

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS



“Implementación de un sistema de monitoreo de consumo y calidad de la energía eléctrica en un inversor monofásico multinivel”

Rafael Cabrera Ovalle

Tesis de Maestría
presentada a la Unidad Académica de Posgrado en Ingeniería
de acuerdo a los requerimientos de la Universidad para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERA

ORIENTACIÓN: ENERGÍAS RENOVABLES Y CIENCIAS AMBIENTALES

Directores de tesis:

Dr. Jorge de la Torre Ramos
Dr. Francisco Eneldo López Monteagudo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
Zacatecas, Zacatecas., mayo de 2018

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS DE MAESTRÍA



C. Rafael Cabrera Ovalle
PRESENTE

La Dirección de la Unidad Académica de Posgrado en Ingeniería le notifica a usted que la Comisión Revisora de su documento de Tesis de Maestría, integrada por los profesores Dr. Jorge de la Torre Ramos, Dr. Francisco Eneldo López Monteagudo, Dr. Jesús Manuel Rivas Martínez, Dr. Francisco Bañuelos Ruedas y Dr. Manuel Reta Hernández, ha concluido la revisión del mismo y ha dado la aprobación para su respectiva presentación.

Por lo anterior, se le autoriza la impresión definitiva de su documento de Tesis de Maestría a fin de dar trámite a la sustentación de su Examen de Grado, a presentarse el

Atentamente

Zacatecas, Zac., fecha

M.I.A. Carlos Héctor Castañeda
Ramírez

Director de la Unidad Académica de Posgrado en Ingeniería

APROBACIÓN DE EXAMEN DE GRADO



Se aprueba por unanimidad el Examen de Grado de Rafael Cabrera Ovalle presentado el para obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ORIENTACIÓN: ENERGÍAS RENOVABLES Y CIENCIAS
AMBIENTALES

Jurado:

Presidente: Dr. Francisco Eneldo López Monteagudo _____

Primervocal: Dr. Jesús Manuel Rivas Martínez _____

Segundo vocal: Dr. Héctor Rene Vega Carrillo _____

Tercervocal: Dr. Manuel Reta Hernández _____

Cuarto vocal: Dr. Francisco Bañuelos Ruedas _____

Dedico

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) por el apoyo brindado que hizo posible la realización del presente trabajo.

Contenido

Lista de figuras	v
Lista de tablas	ix
Nomenclatura.....	x
Resumen	xii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Consumo de energía eléctrica en el mundo.	2
1.2. Capacidad instalada y generación de energía eléctrica.....	3
1.3. Calidad de la energía.....	6
1.4. Hipótesis	7
1.5. Objetivo	7
Capítulo 2. Fundamentos teóricos.....	8
2.1. Factor de potencia.....	8
2.2. Distorsión armónica.....	9
2.3. Transformada de Fourier	12
2.4. La transformada discreta de Fourier (DFT)	13
2.4.1. La transformada rápida de Fourier (FFT)	14

	4
2.5. Teorema demuestro deNyquist	
16	
Capítulo 3. Diseño y desarrollo del prototipo	18
3.1. Microcontroladores PIC	
18	
3.2. Etapadeacondicionamiento de señales	
19	

	5
3.3. Comunicación serial	
24	
3.3.1. Módulos Xbee.....	
26	
3.4. Desarrollo del prototipo	
27	
3.4.1. Simulación del prototipo.....	
29	
3.4.2. Implementación del prototipo.....	
33	
3.5. Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario (GUI)	
37	
3.5.1. Desarrollo de la GUI en MATLAB	
38	
Capítulo 4. Pruebas y resultados	42
4.1. Prueba con carga puramente resistiva.....	
42	
4.2. Pruebas con carga inductiva-resistiva.....	
46	
4.3. Pruebas con inversor multinivel	
52	
4.3.1. Pruebas con carga resistiva	
52	
4.3.2. Pruebas con carga inductiva-resistiva.....	
55	
Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro	59
5.1. Conclusiones.....	
59	
5.2. Trabajo a futuro	
60	
Apéndices.....	61
Apéndice A: Hojas de datos.....	62
Apéndice B: Análisis de costos.	73

Bibliografía..... 74

Lista de figuras

Figura1.1.	Variación porcentual anual del consumo de energía eléctrica a nivel mundial.....	2
Figura1.2.	Consumo total de electricidad a nivel mundial en el año 2012.....	3
Figura1.3.	Capacidad de generación de energía eléctrica en miembros de la OCDE en el año 2012.....	4
Figura1.4.	Generación de electricidad mundial a partir de fuentes de energía renovables.....	5
Figura1.5.	Tendencia mundial de las fuentes de energía para la generación eléctrica.	6
Figura2.1.	Triángulo de potencia.....	9
Figura2.2.	Cálculo de una FFT de ocho puntos usando el esquema FFT Radix-2.....	15
Figura3.1.	Microcontrolador PIC16F877A.	19
Figura3.2.	Sensor de voltaje de precisión PH1135.....	20
Figura3.3.	Divisor de voltaje	20
Figura3.4.	Sensor de corriente por efecto Hall CSLH3A45.....	21
Figura3.5.	Circuito de amplificación implementado para el sensado de la corriente.....	22

Figura3.6.	Circuitodetector de cruce por cero.	8
24		
Figura3.7.	Esquema decomunicación asíncrona.....	
25		
Figura3.8.	Módulo decomunicación Xbee.....	
27		
Figura3.9.	Diagrama debloques del sistema.....	
27		
Figura3.10.	Entorno detrabajo del software Proteus 8 Professional de ISIS.....	
29		
Figura3.11.	Diagrama esquemático para la simulación del prototipo.	
30		
Figura3.12.	Diagrama deflujo del código del microcontrolador PIC16F877A.....	
32		

Figura3.13.	Módulo Xbee montado sobre basereguladora devoltajeSparkFun XBee Explorer Regulated.....	33
Figura3.14.	Diseño del circuito impreso desarrollado en PCB Wizard Professional Edition.....	34
Figura3.15.	Prototipo del sistema de monitoreo.....	34
Figura3.16.	Módulo de comunicación serial por USB SparkFun XBee Explorer Dongle para dispositivos Xbee.	35
Figura3.17.	Software X-CTU de Digi para programación de módulos Xbee.....	36
Figura3.18.	Software Realterm: Serial Terminal recibiendo datos desde el puerto COM.....	37
Figura 3.19.	Entorno GUIDE para desarrollo de interfaces gráficas en <i>MATLAB</i>	39
Figura 3.20.	Diagrama de flujo del código implementado en la GUI de <i>MATLAB</i>	40
Figura 3.21.	Interface gráfica de usuario diseñada en <i>MATLAB</i> para el sistema de monitoreo.	
Figura 3.22.	41
Figura 4.1.	Archivo de texto generado por la GUI a partir de los datos recibidos del sistema de monitoreo.....	
Figura 4.2.		41
Figura 4.3.	Analizador de calidad de la energía Fluke 43B.....	42
Figura 4.4.	Carga resistiva implementada para las pruebas (plancha Oster 5002-054)	43
Figura 4.5.	Formas de onda obtenidas mediante el prototipo con carga puramente resistiva (plancha Oster 5002-054).	43
Figura 4.6.	Formas de onda obtenidas mediante el analizador Fluke 43B con carga puramente resistiva (plancha Oster 5002-054).....	44
Figura 4.7.		

Componen 45

tes Cargas inductiva-resistiva implementadas para las pruebas. a)

armónicos Esmeril

obtenidos B&D BT3600-B3, b)Cortadora Makita 2414NB.....

mediante 46

el

prototipo

con carga

resistiva

(plancha

Oster 5002-

054).

.....

.....

.....

.... 44

Component

es

armónicos

obtenidos

mediante el

analizador

Fluke 43B

con carga

resistiva

(plancha

Oster

5002-054).

a)

Voltaje, b)

Corriente

y c)

Potencia.

.....

Figura 4.8. Formas de onda obtenidas mediante el prototipo con carga inductiva-resistiva (Esmeril B&D BT3600-B3).....	47
Figura 4.9. Formas de onda obtenidas mediante el analizador Fluke 43B con carga inductiva-resistiva (Esmeril B&D BT3600-B3).	
Figura 4.10.	47
Componentes armónicos obtenidos mediante el prototipo con carga inductiva-resistiva (Esmeril B&D BT3600-B3)	
Figura 4.11.	48
Figura 4.12. Componentes armónicos obtenidos mediante el analizador Fluke 43B con carga inductiva-resistiva (Esmeril B&D BT3600-B3).....	48
Figura 4.13. Formas de onda obtenidas mediante el prototipo con carga inductiva-resistiva (Cortadora Makita2414NB).	
Figura 4.14.	49
Formas de onda obtenidas mediante el analizador Fluke 43B con carga inductiva-resistiva (Cortadora Makita 2414NB).....	50
Figura 4.15. Componentes armónicos obtenidos mediante el prototipo con carga inductiva-resistiva (Cortadora Makita 2414NB).....	50
Figura 4.16. Componentes armónicos obtenidos mediante el analizador Fluke 43B con carga inductiva-resistiva (Cortadora Makita 2414NB). a) Voltaje, b)Corriente y c) Potencia.....	
Figura 4.17.	51
Figura 4.18. Carga resistiva utilizada enel inversor multinivel (foco incandescente).....	52
Figura 4.19. Formasdeonda obtenidas mediante el prototipo enel inversor multinivel concarga resistiva (foco incandescente).....	53
Figura 4.20. Formas deonda obtenidas mediante el analizador Fluke 43B enel inversor multinivelconcarga resistiva (foco incandescente).	53

Componentes Corriente y c) Potencia.....
54

armónicos obtenidos mediante el prototipo en el inversor multinivel con carga resistiva (foco incandescente).

.....

.....

54

Componentes armónicos obtenidos mediante el analizador Fluke 43B en el inversor multinivel con carga resistiva (foco incandescente). a) Voltaje, b)

Figura 4.22. Formas de onda obtenidas mediante el prototipo en el inversor multinivel con carga inductiva-resistiva (Dremel300).	56
Figura 4.23. Formas de onda obtenidas mediante el analizador Fluke 43B en el inversor multinivel con carga inductiva-resistiva (Dremel 300).....	
Figura 4.24. 56	
Componentes armónicos obtenidos mediante el prototipo en el	
Figura 4.25. inversor multinivel con carga inductiva-resistiva (Dremel	
300).....	57
Componentes armónicos obtenidos mediante el analizador Fluke 43B en	
el inversor multinivel con carga inductiva-resistiva (Dremel 300). a)	
Voltaje,	
b) Corriente y c) Potencia.....	57
Figura A.1. Hoja de datos del microcontrolador PIC 16F877A (A)	62
Figura A.2. Hoja de datos del microcontrolador PIC 16F877A (B).....	63
Figura A.3. Hoja de datos del microcontrolador PIC 16F877A (C).....	64
Figura A.4. Hoja de datos del módulo RF Xbee (A).....	65
Figura A.5. Hoja de datos del módulo RF Xbee (B)	66
Figura A.6. Hoja de datos del módulo RF Xbee (C)	67
Figura A.7. Hoja de datos del amplificador operacional LM324.....	68
Figura A.8. Hoja de datos del regulador de voltaje LM7805	69
Figura A.9. Hoja de datos del optoacoplador 4N25	70
Figura A.10. Hoja de datos del sensor de voltaje de precisión PH1135.....	71
Figura A.11. Hoja de datos del sensor de corriente por efecto Hall CSLH3A45.....	72

Lista de tablas

Tabla2.1.	Límite dedistorsión armónica envoltaje según la IEEE Std 519.....	11
Tabla2.2.	Límite dedistorsión armónica encorriente según laIEEE Std 519.....	12
Tabla2.3.	Calculodelosíndices para la FFT deocho puntos mediante el algoritmo Radix-2.....	15
Tabla4.1.	Tabla comparativa entre los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B para una carga puramenteresistiva (plancha Oster 5002-054).	45
Tabla4.2.	Tabla comparativa entre los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B concarga inductiva-resistiva (Esmeril B&D BT3600-B3).	49
Tabla4.3.	Tabla comparativa entre los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B parauna carga inductiva- resistiva (Cortadora Makita 2414NB).	51
Tabla4.4.	Tabla comparativa entre los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B para una c carga inductiva-resistiva conectada al inversor multinivel(foco incandescente).	55
Tabla4.5.	Tabla comparativa entre los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B para unacarga inductiva-resistiva conectada al inversor multinivel (Dremel 300).	58
TablaB.1.	Análisis decostos de los componentes delprototipo.....	73

Nomenclatura

Simbología

Frecuencia.

Dióxido de
carbono. Voltaje

RMS. Corriente

RMS. Potencia.

Potencia reactiva.

Potencia aparente.

Fase.

Coseno.

Periodo de muestreo.

Numero de muestras.

Tiempo total de
muestreo. Frecuencia de
muestreo.

Frecuencia máxima de la
señal. Corriente de corto
circuito.

Corriente máxima a la frecuencia
fundamental. Armónico.

Tensión del bus.

Ohms.

Entradas o salidas digitales.

Abreviaturas

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.
f.d.p	Factor de potencia.
DFT	Transformada discreta de Fourier.
THD	Distorsión armónica total.
TDD	Distorsión de demanda total.
GUI	Interfaz gráfica de usuario.
IDE	Entorno de desarrollo integrado.
ADC	Convertidor análogo-digital.
RISC	Computador con Conjunto de Instrucciones Reducidas.
CISC	Computador con Conjunto de Instrucciones Complejas.
ALU	Unidad aritmética lógica.
UART	Transmisor receptor universal
asíncrono. WPAN	Red inalámbrica de área personal.
PAN ID	Identificador de área personal (Personal Area Network Id.).
MY	Dirección fuente (Source Address).
DL	Dirección de destino (Destination Address Low).

Resumen

Una de las fuentes principales de energía en nuestro planeta es actualmente la energía eléctrica. La electricidad se ha vuelto fundamental para el desarrollo industrial del mundo y se ha convertido en parte importante del desarrollo social. La principal fuente de energía utilizada a nivel mundial para la generación de electricidad son los hidrocarburos, los cuales suelen ser petróleo, carbón y gas natural, sin embargo, estos hidrocarburos son generadores de gases de efecto invernadero, ya que al ser quemados, emiten a la atmósfera lo que contribuye al cambio climático por lo que el uso eficiente de la energía eléctrica se vuelve cada vez más esencial.

Los sistemas de energía están diseñados para operar a frecuencias de 50 o 60 Hz. Sin embargo, ciertos tipos de cargas producen corrientes y tensiones con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de 50 o 60 Hz. Estas frecuencias más altas son una forma de contaminación eléctrica conocida como distorsión armónica del sistema de potencia. Las fuentes más comunes de los armónicos son las cargas no lineales como las cargas electrónicas, tales como variadores de velocidad y fuentes de alimentación conmutadas debido a que estas cargas utilizan diodos rectificadores controlados, transistores de potencia y otros interruptores electrónicos para cortar formas de onda para controlar la potencia.

El grado en que los armónicos se pueden tolerar está determinado por la susceptibilidad de la carga, la existencia de armónicos trae consigo diversos problemas como el sobrecalentamiento de los conductores, disminución del factor de potencia, deterioro o destrucción de bancos de capacitores, deterioro de la forma de onda de la tensión, y consiguientemente el funcionamiento de los aparatos eléctricos. La IEEE Std 519 recomienda fijar los límites de THD en un 5% en voltaje y de igual forma recomienda para

cualquier armónico simple una distorsión menor al 3% ya que al mantener bajos valores de THD en un sistema garantizará el funcionamiento adecuado y una vida más larga de los equipos.

El sistema propuesto posee la capacidad de medir la potencia activa, reactiva y aparente así como el factor de potencia y la distorsión armónica tanto de las formas de onda de voltaje y corriente mediante la implementación de un microcontrolador PIC 16F877A, el cual transmitirá los datos de forma inalámbrica mediante la utilización de módulos XBee desde el sitio de medición hasta el ordenador, permitiendo al usuario llevar un registro mediante una interfaz gráfica de usuario desarrollada en MATLAB lo que hará posible tomar las medidas necesarias para corregir el factor de potencia y mejorar la calidad de la energía eléctrica para así volver más eficiente el uso de esta.

Capítulo 1. Introducción

Una de las fuentes principales de energía en nuestro planeta es actualmente la energía eléctrica. La electricidad se ha vuelto fundamental para el desarrollo industrial del mundo y se ha convertido en parte importante del desarrollo social. La docilidad en su control, la fácil y limpia transformación de energía en trabajo, y el rápido y eficaz transporte, son cualidades que permiten a la electricidad ser una de las principales fuentes de energía.

Actualmente el uso de la energía eléctrica es fundamental para realizar gran parte de nuestras actividades. En los últimos años, el desarrollo de los países se ha reflejado en el volumen de consumo de energía eléctrica, por un lado, las economías desarrolladas han presentado una disminución del crecimiento de la demanda de energía eléctrica, mientras que las economías no desarrolladas han tenido un crecimiento sostenido en los últimos años. A medida que los países se industrializan, el consumo de energía eléctrica es mayor.

A nivel mundial, existen fuertes preocupaciones derivadas del alto consumo de energía eléctrica, una de las más importantes es el impacto ambiental que genera. La principal fuente de energía utilizada a nivel mundial para la generación de electricidad son los hidrocarburos, los cuales suelen ser petróleo, carbón y gas natural.

Estos hidrocarburos son generadores de gases de efecto invernadero, ya que al ser quemados, emiten a la atmósfera lo que contribuye al cambio climático, por lo que el uso eficiente de la energía eléctrica se vuelve cada vez más esencial.

Con la finalidad de disminuir las emisiones derivadas del uso de este tipo de combustibles en la generación de la energía eléctrica, se ha

incrementado el interés en desarrollar tecnologías de captura de carbono; aunado a esto, se ha puesto especial interés

en el desarrollo de tecnología que permita mayor aprovechamiento y generación de energías renovables como son la energía eólica, la energía solar tanto térmica como fotovoltaica, así como el uso de celdas de combustible que generan energía a partir de la utilización de hidrógeno y el aprovechamiento de la biomasa. Sin embargo, a la fecha los avances han sido limitados.[1]

1.1. Consumo de energía eléctrica en el mundo.

Hoy en día las sociedades tienen una mayor dependencia de los suministros de energía. En los últimos años, ha existido un rápido aumento de la demanda mundial de electricidad debido a las altas tasas de crecimiento tanto económico como poblacional. En la última década, la tasa de crecimiento anual de la población mundial fue aumentando con ello las necesidades de electrificación. A nivel mundial, el consumo de energía eléctrica ha variado constantemente en los últimos años, teniendo un menor crecimiento en países desarrollados y un mayor en los países emergentes como lo muestra la figura 1.1. En los países con economías desarrolladas se ha incentivado la eficiencia energética mientras que en los países en desarrollo se ha buscado una mayor cobertura debido a su rápido crecimiento.

