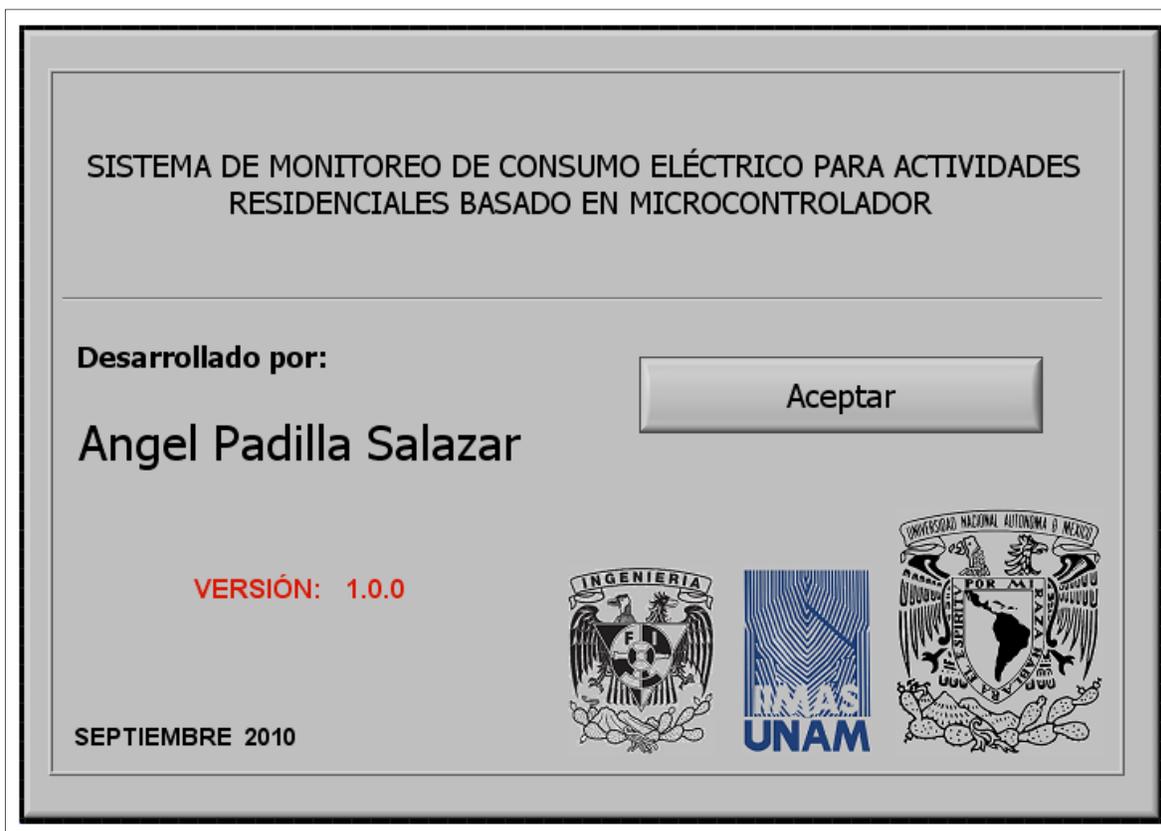


Figura 3.27 Pantalla de presentación de la interface gráfica para la PC.

Selección de archivos para almacenar datos

Una vez cerrada la pantalla de presentación, el programa despliega un aviso para el usuario (Figura 3.28a) el cual se cierra presionando el botón "OK". A continuación, el usuario debe seleccionar un archivo de texto ya existente o el nombre de un archivo nuevo¹ para almacenar los datos en Tiempo-Real (Figura 3.28b). Después de esto, se requiere al usuario llevar a cabo los pasos anteriores pero para el archivo que almacene los datos históricos (Figura 3.28c,d).

¹ Recuérdese agregar al nombre del archivo la extensión `.txt`

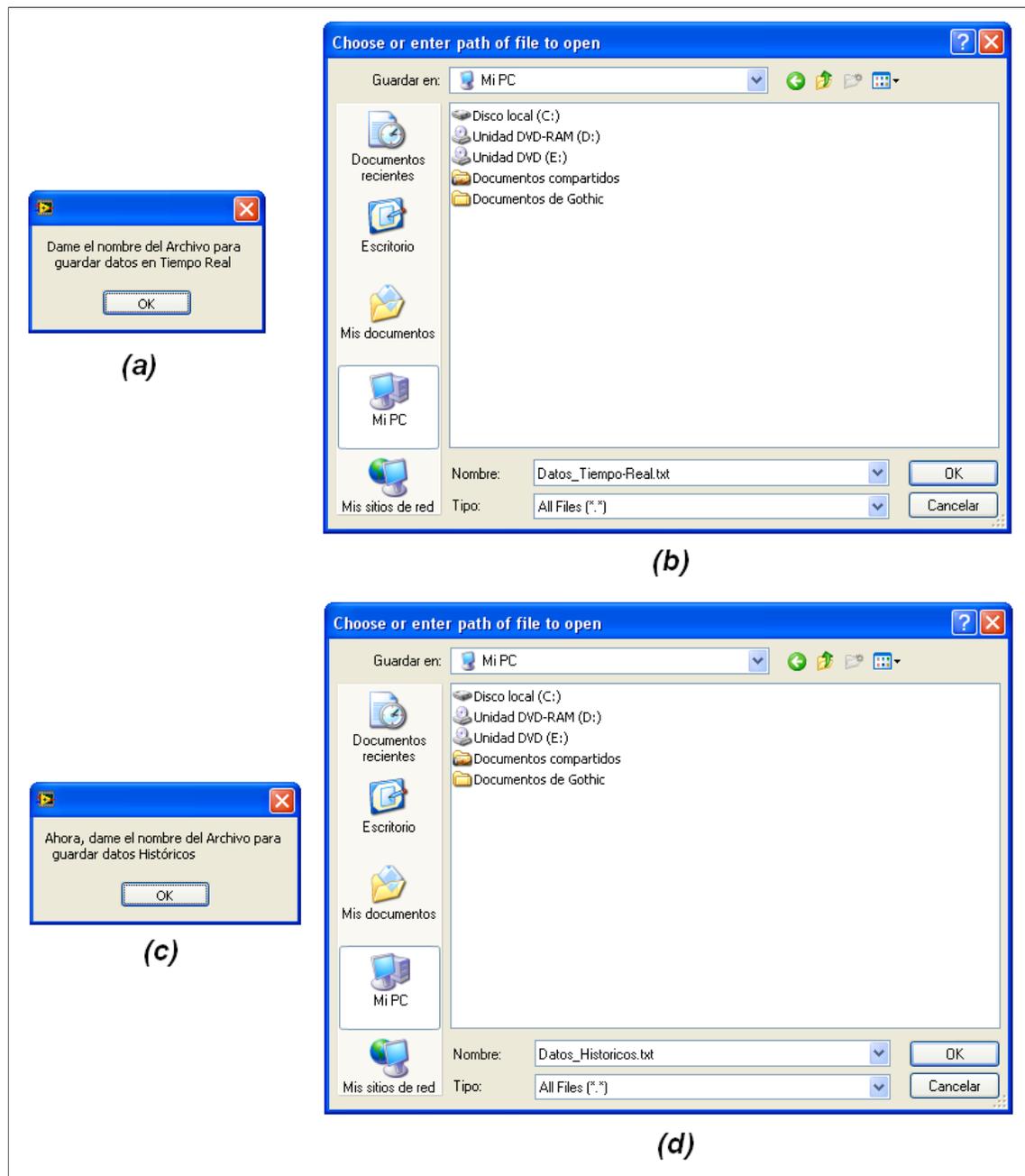


Figura 3.28 Selección de archivos para almacenar datos. (a) Selección del puerto USB. (b) Botón para transmisión.

Control por eventos

Una vez seleccionados los archivos de almacenamiento de datos, la rutina se controla por eventos, esto quiere decir que cada que se presione un determinado botón, se producirá un evento determinado. Este tipo de control se asemeja al uso de interrupciones, por lo que es necesario un diagrama de flujo aparte que muestre su rutina (Figura 3.29).

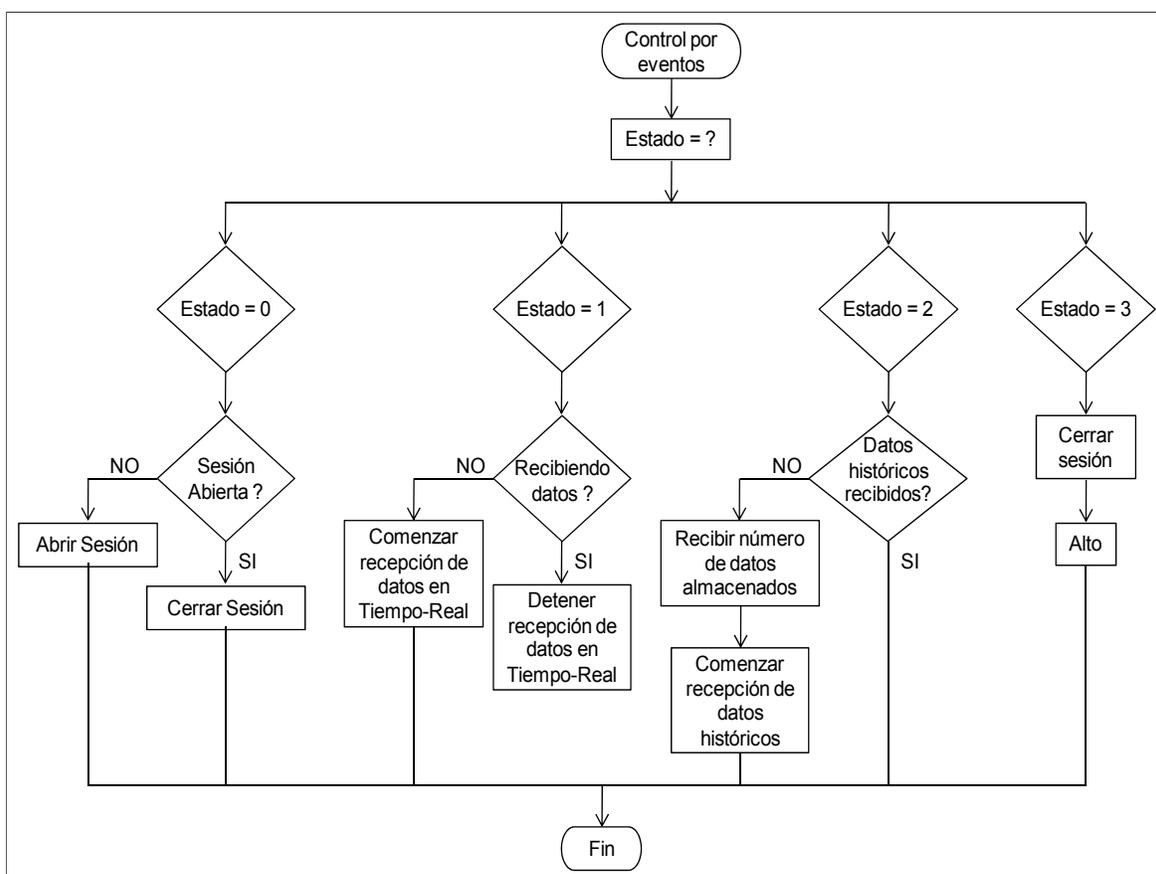


Figura 3.29 Diagrama de flujo de la rutina de control por eventos de la interfase gráfica para la PC.

A continuación se detallan las partes más relevantes del diagrama anterior.

Abrir/Cerrar sesión

Este evento abre o cierra una sesión de comunicación vía USB al presionar el botón mostrado en la Figura 3.30a. Si el caso es abrir una sesión, se proveerán las características necesarias para una correcta comunicación entre la PC y el Microcontrolador:

- Puerto USB: puerto donde se encuentra conectado el sistema
- Baudaje: 115200 baudios
- Bits de datos: 8 bits
- Paridad: ninguna
- Bits de parada: 1.0
- Control de flujo: ninguno

Alto

Este evento detiene todos los procesos. En otras palabras, se detiene el programa en ejecución y es necesario volver a ejecutarlo desde el inicio, véase la Figura 3.30b.



Figura 3.30 Botones principales de la pantalla principal de la interface gráfica para la PC.
 (a) Abrir/Cerrar sesión. (b) Alto.

Los tres eventos restantes (Modo de recuperación de datos almacenados, facturación y en Tiempo-Real) corresponden a cada modo de funcionamiento del sistema y a continuación serán descritos con más detenimiento.

3.5.1.3 Modo de recuperación de datos almacenados y facturación

En la Figura 3.31 y 3.32 se observan, respectivamente, la pantalla en modo de recuperación de datos almacenados y la pantalla de facturación cuyo proceso de funcionamiento lo describe el diagrama de flujo de la Figura 3.33.

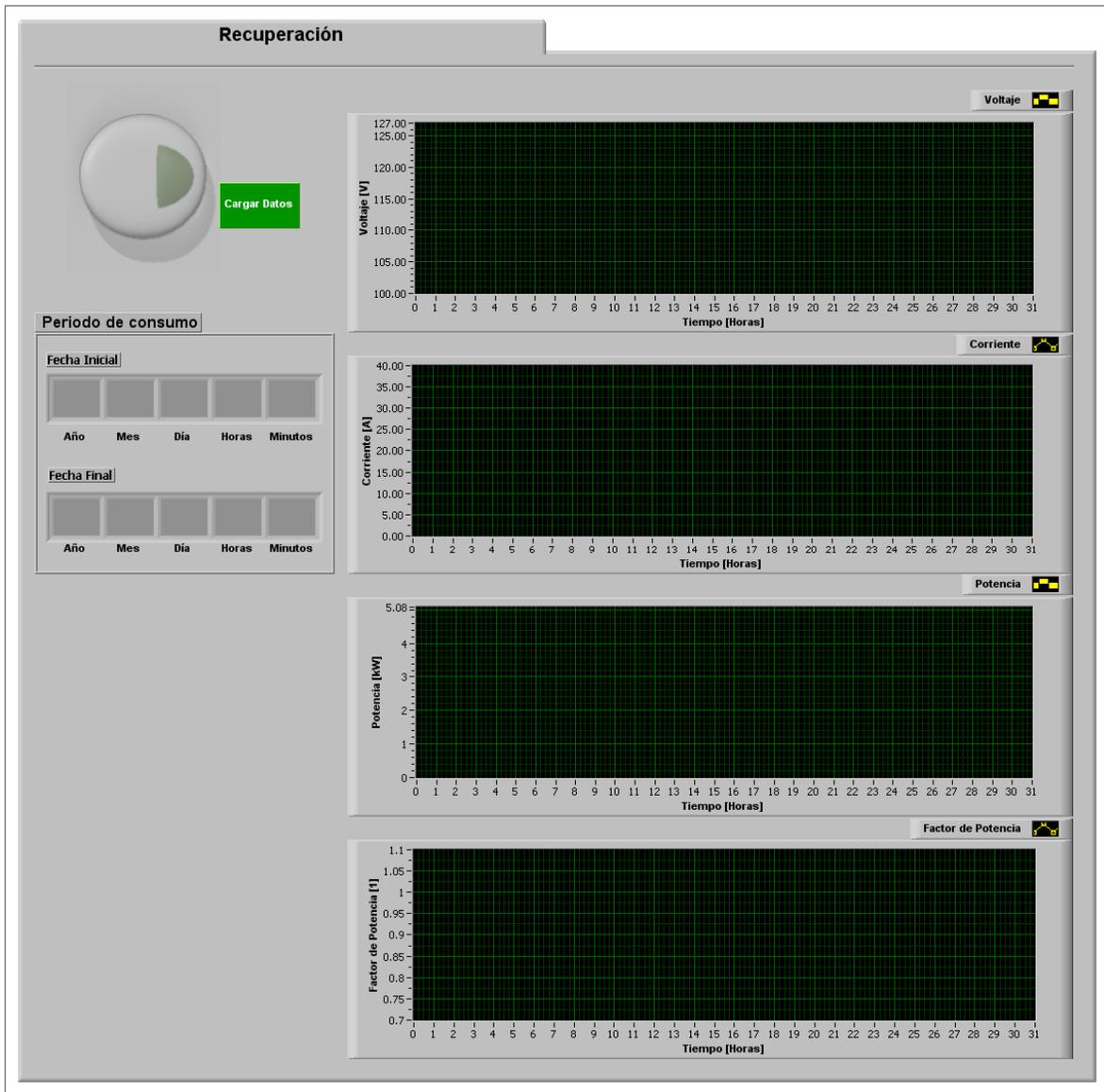


Figura 3.31 Pantalla del modo de recuperación de datos de la interfase gráfica para la PC.