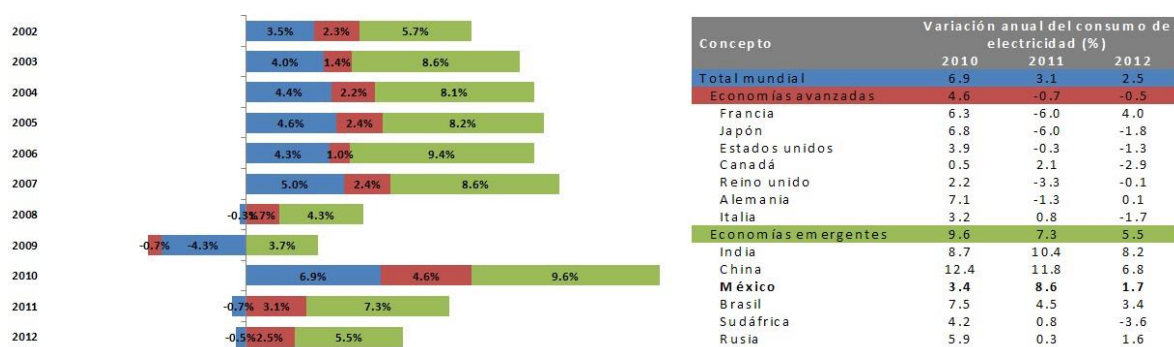


Figura 1.1. Variación porcentual anual del consumo de energía eléctrica a nivel mundial.

En el año 2012, el consumo final de electricidad fue de 20.1 TWh a nivel mundial. Los sectores que demandaron un mayor consumo son el industrial con un 4.1 TWh del total, seguido del residencial con un 3.5 TWh . Por otra parte, el sector comercial y de servicios

contribuyeron con el 22.8% del consumo. Este aumento de consumo por parte del sector industrial es debido en gran medida al crecimiento económico de los países emergentes como el bloque asiático. La figura 1.2 muestra la distribución porcentual del consumo de energía eléctrica por sector.

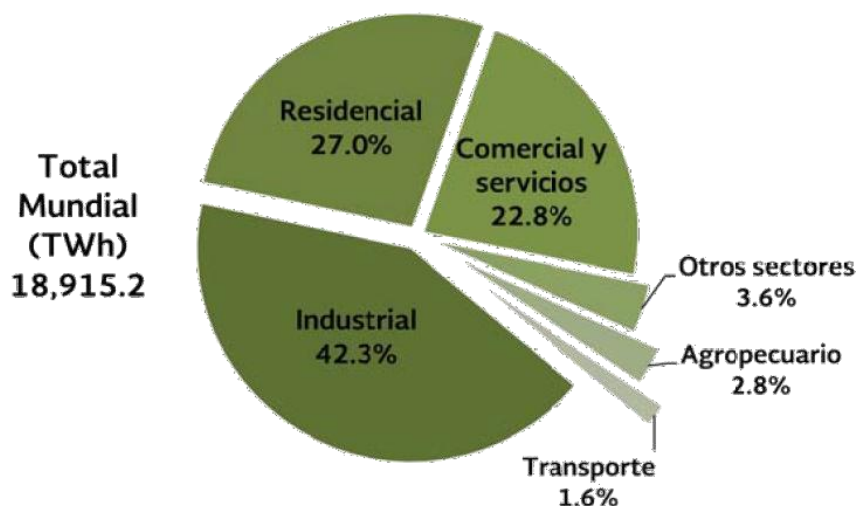


Figura 1.2. Consumo total de electricidad a nivel mundial en el año 2012.

1.2. Capacidad instalada y generación de energía eléctrica

La capacidad instalada para la producción de energía eléctrica total entre los países miembros de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) fue de [] en 2012, lo que representó un crecimiento del [] con respecto al año []

2011. Estados Unidos es el país con mayor capacidad instalada a nivel mundial con un total de [] en el año 2012, de los cuales, el [] corresponde a energía eléctrica generada a partir de combustibles fósiles. En cuanto a fuentes de generación limpias, la energía nuclear y la energía hidroeléctrica contribuyen con un [] cada una.

En México, del total de la capacidad de generación instalada, el [] depende de combustibles fósiles, en cuanto a la capacidad de fuentes limpias, la energía hidroeléctrica aporta a [] lo que corresponde al [] seguida de la nucleoelectrica que representa []

el . La figura 1.3 muestra la capacidad de generación instalada para países miembros de la OCDE.

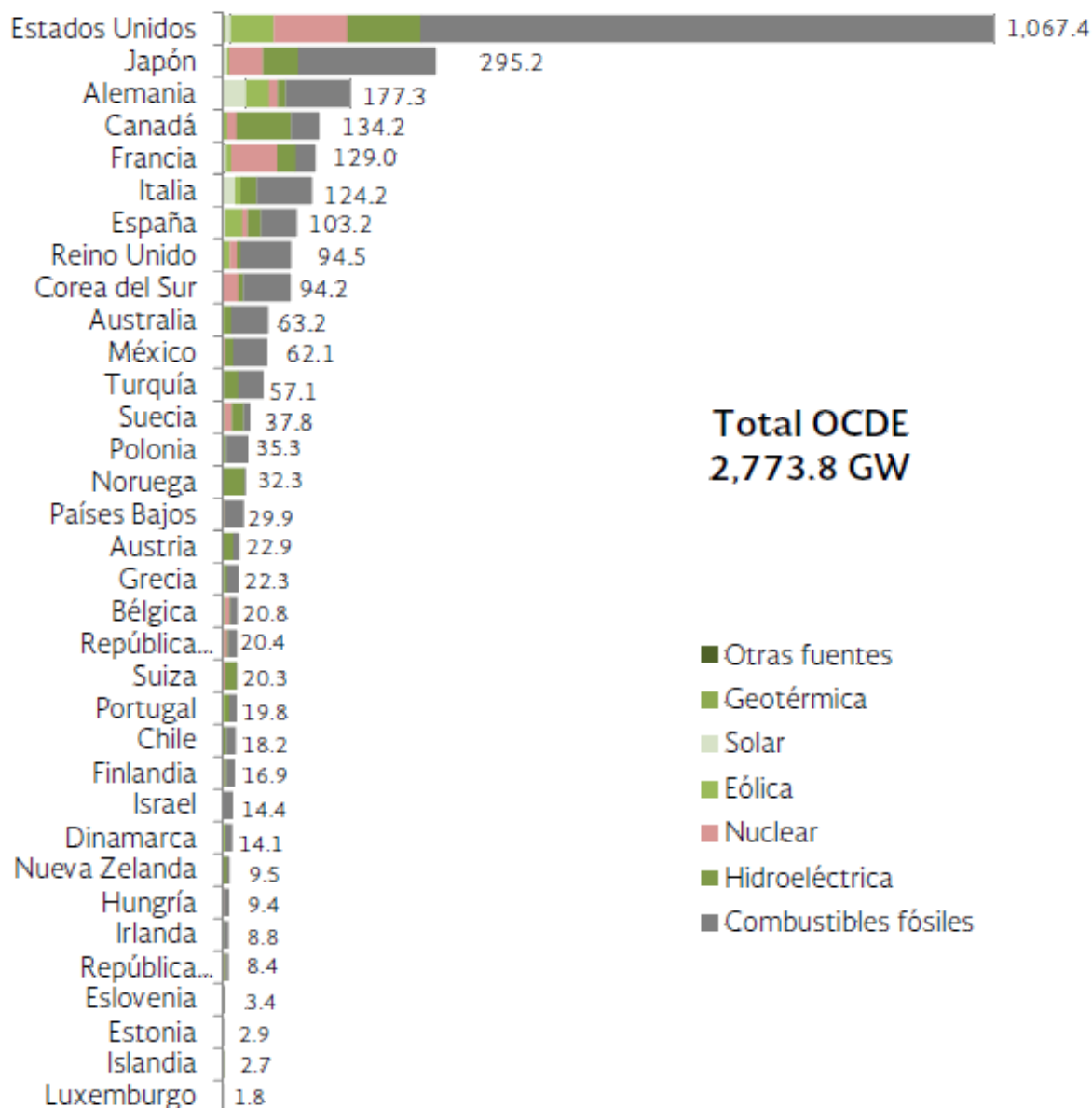


Figura 1.3. Capacidad de generación de energía eléctrica en países miembros de la OCDE en el año 2012

En 2012, la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles en los países desarrollados fue de 50.1% , mientras que en las economías emergentes, la generación fue de 20.1% . Como muestra la figura 1.4, la generación de energía eléctrica a partir de energías renovables representó un 29.7% del total de generación, del cual, el 76.84% se produjo a partir de energía hidroeléctrica, esta fue seguida por la energía eólica con un 10.65% , los biocombustibles sólidos representaron un 5.67% y el resto repartido entre la energía solar fotovoltaica, geotérmica, biogás, por mencionar algunas. [2]

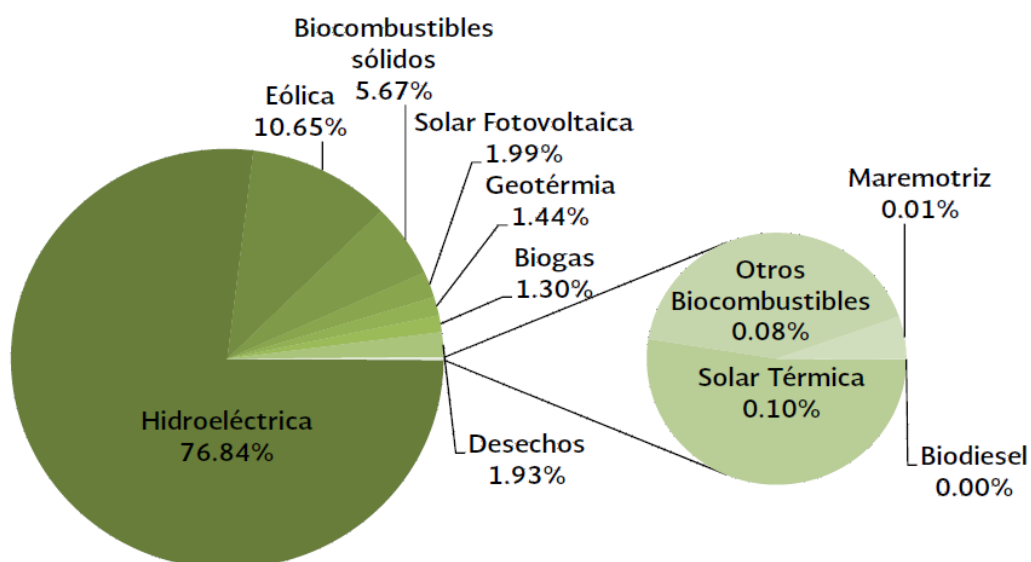


Figura 1.4. Generación de electricidad mundial a partir de fuentes de energía renovables

En 2012 la energía que se consumió para la generación de electricidad fue de 10.65% y se espera que alcance los 20.1% para el año 2035 con una tasa media anual de crecimiento del 1.5% . Como se observa en la figura 1.5, destaca que la fuente de energía con mayor porcentaje de penetración son las fuentes renovables con el 76.84% de crecimiento anual ubicándose al final del periodo con 10.65% . [3]

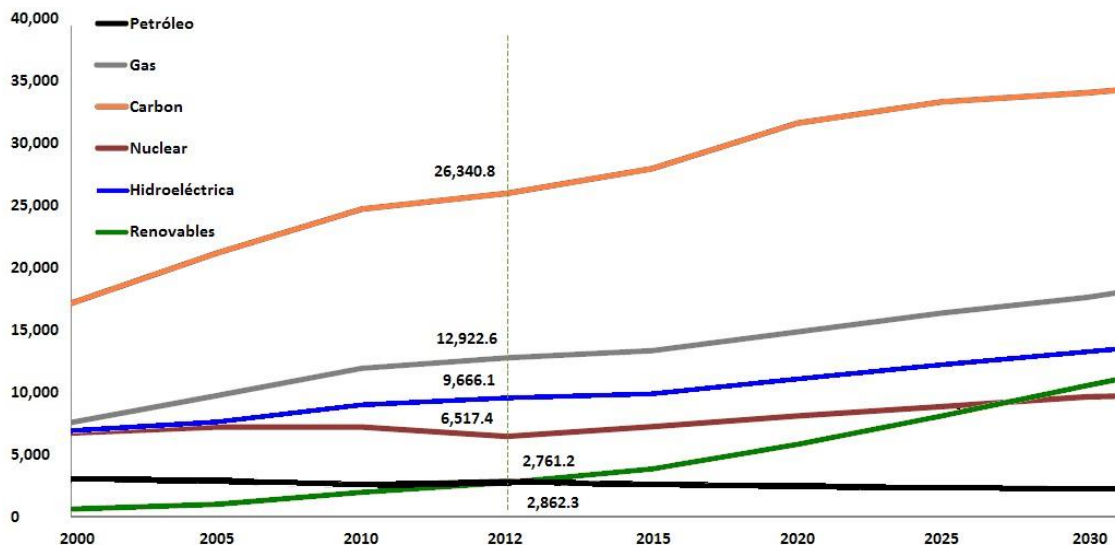


Figura 1.5. Tendencia mundial de las fuentes de energía para la generación eléctrica.

1.3. Calidad de la energía

Los sistemas de energía están diseñados para operar a frecuencias de 50 Hz o 60 Hz. Sin embargo, ciertos tipos de cargas producen corrientes y tensiones con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental 50 Hz o 60 Hz. Estas frecuencias más altas son una forma de contaminación eléctrica conocida como distorsión armónica del sistema de potencia. Las fuentes más comunes de los armónicos son las cargas no lineales como las cargas electrónicas, tales como variadores de velocidad y fuentes de alimentación conmutadas debido a que estas cargas utilizan diodos rectificadores controlados, transistores de potencia y otros interruptores electrónicos para cortar formas de onda para controlar la potencia.

El grado en que los armónicos se pueden tolerar está determinado por la susceptibilidad de la carga, la existencia de armónicos trae consigo diversos problemas como el sobrecalentamiento de los conductores, disminución del factor de potencia, deterioro o destrucción de bancos de capacitores, deterioro de la forma de onda de la tensión, y consiguientemente el mal funcionamiento de los aparatos eléctricos. La IEEE Std 519 recomienda fijar los límites de THD en un 5% en voltaje y de igual forma recomienda para cualquier armónico simple una distorsión menor al 3% ya que al mantener bajos valores de

THD en un sistema garantizará el funcionamiento adecuado y una vida más larga de los equipos.

La calidad y uso eficiente de la energía eléctrica minimiza costos de operación e incrementa los beneficios de mantener la competitividad. Las principales formas para mejorar la eficiencia de los sistemas son:[4]

- Mantener los niveles de voltaje.
- Mantener constante la frecuencia.
- Minimizar el desbalanceo de fase.
- Mantener un buen factor de potencia.

1.4. Hipótesis

Es posible desarrollar un sistema de monitoreo de fácil implementación en instalaciones eléctricas de baja tensión existentes que permita diagnosticar el consumo de energía eléctrica apoyando la toma de decisiones a partir de una base de datos de consumo creada por este.

1.5. Objetivo

Desarrollar un sistema de monitoreo que incorpore una interfaz gráfica de usuario sencilla el cual permita la adquisición, el análisis y posea la capacidad de crear bases de datos del consumo de energía eléctrica en distintos tipos de cargas para contribuir con el ahorro de esta en sistemas de baja tensión.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos

2.1. Factor de potencia

La potencia se define como la tasa de gasto de energía mientras que el Watt es la unidad de potencia eléctrica y está definida como la cantidad de trabajo realizado por una corriente eléctrica. La diferencia de potencial entre dos puntos es igual a la energía por unidad de carga la cual es comúnmente conocido como voltaje y su unidad es el volt, de igual forma, la corriente eléctrica o intensidad eléctrica es el flujo de carga eléctrica por unidad, esta unidad es conocida como ampere. La potencia eléctrica está definida por el producto de la corriente y la tensión. [5].

En corriente alterna, los elementos de almacenamiento de energía, tales como inductores y capacitores pueden resultar en inversiones periódicas de la dirección del flujo de energía. La porción de la energía adquirida durante un ciclo completo de la forma de onda se le denomina potencia real, mientras que la parte de la energía que devuelve a la fuente en cada ciclo debido a la energía almacenada, se conoce como la potencia reactiva.

El triángulo de potencia muestra la relación entre las potencias. La potencia real o potencia activa se expresa en Watts, la potencia reactiva en volts-ampere reactivos, la potencia aparente en volts-ampere, y la fase es la diferencia del ángulo entre las ondas de voltaje y corriente. [6]

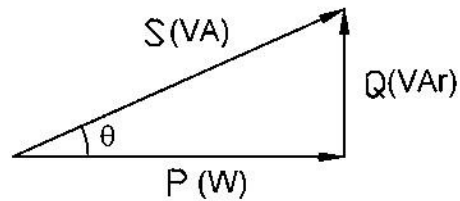


Figura 2.1. Triángulo de potencia.

La fórmula para calcular la potencia real muestra en la ecuación (2.1). [7]

(2.1)

En un circuito de corriente alterna cuando las cargas conectadas al sistema son lineales

y el voltaje es sinusoidal, el factor de potencia está dado por el coseno del ángulo formado por la potencia activa y la potencia aparente. El factor de potencia es la relación proporcional de la potencia activa y la potencia aparente. Usando esta definición, el factor de potencia para formas de onda no sinusoidales debe ser calculado mediante la ecuación (2.2). [8]

— ————— (2.2)

2.2. Distorsión armónica

Los sistemas de energía eléctrica están diseñados para operar a una frecuencia de 60 Hz . Sin embargo, cierto tipo de cargas producen corrientes y voltajes que son múltiplos de la frecuencia fundamental de 60 Hz .

Ciertas cargas eléctricas controlan el flujo de corriente, de tal forma, que la demanda de corriente es solo por algunos instantes dentro de periodo de la señal de voltaje, lo que provoca que la forma de onda de la corriente demandada no sea sinusoidal. La corriente no sinusoidal puede llegar a interactuar con impedancias del sistema pudiendo provocar picos de voltaje y en algunos casos resonancia.

A diferencia de eventos transitorios como los huecos de tensión que duran desde unos pocos milisegundos a varios ciclos, los armónicos son fenómenos periódicos que producen distorsión continua de las formas de onda de voltaje y corriente. Estas formas de onda no sinusoidales periódicas se describen en términos de sus armónicos, cuyas magnitudes y ángulos de fase se calculan usando análisis de Fourier.

Existen dos principales fuentes de componentes armónicas, los dispositivos saturables y los dispositivos electrónicos de potencia. Los dispositivos saturables producen armónicos debido principalmente a la saturación del hierro, como es el caso para los transformadores, motores y lámparas fluorescentes que utilizan balastos magnéticos. Las cargas electrónicas de potencia comúnmente consumen energía solo durante fracciones de tiempo de la tensión aplicada, estas cargas incluyen fuentes de alimentación conmutadas, variadores de tensión, moduladores de ancho de pulso, inversores y luces fluorescentes con balastro electrónico. Cuando se habla de los armónicos en las instalaciones de energía, son los armónicos de corriente los más preocupantes, puesto que son corrientes que generan efectos negativos.[9]

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal que idealmente deberíamos encontrar, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas. Para que se considere como distorsión armónica las deformaciones en una señal, se deben de cumplir las siguientes condiciones:

La señal debe tener valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita

La señal debe ser periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o voltaje.