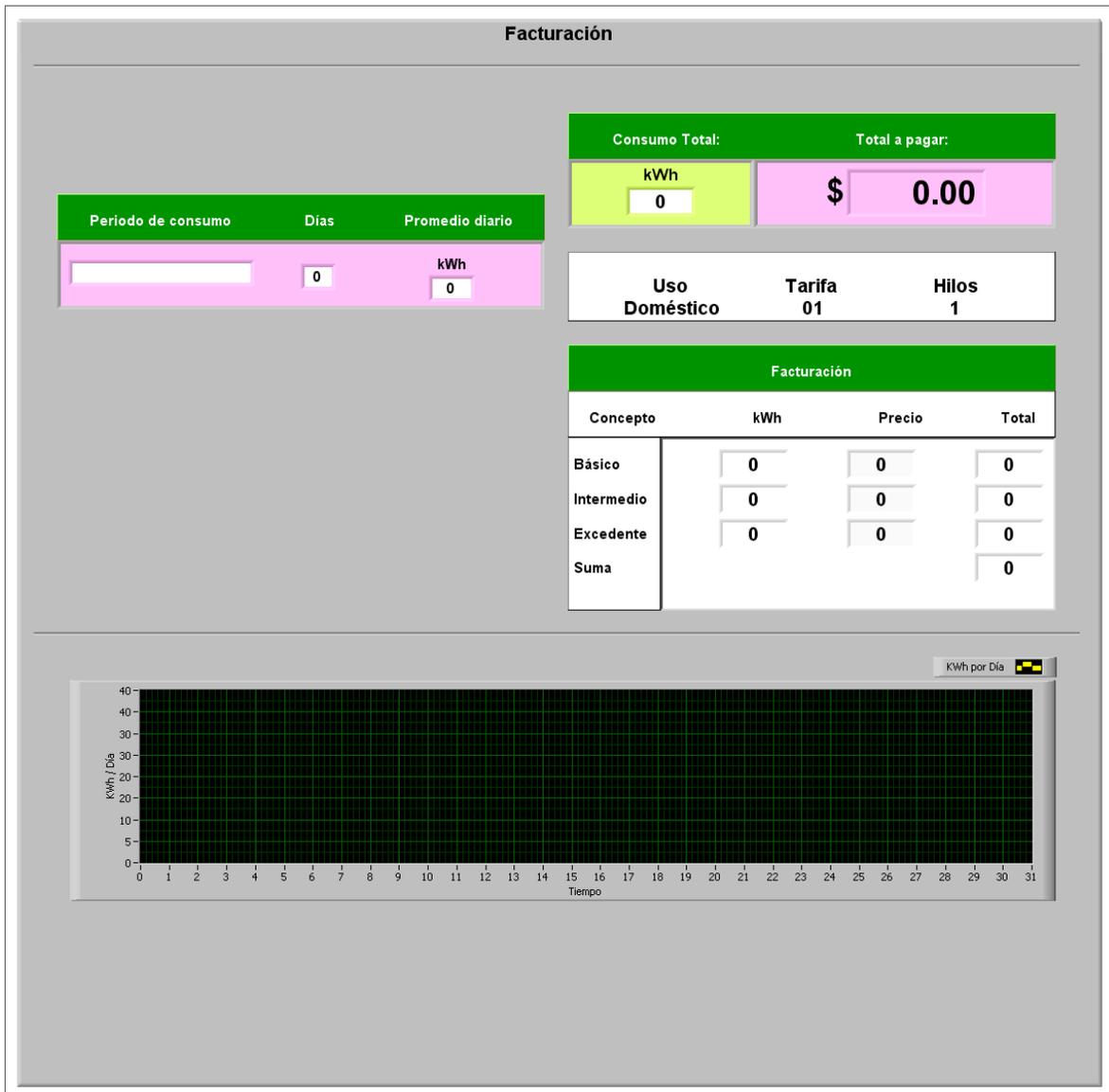


Figura 3.32 Pantalla del modo de facturación de la interface gráfica para la PC.

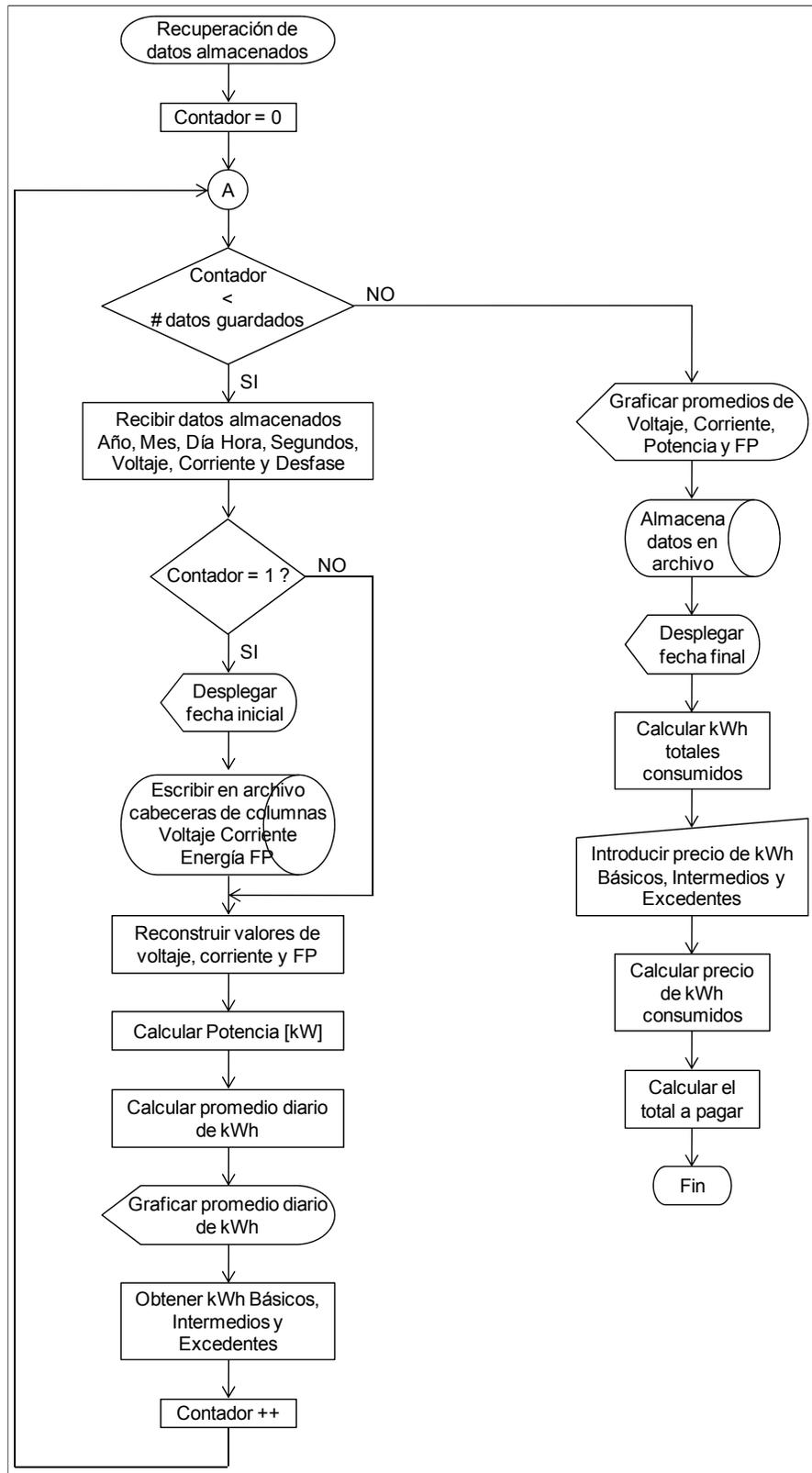


Figura 3.33 Diagrama de flujo del modo de recuperación de datos de la interface gráfica para la PC.

Con base en el diagrama de flujo anterior, los procesos más importantes que cumple esta rutina son la reconstrucción de los valores, el almacenamiento de datos en un archivo y el cálculo de los valores de facturación. Recuérdese que lo que permite entrar en este modo de funcionamiento es la transmisión del carácter 'H' hacia el Microcontrolador¹.

Reconstrucción de valores

Debido a que el sistema en su modo monitor lo que captura y almacena en la EEPROM es el promedio por hora de los valores pico del voltaje y la corriente, así como el desfase entre ambas señales, es necesario una fase de reconstrucción de los valores digitales recuperados para que correspondan con sus valores RMS reales de la forma más fiel posible.

Para esto, es necesario seguir los siguientes pasos:

- Pasar de los valores digitales a su correspondiente valor analógico tomando en cuenta que se trata de una conversión de 10 bits ($2^{10} = 1024$) y el voltaje de referencia es de +3.3 Volts.
- Dar una ganancia y un voltaje de offset o compensación para lograr que el valor se acerque lo más posible al real.
- En el caso de la corriente, es necesario regresar del valor del voltaje a la salida de la etapa de transducción a la corriente a la entrada de dicha etapa tomando en cuenta que el transformador de corriente es de relación 1000:1 y es equivalente a una fuente de corriente por lo que cabe recordar que existe una resistencia en paralelo (R_{th}).
- Multiplicar ambas señales por la raíz cuadrada de 0.5 para obtener sus respectivos valores RMS.
- Tratar algebraicamente los valores a modo de ajuste² para conseguir valores más cercanos a la realidad.
- Para el factor de potencia, se toma el ángulo de desfase³ y se multiplica por su equivalencia en grados y luego se transforma en radianes.

Los incisos anteriores equivalen al código que se genera con el diagrama de programación mostrado en la Figura 3.34.

¹ Véase el punto 3.4.3.3, Modo de transmisión a PC.

² Véase el punto 3.6, Ajuste del sistema.

³ Véase el punto 3.4.3.2, Modo monitor.

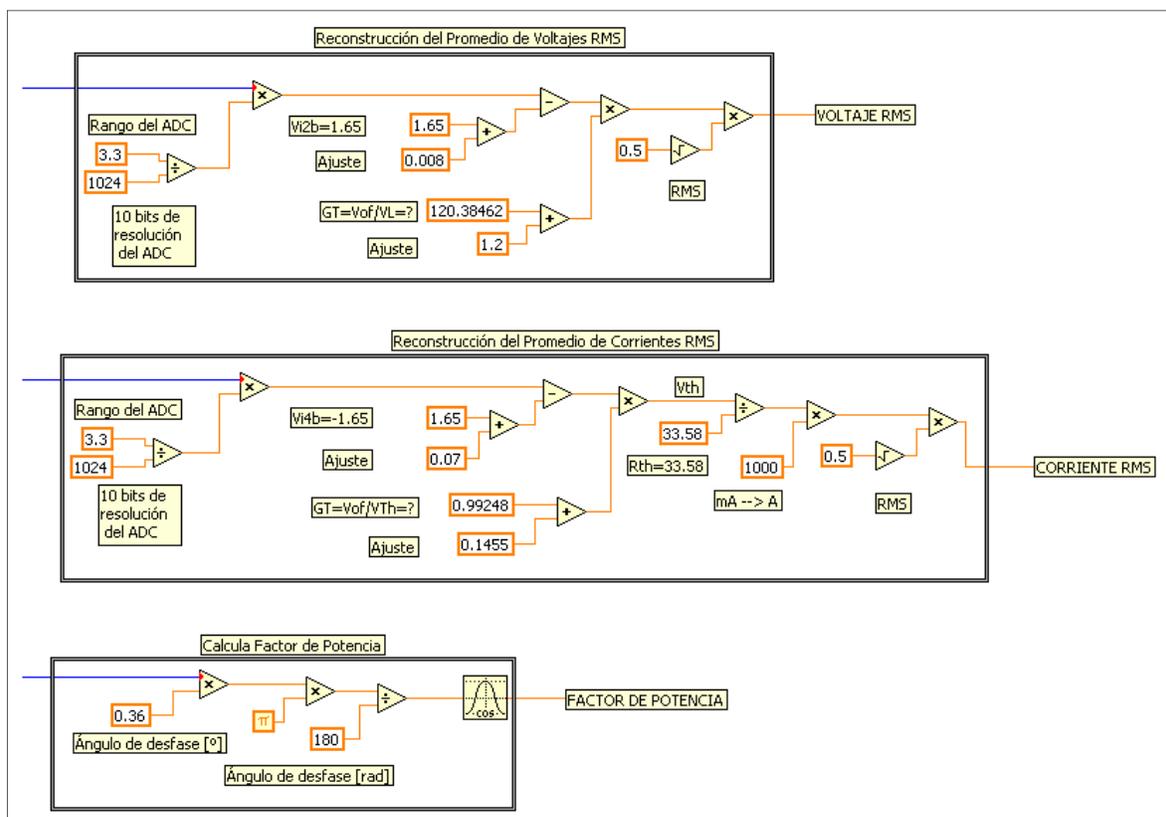


Figura 3.34 Código para la reconstrucción de los valores de voltaje y corriente en el modo de recuperación de datos de la interface gráfica para la PC.

Almacenamiento de datos

La rutina de almacenamiento de los datos en un archivo de texto consiste en guardar los valores de voltaje RMS [V], corriente RMS [A], factor de potencia y consumo de energía [kWh] en columnas con sus respectivos nombres de cabecera.

Facturación

Para la rutina de facturación, es necesario que el usuario proporcione los precios del kWh básicos, intermedios y excedentes (si es que existen) que se encuentran en el recibo del consumo de luz proporcionado por CFE. Con estos valores, se calculan los siguientes valores significativos:

- Periodo de consumo.
- Días de consumo.
- Promedio diario de kWh consumidos.
- kWh básicos, intermedios y/o excedentes totales consumidos.
- kWh totales consumidos.

- Total de dinero a pagar por el consumo neto (sin contar impuestos u otro cargo de cualquier índole).

3.5.1.4 Modo en tiempo-real

La Figura 3.35 muestra la pantalla del modo en Tiempo-Real cuyo diagrama de flujo de funcionamiento se encuentra en la Figura 3.36.

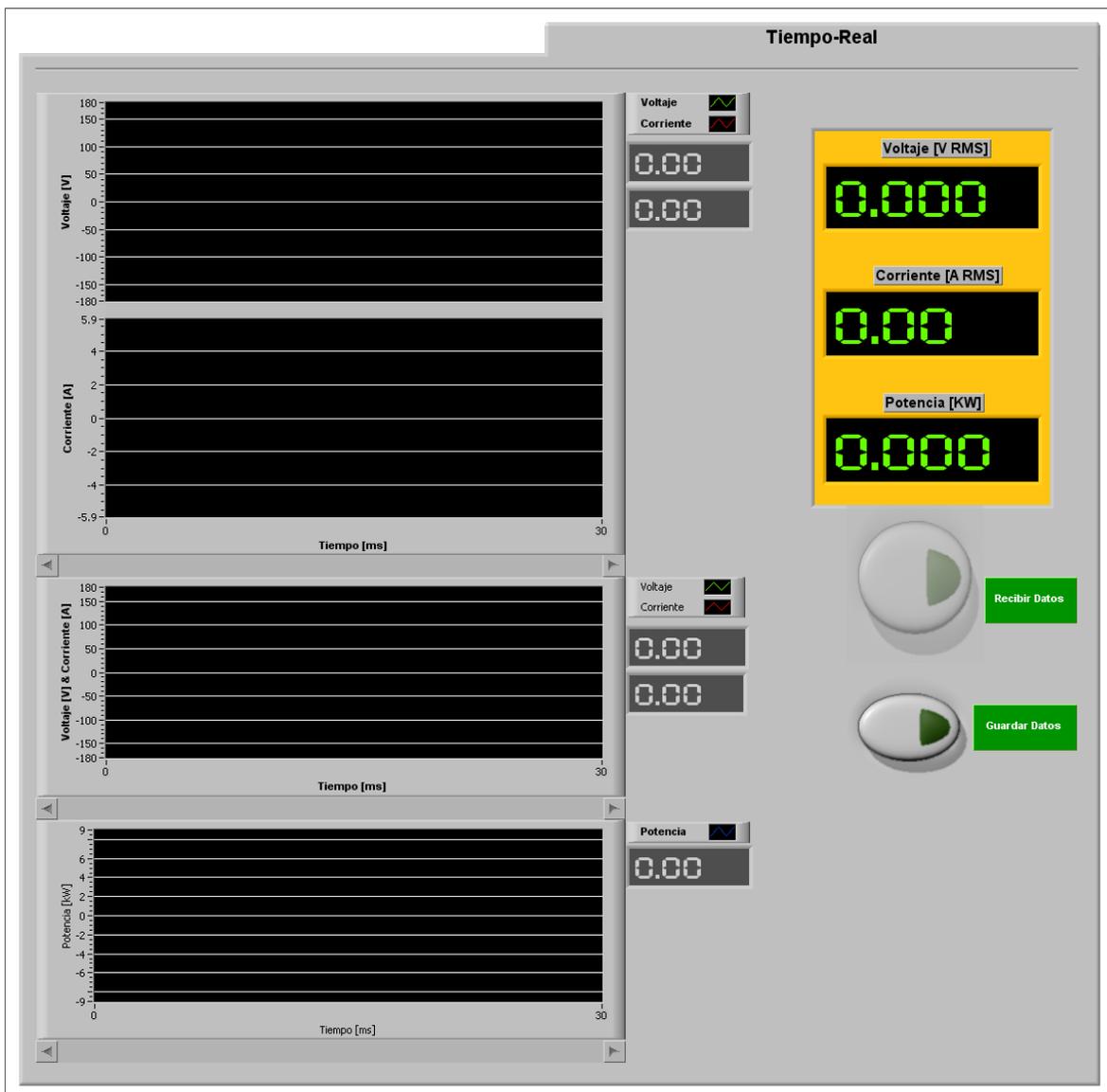


Figura 3.35 Pantalla del modo en tiempo-real de la interface gráfica para la PC.

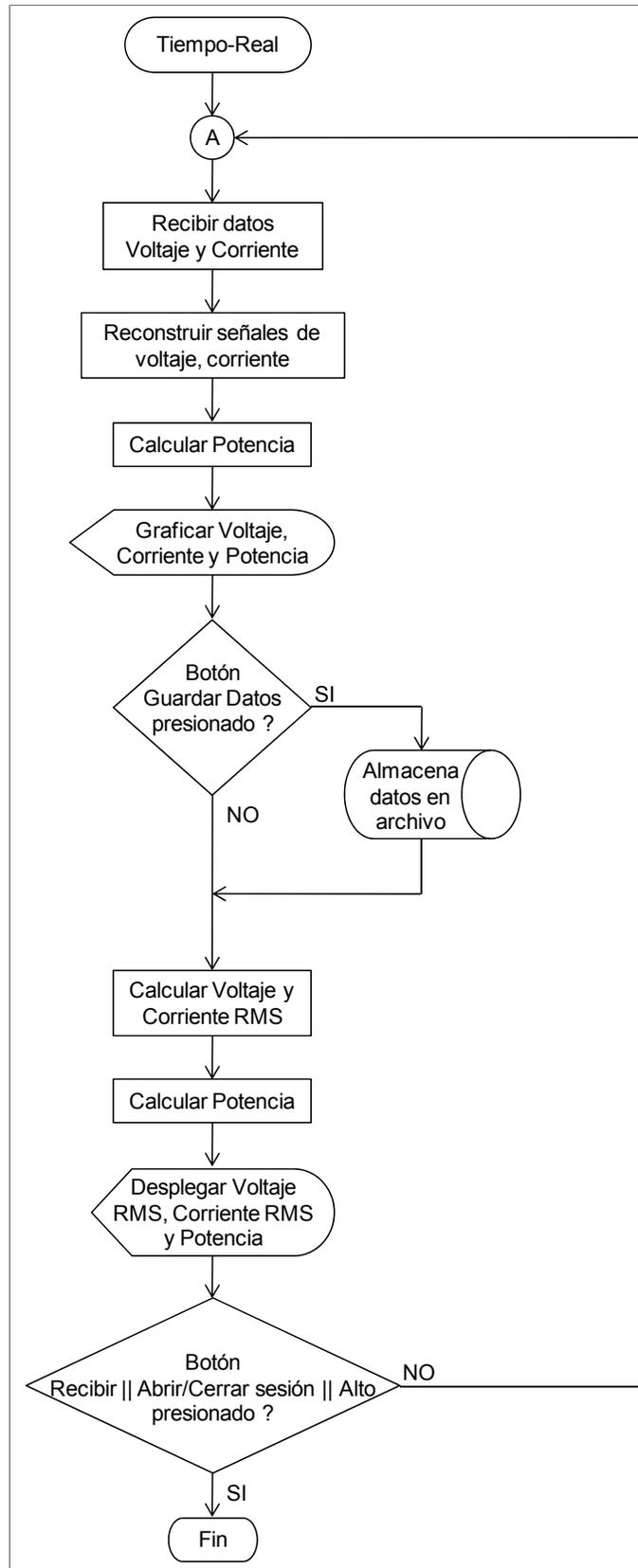


Figura 3.36 Diagrama de flujo del modo en tiempo-real de la interface gráfica para la PC.

Con base en el diagrama de flujo anterior, los procesos más importantes que cumple esta rutina son la reconstrucción de las señales y el cálculo y despliegue de los valores RMS del voltaje y la corriente. Recuérdese que lo que permite entrar y salir de este modo de funcionamiento es la transmisión del carácter 'T' y 'S' hacia el Microcontrolador¹.

Reconstrucción de señales

Para ver las señales de voltaje y corriente emulando un osciloscopio, es necesario una fase de reconstrucción de los valores digitales para que correspondan con sus valores reales de la forma más fiel posible.

Para esto, es necesario seguir los siguientes pasos:

- Pasar de los valores digitales a su correspondiente valor analógico tomando en cuenta que se trata de una conversión de 10 bits ($2^{10} = 1024$) y el voltaje de referencia es de +3.3 Volts.
- Dar una ganancia y un voltaje de offset o compensación para lograr que el valor se acerque lo más posible al real.
- En el caso de la corriente, es necesario regresar del valor del voltaje a la salida de la etapa de transducción a la corriente a la entrada de dicha etapa tomando en cuenta que el transformador de corriente es de relación 1000:1 y es equivalente a una fuente de corriente por lo que cabe recordar que existe una resistencia en paralelo (R_{th}).

Cálculo y despliegue de los valores RMS

En aras de emular un voltímetro y un amperímetro, es necesario que la rutina en modo de tiempo-real obtenga los valores RMS de las señales de voltaje y corriente. Esto se logra obteniendo el promedio de 60 valores pico continuos (equivalentes a 1 segundo) y multiplicándolos por la raíz cuadrada de 0.5, para después tratar algebraicamente los valores a modo de ajuste² con el fin de conseguir valores más cercanos a la realidad.

Por último, obsérvese que se implementó una rutina para que en el caso de estar recibiendo datos en tiempo-real, al oprimir ya sea el botón de "Recibir Datos", de "Abrir / Cerrar Sesión" o "ALTO", se mande la señal correcta de término de la recepción (carácter 'S') al Microcontrolador.

¹ Véase el punto 3.4.3.3, Modo de transmisión a PC.

² Véase el punto 3.6, Ajuste del sistema.

3.6 Ajuste del sistema

Para una correcta reconstrucción de las señales reales (señales de entrada) con respecto a las desplegadas por el sistema en la interface gráfica de la PC (señales de salida), es necesario incluir una etapa de ajuste, que consiste en agregar una ganancia y un voltaje de compensación adecuados.

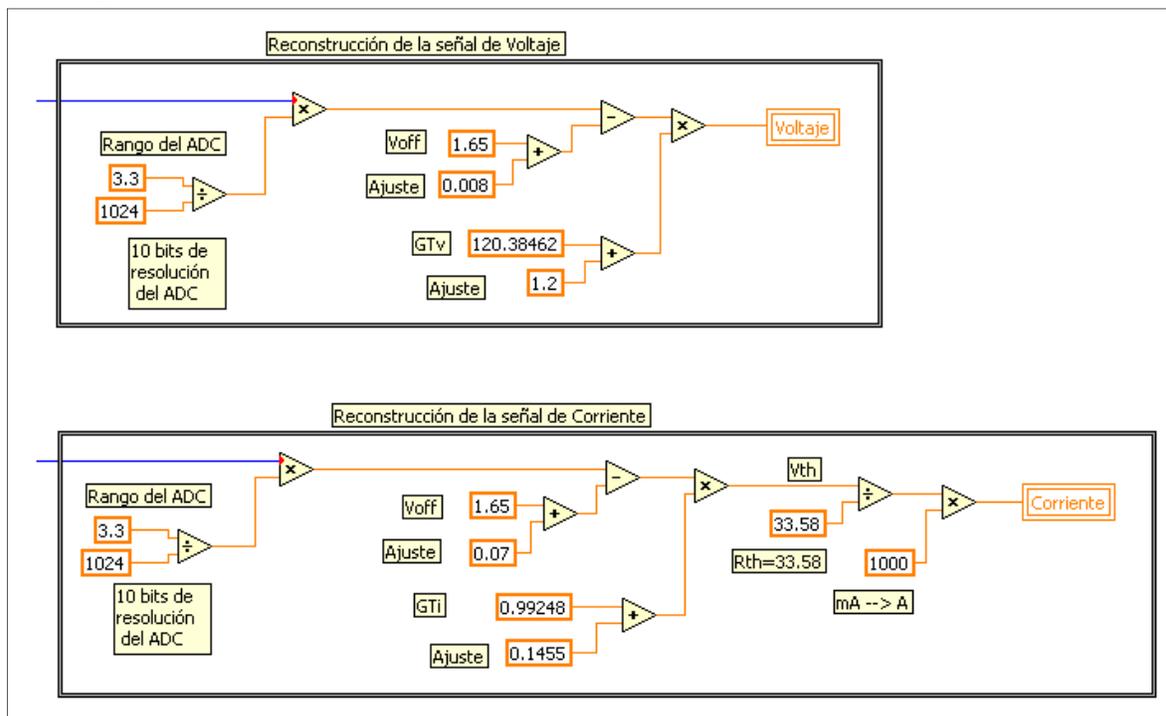


Figura 3.37 Etapa de reconstrucción de señales.

La Figura 3.37 muestra la etapa de reconstrucción de las señales de voltaje y corriente, en la cual se observa el uso de unas ganancias GT_v y GT_i , y de un voltaje V_{off} , las cuales respectivamente corresponden a las ganancias totales en la etapa de acondicionamiento desde las señales reales hasta la entrada del convertidor analógico-digital y el voltaje que se suma en las configuraciones de sumador inversor (1.65 V) de dicha etapa. En otras palabras:

- **GT_v** : ganancia entre la señal de entrada al transformador de voltaje y la señal de entrada al convertidor analógico-digital.
- **GT_i** : ganancia entre la señal de salida del transformador de corriente y la señal de entrada al convertidor analógico-digital.

Dichos valores se obtuvieron con ayuda de un multímetro ^[1] y sus valores son:

| | |
|-----------|-----------|
| GT_v | 120.38462 |
| GT_i | 0.99248 |
| V_{off} | 1.65 |

Tabla 3.2 Valores de las ganancias totales y el voltaje de compensación de la reconstrucción de señales.

Aunado a los datos anteriores, se agregaron 4 valores de ajuste (Tabla 3.3), los cuales, fueron obtenidos mediante los siguientes procedimientos:

| | |
|-------------------|--------|
| G _{Tv} | 1.2 |
| G _{Ti} | 0.1455 |
| V _{offv} | 0.008 |
| V _{offi} | 0.07 |

Tabla 3.3 Valores de ajuste para las ganancias totales y los voltajes de compensación de la reconstrucción de señales.

Voltajes de compensación

Para los valores de ajuste de los voltajes de compensación se hizo un ajuste a cero cambiando la señal de entrada a las etapas de acondicionamiento por la señal de tierra y se buscó un valor tal que igualara los cero volts.

Ganancias totales

Para los valores de ajuste de ambas ganancias se conectó una carga al sistema, la cual consiste en una lámpara de halógeno con un consumo de potencia máximo de 500W. Con dicha carga, los valores de voltaje y corriente alternos RMS fueron homologados con unos multímetros patrón normal ^[i] y de gancho ^[ii], respectivamente, para obtener los siguientes valores:

| Voltaje Multímetro | Voltaje Sistema | Corriente Multímetro | Corriente Sistema |
|--------------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| 121.7 [V] | 121.7 | 4.11 [A] | 4.11 [A] |

Tabla 3.4 Valores de voltaje y corriente homologados.

3.7 Manejo del sistema

Para entender correctamente el uso del Sistema de Monitoreo de Consumo Eléctrico para Actividades Residenciales Basado en Microcontrolador se decidió describir paso por paso su forma correcta de uso, abarcando todas y cada una de sus funciones.

Dependiendo de los elementos del sistema, éste puede funcionar en 2 configuraciones:

- Configuración de medidor de consumo eléctrico residencial: el sistema, conectado al tablero eléctrico principal¹ de la casa habitación, registra el consumo de energía eléctrica, al igual que el medidor tradicional instalado por la compañía de luz.
- Configuración de monitor de energía en aparatos eléctricos/electrónicos²: el sistema se conecta a un enchufe múltiple para conectar cualquier aparato o dispositivo eléctrico/electrónico y medir su consumo de energía eléctrica.