El grado en que los armónicos son tolerados está determinado por la susceptibilidad de la carga. El tipo de carga menos susceptible es aquella cuya función principal es la calefacción, en este caso, la energía armónica generalmente se utiliza y por lo tanto es tolerable. El tipo más susceptible de equipo es aquel cuyo diseño o constitución supone

una forma de onda de tensión sinusoidal casi perfecta, este tipo de equipos con frecuencia,

son los sistemas de comunicación o procesamiento de datos.[10]

La distorsión armónica total (THD) se define como la relación de la suma de las componentes armónicas a la fundamental. La distorsión armónica total de voltaje se obtiene mediante la ecuación (2.3), a su vez, la distorsión armónica total de corriente se calcula aplicando la ecuación (2.4).[11]

$$\frac{\sqrt{\sum}}{\quad} \quad (2.3)$$

$$\frac{\sqrt{\sum}}{\quad} \quad (2.4)$$

La IEEE Std 519 fija los niveles de distorsión armónica de tensión y de corriente por componente y total aceptables en un sistema eléctrico de potencia. La tabla 2.1 muestra los límites de distorsión aceptados en voltaje.

Tabla 2.1. Límite de distorsión armónica en voltaje según la IEEE Std 519.

Límites de distorsión en voltaje		
Tensión del bus	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total. THD

En el caso de la distorsión armónica en corriente, los límites están determinados por el tamaño relativo del sistema que demanda contra el sistema que alimenta, y se expresa como la relación de la corriente de corto circuito y la corriente de demanda máxima a la frecuencia fundamental. La tabla 2.2 muestra los límites de distorsión aceptados en corriente. Cabe destacar, que la tabla indica los límites para las componentes armónicas impares, por lo que el límite de los armónicos pares es el 25% del límite de distorsión del rango donde se encuentre este.

Tabla 2.2. Límite de distorsión armónica en corriente según la IEEE Std 519.

Límites de distorsión armónica en corriente para sistemas de distribución						
Límites para componentes armónicas impares en porcentaje de						
	Armónicos	Armónicos	Armónicos	Armónicos	Armónicos	Distorsión de demanda total (TDD)

2.3. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta matemática empleada para transformar señales entre el dominio del tiempo (o espacial) y el dominio de la frecuencia la cual es reversible, siendo capaz de realizar transformaciones desde cualquiera de los dominios al otro [12]. En el caso de una función periódica en el tiempo, la transformada de Fourier se puede simplificar para el cálculo de un conjunto discreto de amplitudes complejas llamado coeficientes de las series de Fourier, ellos representan el espectro de frecuencia de la señal del dominio-tiempo original.

$$\int \quad (2.5)$$

2.4. La transformada discreta de Fourier (DFT)

La transformada discreta de Fourier (DFT) permite transformar una función matemática en otra, obteniendo una representación en el dominio de la frecuencia siendo la función original una función en el dominio del tiempo. La DFT requiere que la función de entrada sea una secuencia discreta y de duración finita, dichas secuencias se suelen generar a partir del muestreo de una función continua. Las muestras de entrada son números complejos (en la práctica, por lo general los números reales), y los coeficientes de salida igualmente son complejos. Las frecuencias de las sinusoides de salida son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental, cuyo período correspondiente es la longitud del intervalo de muestreo. [13]

La secuencia de números complejos $x[n]$ se convierte en la secuencia de números complejos $X[k]$ mediante la DFT con la fórmula

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.6)$$

donde j es la unidad imaginaria y $e^{-j2\pi kn/N}$ es la N -ésima raíz de la unidad.

El cálculo de la DFT mediante la ecuación (2.6) genera N^2 operaciones complejas. Dado que se trata de una cantidad finita de datos, la solución de la DFT puede ser obtenida mediante la implementación de algoritmos numéricos o incluso hardware dedicado.

Es posible representar la DFT como un producto entre una matriz y un vector, de modo que

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ \vdots \\ X[N-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & e^{-j2\pi/N} & \dots & e^{-j2\pi(N-1)/N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{-j2\pi(N-1)/N} & \dots & e^{-j2\pi(N-1)(N-1)/N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[0] \\ x[1] \\ \vdots \\ x[N-1] \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

donde

Aunque, en teoría, la complejidad numérica de esta forma varía significativamente de la forma directa, este método presenta ventajas notables a causa del trabajo con matrices.

2.4.1. La transformada rápida de Fourier (FFT)

Debido a que la solución de la DFT requiere la resolución de N^2 complejas, se suele emplear algún algoritmo que sea más eficiente al momento de resolver la transformada rápida de Fourier (FFT). El algoritmo FFT entrega los mismos resultados que la DFT pero optimiza el cómputo dividiendo el problema en cálculos de DFT de menor orden implementando una estructura recursiva [14].

Uno de los algoritmos más conocidos e implementados es el algoritmo denominado FFT Radix-2, dicho algoritmo permite reducir la complejidad numérica, ya que de resolverse un número N^2 de operaciones complejas a un número de operaciones complejas de $N \log_2 N$ con lo que se reduce significativamente los tiempos de cómputo [15].

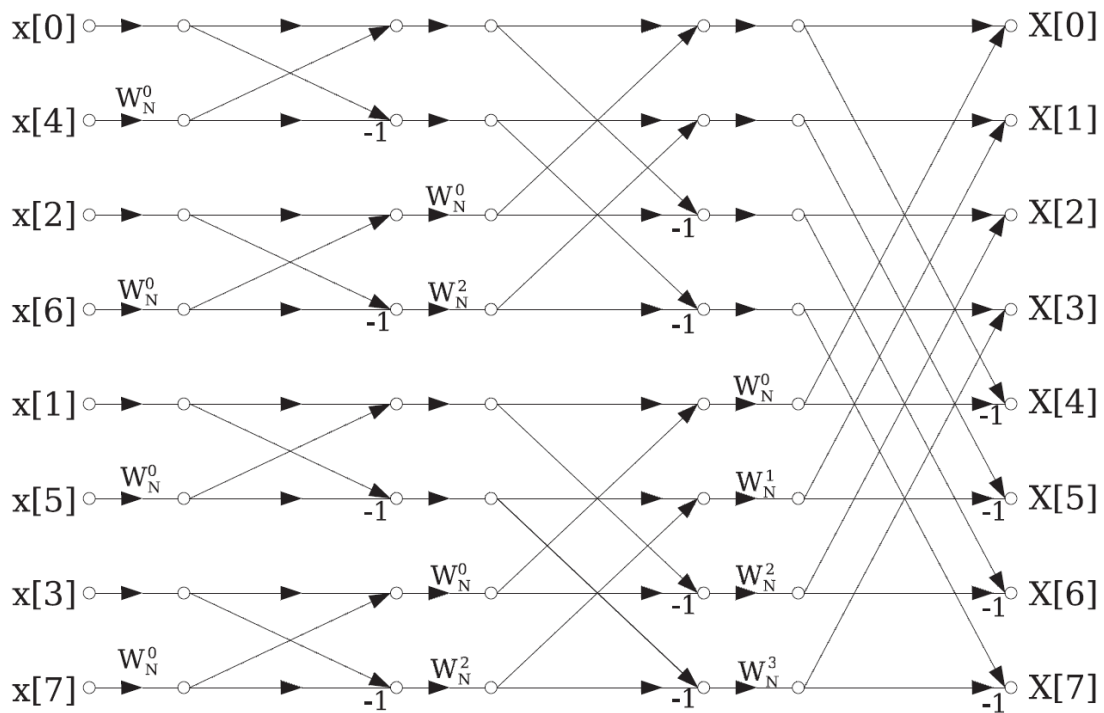


Figura 2.2. Cálculo de una FFT de ocho puntos usando el esquema FFT Radix-2.

La tabla 2.3 muestra la forma que en que los índices son calculados para una FFT Radix-2 de ocho puntos. Como se puede observar el índice resultante es determinado mediante el número de muestra en binario escrito de forma inversa.

Tabla 2.3. Cálculo de los índices para la FFT de ocho puntos mediante el algoritmo Radix-2

Índice	Índice en binario	Índice en binario a la inversa	Índice inverso

2.5. Teorema de muestreo de Nyquist

Conocer el contenido frecuencial, es decir, el espectro de frecuencias de una señal, es fundamental para entender el o los procesos físicos de los que proviene. La técnica más común para transformar una señal del espacio temporal al espacio frecuencial es la Transformada de Fourier. La extensa variedad de señales: periódicas, no periódicas, aleatorias, etc., ha obligado a generar una gran diversidad de técnicas diferentes para obtener la transformada de Fourier. Sin importar el uso de herramientas, antiguas o modernas, numéricas o analíticas, si la señal no ha sido adquirida adecuadamente no será posible observar el comportamiento frecuencial correcto, por lo cual, es necesario definir criterios adecuados para una buena adquisición de señales cuando se trabaja en el dominio de las frecuencias.

Debido a lo antes mencionado, es necesario determinar el intervalo de tiempo entre cada dato que se adquiere y el número de muestras que se desea adquirir. El intervalo entre un dato y el otro es la resolución temporal o periodo de muestreo de la señal digitalizada mientras que el conjunto de datos adquiridos se le llama muestra cuyo tiempo total es igual a:

$$(2.8)$$

mientras que el inverso del periodo de muestreo se le llama frecuencia de muestreo y está definido por la ecuación (2.9).

$$(2.9)$$

Es importante que el tiempo total sea suficiente para que el fenómeno se pueda observar completamente.

El teorema de Nyquist establece como condición necesaria y suficiente para la reconstrucción en el dominio temporal que la frecuencia de muestreo de esta debe ser al menos 2 veces mayor que la frecuencia más alta de la señal que se quiere reconstruir.

(2.10)

Como muestra la ecuación (2.10), el teorema de Nyquist establece el mínimo de frecuencia de muestreo mas no el máximo, por lo que a mayor sea la frecuencia de muestreo, la señal tendrá mayor similitud a la señal muestreada originalmente.[16]

Capítulo 3. Diseño y desarrollo del prototipo

Con el objetivo de desarrollar un sistema de monitoreo que permita la adquisición y análisis de los datos de consumo de energía en sistemas de baja tensión, se plantea la implementación de un microcontrolador que lleve a cabo el muestreo de las señales provenientes de la red eléctrica y transmita estas de manera inalámbrica hasta un ordenador receptor que permita realizar los correspondientes cálculos, despliegue las formas de onda, muestre los valores de las principales variables eléctricas, y a su vez, permita almacenar datos para su posterior análisis, permitiendo así, tomar las medidas necesarias para volver más eficiente el uso de la energía eléctrica.

3.1. Microcontroladores PIC

Los microcontroladores son dispositivos programables capaces de realizar diferentes actividades que requieran del procesamiento y control de datos digitales, además, permiten la comunicación digital de diferentes dispositivos. Los microcontroladores poseen una memoria interna que es capaz de almacenar las instrucciones que corresponden al programa que se ejecuta, cuentan con registros que corresponden a los datos que el usuario maneja, así como registros especiales asignados al control de las diferentes funciones del microcontrolador.

Los microcontroladores se programan en lenguaje ensamblador (aunque en la actualidad existen diversos compiladores) y cada microcontrolador posee su conjunto de instrucciones de acuerdo a su fabricante y modelo. De acuerdo al número de instrucciones

que el microcontrolador maneja se le denomina de arquitectura RISC (reducido) o CISC (complejo).

Los microcontroladores se componen principalmente de la memoria del programa, memoria de registros, de una ALU (Unidad Lógica Aritmética) y pines I/O (entrada y/o salida). La ALU es la encargada de procesar los datos dependiendo de las instrucciones que se ejecuten (ADD, OR, AND), mientras que los pines son los que se encargan de comunicar al microcontrolador con el medio externo; la función de los pines puede ser de transmisión de datos, alimentación de corriente para el funcionamiento de este o pines de control específico, por lo que el microcontrolador utilizado para el desarrollo del prototipo es el microcontrolador PIC16F577A mostrado en la figura 3.1 cuya hoja de datos se incluye en los anexos. [17]



Figura 3.1. Microcontrolador PIC16F877A.

3.2. Etapa de acondicionamiento de señales

Dado que el microcontrolador PIC16F877A trabaja con voltajes entorno a los 5V es necesario realizar un acondicionamiento de las señales que adecúe estas para poder ser procesadas mediante este.

Para llevar a cabo el sensado del voltaje se implementó un sensor de voltaje de precisión PH1135 para corriente alterna que posee un voltaje de operación de 220V a la

entrada el cual es atenuado para entregar un nivel de voltaje a la salida de entre V_{in} y V_{out} con un voltaje de offset de V_{offset} equivalente a un voltaje de entrada de 0V.



Figura 3.2. Sensor de voltaje de precisión PH1135.

Dado que el voltaje de la red es mayor al soportado por el sensor de voltaje, se implementó un divisor de voltaje el cual permite reducir los niveles de este adecuándolos a los requerimientos del sensor para su correcto funcionamiento. La ecuación (3.1) describe la forma que se comporta el divisor de voltaje implementado.

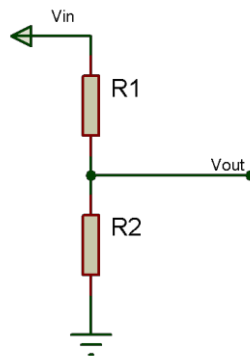


Figura 3.3. Divisor de voltaje

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{offset} \quad (3.1)$$

Si suponemos la resistencia R_1 y R_2 , y tomando en cuenta que el sensor posee un voltaje de offset de V_{offset} y despejando el valor del voltaje de entrada V_{in} , observamos que el voltaje de la línea es reducido de tal forma que el sensor permitirá medir

voltajes dentro de un rango de V_{min} a V_{max} como lo muestra la ecuación (3.2). Tomando en cuenta lo anterior ya que nuestro microcontrolador posee un convertidor ADC de 10 bits lo que equivale a un total de 1024 niveles, a como resultado que nuestro sensor de voltaje tenga una resolución de ΔV como lo señala la ecuación (3.3).

$$V_{min} \leq V \leq V_{max} \quad (3.2)$$

$$\Delta V = \frac{V_{max} - V_{min}}{1024} \quad (3.3)$$

Para realizar el sensado de la corriente se utiliza un sensor de efecto Hall CSLH3A45 el cual posee una resolución de I_{res} y un voltaje de offset de V_{offset} cuando la corriente del conductor que pasa a través es igual a cero.



Figura 3.4. Sensor de corriente por efecto Hall CSLH3A45

Con el objetivo de aumentar la sensibilidad del sensor se recurrió a la implementación de un circuito amplificador como el que se muestra en la figura 3.5. El circuito consta de dos seguidores de voltaje, los cuales, van conectados a un amplificador operacional con configuración diferencial.

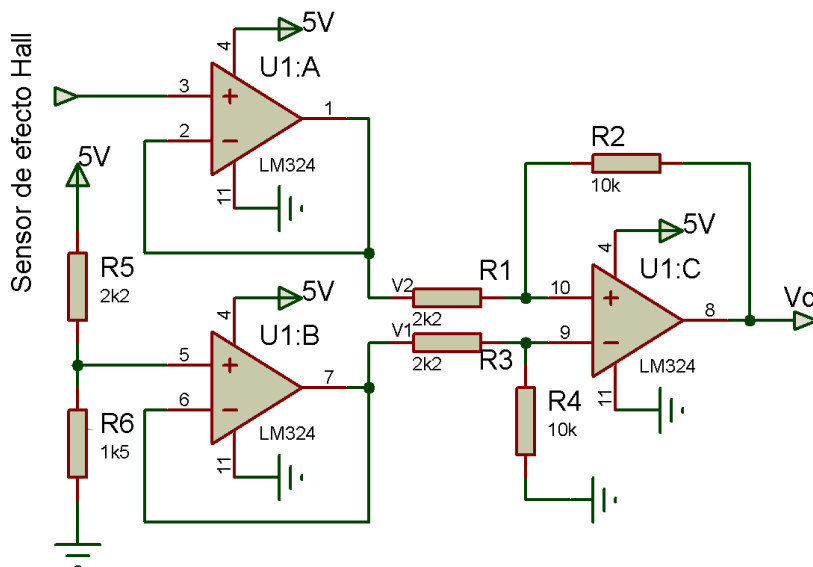


Figura3.5. Circuito de amplificación implementado para el sensado de la corriente

Dado que V_1 y V_2 al igual que V_3 y V_4 son iguales, el voltaje de salida está dado por la ecuación (3.4).

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2) + V_3 \quad (3.4)$$

Como lo muestra la figura 3.5, el voltaje V_1 está dado por el nivel de voltaje de offset que posee el sensor de efecto Hall, el cual es de 2.5V. El valor de voltaje V_2 es determinado mediante el divisor de voltaje localizado a la entrada del segundo amplificador operacional configurado como seguidor el cual entrega un valor de 2.14V a la salida como lo muestra la ecuación (3.5). Aplicando la ecuación (3.4) podemos observar que la ganancia del amplificador operacional diferencial está determinada por el valor resultante de $\frac{R_2}{R_1}$, que para este caso, resulta en una ganancia de 4.55, con lo que se consigue obtener una resolución del sensor de efecto Hall de 0.55mA como lo muestra la ecuación (3.6), sin embargo, el valor de offset entregado a la salida también resulta modificado, ya que anteriormente de tener un nivel de offset de 2.5V, ahora se tiene un voltaje de offset de 2.14V. Si a la ecuación (3.4) añadimos el valor de resolución del sensor de corriente por

efecto Hall además de unavariablen rango y posteriormente despejamos, se determina que el sensor decorriente porefecto Hall posee unrango deoperación de como semuestra enla ecuación (3.8). Teniendo encuesta lo anterior y sabiendo que el convertidor ADC del microcontrolador posee unaresolución de 10 bits, esto da comoresultado que nuestro sensor decorriente tenga una resolución de41.7mA comolo señala la ecuación (3.9).

$$\text{-----} \quad (3.5)$$

$$\text{-----} \quad (3.6)$$

$$\text{---} \quad (3.7)$$

$$\text{=====} \quad (3.8)$$

$$\text{-----} \quad (3.9)$$

El iniciodela digitalización dela señalescontrolada por medio deun circuito detector

decruceporcero,el cual fue realizado mediante la implementación de unoptoacoplador 4n25como lo muestra la figura 3.6.

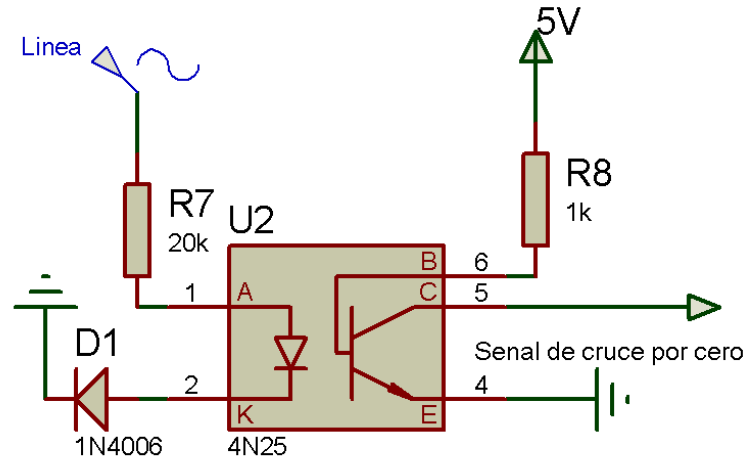


Figura3.6. Circuitodetector decruce por cero.

3.3. Comunicación serial

La comunicación serial consiste en el envío de un bit de información de manerasecuencial, esto es, unbit a la vez y a unritmo acordado entre el emisor y el receptor.