En ambos casos, el sistema es capaz de conectarse a la PC para observar las señales de Voltaje, Corriente y Potencia en tiempo-real, así como los valores RMS del Voltaje y la Corriente y su producto.

3.7.1 Configuración de medidor de consumo eléctrico residencial

El sistema de monitoreo en esta configuración consta de los siguientes elementos:

- Sensor de gancho.
- Par de caimanes.
- Interruptor de Encendido / Apagado del sistema (Figura 3.38).
- Interruptor de Modo de trabajo, Monitor / Transmisión a PC (Figura 3.38).
- Botón de RESET (reinicio).
- Cable USB.
- Carpeta con los archivos de controladores o drivers del chip de comunicación USB llamada “Drivers SDM-USB-Qs1-S”.
- Archivo ejecutable “Fecha.exe”.
- Archivo ejecutable “Principal.exe”.

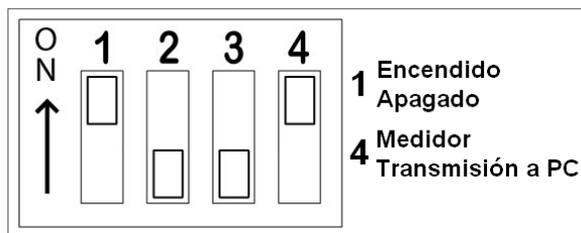


Figura 3.38 Interruptor de Encendido y Modo de trabajo.

¹ Tablero eléctrico principal: consiste en una caja donde se montan los interruptores automáticos respectivos, cortacircuitos, fusibles y el medidor de consumo [20].

² Véase el punto 2.3.2, Monitores de energía en aparatos eléctricos/electrónicos.

La Figura 3.39 ilustra la conexión del sistema al tablero principal de una casa habitación (interruptor Apagado).

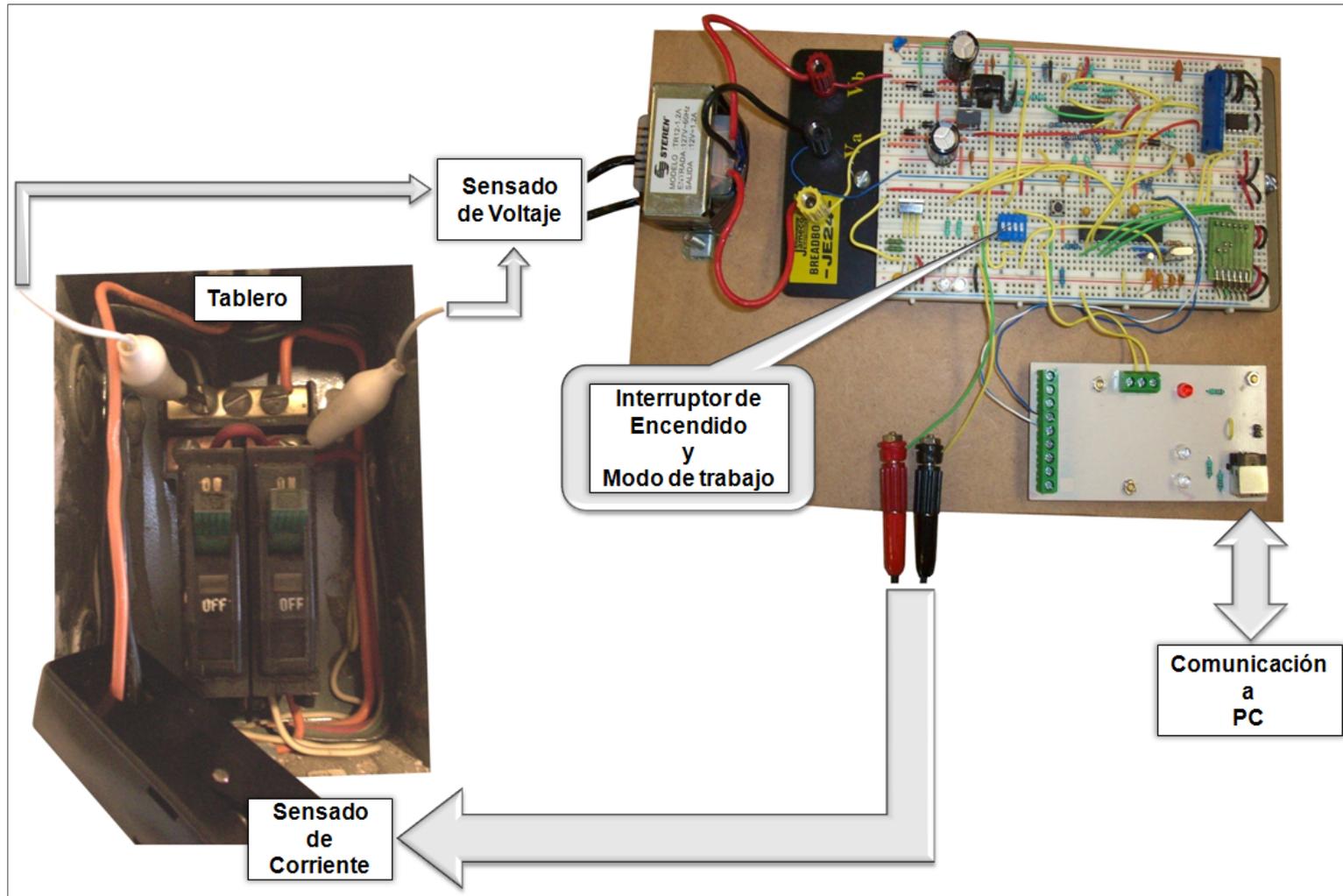


Figura 3.39 Conexión del sistema de monitoreo en su configuración de medidor de consumo eléctrico residencial.

Una vez conectado al tablero, el procedimiento de uso del sistema se resume en los pasos siguientes:

1. Mover el interruptor a la posición de Encendido.
2. Mover el interruptor de Modo de trabajo a la posición de Transmisión a PC.
3. Conectar el cable USB al sistema y a la PC.
4. Instalar los controladores y la fecha del sistema.
5. Desconectar el cable USB del sistema y la PC.
6. Mover el interruptor de Modo de trabajo a la posición de Monitor.
7. Dejar al sistema que registre el consumo de energía eléctrica durante el periodo deseado.

Cuando se requiera recuperar los datos almacenados en el sistema, se deben seguir los siguientes pasos:

8. Mover el interruptor de Modo de trabajo a la posición de Transmisión a PC.
9. Conectar el cable USB al sistema y a la PC.
10. Ejecutar el archivo “Principal.exe” y seguir las indicaciones en pantalla.
11. Seleccionar el Puerto USB correspondiente al utilizado para conectar el sistema.
12. Presionar el botón “Abrir / Cerrar sesión”.
13. En la pestaña de Facturación, ingresar los precios del kilowatt-hora Básico, Intermedio y Excedente que se encuentra en el recibo de CFE.
14. Cambiar a la pestaña de Recuperación y presionar el botón “Cargar Datos”.

Para ver las señales del voltaje y corriente (de la línea):

15. Ir a la pestaña de Tiempo-Real y presionar el botón “Recibir Datos”.
16. Mientras los datos son recibidos, en cualquier momento es posible guardar los datos presionando el botón “Guardar Datos”.

Para detener por completo el programa:

17. Presionar el botón “ALTO”.
18. Cerrar la pantalla de la interface gráfica.

Cabe recordar que no se debe desconectar el cable USB mientras exista una sesión abierta ya que se corre el peligro de un fallo de hardware del sistema operativo.

3.7.2 Configuración de monitor de energía en aparatos eléctricos/electrónicos

El sistema de monitoreo en esta configuración consta de los siguientes elementos:

- Sensor de gancho.
- Enchufe múltiple de 4 contactos.
- Interruptor de Encendido / Apagado del sistema (Figura 3.38).
- Interruptor de Modo de trabajo, Monitor / Transmisión a PC (Figura 3.38).
- Botón de RESET (reinicio).
- Cable USB.
- Carpeta con los archivos de controladores o drivers del chip de comunicación USB llamada “Drivers SDM-USB-Qs1-S”.
- Archivo ejecutable “Fecha.exe”.
- Archivo ejecutable “Principal.exe”.

La Figura 3.40 ilustra la conexión del sistema en esta configuración (interruptor Apagado).

Una vez conectado el/los aparatos, el procedimiento de uso del sistema se resume en los pasos siguientes, tomando en cuenta que la función más útil en este caso es la emulación un amperímetro y un voltímetro:

1. Mover el interruptor a la posición de Encendido.
2. Mover el interruptor de Modo de trabajo a la posición de Transmisión a PC.
3. Conectar el cable USB al sistema y a la PC.
4. Instalar los controladores y la fecha del sistema.
5. Ejecutar el archivo “Principal.exe” y seguir las indicaciones en pantalla.
6. Seleccionar el Puerto USB correspondiente al utilizado para conectar el sistema.
7. Presionar el botón “Abrir / Cerrar sesión”.
8. Ir a la pestaña de Tiempo-Real y presionar el botón “Recibir Datos”.
9. Mientras los datos son recibidos, en cualquier momento es posible guardar los datos presionando el botón “Guardar Datos”.

Para detener por completo el programa:

10. Presionar el botón “ALTO”.
11. Cerrar la pantalla de la interface gráfica.

Cabe recordar que no se debe desconectar el cable USB mientras exista una sesión abierta ya que se corre el peligro de un fallo de hardware del sistema operativo.

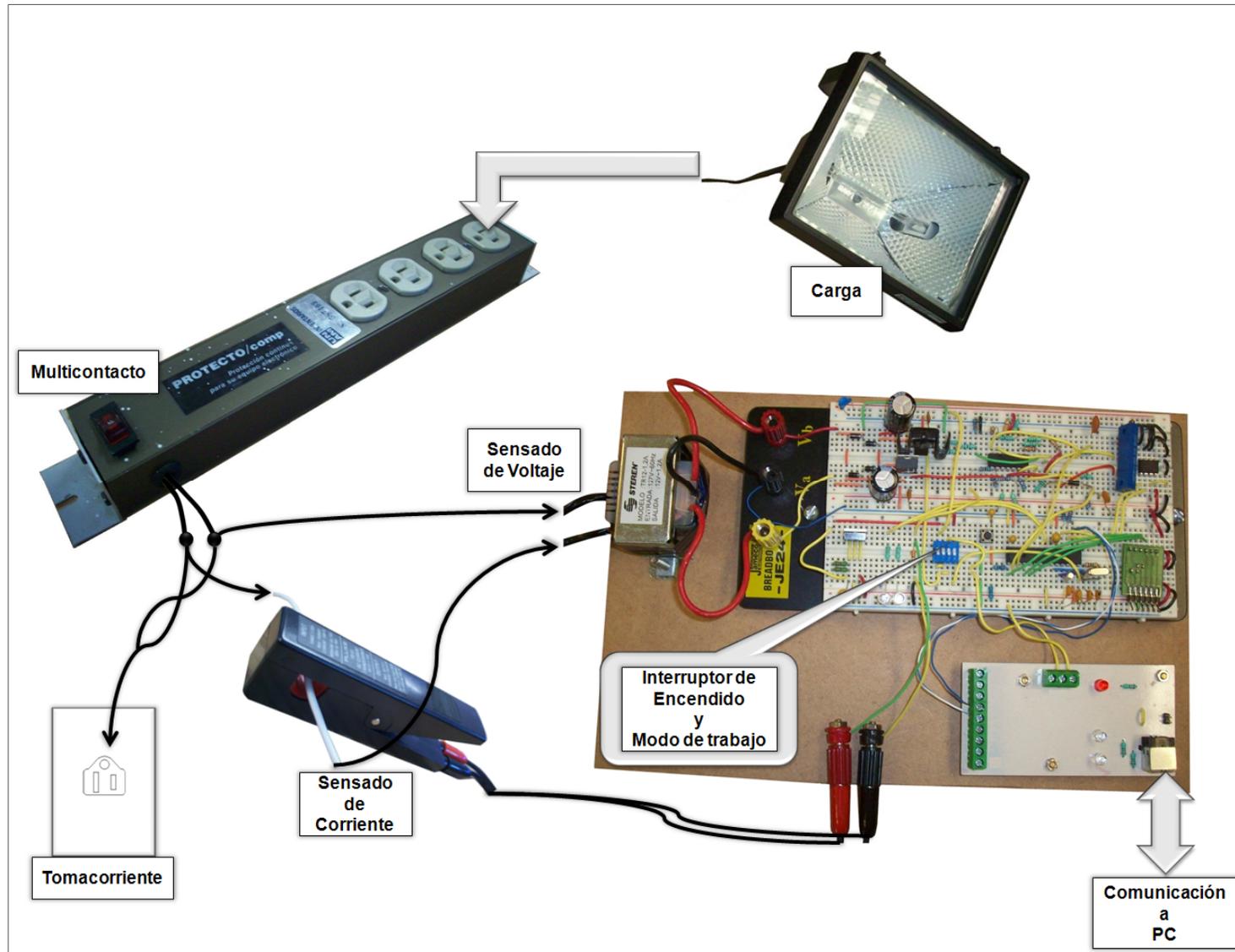


Figura 3.40 Conexión del sistema de monitoreo en su configuración de monitor de energía en aparatos eléctricos/electrónicos.

Capítulo 4

Resultados

Experimentales

Una de las etapas finales más importantes en el desarrollo de cualquier sistema es la realización de pruebas y la obtención de resultados experimentales para obtener un indicador del comportamiento del sistema que permita la implementación de la calibración para la corrección o atenuación de errores. A lo largo de este capítulo se presentan las pruebas y mejoras realizadas y los resultados obtenidos.

4.1 Evaluaciones experimentales

Para la realización de las pruebas o evaluaciones experimentales, se diseñó un experimento que consistió en conectar al sistema diferentes cargas y tomar valores de los multímetros patrón ^[h, i] así como del sistema. Dichas cargas se hicieron combinando 3 lámparas de halógeno con un consumo de potencia de máximo de 500W numeradas como lo muestra la Figura 4.1.