La mayoría delossistemas microprogramables están diseñados para la transferencia de datos enbuses o líneas de8 bitso múltiplos de8. Así el bus dedatos está optimizado para el tratamiento dedatos enparalelo lo cual esmucho másrápido queel tratamiento serie. Algunas desuscaracterísticas son:

Pararealizarla comunicación de datos enparalelo serequiere gran cantidad de hilos conductores, pues debe ser establecido un hilo para cada bit de datos, además delas señales decontrol. Esto encarece notablemente la comunicación enfunción dela distancia. La comunicación serie requiere 2, 3 ó 4 hilos.

Una entrada/salida seriepuede ser realizada a través depares de cobre,cable coaxial, fibra óptica, vía radio o vía satélite, lo queproporciona comunicación con equipos remotos (redeslocales)o muyremotos (Internet a través de las redes telefónicas y dedatos).

La comunicación paralela no posee el alto grado de estandarización que ha

alcanzado la comunicación serie, lo que permite la intercomunicación entre equipos, por ejemplo mediante RS232, USB o FireWire.

Existen dos modos básicos para realizar la transmisión de datos y son el modo asíncrono y el modo síncrono.

Las transmisiones síncronas son aquellas en que los bits que constituyen el código de un carácter se emiten con la ayuda de impulsos suplementarios que permiten mantener en sincronismo los dos extremos. En las transmisiones síncronas los caracteres se transmiten consecutivamente, no existiendo ni bit de inicio ni bit de parada entre los caracteres, estando dividida la corriente de caracteres en bloques, enviándose una secuencia de sincronización al inicio de cada bloque.

En la transmisión asíncrona un carácter a transmitir es encuadrado con un indicador de inicio y fin de carácter, de la misma forma que se separa una palabra con una letra mayúscula y un espacio en una oración. La forma estándar de encuadrar un carácter es a través de un bit de inicio y un bit de parada.

Durante el intervalo de tiempo en que no son transferidos caracteres, el canal debe poseer un "1" lógico. Al bit de parada se le asigna también un "1". Al bit de inicio del carácter a transmitir se le asigna un "0". Por todo lo anterior, un cambio de nivel de "1" a "0" lógico indicará al receptor que un nuevo carácter será transmitido.

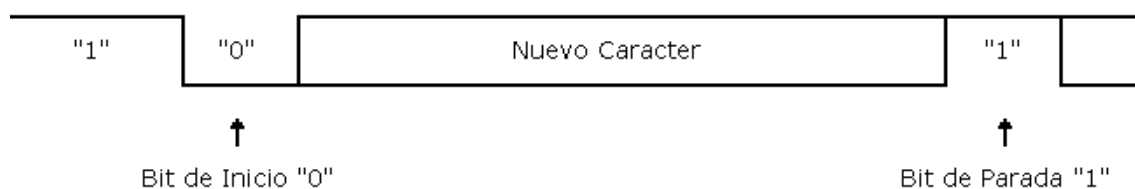


Figura 3.7. Esquema de comunicación asíncrona.

3.3.1. Módulos Xbee

Los módulos Xbee son dispositivos que permiten la comunicación inalámbrica entre sí de manera sencilla, los módulos Xbee trabajan bajo el estándar ZigBee que es un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo. Los dispositivos ZigBee están basados en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (WPAN) y trabajan en la banda de 2.4 GHz. Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos lo que permite a estos comunicarse en arquitecturas punto a punto, punto a multi-punto o en una red mesh. Los módulos Xbee son económicos, poderosos y fáciles de utilizar. Los Xbee pueden ser utilizados mediante comunicación UART. Algunas sus principales características son:

- Poseen un amplio rango de alcance: hasta 300ft(100m) en línea vista para los módulos Xbee y hasta 1 milla (1.6 Km) para los módulos Xbee Pro.

- Disponen de 9 pines configurables como entrada o salida digital

- Poseen la capacidad de realizar conversiones análogas-digitales.

- Son dispositivos de bajo consumo, requieren de una corriente menor a cuando están en funcionamiento y menor a cuando están en modo sleep.

- Cuentan con interfaz serial.

- Contienen 65,000 direcciones para cada uno de los 16 canales disponibles. Se pueden tener muchos de estos dispositivos en una misma red.

- Son dispositivos de fácil integración.



Figura3.8. Módulo de comunicación Xbee.

3.4. Desarrollo del prototipo

El diagrama de bloques que se observa en la figura 3.9 muestra la estructura básica del sistema. El microcontrolador lleva una digitalización de los valores obtenidos mediante los sensores de voltaje y corriente, posteriormente este los transmite vía comunicación serial al transmisor inalámbrico, que a su vez, envía los datos hasta el receptor que se encuentra directamente conectado al ordenador para llevar a cabo el análisis de los datos y finalmente desplegarlos en pantalla mientras estos se almacenan en un archivo de texto para su posterior análisis.

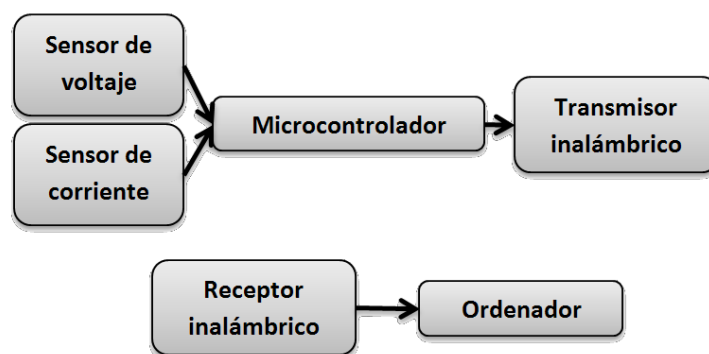


Figura3.9. Diagrama de bloques del sistema.

Con la finalidad de llevar a cabo un muestreo que permita analizar las componentes armónicas de las señales de voltaje y corriente obtenidas mediante el prototipo con un

rango que vaya desde la componente fundamental hasta el armónico número 50 como lo indica la IEEE Std 519, y tomando en cuenta que la señal de voltaje de la red eléctrica posee una frecuencia de 60 Hz se calcula el periodo de la señal.

$$T = \frac{1}{f} \quad (3.10)$$

$$T = \frac{1}{60} \quad (3.11)$$

El teorema de muestreo de Nyquist indica que la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia fundamental, tomando en cuenta lo antes descrito, se observa que la frecuencia de muestreo debe ser mayor o igual a f_s como lo describe la ecuación (3.12) donde 50 es el número total de armónicos a analizar.

$$f_s \geq 50 \cdot f \quad (3.12)$$

Una vez conocida la frecuencia mínima de muestreo, se calcula el número de muestras necesarias para cumplir con la condición. Despejando N de la ecuación (2.8) y de la ecuación (2.9) obtenemos que el número de muestras mínimas a tomar de la señal es 100.

$$N = \frac{f_s}{f} \cdot T \quad (3.13)$$

$$N = \frac{50 \cdot f}{f} \cdot \frac{1}{60} \quad (3.14)$$

Debido a que la transformada rápida de Fourier indica que el número de muestras debe ser un múltiplo de N , el número de muestras más próximo que cumple con dicha condición es 128, sin embargo, la frecuencia obtenida a partir del teorema de Nyquist fija un límite inferior y superior, por lo que se propone tomar 256 muestras que sería el siguiente múltiplo de N . Despejando f_s de la ecuación (2.8) se obtiene un periodo de muestreo de T_s a lo que corresponde una frecuencia de muestreo de f_s como muestra en la ecuación (3.16).

(3.15)

(3.16)

Como se observa, tanto el número de muestras como la frecuencia de muestro obtenidas cumplen con las condiciones impuestas por la transformada rápida de Fourier y por el teorema de muestreo de Nyquist.

3.4.1. Simulación del prototipo.

Con la finalidad de dar una primera validación al prototipo, se recurre al software *Proteus 8 Professional* de *ISIS*, el cual permite llevar a cabo simulaciones de circuitos electrónicos, permite probar sistemas de comunicación serial, así como implementar y programar microcontroladores utilizando lenguaje ensamblador algún compilador de lenguaje C.

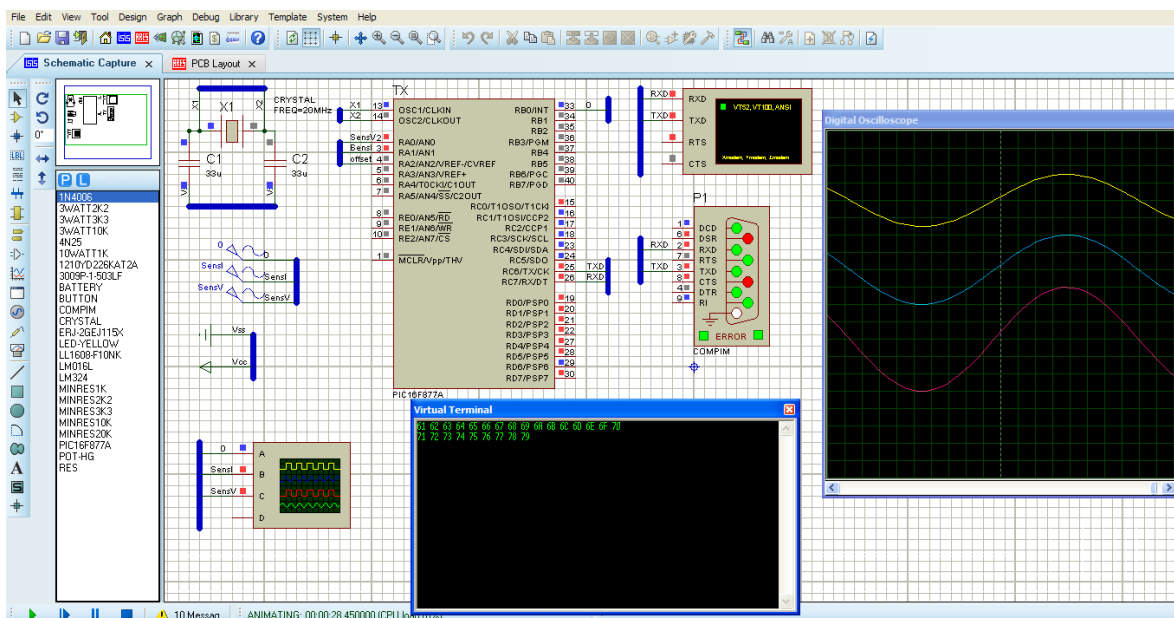


Figura 3.10. Entorno de trabajo del software *Proteus 8 Professional* de *ISIS*

Para el desarrollo del prototipo se implemente un microcontrolador PIC16F877A ya que, como se mencionó, posee las características necesarias para llevar a cabo el muestreo de nuestra señal y enviarlas mediante comunicación serial.

Para el sensado de voltaje y corriente se hace uso de los arreglos de sensores mencionados anteriormente. La señal entregada mediante el sensor de voltaje, se conecta directamente al pin número 2 de nuestro microcontrolador, mientras que la señal del sensor de corriente se conecta al pin número 3, estos pines pertenecen al convertidor analógico canal uno y dos respectivamente.

Con el fin de sincronizar el muestreo de nuestras señales, se recurre al detector de cruce por cero, el cual, como su nombre lo dice, detecta las transiciones de un voltaje positivo a negativo, lo que permite comenzar a muestrear nuestra señal siempre en el mismo punto. La señal entregada por el detector es conectada al pin número 33 que corresponde a un pin dedicado para interrupciones por algún evento externo. Los pines número 25 y 26 corresponden a las terminales de transmisión y recepción para el módulo de comunicación UART incorporada en el PIC 16F877A. El diagrama esquemático del prototipo se muestra en la figura 3.11.

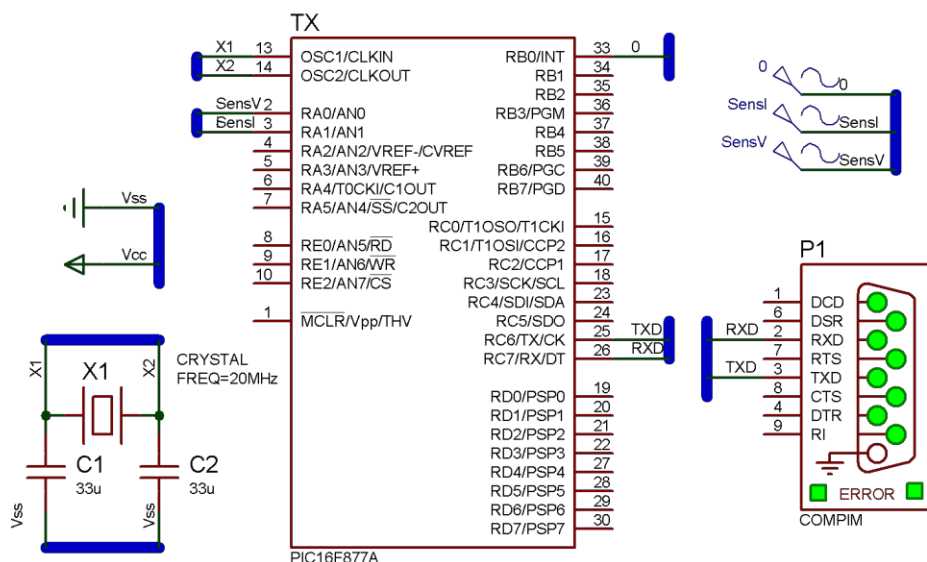


Figura 3.11. Diagrama esquemático para la simulación del prototipo.

Para realizar la programación del código de funcionamiento del microcontrolador

PIC16F877A se utiliza el compilador Hi-Tech v9.83 que permite desarrollar códigos de programa en lenguaje C. El diagrama de flujo del código implementado en el microcontrolador se muestra más adelante.

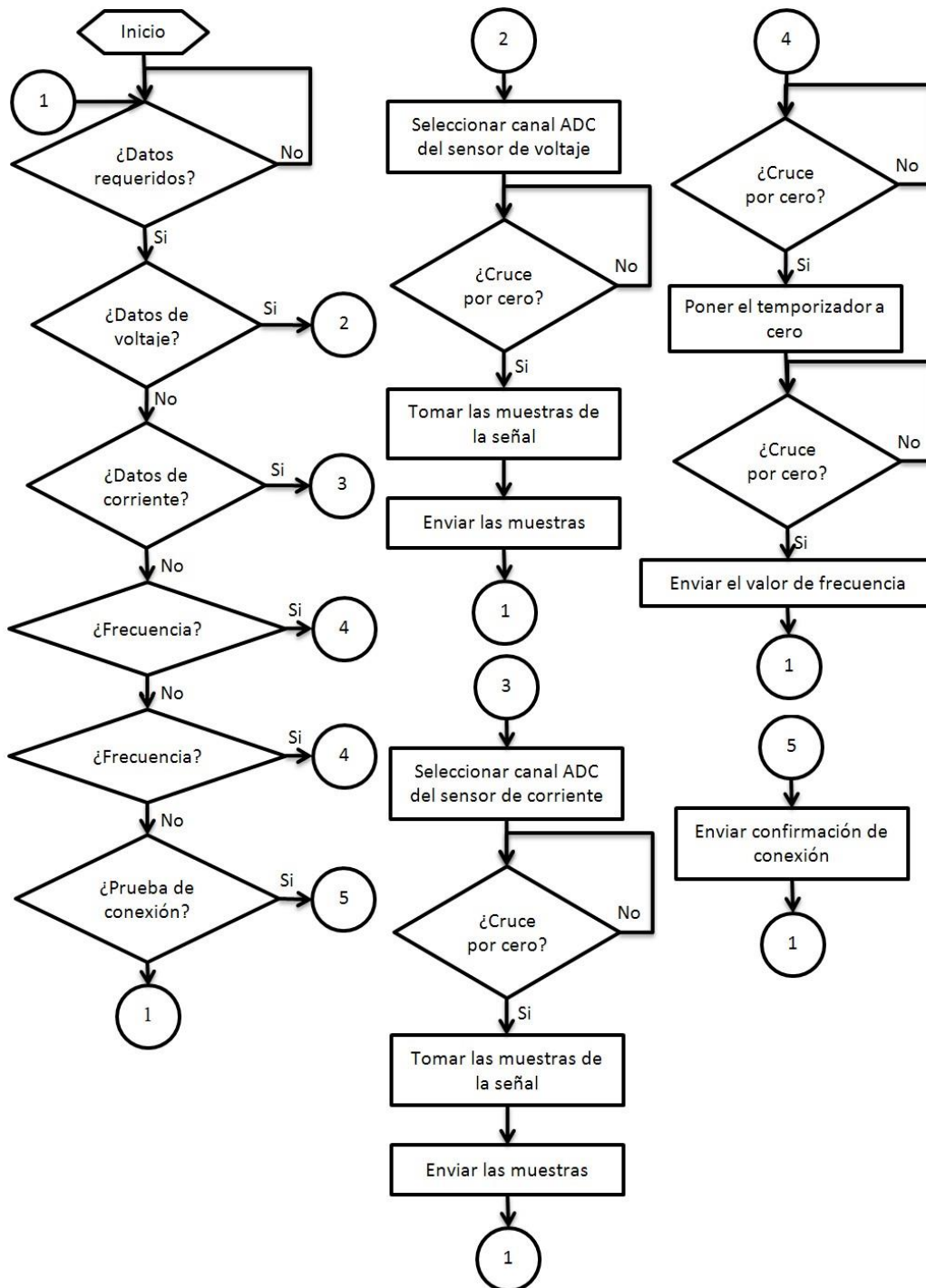


Figura 3.12. Diagrama de flujo del código del microcontrolador PIC16F877A.

Con el objetivo de configurar la comunicación entre el PIC16F877A y el ordenador,

los parámetros cargados al registro UART del microcontrolador y del puerto COM receptor se definen de la siguiente manera:

Baudios: 57600.

Paridad: Ninguna.

Bits de datos: 8 bits.

Bits de parada: 1.

Control de flujo: Ninguno.

3.4.2. Implementación del prototipo

Una vez validada la simulación del sistema de monitoreo, se procede con la construcción del prototipo, para esto, se llevó a cabo la integración de cada uno de los componentes del sistema, además, se agregó un circuito regulador de voltaje compuesto por un LM7805 para lograr mantener un voltaje de alimentación de 5V, ya que los dispositivos que componen el prototipo operan bajo este nivel de voltaje, sin embargo, el voltaje de operación del módulo Xbee es de 3.3V, por lo que a este se le añadió una base comercial regulada *SparkFun XBee Explorer Regulated* que permite la alimentación de 3.3V.



Figura 3.13. Módulo Xbee montado sobre base reguladora de voltaje *SparkFun XBee Explorer Regulated*.



Figura 3.16. Módulo de comunicación serial por USB *SparkFun XBee Explorer Dongle* para dispositivos Xbee.

La programación de los módulos Xbees llevada a cabo mediante el software *X-CTU* de . Con la finalidad de realizar una correcta conexión punto a punto entre dos dispositivos Xbee, y que estos se comuniquen de igual forma con dispositivos externos como un microcontrolador o un ordenador, se deben cumplir con los siguientes requisitos:

El valor de PANID, de los dos dispositivos Xbee debe ser idéntico.

El valor MY de uno de los módulos Xbee debe ser igual al valor DL del otro y viceversa.

El valor asignado a los baudios, los bits de datos, la paridad, los bits de parada así como el control de flujo deben ser idénticos entre los módulos Xbee, así como entre los dispositivos externos involucrados en el sistema de comunicación.

El resto de los parámetros de los módulos Xbee se dejan tal cual vienen de fábrica.

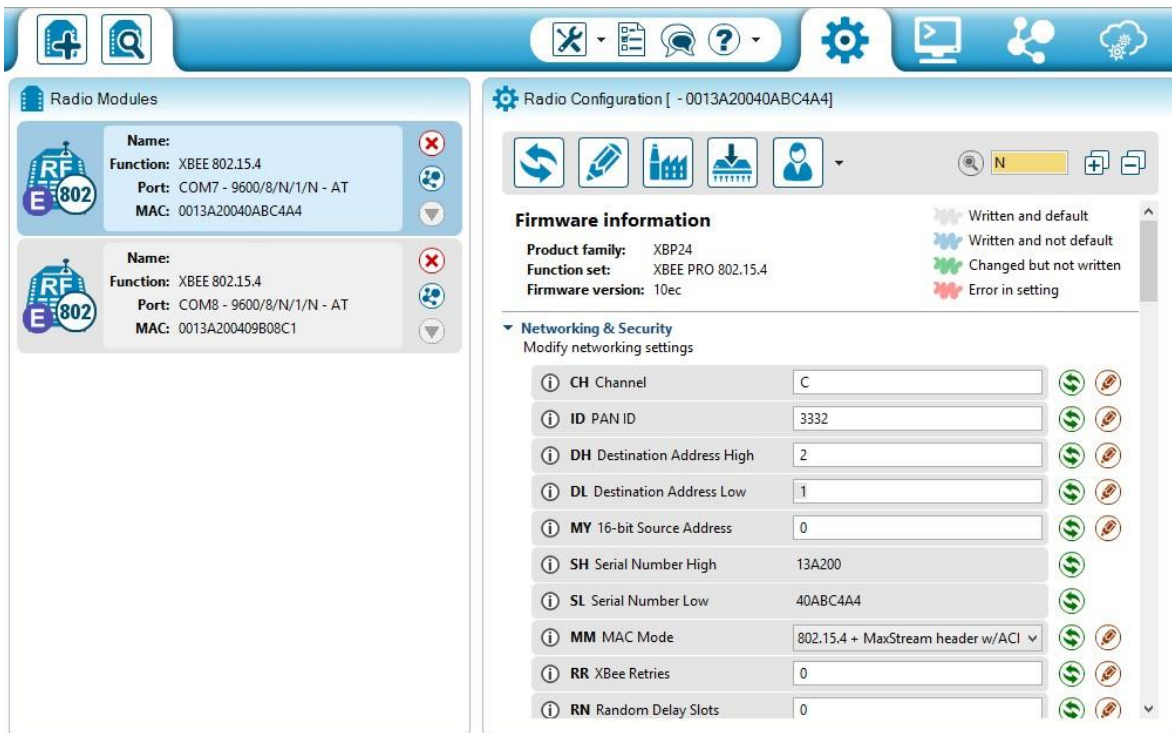


Figura 3.17. Software X-CTU deDigi para programación demódulos Xbee.

Para comprobar el funcionamiento del sistema de monitoreo se utilizó la herramienta

computacional *Realterm: Serial Terminal* que permite visualizar los datos enviados y recibidos mediante la comunicación serial. Como se puede observar en la figura 3.18, existe una recepción de datos enviados por parte del prototipo validando así su funcionamiento.

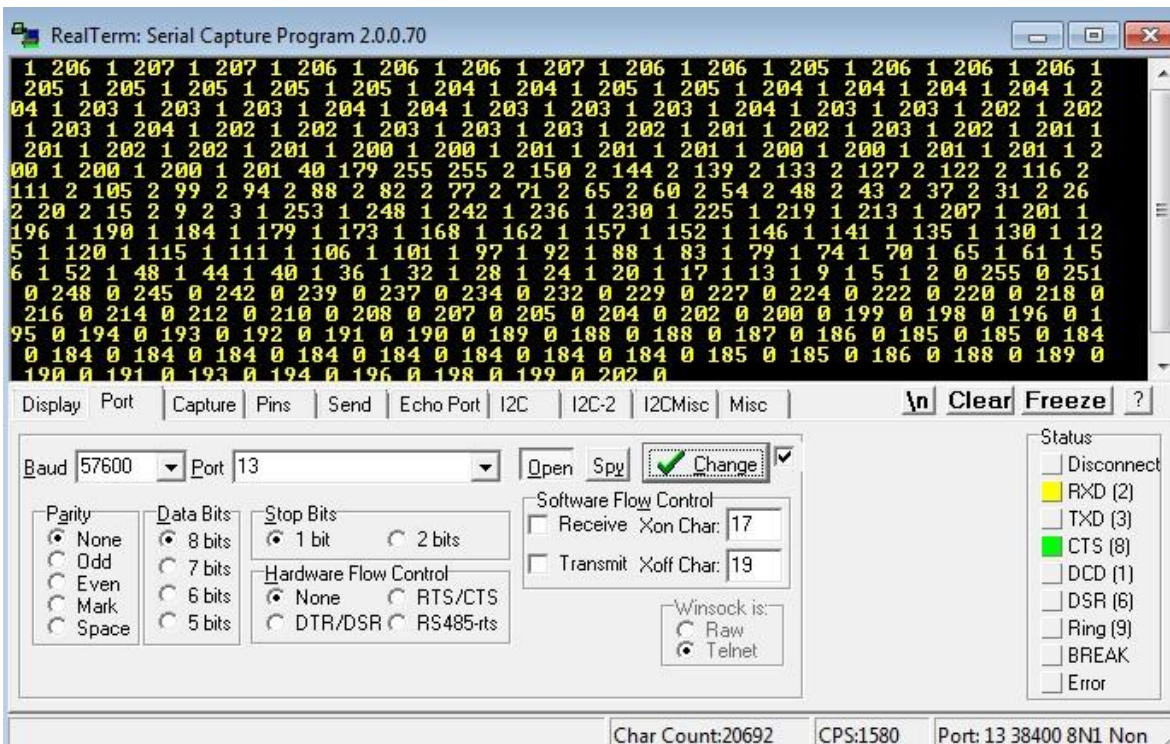


Figura 3.18. Software *Realterm:Serial Terminal* recibiendo datos desde el puerto COM.

3.5. Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario (GUI)

Una interfaz gráfica de usuario, conocida también como GUI por sus siglas en inglés (*Graphical User Interface*) es un programa informático que permite interactuar con los dispositivos electrónicos utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz. Su principal uso, consiste en proporcionar un entorno visual sencillo para permitir una comunicación sencilla e intuitiva con el sistema operativo de una máquina o computador. La GUI surge como evolución de las interfaces de línea de comandos que se usaban para operar los primeros sistemas operativos.

En la actualidad existen diversas herramientas computacionales que permiten desarrollar interfaces gráficas tales como Visual Basic, Visual C++, Java, LabView y Matlab. Para la creación de la GUI del sistema se decide utilizar MATLAB dado que este contiene un gran número de funciones incorporadas, posee un entorno sencillo de trabajo,

permite mostrar gráficos de manera sencilla, además de poseer la posibilidad de desarrollar

interfaces gráficas de usuario y permitir crear archivos de instalación de los algoritmos e interfaces creadas para su distribución a terceros.

3.5.1. Desarrollo de la GUI en MATLAB

MATLAB es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). La palabra *MATLAB* proviene de la unión de las palabras en inglés "MATrix LABoratory" ya que su elemento básico de función se basa en el uso de matrices de datos. *MATLAB* puede ser utilizado para llevar a cabo cálculos matemáticos, modelado, análisis y procesamiento de datos, visualización de gráficos y desarrollo de algoritmos.[18]

En *MATLAB* una GUI es una visualización gráfica en una o más ventanas que contienen los controles llamados componentes que permiten al usuario realizar tareas interactivas evitando que el usuario tenga que escribir directamente en la línea de comandos para realizar las tareas. A diferencia de los programas para llevar a cabo tareas de codificación, el usuario no tiene que entender los detalles de cómo se realizan las tareas.

En *MATLAB* existen dos formas para llevar a cabo el desarrollo de interfaces, ya sea mediante la línea de comandos, o por medio del uso de GUIDE de *MATLAB* el cual es un entorno de programación gráfica que proporciona herramientas para diseñar interfaces de usuario para aplicaciones personalizadas. Mediante el editor de diseño de GUIDE, es posible diseñar gráficamente de manera sencilla la interfaz de usuario ya que esta genera de manera automática el código de *MATLAB* para construir los controles involucrados en la GUI.[19]

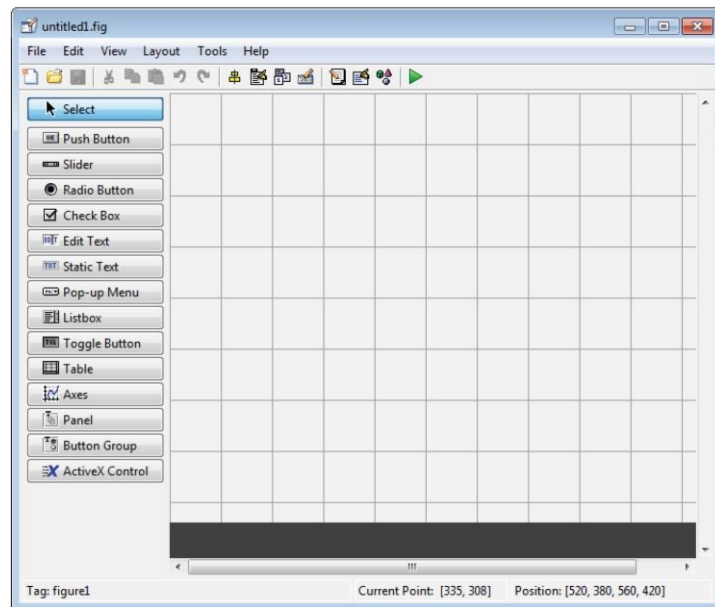


Figura 3.19. Entorno GUIDE para desarrollo de interfaces graficas en *MATLAB*

El entorno GUIDE de *MATLAB* presenta una gran variedad de controles para el desarrollo de esta, cuenta con menús Pop-up y Listbox que permiten desplegar una serie de opciones a seleccionar en forma de lista, posee diversas herramientas de selección como los Radio Button y los Check Box, cuenta con botones de pulsado (Push Button), que al ser activados, ejecutan rutinas de programa que se encuentran dentro del código así como recuadros denominados Axes que permiten mostrar tanto imágenes como gráficas.

El diagrama de flujo que se observa en la figura 3.20 muestra la estructura básica del código de programa implementado para llevar a cabo la recepción y manejo de los datos provenientes del sistema de monitoreo, mientras que la interface gráfica de usuario desarrollada es mostrada en la figura 3.21.

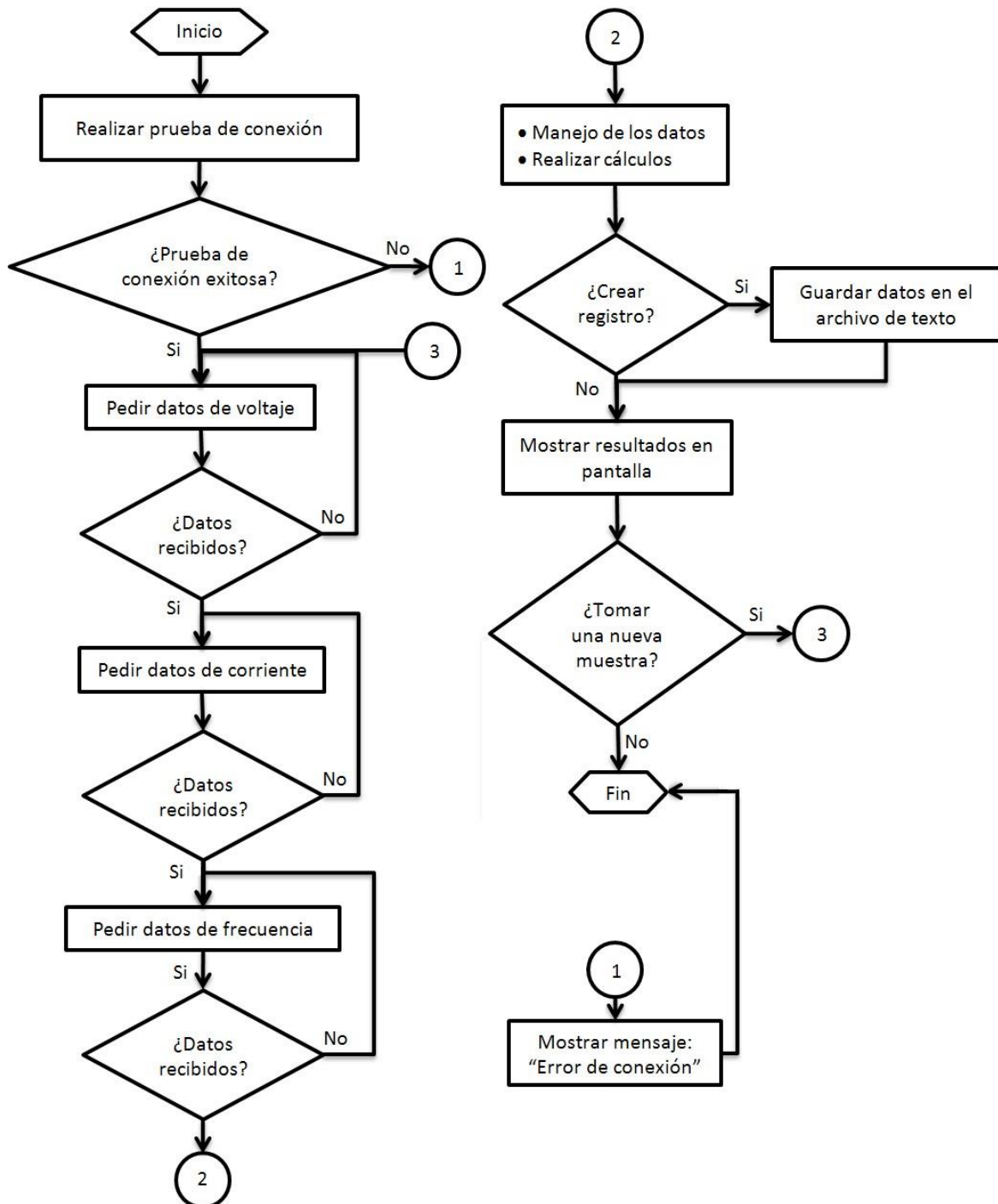


Figura 3.20. Diagrama deflujo del código implementado en la GUI de *MATLAB*.

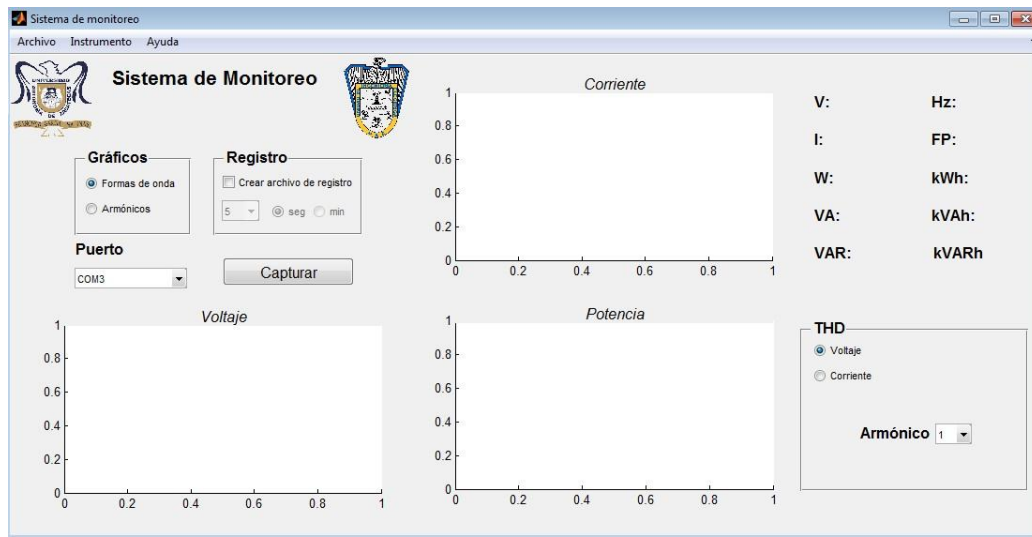


Figura 3.21. Interface gráfica de usuario diseñada en *MATLAB* para el sistema de monitoreo.

La interface gráfica es capaz de generar un archivo de texto que contiene las variables eléctricas calculadas por medio del sistema. La figura 3.22 muestra el formato de archivo generado a través de la GUI.

Fecha	Hora	Vrms	Irms	watts	VA	VAR	HZ
30-Apr-2015	12:56:21	132.056629	0.824021	108.736442	108.817466	2.037046	59.984894
30-Apr-2015	12:57:21	133.019464	0.832487	110.676400	110.737061	3.080515	60.022984
30-Apr-2015	12:58:21	132.160044	0.831140	109.767031	109.843551	3.437744	59.996678
30-Apr-2015	12:59:21	132.418950	0.832404	110.118603	110.226281	3.834848	60.011028
30-Apr-2015	13:00:21	132.539385	0.831766	110.121849	110.241729	5.088052	60.021679
30-Apr-2015	13:01:21	132.670956	0.831294	110.191803	110.288710	4.202723	60.046078
30-Apr-2015	13:02:21	132.579372	0.832940	110.328137	110.430550	4.472669	60.014382
30-Apr-2015	13:03:21	132.756711	0.832579	110.439957	110.530546	3.736214	60.031647
30-Apr-2015	13:04:21	132.682466	0.831896	110.295569	110.378153	3.518870	60.028972
30-Apr-2015	13:05:21	132.465731	0.830588	109.953717	110.024466	3.687019	60.022945
30-Apr-2015	13:06:21	132.550835	0.832495	110.280195	110.347973	3.346870	59.984423
30-Apr-2015	13:07:21	132.235552	0.830800	109.792092	109.861209	3.030616	59.989198
30-Apr-2015	13:08:21	132.230870	0.831615	109.902563	109.965211	2.836327	60.006589
30-Apr-2015	13:09:21	132.223504	0.831566	109.893580	109.952557	2.557032	59.988265
30-Apr-2015	13:10:21	132.838085	0.832243	110.487672	110.553560	3.121038	60.011257
30-Apr-2015	13:11:21	132.836573	0.832368	110.506235	110.568945	3.109364	60.011991
30-Apr-2015	13:12:21	132.952713	0.832543	110.627270	110.688910	3.247718	60.000222
30-Apr-2015	13:13:21	132.849165	0.833092	110.532123	110.675471	4.263169	59.979640
30-Apr-2015	13:14:21	132.840418	0.832338	110.429326	110.568208	4.615987	60.005835
30-Apr-2015	13:15:21	132.368361	0.831302	109.972183	110.038225	2.674583	60.013880
30-Apr-2015	13:16:21	132.504277	0.831614	110.124247	110.192397	2.909519	60.032907
30-Apr-2015	13:17:21	132.711218	0.832066	110.361505	110.424461	3.045723	60.034058
30-Apr-2015	13:18:21	132.543903	0.832277	110.248675	110.313316	3.261373	60.008301
30-Apr-2015	13:19:21	132.274436	0.830373	109.773083	109.837185	2.899549	59.999971
30-Apr-2015	13:20:21	132.273811	0.831019	109.799789	109.921966	4.425962	60.011092
30-Apr-2015	13:21:21	132.486994	0.831374	110.044660	110.146215	3.591266	60.003615
30-Apr-2015	13:22:21	132.506425	0.830946	110.039536	110.105694	3.156052	59.978651

Figura 3.22. Archivo de texto generado por la GUI a partir de los datos recibidos del sistema de monitoreo.