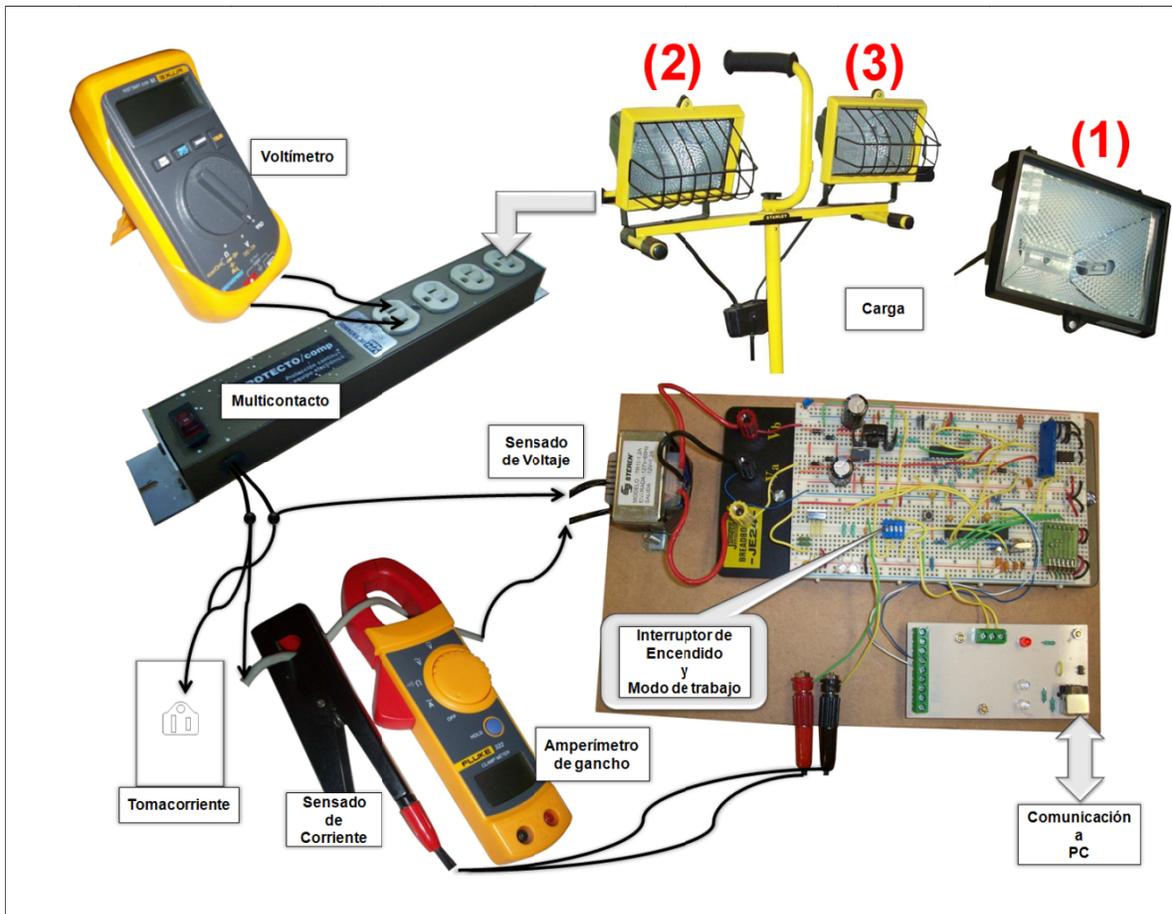


Figura 4.1 Configuración física del experimento para pruebas del sistema.

Los datos obtenidos son los mostrados en la Tabla 4.1.

| Carga | Voltaje Real [V] | Voltaje Sistema [V] | Corriente Real [A] | Corriente Sistema [A] |
|-------------|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| (1)+(2)+(3) | 115.6 | 118.1 | 11.18 | 11.10 |
| (1)+(3) | 118.5 | 119.8 | 7.76 | 7.63 |
| (1)+(2) | 118.6 | 119.9 | 7.67 | 7.57 |
| (2)+(3) | 119.1 | 120.1 | 7.25 | 7.17 |
| (1) | 121.7 | 121.7 | 4.11 | 4.11 |
| (3) | 122.0 | 121.8 | 3.74 | 3.80 |
| (2) | 122.2 | 121.9 | 3.64 | 3.66 |

Tabla 4.1 Valores obtenidos en las pruebas del sistema.

Para ver de forma más clara la exactitud con que los valores del sistema se acercan a los valores reales registrados por los multímetros patrón, se debe observar la gráfica de la Figura 4.2 para el caso de las mediciones de voltaje y la Figura 4.3 para las corrientes.

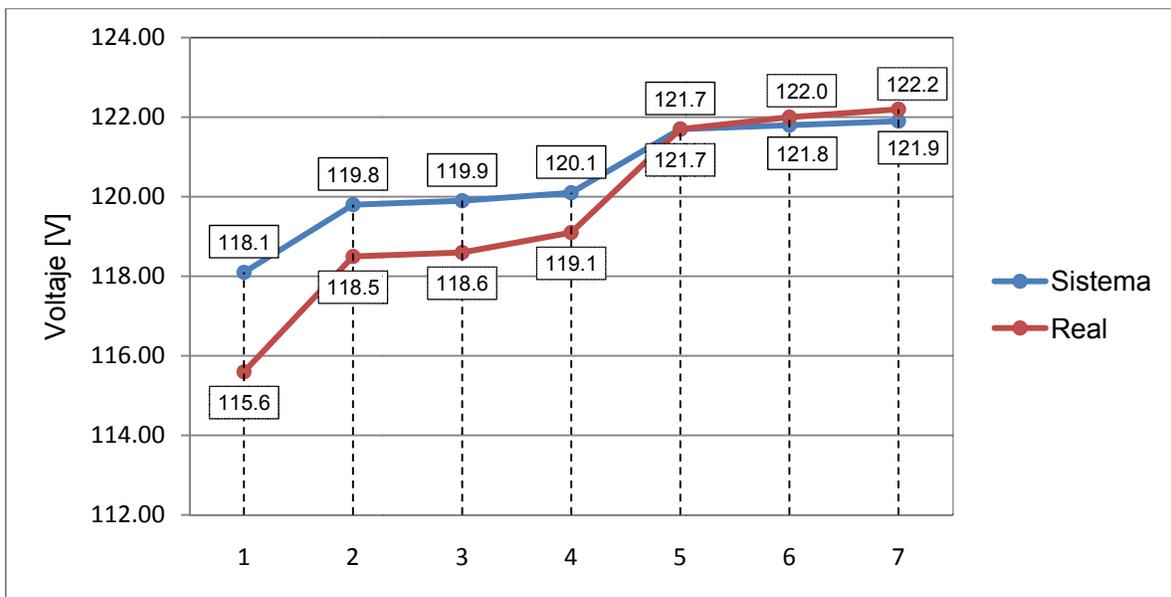


Figura 4.2 Gráfica comparativa de los valores de Voltaje reales y del sistema.

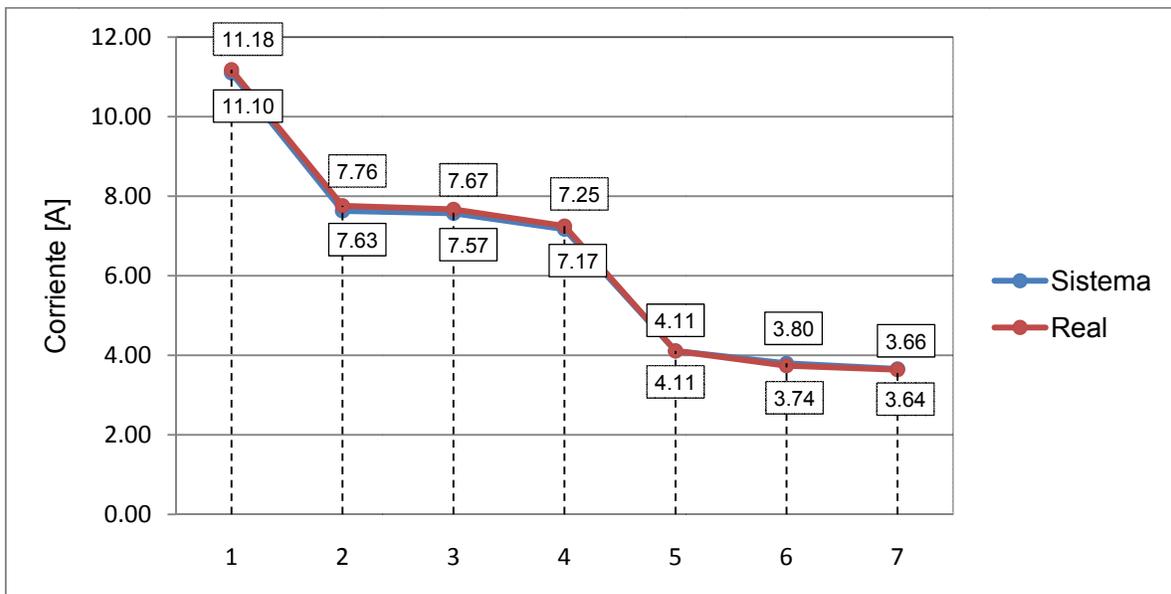


Figura 4.3 Gráfica comparativa de los valores de Corriente reales y del sistema.

Las gráficas anteriores nos brindan un indicador más que cuantitativo, cualitativo ya que resulta fácil con solo observar las líneas qué tanto se desvían entre sí los valores experimentales y reales.

Para tener un indicador cuantitativo de la exactitud del sistema, se obtiene el error absoluto de cada una de las muestras (Tabla 4.2) utilizando la ecuación 4.1. El error absoluto nos indica la cantidad de Volts o Amperes que se aleja el sistema de los valores reales.

$$Error\ absoluto = |Valor_{Sistema} - Valor_{Real}| \quad (4.1)$$

| Voltaje Real [V] | Voltaje Sistema [V] | Error Absoluto [V] | Corriente Real [A] | Corriente Sistema [A] | Error Absoluto [A] |
|------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| 115.6 | 118.1 | 2.5 | 11.18 | 11.10 | 0.08 |
| 118.5 | 119.8 | 1.3 | 7.76 | 7.63 | 0.13 |
| 118.6 | 119.9 | 1.3 | 7.67 | 7.57 | 0.10 |
| 119.1 | 120.1 | 1.0 | 7.25 | 7.17 | 0.08 |
| 121.7 | 121.7 | 0.0 | 4.11 | 4.11 | 0.00 |
| 122.0 | 121.8 | 0.2 | 3.74 | 3.80 | 0.06 |
| 122.2 | 121.9 | 0.3 | 3.64 | 3.66 | 0.02 |
| Promedio: | | 0.94 | Promedio: | | 0.07 |

Tabla 4.2 Error en las mediciones de los valores obtenidos en las pruebas del sistema.

Otro indicador de la exactitud en el funcionamiento del sistema es la correlación que existe entre los datos reales y los datos experimentales o del sistema, en otras palabras, es necesario analizar la linealidad del sistema. Para lograr esto, es necesario graficar los valores reales contra los experimentales como lo muestra la Figura 4.4 y 4.5 y obtener la ecuación de ajuste así como la correlación (R^2).

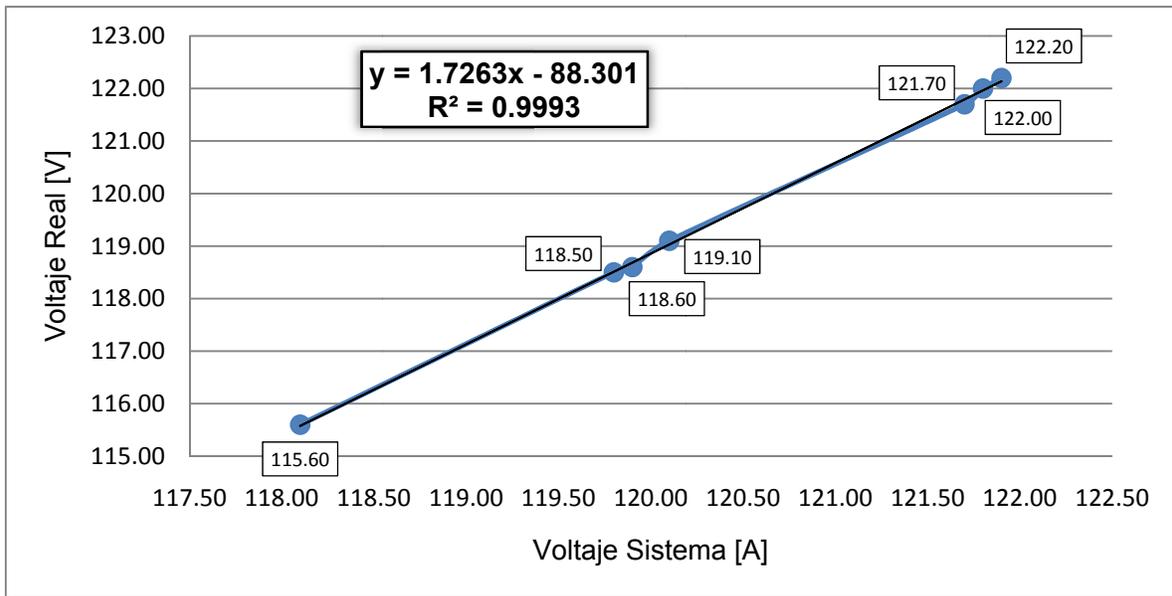


Figura 4.4 Gráfica comparativa de los valores de Voltaje reales y del sistema.

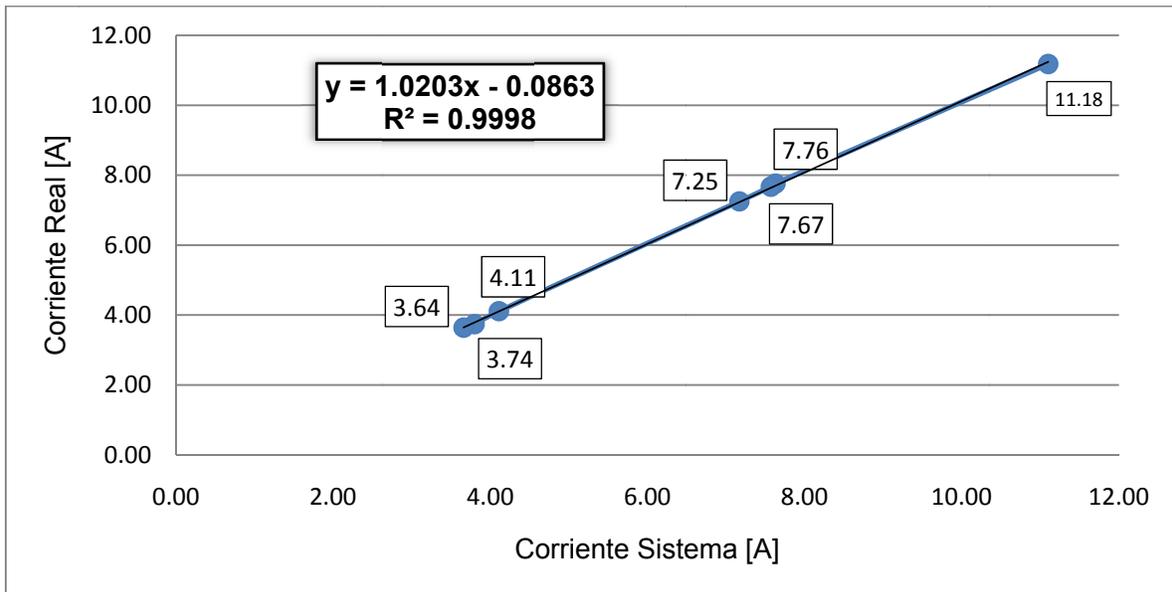


Figura 4.5 Gráfica comparativa de los valores de Corriente reales y del sistema.

De las gráficas anteriores se desprende que, aparte de que el sistema se comporta de manera lineal, la correlación entre valores resulta muy cercana a la unidad, lo que indica que los valores experimentales se acercan bastante a los indicados por el instrumento de medición patrón utilizado.