Capítulo 4. Pruebas y resultados

En el presente capítulo se muestran las diferentes pruebas realizadas utilizando el prototipo desarrollado, de igual forma se muestran los resultados obtenidos de estas mismas pruebas realizadas mediante un sistema analizador de redes comercial (Fluke 43B Power Quality Analyzer) el cual permite, entre otras funciones, obtener los valores calculados por el prototipo.



Figura 4.1. Analizador de calidad de la energía Fluke 43B.

4.1. Prueba con carga puramente resistiva

Para la realización de las pruebas iniciales del sistema se implementó una carga puramente resistiva, para esto, se utilizó una plancha comercial (Oster 5002-054)



Figura4.2. Carga resistiva implementada para las pruebas (plancha Oster 5002-054)

La figura4.3 muestra las formas de onda devoltaje, corriente y potencia obtenidos mediante el prototipo para una carga puramente resistiva, mientras que la figura 4.4 muestra las formas de onda devoltaje y corriente correspondientes al sistema Fluke 43B.

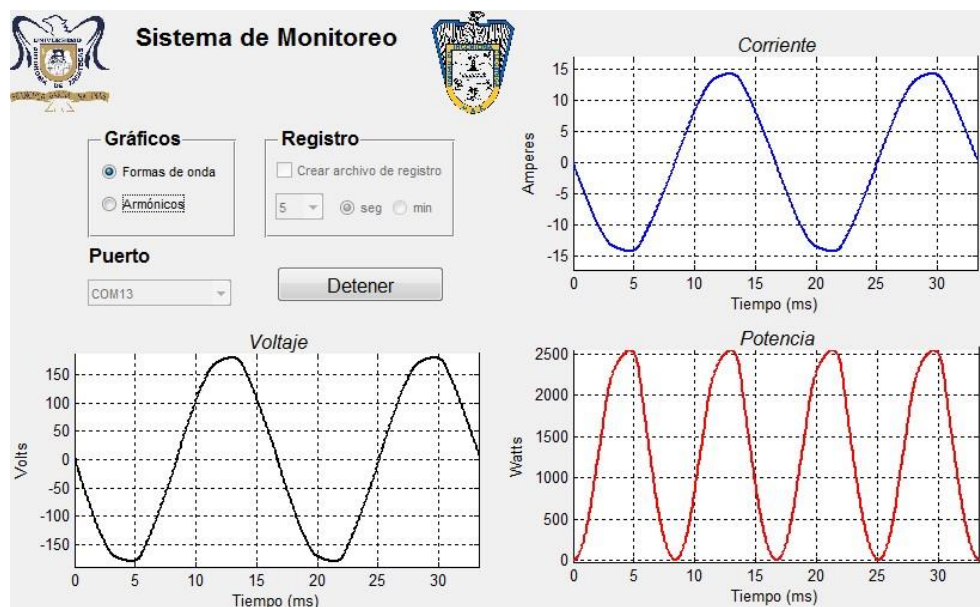


Figura4.3. Formas de onda obtenidas mediante el prototipo con carga puramente resistiva (plancha Oster 5002-054).

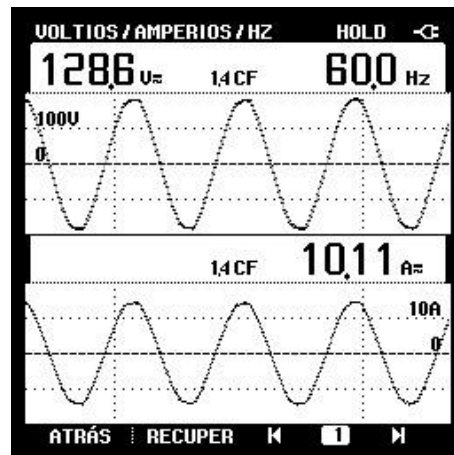


Figura4.4. Formas de onda obtenidas mediante el analizador Fluke43B con carga puramente resistiva (plancha Oster 5002-054).

La figura4.5 muestra las gráficas de componentes armónicos de voltaje, corriente y potencia obtenidos mediante el prototipo para una carga puramente resistiva, la figura 4.6 muestra los componentes armónicos de voltaje, corriente potencia correspondientes al sistema Fluke43B.

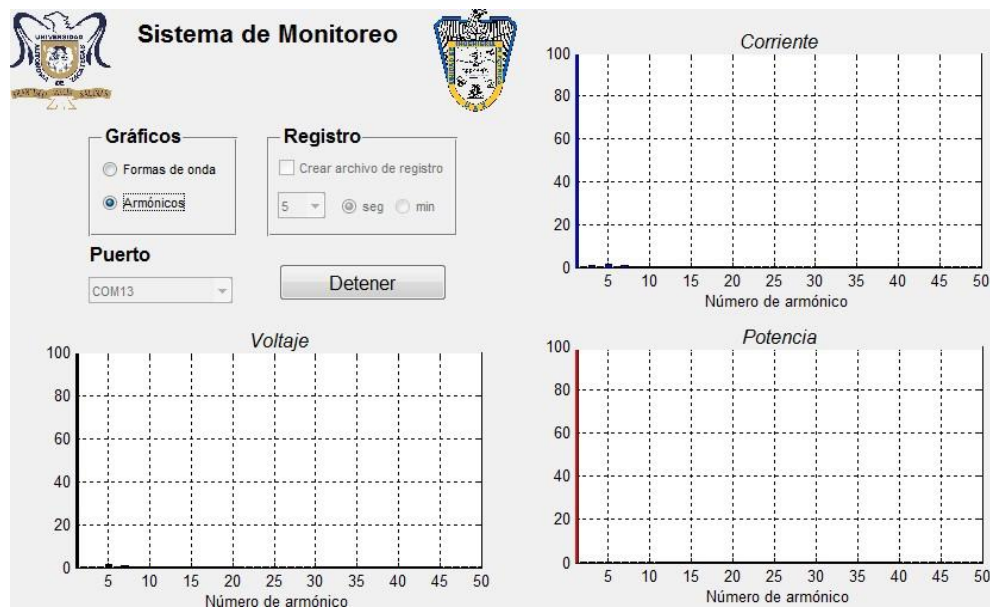
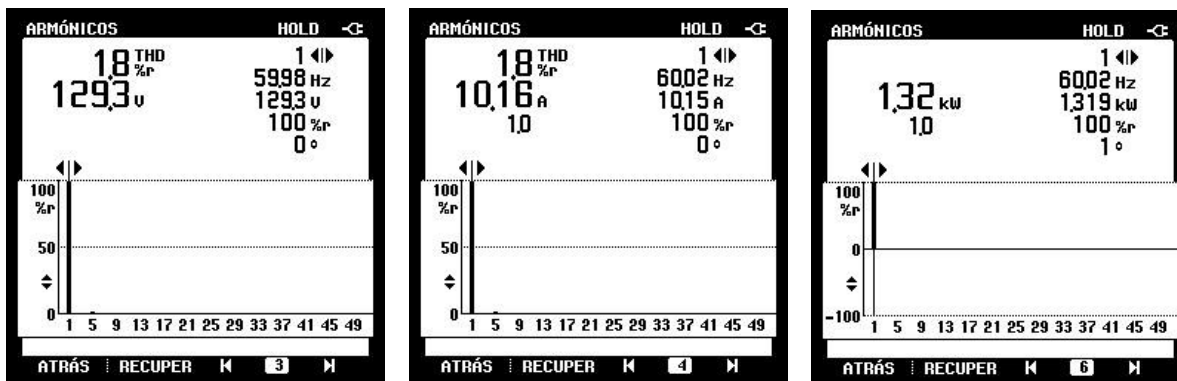


Figura4.5. Componentes armónicos obtenidos mediante el prototipo con carga resistiva (plancha Oster 5002-054).



a) b) c)
 Figura 4.6. Componentes armónicos obtenidos mediante el analizador Fluke 43B con carga resistiva (plancha Oster 5002-054). a) Voltaje, b) Corriente y c) Potencia.

La tabla 4.1 muestra los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B para una carga puramente resistiva, como se puede observar la diferencia entre las mediciones obtenidas mediante los sistemas se encuentran todas por debajo del 1%.

Tabla 4.1. Tabla comparativa entre los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B para una carga puramente resistiva (plancha Oster 5002-054).

Tipo	Prototipo	Fluke 43B	Error (%)
Voltaje			
Corriente			
Potencia real			
Potencia aparente			
Potencia reactiva			
Frecuencia			
Factor de potencia			
THD en voltaje			
THD en corriente			

4.2. Pruebas con carga inductiva-resistiva

Para la realización de las pruebas con carga inductiva-resistiva se utilizó un par de cargas, la primera un esmerilador de banco (Esmeril B&D BT3600-B3) y la segunda una cortadora de disco (Cortadora Makita 2414NB).



Figura 4.7. Cargas inductiva-resistiva implementadas para las pruebas. a) Esmeril B&D BT3600-B3, b) Cortadora Makita 2414NB.

La figura 4.8 muestra las formas de onda de voltaje, corriente y potencia obtenidos mediante el prototipo para el esmeril B&D BT3600-B3 (figura 4.7 a)), mientras que la figura 4.9 muestra las formas de onda de voltaje y corriente correspondientes al sistema Fluke 43B.

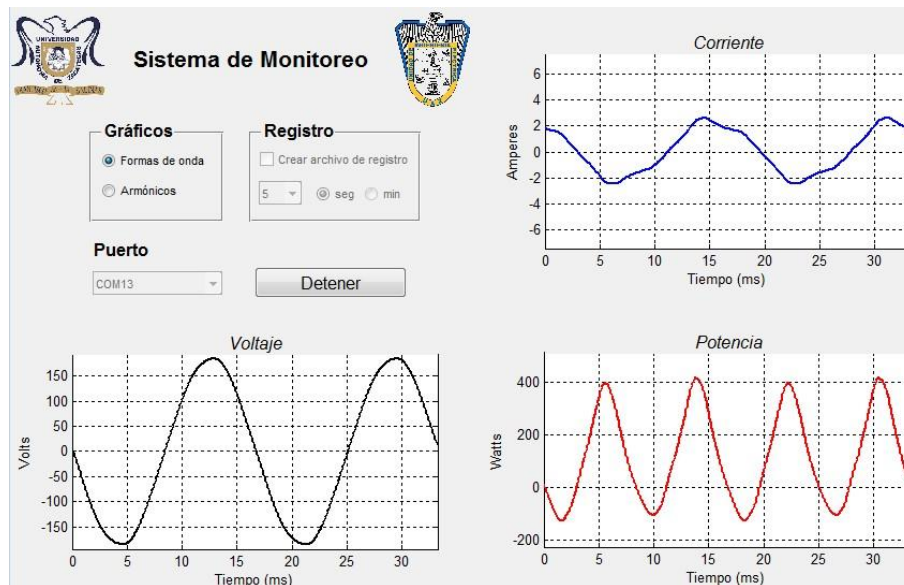


Figura4.8. Formas de onda obtenidas mediante el prototipo con carga inductiva-resistiva (Esmeril B&D BT3600-B3).

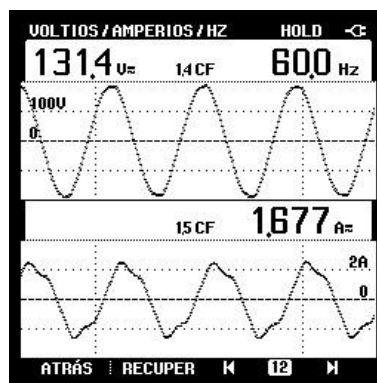


Figura4.9. Formas de onda obtenidas mediante el analizador Fluke 43B con carga inductiva-resistiva (Esmeril B&D BT3600-B3).

La figura4.10 muestra las gráficas de componentes armónicos de voltaje, corriente y potencia obtenidos mediante el prototipo para la carga inductiva-resistiva a), la figura 4.11 muestra los componentes armónicos de voltaje, corriente y potencia correspondientes al sistema Fluke 43B.

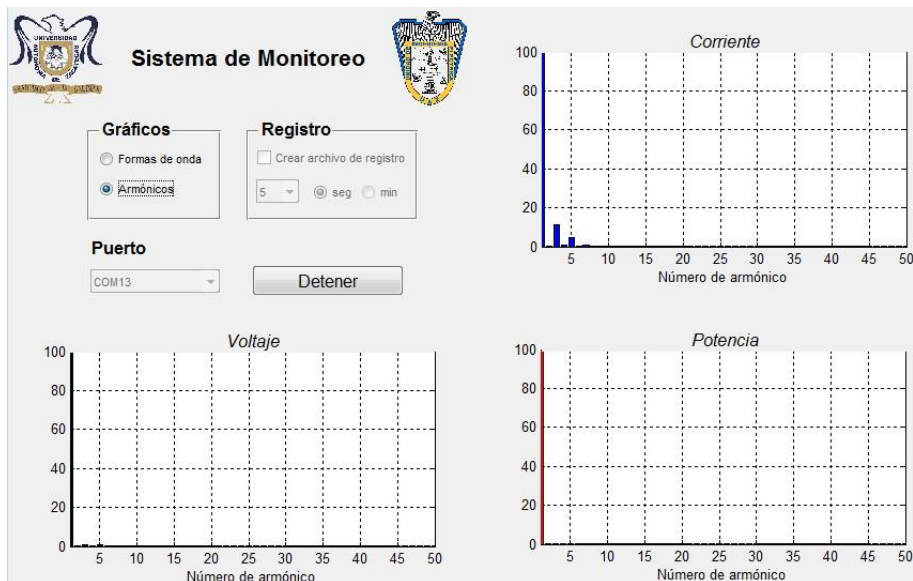
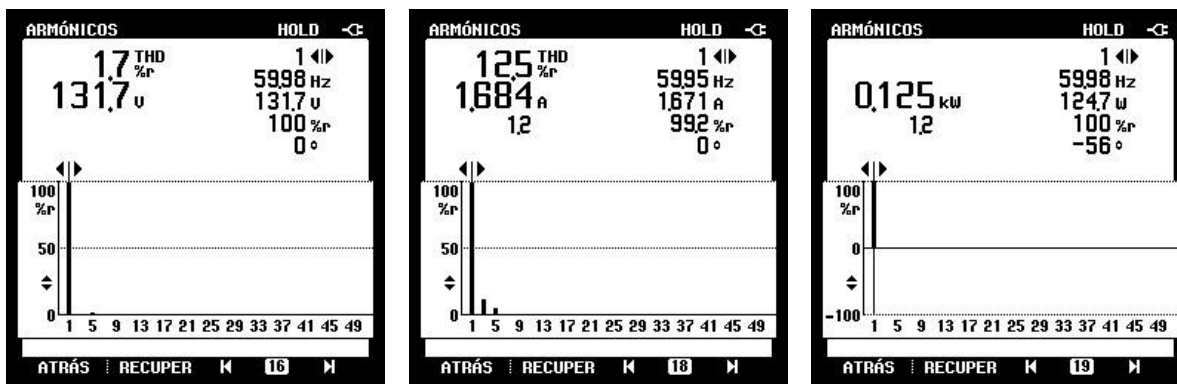


Figura 4.10. Componentes armónicos obtenidos mediante el prototipo con carga inductiva-resistiva (Esmeril B&D BT3600-B3)



a) b) c)

Figura 4.11. Componentes armónicos obtenidos mediante el analizador Fluke 43B con carga inductiva-resistiva (Esmeril B&D BT3600-B3)

La tabla 4.2 muestra los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke

43B para el esmeril B&D BT3600-B3 (Figura 4.7 a)), como se puede observar, el prototipo logra mantenerse dentro de un margen de error menor al 2%.

Tabla4.2. Tabla comparativa entre los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B con carga inductiva-resistiva (Esmeril B&D BT3600-B3).

Tipo	Prototipo	Fluke 43B	Error (%)
Voltaje			
Corriente			
Potencia real			
Potencia aparente			
Potencia reactiva			
Frecuencia			
Factor de potencia			
THD en voltaje			
THD en corriente			

La figura 4.12 muestra las formas de onda de voltaje, corriente y potencia obtenidos

mediante el prototipo para la cortadora Makita 2414NB (figura 4.7 b)), mientras que la figura 4.13 muestra las formas de onda de voltaje y corriente correspondientes al sistema Fluke 43B.

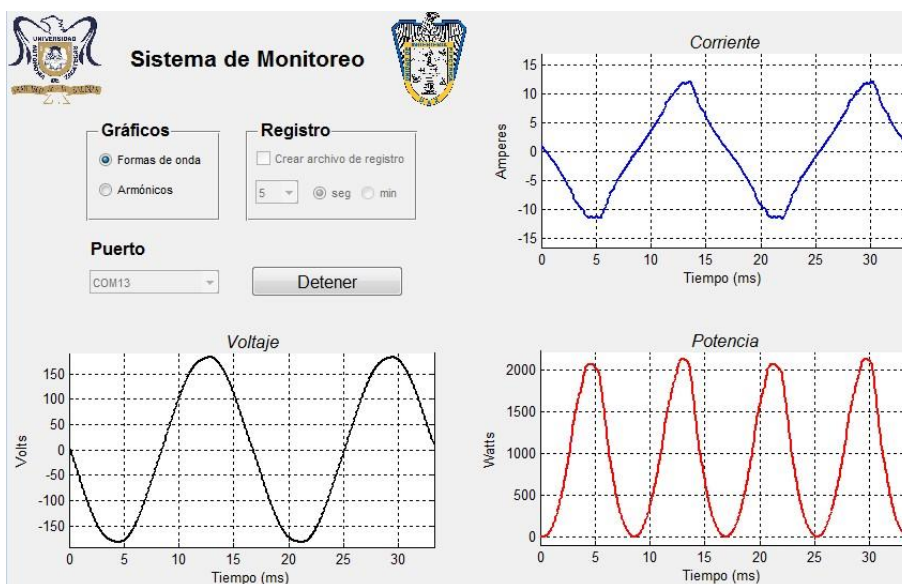


Figura 4.12. Formas de onda obtenidas mediante el prototipo con carga inductiva-resistiva (Cortadora Makita 2414NB).

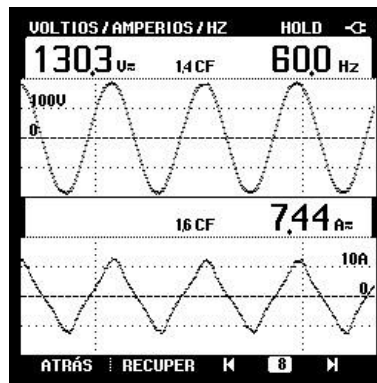


Figura 4.13. Formas de onda obtenidas mediante el analizador Fluke43B con carga inductiva-resistiva (Cortadora Makita2414NB).

La figura 4.14 muestra las gráficas de componentes armónicos de voltaje, corriente y potencia obtenidos mediante el prototipo para la cortadora Makita2414NB (figura 4.7 b)), la figura 4.15 muestra los componentes armónicos de voltaje, corriente y potencia correspondientes al sistema Fluke43B.

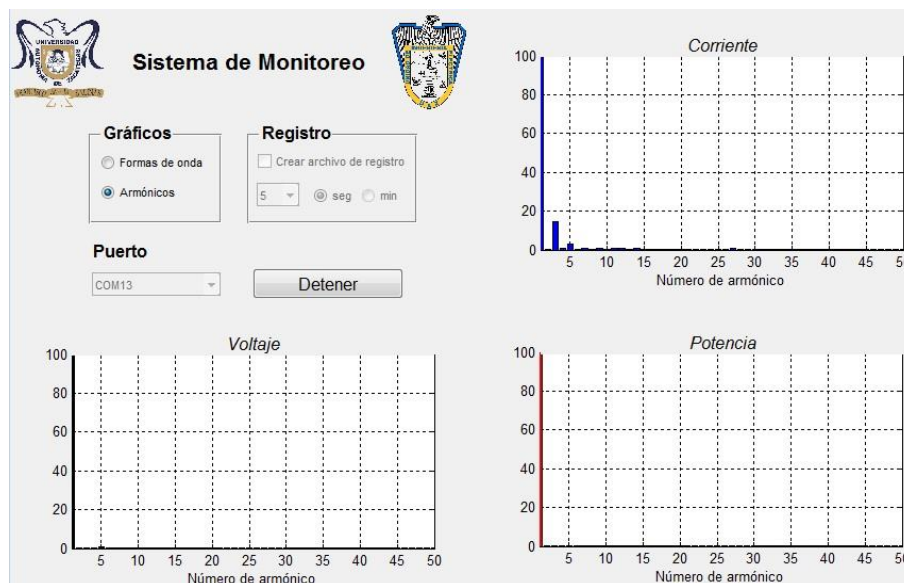
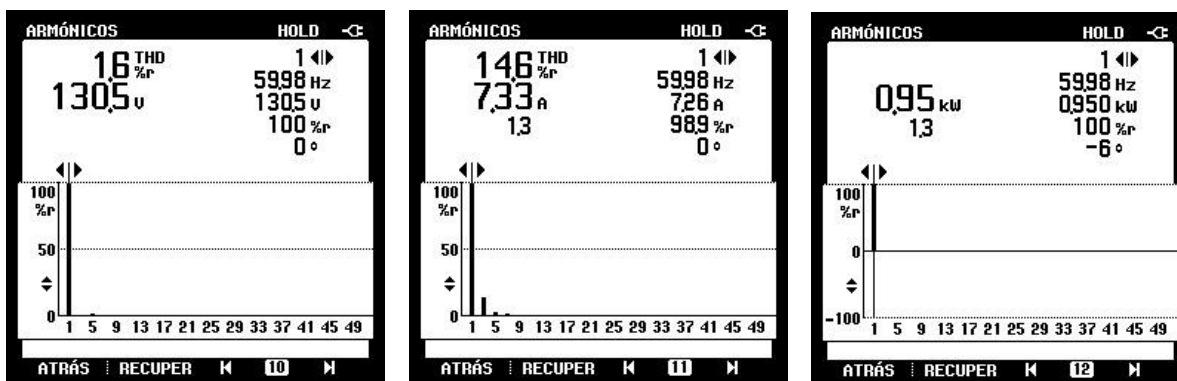


Figura 4.14. Componentes armónicos obtenidos mediante el prototipo con carga inductiva-resistiva (Cortadora Makita2414NB)



a) b) c)
 Figura 4.15. Componentes armónicos obtenidos mediante el analizador Fluke 43B con carga inductiva-resistiva (Cortadora Makita2414NB). a) Voltaje, b) Corriente y c) Potencia.

La tabla 4.3 muestra los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B para la cortadora Makita2414NB (figura 4.7 b)), como se puede observar, para este caso podemos percibir una diferencia mayor entre los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B, esto debido en parte al redondeo que el sistema Fluke 43B realiza para valores que rondan los kW, sin embargo los valores no discrepan más allá del 4%.

Tabla 4.3. Tabla comparativa entre los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B para una carga inductiva-resistiva (Cortadora Makita 2414NB).

Tipo	Prototipo	Fluke 43B	Error (%)
Voltaje			
Corriente			
Potencia real			
Potencia aparente			
Potencia reactiva			
Frecuencia			
Factor de potencia			
THD en voltaje			
THD en corriente			

4.3. Pruebas con inversor multinivel

Con la finalidad observar el comportamiento del prototipo bajo diferentes circunstancias, se utilizó como fuente de energía un inversor multinivel alimentado por paneles fotovoltaicos que representa una fuente de energía no lineal de energía eléctrica.

4.3.1. Pruebas con carga resistiva

Para la realización de las pruebas iniciales con un inversor multinivel como fuente de energía en base a paneles fotovoltaicos se implementó una carga puramente resistiva, para esto, se hizo uso de un foco incandescente de 100W.



Figura 4.16. Carga resistiva utilizada en el inversor multinivel (foco incandescente).

La figura 4.17 muestra las formas de onda de voltaje, corriente y potencia obtenidos

mediante el prototipo para una carga puramente resistiva alimentada mediante el inversor multinivel, mientras que la figura 4.18 muestra las formas de onda de voltaje y corriente correspondientes al sistema Fluke 43B.

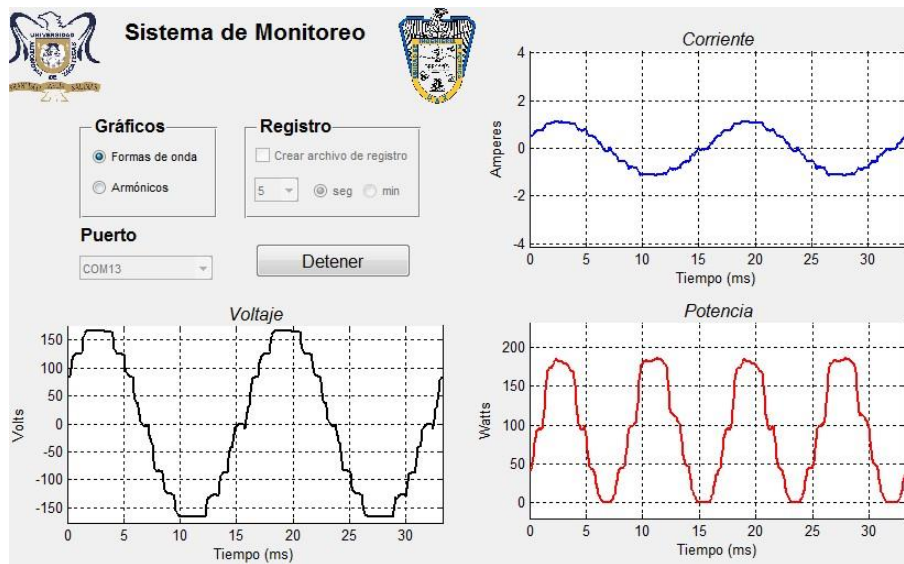


Figura 4.17. Formas de onda obtenidas mediante el prototipo en el inversor multinivel con carga resistiva (foco incandescente).

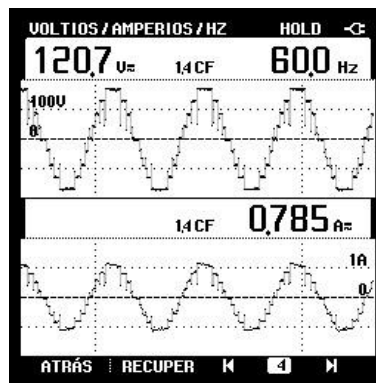


Figura 4.18. Formas de onda obtenidas mediante el analizador Fluke 43B en el inversor multinivel con carga resistiva (foco incandescente).

La figura 4.19 muestra las gráficas de componentes armónicos de voltaje, corriente y potencia obtenidos mediante el prototipo para una carga puramente resistiva alimentada mediante el inversor multinivel, la figura 4.20 muestra los componentes armónicos de voltaje, corriente y potencia correspondientes al sistema Fluke 43B.

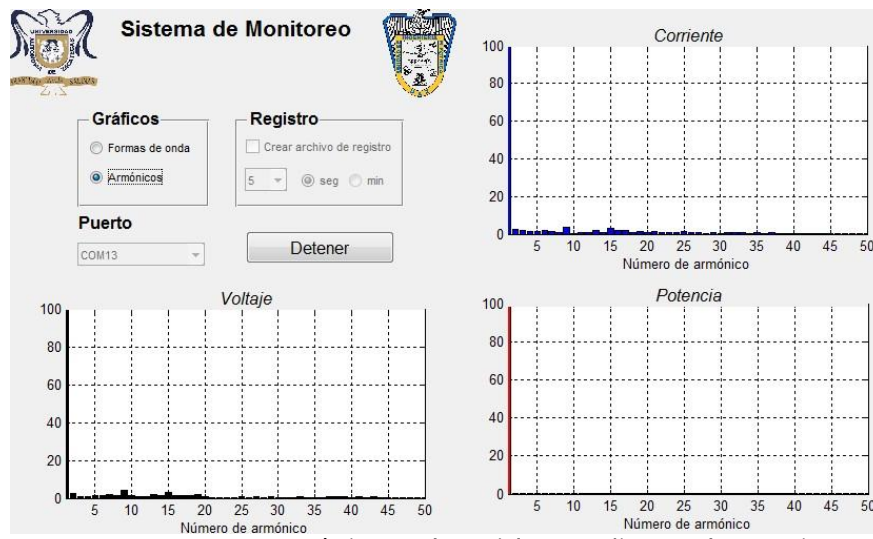


Figura 4.19. Componentes armónicos obtenidos mediante el prototipo en el inversor multinivel con carga resistiva (foco incandescente).

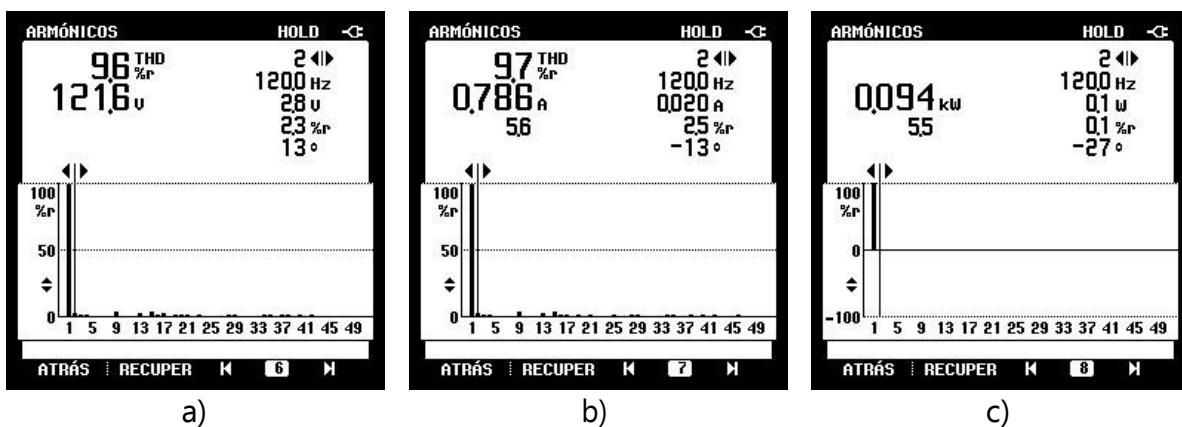


Figura 4.20. Componentes armónicos obtenidos mediante el analizador Fluke 43B en el inversor multinivel con carga resistiva (foco incandescente). a) Voltaje, b) Corriente y c) Potencia.

La tabla 4.4 muestra los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke

43B para una carga puramente resistiva alimentada mediante el inversor multinivel, como se puede observar el porcentaje de errores mayor que en los casos anteriores debido al redondeo que efectúa el sistema Fluke 43B lo que impide un cálculo más preciso del error, sin embargo, el porcentaje de error se encuentra por debajo del .

Tabla 4.4. Tabla comparativa entre los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B para una carga inductiva-resistiva conectada al inversor multinivel (foco incandescente).

Tipo	Prototipo	Fluke 43B	Error (%)
Voltaje			
Corriente			
Potencia real			
Potencia aparente			
Potencia reactiva			
Frecuencia			
Factor de potencia			
THD en voltaje			
THD en corriente			

4.3.2. Pruebas con carga inductiva-resistiva

Para la realización de las pruebas con carga inductiva-resistiva conectada al inversor multinivel, un fuente de energía en base a paneles fotovoltaicos se utilizó en un mini taladro de mano conocido como mototool (Dremel 300).



Figura 4.21. Carga inductiva-resistiva utilizada en el inversor multinivel (Dremel 300).

La figura 4.22 muestra las formas de onda de voltaje, corriente y potencia obtenidos mediante el prototipo para una carga resistiva-inductiva alimentada mediante el inversor multinivel, mientras que la figura 4.23 muestra las formas de onda de voltaje y corriente correspondientes al sistema Fluke 43B.

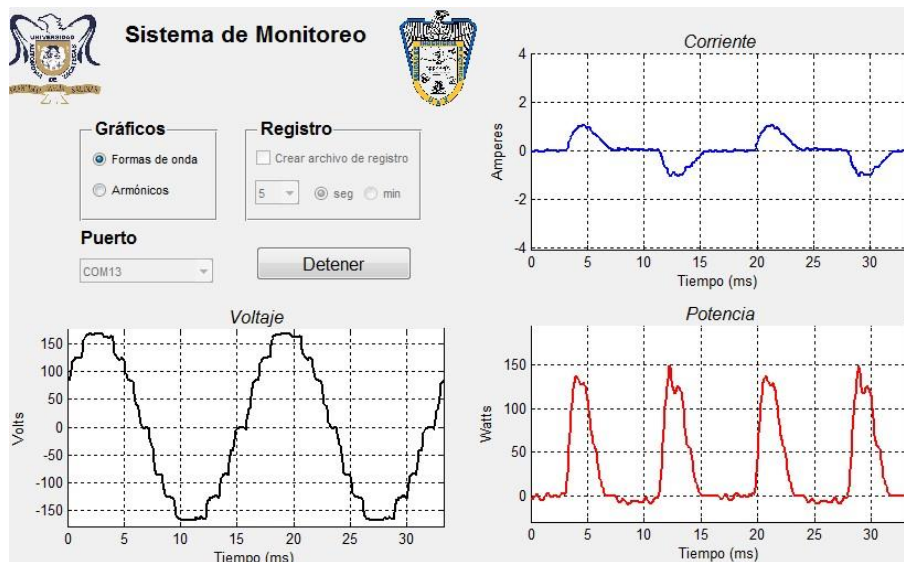


Figura 4.22. Formas de onda obtenidas mediante el prototipo en el inversor multinivel con carga inductiva-resistiva (Dremel300).

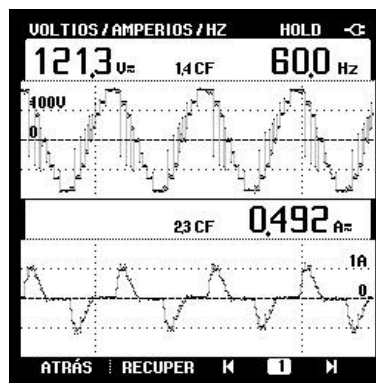


Figura 4.23. Formas de onda obtenidas mediante el analizador Fluke 43B en el inversor multinivel con carga inductiva-resistiva (Dremel 300).

La figura 4.24 muestra las gráficas de componentes armónicos de voltaje, corriente y potencia obtenidos mediante el prototipo para una carga resistiva-inductiva alimentada mediante el inversor multinivel, la figura 4.25 muestra los componentes armónicos de voltaje, corriente y potencia correspondientes al sistema Fluke 43B.

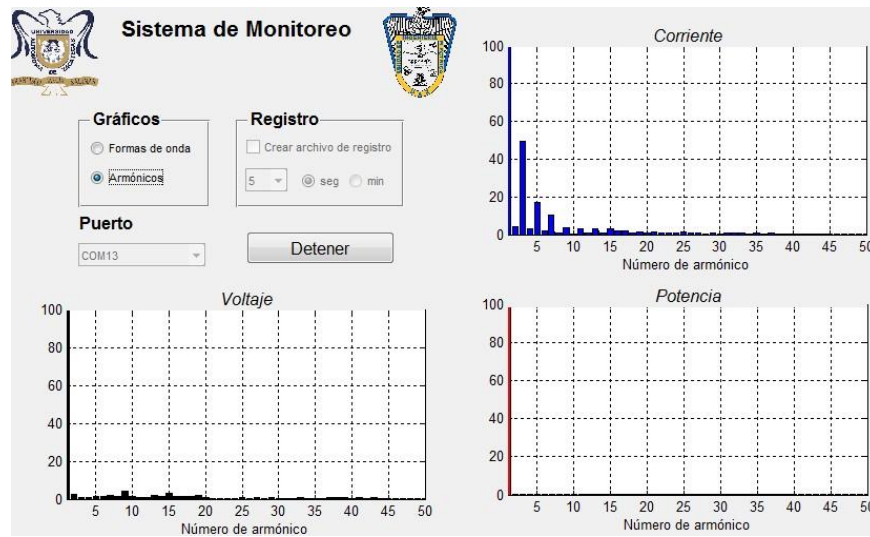


Figura 4.24. Componentes armónicos obtenidos mediante el prototipo en el inversor multinivel con carga inductiva-resistiva (Dremel 300).

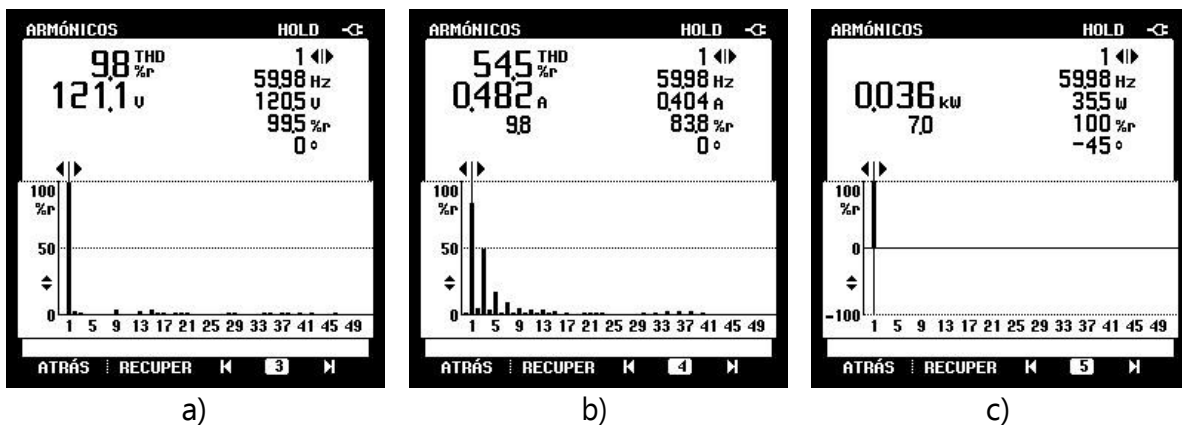


Figura 4.25. Componentes armónicos obtenidos mediante el analizador Fluke 43B en el inversor multinivel con carga inductiva-resistiva (Dremel 300). a) Voltaje, b) Corriente y c) Potencia.

La tabla 4.5 muestra los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke

43B para una carga resistiva-inductiva alimentada mediante el inversor multinivel, como se puede observar, la diferencia más significativa se encuentra en el valor de THD para corriente, esto es debido a que la carga es de baja potencia, por lo que demanda poca corriente, dando como resultado que la señal obtenida se presente de forma escalonada a

causa de la resolución del sensor de corriente, aun así, el prototipo logra mantener un margen de error menor al 3%.