4.1.1 Reajuste

Aunque los resultados arrojados fueron satisfactorios, se decidió homogeneizarlos por medio de un tratamiento estadístico al implementar las ecuaciones de tendencia o regresión lineal (ecuaciones 4.2 y 4.3) obtenidas automáticamente con el software de cálculo (Microsoft Excel 2007) directamente en el código de reconstrucción de las señales de voltaje y de corriente como lo muestra la Figura 4.6.

$$y = 1.7263x - 88.301 \tag{4.2}$$

$$y = 1.0203x - 0.0863 \tag{4.3}$$

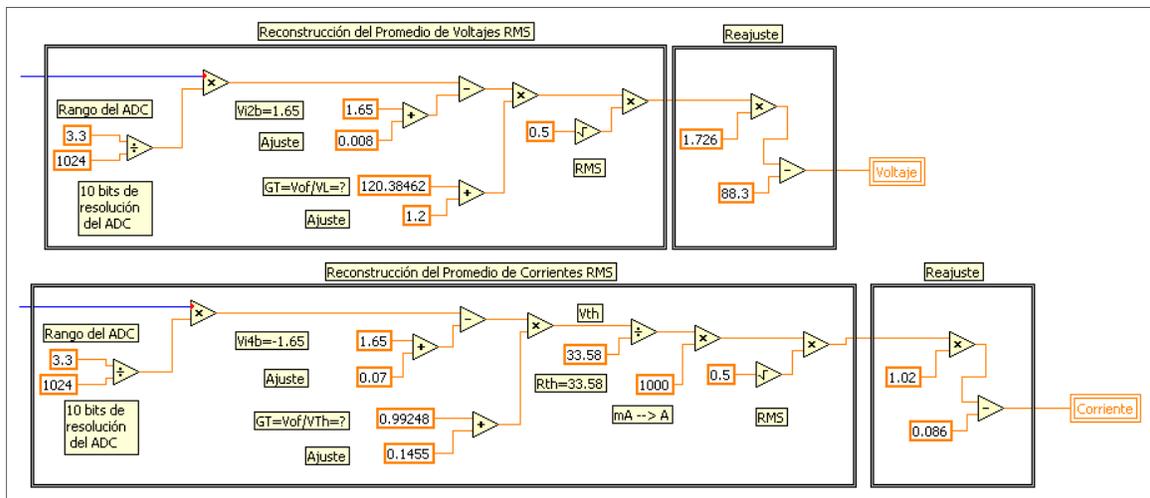


Figura 4.6 Etapa de reconstrucción de señales con reajuste.

A continuación, se realizaron pruebas para aplicarles el mismo tratamiento que antes del reajuste.

| Carga | Voltaje Real [V] | Voltaje Sistema [V] | Corriente Real [A] | Corriente Sistema [A] |
|-------------|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| (1)+(2)+(3) | 115.5 | 115.6 | 11.13 | 11.21 |
| (1)+(3) | 118.3 | 118.7 | 7.75 | 7.79 |
| (1)+(2) | 118.4 | 118.9 | 7.64 | 7.67 |
| (2)+(3) | 119.0 | 119.5 | 7.25 | 7.25 |
| (1) | 121.8 | 122.6 | 4.14 | 4.15 |
| (3) | 122.0 | 122.7 | 3.74 | 3.80 |
| (2) | 122.1 | 122.8 | 3.64 | 3.65 |

Tabla 4.3 Valores obtenidos en las pruebas del sistema con reajuste.

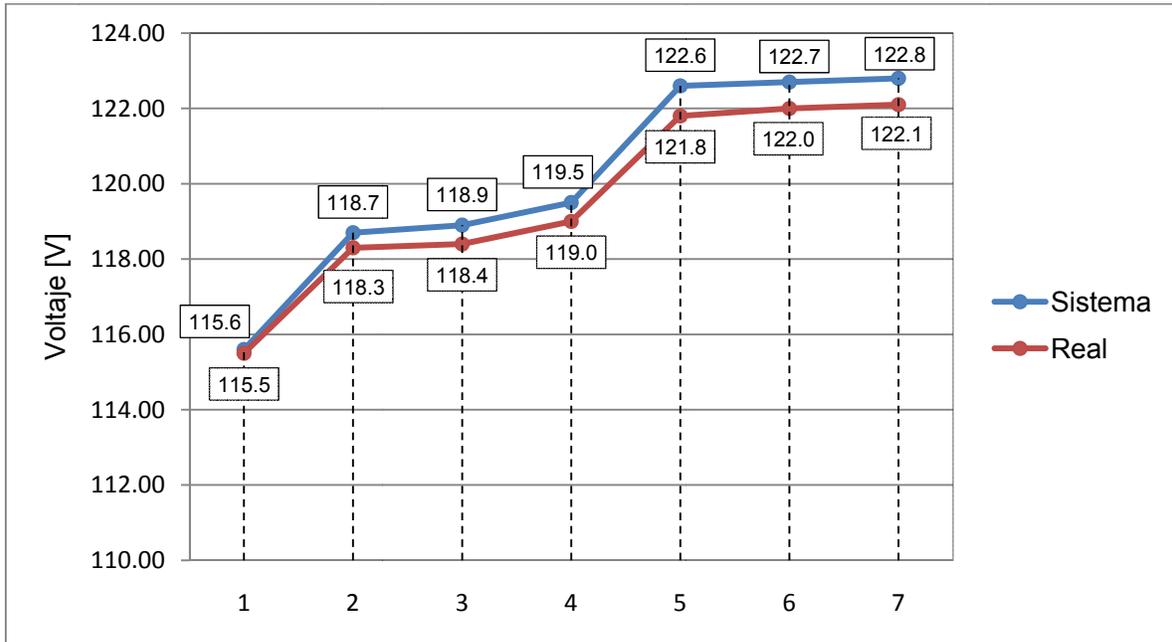


Figura 4.7 Gráfica comparativa de los valores de Voltaje reales y del sistema con reajuste.

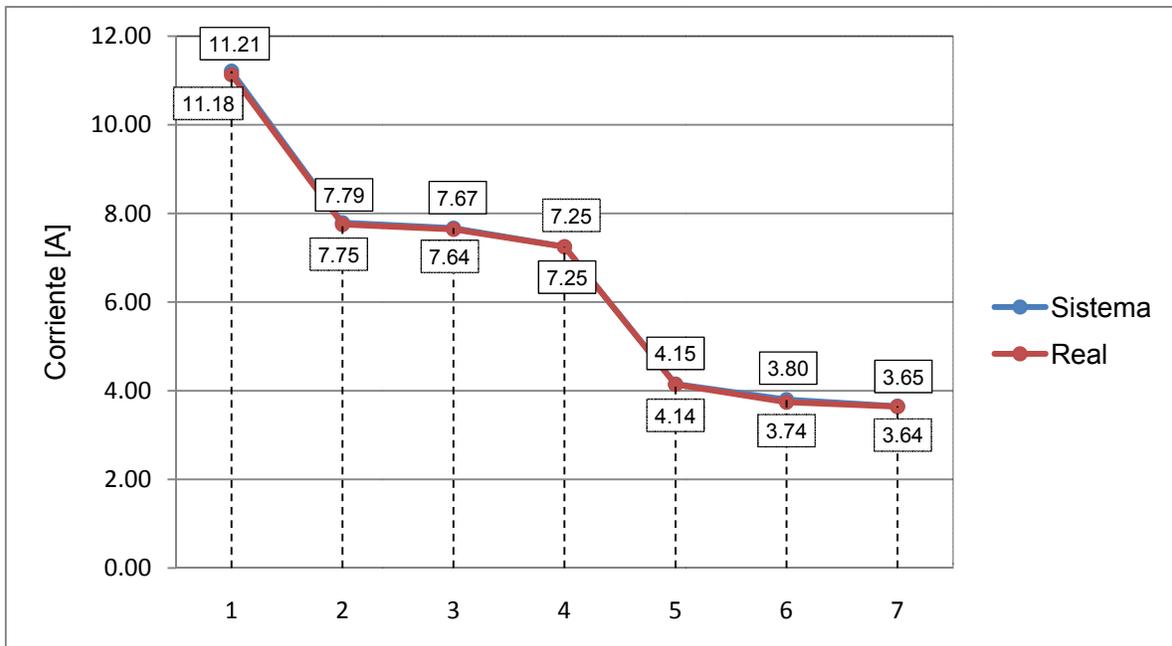


Figura 4.8 Gráfica comparativa de los valores de Corriente reales y del sistema con reajuste.

| Voltaje Real [V] | Voltaje Sistema [V] | Error Absoluto [V] | Corriente Real [A] | Corriente Sistema [A] | Error Absoluto [A] |
|------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| 115.50 | 115.60 | 0.10 | 11.13 | 11.21 | 0.08 |
| 118.30 | 118.70 | 0.40 | 7.75 | 7.79 | 0.04 |
| 118.40 | 118.90 | 0.50 | 7.64 | 7.67 | 0.03 |
| 119.00 | 119.50 | 0.50 | 7.25 | 7.25 | 0.00 |
| 121.80 | 122.60 | 0.80 | 4.14 | 4.15 | 0.01 |
| 122.00 | 122.70 | 0.70 | 3.74 | 3.80 | 0.06 |
| 122.10 | 122.80 | 0.70 | 3.64 | 3.65 | 0.01 |
| Promedio: | | 0.53 | Promedio: | | 0.03 |

Tabla 4.4 Error en las mediciones de los valores obtenidos en las pruebas del sistema con reajuste.

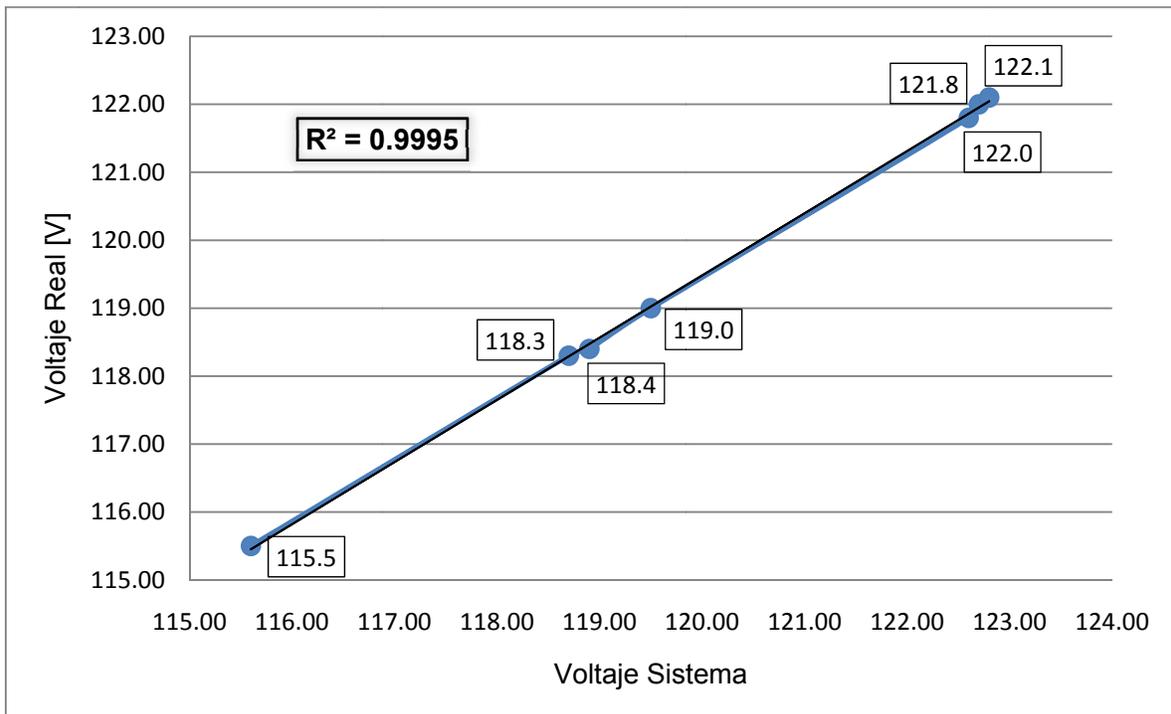


Figura 4.9 Gráfica comparativa de los valores de Voltaje reales y del sistema con reajuste.

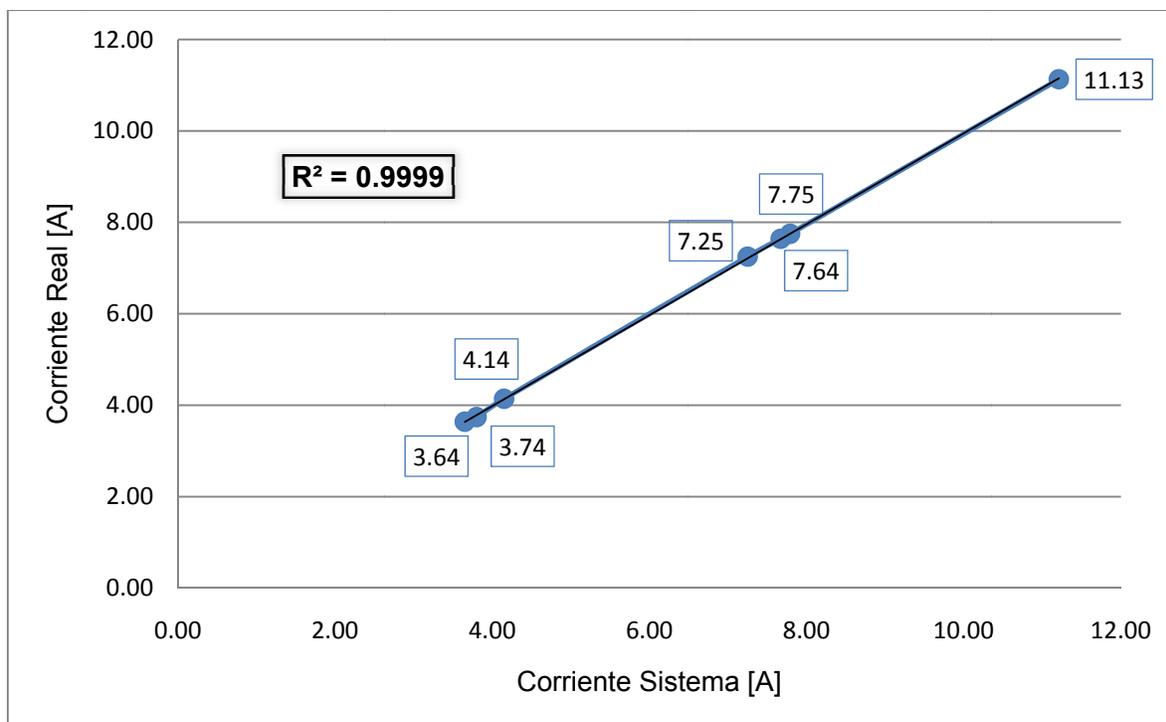


Figura 4.10 Gráfica comparativa de los valores de Corriente reales y del sistema con reajuste.

Como puede observarse al comparar las gráficas del antes y el después del reajuste, hubo mejoras en todos los aspectos de la toma de valores y con respecto a su homogenización evitándose así que existan valores “que se disparen” de los demás.

A continuación, para redondear las observaciones sobre los resultados anteriores, se comparan los datos obtenidos antes y después del reajuste mediante el promedio de error absoluto utilizando la Tabla 4.5.

| Antes del reajuste | Después del reajuste | Antes del reajuste | Después del reajuste |
|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| Error Absoluto [V] | Error Absoluto [V] | Error Absoluto [A] | Error Absoluto [A] |
| 2.5 | 0.10 | 0.08 | 0.08 |
| 1.3 | 0.40 | 0.13 | 0.04 |
| 1.3 | 0.50 | 0.10 | 0.03 |
| 1.0 | 0.50 | 0.08 | 0.00 |
| 0.0 | 0.80 | 0.00 | 0.01 |
| 0.2 | 0.70 | 0.06 | 0.06 |
| 0.3 | 0.70 | 0.02 | 0.01 |
| Promedio | | Promedio | |
| 0.94 | 0.53 | 0.07 | 0.03 |

Tabla 4.5 Error en las mediciones de los valores obtenidos en las pruebas del sistema antes y después del reajuste.

Como puede observarse, con el reajuste se obtienen mediciones con un error promedio de 53 centésimas de volt y 30 miliamperios que equivalen a 41 centésimas de volt y 40 miliamperios de error menos que antes del reajuste.

Finalmente, otro tipo de pruebas realizadas fueron las referentes al factor de potencia, calculado cuando el sistema se encuentra en modo medidor de consumo energía eléctrica. Para esto se comparó el desfase entre corriente y voltaje utilizando como medida patrón un osciloscopio marca Tektronix modelo 2336, obteniéndose las mediciones siguientes:

| Carga | Ángulo de desfase Real [°] | Ángulo de desfase Sistema [°] |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Refrigerador + 2 lámparas de halógeno | 4.3 | 1.2 |
| 2 lámparas de halógeno | 8.6 | 7.9 |
| Refrigerador + Ventilador | 34.3 | 29.2 |
| Refrigerador | 42.9 | 39.3 |

Tabla 4.6 Valores obtenidos en las pruebas del ángulo de desfase entre las señales de voltaje y corriente.

A continuación se calcula el error absoluto. Recuérdese que el máximo error de ángulo de desfase es 90°.

| Ángulo de desfase Sistema [°] | Ángulo de desfase Real [°] | Error Absoluto [°] |
|-------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 1.2 | 4.3 | 3.1 |
| 7.9 | 8.6 | 0.7 |
| 29.2 | 34.3 | 5.1 |
| 39.3 | 42.9 | 3.6 |
| Promedio: | | 3.125 |

Tabla 4.7 Error en las mediciones de los valores obtenidos en las pruebas del ángulo de desfase entre las señales de voltaje y corriente.

La tabla anterior muestra que en promedio existe un error de $\pm 3.125^\circ$.

Capítulo 5

Conclusiones

Con el propósito de evaluar el trabajo realizado en esta tesis, esta sección incluye las conclusiones obtenidas en referencia al objetivo planteado, así como para poder obtener un indicador de los logros, conocimientos y experiencia adquiridos.

Con respecto al diseño y construcción física del sistema, se cubrió el objetivo de hacer al sistema lo menos invasivo posible utilizando sensores que brindan una instalación segura como lo es el sensor de gancho que simplemente requiere rodear un cable que se encuentra en la mayoría de los casos correctamente aislado. Aunado a esto, fue posible lograr mediante un correcto proceso de calibración, que el sistema respondiera de forma confiable en la toma de mediciones, lo que le brinda al usuario la certidumbre que se buscaba.

En cuanto a la alimentación del sistema, se consiguió evitar el uso de pilas grandes (tipo AA); sin embargo, podría en un futuro agregársele una batería tipo botón para evitar depender del suministro eléctrico y contrarrestar alguna falla de éste.

Sobre el uso del Microcontrolador para el control del sistema, fue correcta la decisión de utilizar un Controlador Digital de Señales, que aparte de cubrir las necesidades del proyecto, brinda la posibilidad de forzarlo aún más para sacarle más provecho utilizando todas o la mayoría de sus demás prestaciones, por ejemplo, en cuanto a velocidad de trabajo.

Con respecto a la interface gráfica, se cubrió el objetivo de desarrollar un programa bastante interactivo y que llama la atención por su fácil acceso a los datos, visualmente hablando. Esto se logró teniendo en mente que el usuario tuviera la sensación de estar observando los datos de Voltaje y Corriente RMS enfrente de un multímetro, viendo las gráficas de las señales en un osciloscopio y viendo su recibo de consumo eléctrico.

Con respecto al desempeño del sistema y tomando en cuenta los resultados mencionados en el capítulo 4, fue posible llegar a la conclusión de que el sistema es bastante exacto en situaciones controladas; sin embargo, esto nos lleva a la necesidad de probarlo en situaciones reales e instalarlo al aire libre como lo está la mayoría de medidores de luz y así tomar en cuenta y crear un sistema que contrarreste los errores producidos por la temperatura y las condiciones atmosféricas.

Por otra parte, los conocimientos adquiridos con el desarrollo del proyecto, junto con todos los aprendidos durante la carrera, redondean la formación de Ingeniero al lograr conjugar la teoría y la práctica en busca de un objetivo específico que abarca conocimientos del área de la electrónica, la programación y la instrumentación, lo que en dado momento, se puede extrapolar sin problemas para la realización de proyectos de mayor escala en el ámbito profesional. Esto incluye la experiencia en la toma de decisiones y el cumplimiento de tiempos específicos que de otra manera serían difíciles de adquirir en el ámbito escolar.

En cuanto a la contribución del sistema desarrollado para con la sociedad, pienso que favorece el desarrollo de una cultura responsable de la utilización de la energía eléctrica con miras al no desperdicio de ésta y aún más importante al cuidado del medio ambiente.

Aunque se considera que los objetivos planteados se cumplieron satisfactoriamente, siempre surge la inquietud de mejorar el sistema, para esto se creó el siguiente capítulo que menciona el trabajo futuro que podría realizarse ya sea por parte del autor o por parte de otros futuros ingenieros.

Capítulo 6

Trabajo Futuro

Pensando en el potencial del sistema, a continuación se plantean algunas modificaciones u optimizaciones con el fin de que el proyecto pueda ser retomado en un futuro como base para el desarrollo de otras tesis, proyectos de investigación o incluso su comercialización.

Implementar la electrónica del sistema en un circuito impreso

Para que el sistema de monitoreo pueda ser instalado en una acometida de residencia doméstica, como se plantea en el objetivo de la aplicación, es necesario conjuntar todas sus partes en un circuito impreso que a su vez se introduzca en un contenedor adecuado proporcionando al sistema las siguientes características:

- Seguro: para evitar daños al usuario.
- Compacto: para su fácil transporte e instalación.
- Resistente: que cuente con protección contra el clima y la temperatura para evitar errores de medición.
- Económico: tener una buena relación calidad-precio.
- Que exista la posibilidad de cumplir normas “estándar” nacionales y/o internacionales.

Migrar la comunicación Microcontrolador-PC a inalámbrica

Ya que actualmente está en boga el uso de dispositivos inalámbricos, para tener alguna oportunidad de competir en el mercado será necesario migrar a dicha tecnología, aunque debe tomarse en cuenta que el monto total no se eleve demasiado. Para esta etapa se podrían implementar el uso de tecnología *Bluetooth* o *Wi-Fi*.

Introducción de capacidades de monitoreo a través de internet

Debido al auge del internet y a su fácil acceso desde cualquier parte del mundo, el introducir esta tecnología al sistema podría brindarnos la oportunidad de tomar la tarifa vigente desde la red, en lugar de que sea introducido por el usuario y también podría darnos la oportunidad de utilizar la utilidad Google PowerMeter¹ para evitarnos el desarrollo de una nueva interface.

Monitorear otro tipo de variables físicas de consumo residencial

Por cuestiones de versatilidad, podría agregarse al sistema, el monitoreo de consumo de agua y gas que completaría todos los servicios básicos de una casa habitación.

Implementación de un sistema de control de Factor de Potencia

Otro camino que podría tomar el proyecto es la de implementar un sistema de control del factor de potencia que sea capaz de medirlo y aplicar una serie de cargas inductivas o capacitivas para tratar de optimizarlo a su valor recomendable que es la unidad, y mejorar el consumo de potencia y por ende tener un menor gasto de energía eléctrica.

Implementación de un algoritmo para el estudio de calidad de energía

Otra de las posibilidades a tomar en cuenta, podría ser el de implementar un algoritmo capaz de analizar y estudiar las señales de consumo más a fondo, tomando en cuenta, por ejemplo, distorsiones armónicas, ruidos y señales no deseadas que pueden resultar interesantes y necesarias en otras aplicaciones.

¹ Véase el punto 2.3.3.1, Google PowerMeter.

Bibliografía

Referencias Bibliográficas

- [A] Boylestad, Robert L. *“Introducción al análisis de circuitos”*. 10ª ed. Pearson Educación, México, 2004.
- [B] Bird, John. *“Electrical and Electronic Principles and Technology”*. 3ª ed. Elsevier, Amsterdam, 2007.
- [C] Bossche, Alex van den. *“Inductors and transformers for power electronics”*. Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.
- [D] Tumański, Slawomir. *“Principles of electrical measurement”*. Taylor & Francis, Boca Raton, 2006.
- [E] Iwansson, Kaj. *“Measuring current, voltage, and power”*. Elsevier, Amsterdam, 1999.
- [F] Webster, John G., editor en jefe. *“The measurement, instrumentation, and sensors handbook”*. CRC Press & IEEE Press, Boca raton, 1999.
- [G] Rashid, Muhammad H., editor en jefe. *“Power electronics handbook”*. Academic Press, San Diego, 2001.
- [H] Malvino, Albert P. *“Principios de electrónica”*. 3ª ed. McGraw-Hill, México, 1986.
- [I] Dailey, Denton J. *“Operational amplifiers and linear integrated circuits”*. McGraw-Hill, New York, 1989.
- [J] Di Jasio, Lucio. *“Programming 16-bit microcontrollers in C : learning to fly the PIC 24”*. Elsevier, Amsterdam, 2007.

Referencias a Hojas de datos

- [a] P3 International Corporation. *“P4320 Kill A Watt TM PS Operating Manual”*. P3 International Corporation, New York, 2010.
- [b] Black & Decker Inc. *“B&D Power monitor instruction manual”*. Black & Decker Inc, Maryland, 2008.

-
- [c] Microchip Technology Inc. *"PICkit2 Programmer/Debugger User's Guide"*. Microchip Technology Inc., Arizona, 2008.
- [d] Fluke Corporation. *"AC Current Transformer Model Y8101 Instruction Sheet"*. Fluke Corporation, Washington, 1980.
- [e] Microchip Technology Inc. *"dsPIC33FJ32GP302/304, dsPIC33FJ64GPX02/X04, and dsPIC33FJ128GPX02/X04 Data Sheet: High-Performance, 16-bit Digital Signal Controllers"*. Microchip Technology Inc., Arizona, 2009.
- [f] Microchip Technology Inc. *"16-bit MCU and DSC Programmer's Reference Manual High-Performance Microcontrollers (MCU) and Digital Signal Controllers (DSC)"*. Microchip Technology Inc., Arizona, 2009.
- [g] Microchip Technology Inc. *"24AA512/24LC512/24FC512 Data Sheet: 512 K I²C CMOS Serial EEPROM"*. Microchip Technology Inc., Arizona, 2004.
- [h] LINX Technologies, Inc. *"SDM-USB-QS-S USB Module Data Guide"*. LINX Technologies, Inc., Oregon, 2008.
- [i] Fluke Corporation. *"FLUKE 16 Multimeter with Temperature Instruction Sheet"*. Fluke Corporation, Washington, 2002.
- [j] Fluke Corporation. *"Fluke 320 and 330 Series Clamp Meters Technical Data"*. Fluke Corporation, Washington, 2005.
- [k] STMicroelectronics. *"TL084/TL084A/TL084B Data Sheet: General Purpose J-FET Quad Operational Amplifiers"*. STMicroelectronics, Italy, 2001.

Referencias Electrónicas

- [1] Comisión Federal de Electricidad. Listado de prototipos aprobados [en línea]. <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/serviciostecnicos/Paginas/Listadodeprototiposaprobados.aspx>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [2] Google Inc. Google Power Meter [en línea]. <http://www.google.com/powermeter/about/index.html>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [3] Comisión Federal de Electricidad. CFE [en línea]. <http://www.cfe.gob.mx/Paginas/Home.aspx>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
-

-
- [4] Energy Inc. The energy Detective [en línea].
<http://www.theenergydetective.com/>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [5] Alta Power Corp. Información de producto The energy Detective [en línea].
<http://www.altapower.com/ted-energy-detective-residential-energy-monitor-2.html>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [6] DIY KYOTO Corp. Wattson [en línea].
<http://www.diykyoto.com/uk>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [7] Amazon.com Inc. Información de producto Wattson [en línea].
<http://www.amazon.co.uk/wattson-wattson01-Wattson/dp/B00154KHW6>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [8] Onzo Ltd. ONZO [en línea].
<http://onzo.com/solutions/>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [9] P3 International Corporation. Kill A Watt [en línea].
<http://www.p3international.com/index.html>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [10] Amazon.com Inc. Información de producto Kill A Watt [en línea].
<http://www.amazon.com/P3-International-P4320-Kill-Watt/dp/B000UKSESK>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [11] Black & Decker Inc. Power Monitor [en línea].
http://www.blackanddecker.com/Energy/PowerMonitor.aspx?WT.mc_id=BDPowerMonitor
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [12] Amazon.com Inc. Información de producto B&D Power Monitor [en línea].
http://www.amazon.com/Black-Decker-EM100B-Energy-Monitor/dp/B001ELJKLE/ref=pd_sim_hi_6
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [13] National Instruments Corporation. NI LabVIEW [en línea].
<http://www.ni.com/labview/>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
-

- [14] National Instruments Corporation. NI VISA [en línea].
<http://www.ni.com/visa/>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [15] National Instruments Corporation. NI Multisim [en línea].
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203426>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [16] National Instruments Corporation. NI Ultiboard [en línea].
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203428>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [17] Microchip Technology Inc. MPLAB Integrated Development Environment [en línea].
http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en019469&part=SW007002
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [18] Microchip Technology Inc. dsPIC33FJ128GP802 [en línea].
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en532298>
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [19] Digital SA Online cc. Foto de producto cable USB tipo A-B [en línea].
http://www.digitalsaonline.co.za/catalog/index.php?main_page=popup_image&pID=11889&zenid=ru2j6m8aocrsegubtuq49g6730
[Consultado Septiembre 22, 2010]
- [20] Bricolaje Casero.com. Tablero eléctrico [en línea].
<http://www.bricolajecasero.com/electricidad/tablero-electrico.php>
[Consultado Septiembre 22, 2010]

Apéndices

Apéndice A. Conexión y carga de un programa en el Microcontrolador dsPIC33FJ128GP802 utilizando el programador PICKit 2 ^[c]

El programador PICKit 2 se conecta al Microcontrolador por medio de 5 pines y vía USB con la PC. En la Figura A.1 se muestra el diagrama de conexión para el dsPIC33FJ128GP802.

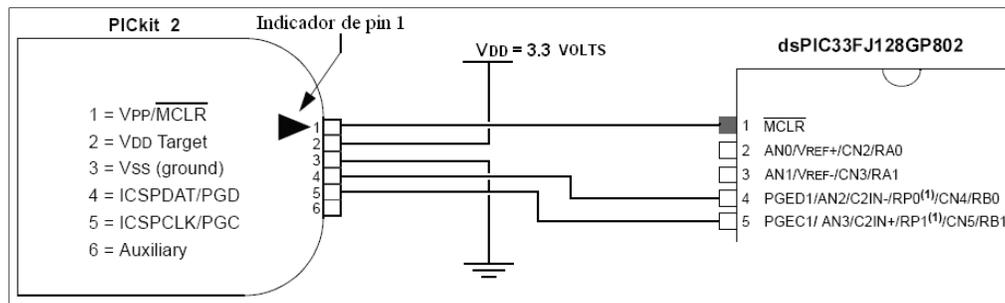


Figura A.1 Diagrama de conexión entre el programador PICKit 2 y el Microcontrolador dsPIC33FJ128GP802.

Una vez conectado el PICKit 2 con el Microcontrolador y la PC, es necesario emplear la aplicación incluida con el PICKit 2 y llevar a cabo los siguientes pasos, ilustrados en las Figuras A.2 a A5:

(a) Presionar File >> Import Hex.

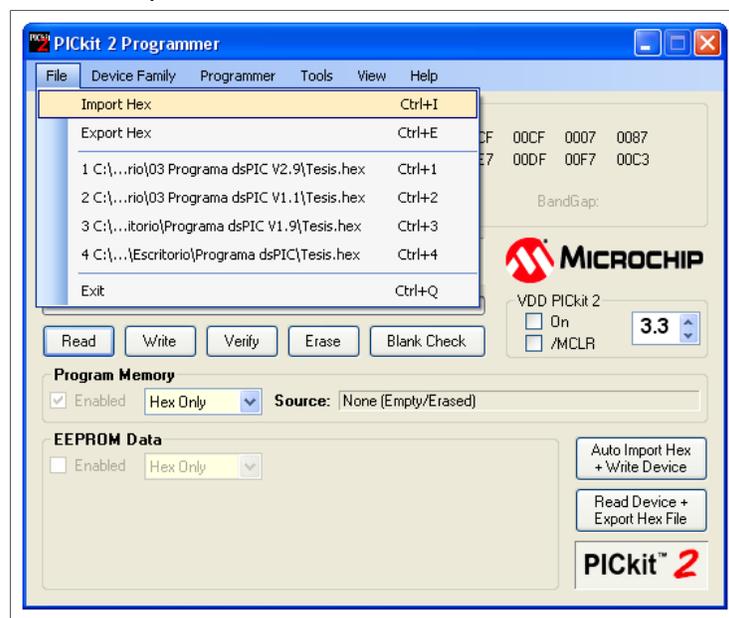


Figura A.2

(b) Seleccionar el archivo hex deseado >> Abrir.

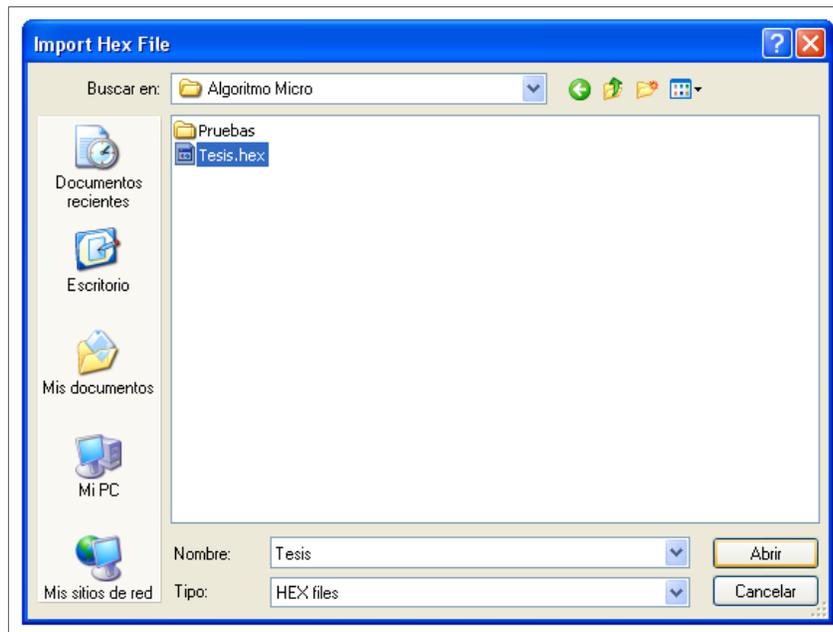


Figura A.3

(c) Presionar Write.

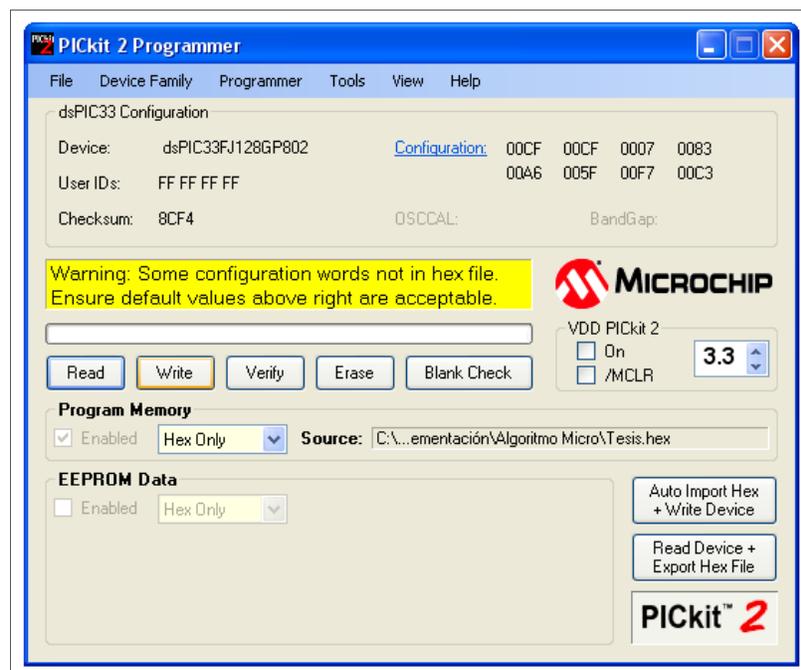


Figura A.4

(d) Esperar a que el programa se cargue con éxito.

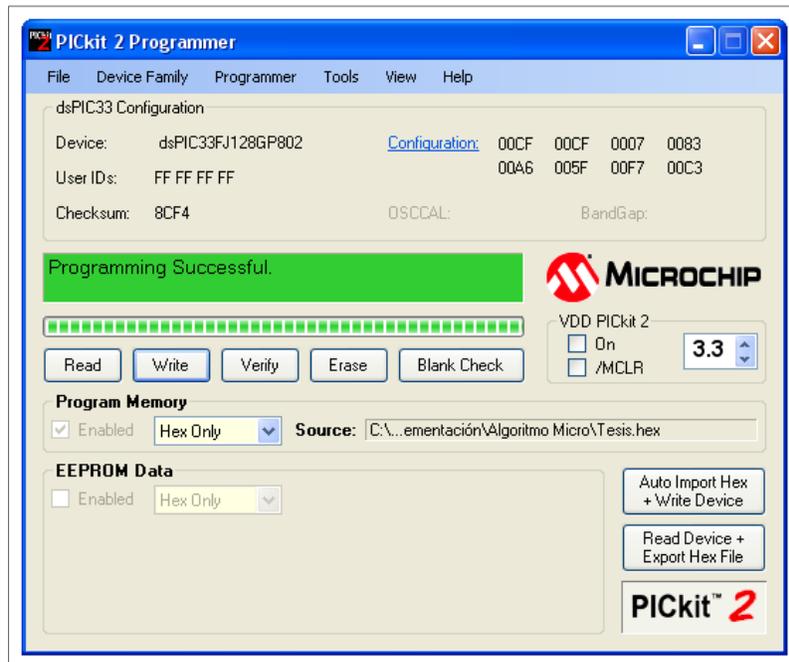


Figura A.5

Apéndice B. Diagrama eléctrico del sistema

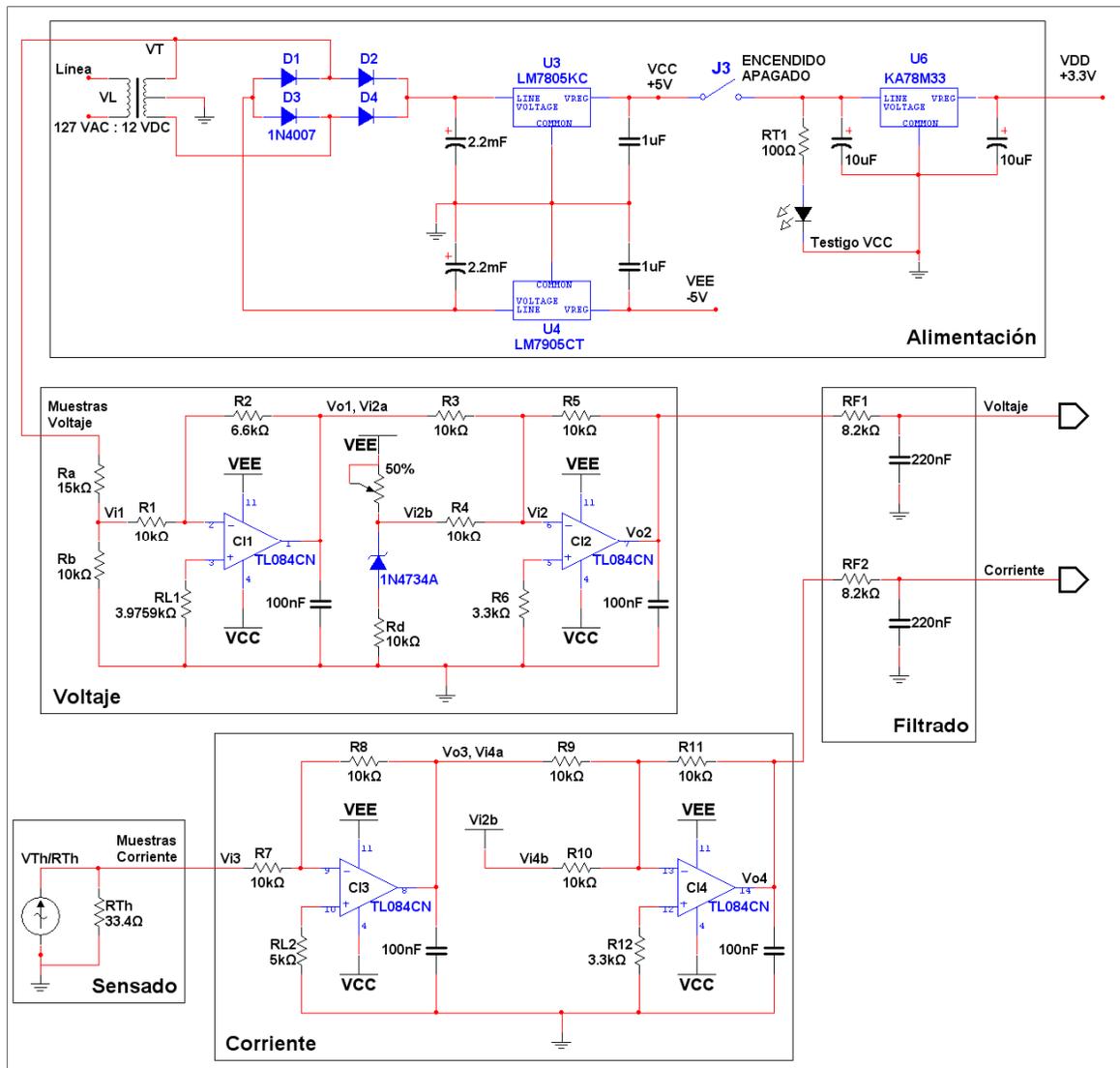


Figura B.1 Diagrama eléctrico del sistema (Parte 1 de 2).

SISTEMA DE MONITOREO DE CONSUMO ELÉCTRICO PARA ACTIVIDADES RESIDENCIALES BASADO EN MICROCONTROLADOR

DIAGRAMA ELÉCTRICO

Diseño:

Angel Padilla Salazar

SEPTIEMBRE 2010

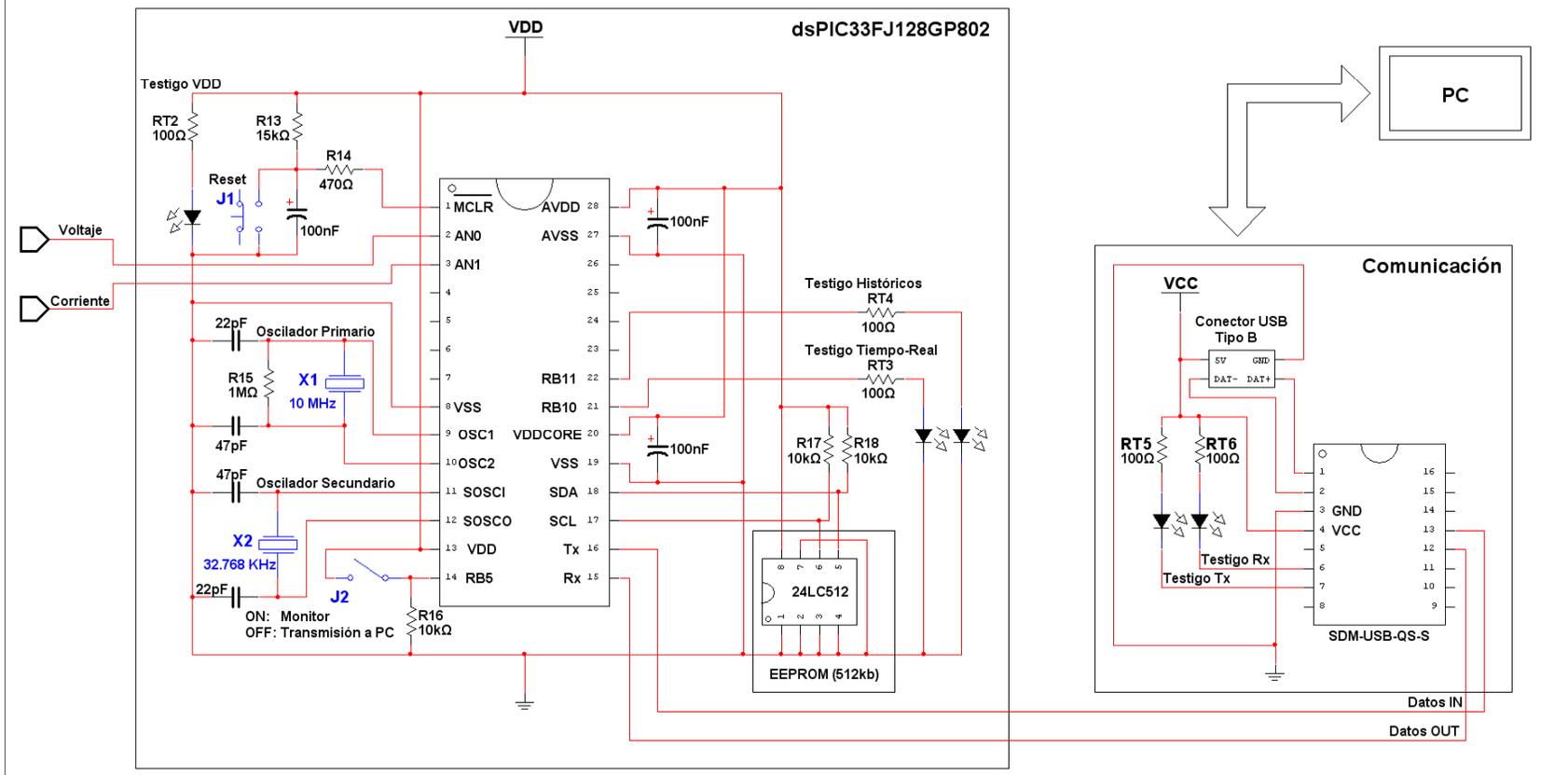


Figura B.1 Diagrama eléctrico del sistema (Parte 2 de 2).