Tabla 4.5. Tabla comparativa entre los valores obtenidos mediante el prototipo y el sistema Fluke 43B para una carga inductiva-resistiva conectada al inversor multinivel (Dremel 300).

Tipo	Prototipo	Fluke 43B	Error (%)
Voltaje	121.87V	121.3V	0.47%
Corriente	0.49A	0.492A	0.4%
Potencia real	33.7W	34W	0.9%
Potencia aparente	59VA	60VA	1.7%
Potencia reactiva	49VAR	49VAR	0
Frecuencia	60Hz	60Hz	0
Factor de potencia	0.55	0.57	0.3%
THD en voltaje	9.1%	9.8%	0.7%
THD en corriente	56.39%	54.5%	2.1%

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro

5.1. Conclusiones

El sistema es capaz de reproducir las formas de onda de voltaje, corriente, potencia y componentes armónicos de diferentes tipos de carga, además, calcula valores de voltaje y corriente eficaz, potencia activa, reactiva y aparente, frecuencia de la red y factor de potencia con un nivel de precisión aceptable lo que permite llevar a cabo un registro preciso del consumo de la energía eléctrica en instalaciones de baja.

Los valores obtenidos mediante el sistema hacen posible implementar las medidas necesarias para hacer un uso eficiente de la energía eléctrica ya que a partir de los niveles de potencia y las gráficas de los componentes armónicos se simplifica la tarea de implementar las medidas necesarias para mejorar la calidad de la energía eléctrica, evitando así, penalizaciones por parte de la compañía de electricidad.

El prototipo muestra un porcentaje de error menor al en el peor de los casos en comparación a los valores obtenidos mediante el sistema comercial implementado en las pruebas, sin embargo, en comparación con este, el prototipo se encuentra limitado a instalaciones eléctricas de baja tensión.

5.2. Trabajo a futuro

Mejorar el rango de operación del prototipo desarrollando un sistema de sensores inteligentes que permita autoajustar el arreglo de acondicionamiento de estos, permitiendo así, trabajar en sistemas eléctricos de baja, media y alta tensión, y a su vez, disminuir el error en el cálculo de la THD.

Explorar tecnologías de microprocesamiento capaces de incorporar un display gráfico que permita observar las formas de onda y las variables eléctricas calculadas por el prototipo in situ y almacenarlas directamente en una tarjeta de memoria.

Desarrollar un sistema de comunicación vía WiFi que permita monitorear el consumo de la energía eléctrica desde cualquier ordenador con conexión a internet vía la implementación de un servidor.

Añadir al prototipo la posibilidad de conectar y desconectar cargas bajo la programación de parámetros de consumo establecidos o de manera remota desde la interface de usuario.

Apéndice

Apéndice A: Hojas de datos.



PIC16F87XA

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F874A
- PIC16F877A

High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory,
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM),
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin
PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,
can be incremented during Sleep via external
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI
(Master mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address
detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with
external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for
Brown-out Reset (BOR)

Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital
Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference
(VREF) module
 - Programmable input multiplexing from device
inputs and internal voltage reference
 - Comparator outputs are externally accessible

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash
program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM
memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

CMOS Technology:

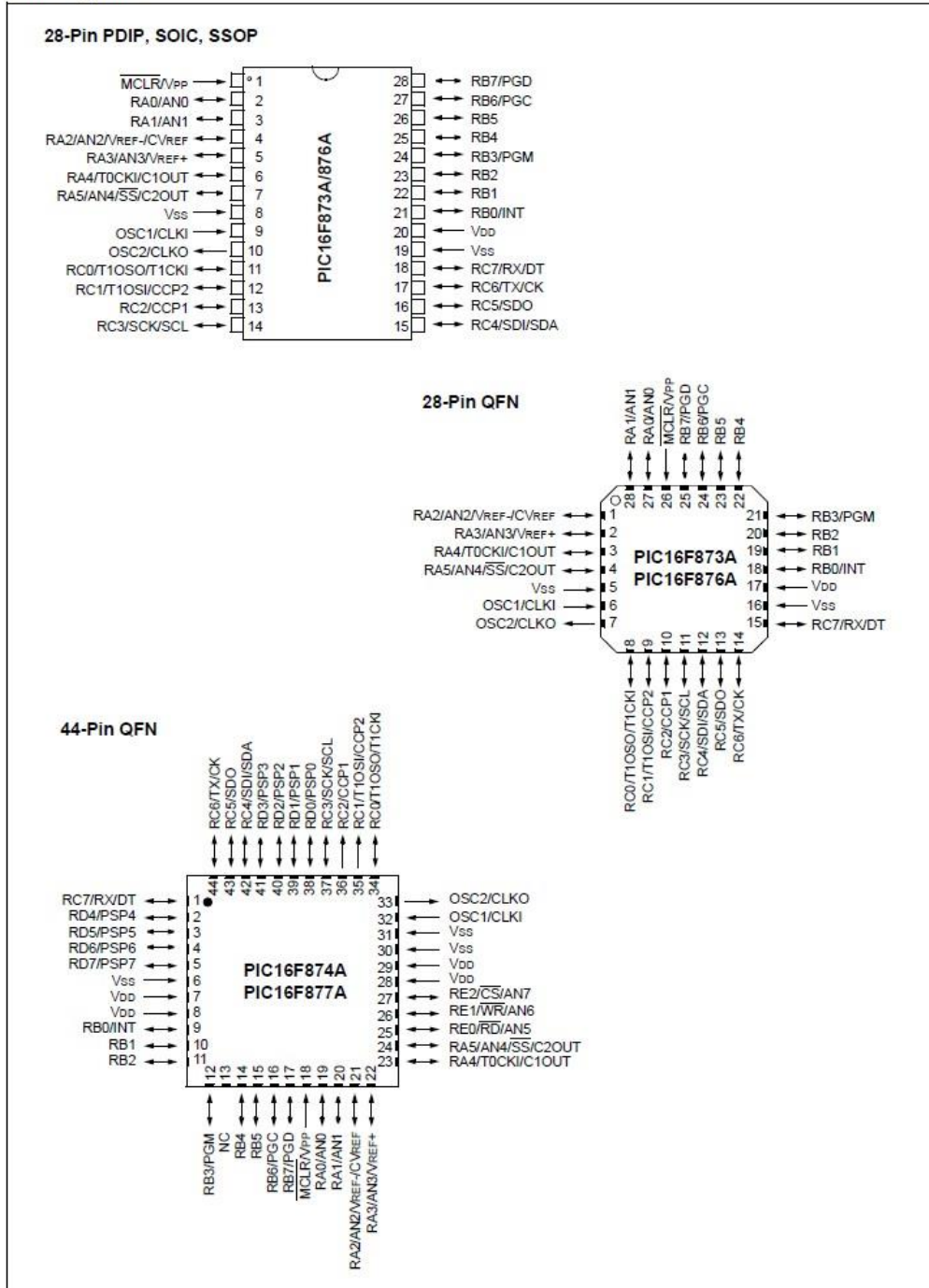
- Low-power, high-speed Flash/EEPROM
technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I ² C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

FiguraA.1. Hojadedatos del microcontrolador PIC 16F877A(A)

PIC16F87XA

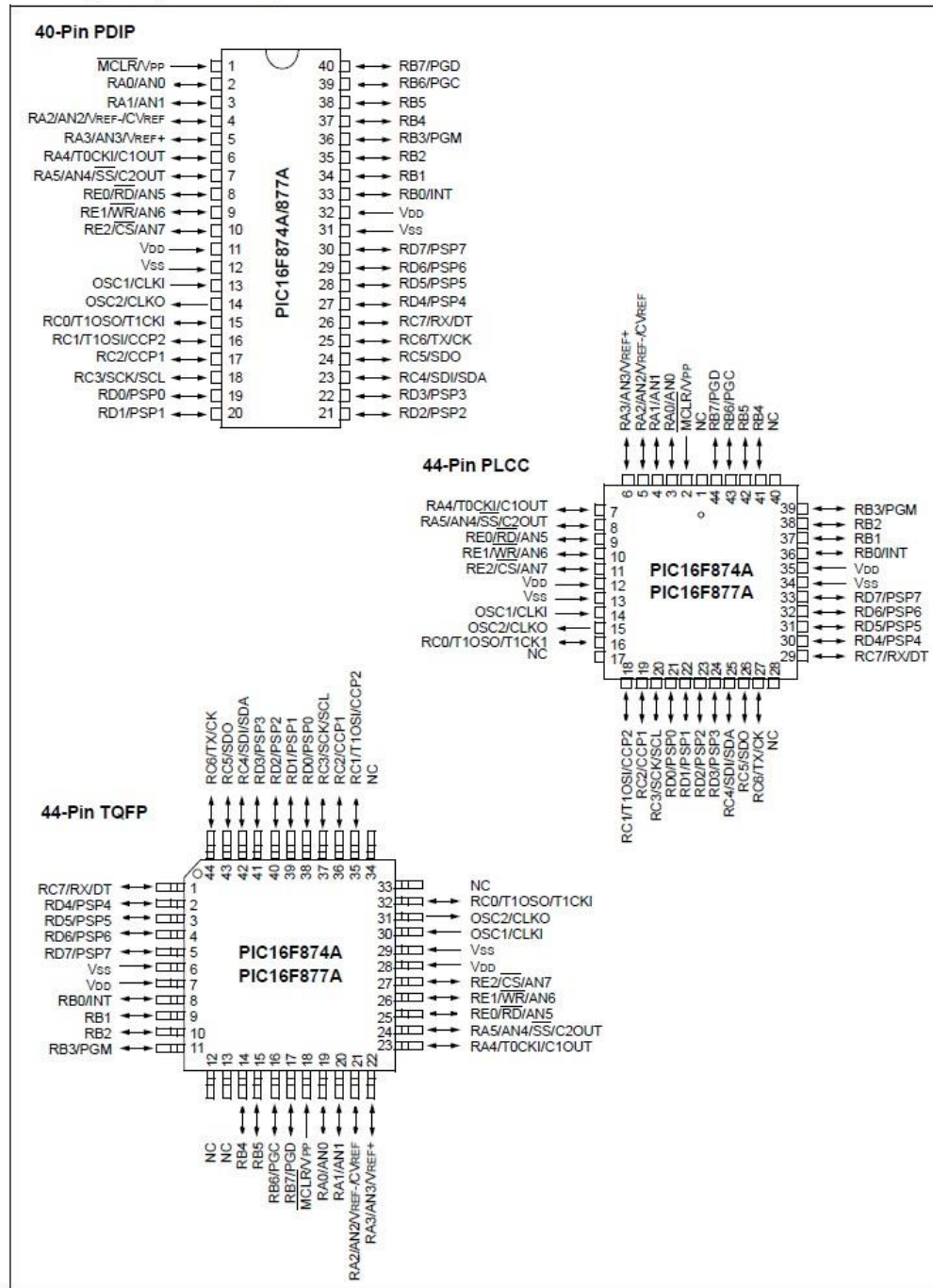
Pin Diagrams



FiguraA.2. Hojadedatos del microcontrolador PIC 16F877A (B)

PIC16F87XA

Pin Diagrams (Continued)



FiguraA.3. Hojadedatos del microcontrolador PIC 16F877A(C)

XBee[®]/XBee-PRO[®] RF Modules

XBee[®]/XBee-PRO[®] RF Modules
RF Module Operation
RF Module Configuration
Appendices



Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol

For RF Module Part Numbers: XB24-A...-001, XBP24-A...-001

IEEE[®] 802.15.4 RF Modules by Digi International



Digi International Inc.
11001 Bren Road East
Minnetonka, MN 55343
877 912-3444 or 952 912-3444
<http://www.digi.com>

90000982_B
2009.09.23

FiguraA.4. Hojadedatos del módulo RF Xbee(A)

1. XBee®/XBee-PRO® RF Modules

The XBee and XBee-PRO RF Modules were engineered to meet IEEE 802.15.4 standards and support the unique needs of low-cost, low-power wireless sensor networks. The modules require minimal power and provide reliable delivery of data between devices.

The modules operate within the ISM 2.4 GHz frequency band and are pin-for-pin compatible with each other.



Key Features

Long Range Data Integrity

XBee

- Indoor/Urban: up to 100' (30 m)
- Outdoor line-of-sight: up to 300' (90 m)
- Transmit Power: 1 mW (0 dBm)
- Receiver Sensitivity: -92 dBm

XBee-PRO

- Indoor/Urban: up to 300' (90 m), 200' (60 m) for International variant
- Outdoor line-of-sight: up to 1 mile (1600 m), 2500' (750 m) for International variant
- Transmit Power: 63mW (18dBm), 10mW (10dBm) for International variant
- Receiver Sensitivity: -100 dBm

RF Data Rate: 250,000 bps

Advanced Networking & Security

Retries and Acknowledgements
 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
 Each direct sequence channels has over 65,000 unique network addresses available
 Source/Destination Addressing
 Unicast & Broadcast Communications
 Point-to-point, point-to-multipoint and peer-to-peer topologies supported

Low Power

XBee

- TX Peak Current: 45 mA (@3.3 V)
- RX Current: 50 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10 μ A

XBee-PRO

- TX Peak Current: 250mA (150mA for international variant)
- TX Peak Current (RPSMA module only): 340mA (180mA for international variant)
- RX Current: 55 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10 μ A

ADC and I/O line support

Analog-to-digital conversion, Digital I/O
 I/O Line Passing

Easy-to-Use

No configuration necessary for out-of box RF communications
 Free X-CTU Software (Testing and configuration software)
 AT and API Command Modes for configuring module parameters
 Extensive command set
 Small form factor

Worldwide Acceptance

FCC Approval (USA) Refer to Appendix A [p64] for FCC Requirements. Systems that contain XBee®/XBee-PRO® RF Modules inherit Digi Certifications.

ISM (Industrial, Scientific & Medical) **2.4 GHz frequency band**

Manufactured under **ISO 9001:2000** registered standards

XBee®/XBee-PRO® RF Modules are optimized for use in the United States, Canada, Australia, Japan, and Europe. Contact Digi for complete list of government agency approvals.



Specifications

Table 1-01. Specifications of the XBee®/XBee-PRO® RF Modules

Specification	XBee	XBee-PRO
Performance		
Indoor/Urban Range	Up to 100 ft (30 m)	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) International variant
Outdoor RF line-of-sight Range	Up to 300 ft (90 m)	Up to 1 mile (1600 m), up to 2500 ft (750 m) international variant
Transmit Power Output (software selectable)	1mW (0 dBm)	63mW (18dBm)* 10mW (10 dBm) for International variant
RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 bps - 250 kbps (non-standard baud rates also supported)	1200 bps - 250 kbps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-92 dBm (1% packet error rate)	-100 dBm (1% packet error rate)
Power Requirements		
Supply Voltage	2.8 – 3.4 V	2.8 – 3.4 V
Transmit Current (typical)	45mA (@ 3.3 V)	250mA (@3.3 V) (150mA for international variant) RPSMA module only: 340mA (@3.3 V) (180mA for international variant)
Idle / Receive Current (typical)	50mA (@ 3.3 V)	55mA (@ 3.3 V)
Power-down Current	< 10 μ A	< 10 μ A
General		
Operating Frequency	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960" x 1.297" (2.438cm x 3.294cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector, RPSMA Connector	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector, RPSMA Connector
Networking & Security		
Supported Network Topologies	Point-to-point, Point-to-multipoint & Peer-to-peer	
Number of Channels (software selectable)	16 Direct Sequence Channels	12 Direct Sequence Channels
Addressing Options	PAN ID, Channel and Addresses	PAN ID, Channel and Addresses
Agency Approvals		
United States (FCC Part 15.247)	OUR-XBEE	OUR-XBEEPRO
Industry Canada (IC)	4214A XBEE	4214A XBEEPRO
Europe (CE)	ETSI	ETSI (Max. 10 dBm transmit power output)*
Japan	R201WW07215214	R201WW08215111 (Max. 10 dBm transmit power output)*
Australia	C-Tick	C-Tick

* See Appendix A for region-specific certification requirements.

Antenna Options: The ranges specified are typical when using the integrated Whip (1.5 dBi) and Dipole (2.1 dBi) antennas. The Chip antenna option provides advantages in its form factor; however, it typically yields shorter range than the Whip and Dipole antenna options when transmitting outdoors. For more information, refer to the "XBee Antennas" Knowledgebase Article located on Digi's Support Web site

Mechanical Drawings

Figure 1-01. Mechanical drawings of the XBee®/XBee-PRO® RF Modules (antenna options not shown)



LM124 LM224 - LM324

LOW POWER QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE GAIN BANDWIDTH : 1.3MHz
- INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE INCLUDES GROUND
- LARGE VOLTAGE GAIN : 100dB
- VERY LOW SUPPLY CURRENT/AMPLI : 375 μ A
- LOW INPUT BIAS CURRENT : 20nA
- LOW INPUT OFFSET VOLTAGE : 5mV max. (for more accurate applications, use the equivalent parts LM124A-LM224A-LM324A which feature 3mV max.)
- LOW INPUT OFFSET CURRENT : 2nA
- WIDE POWER SUPPLY RANGE :
SINGLE SUPPLY : +3V TO +30V
DUAL SUPPLIES : \pm 1.5V TO \pm 15V

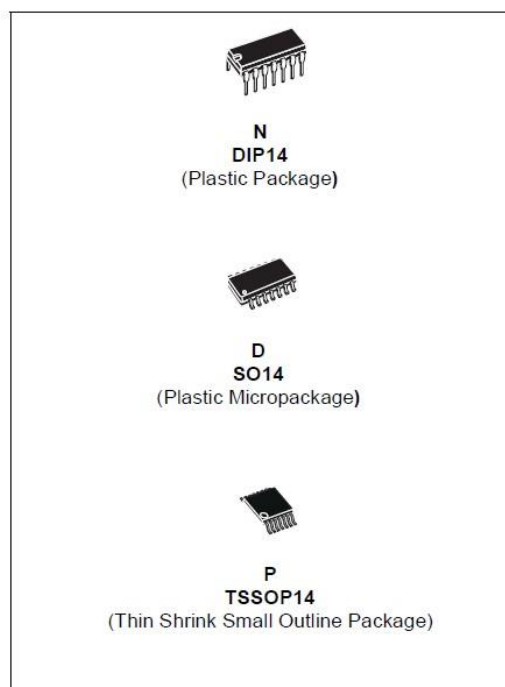
DESCRIPTION

These circuits consist of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers. They operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

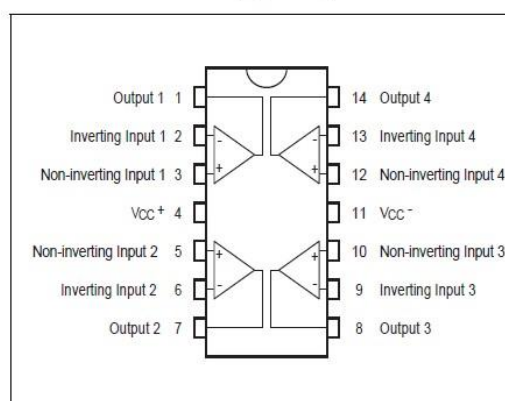
ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package		
		N	D	P
LM124	-55°C, +125°C	•	•	•
LM224	-40°C, +105°C	•	•	•
LM324	0°C, +70°C	•	•	•
Example : LM224N				

N = Dual in Line Package (DIP)
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)
P = Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP) - only available in Tape & Reel (PT)



PIN CONNECTIONS (top view)



MC78XX/LM78XX/MC78XXA

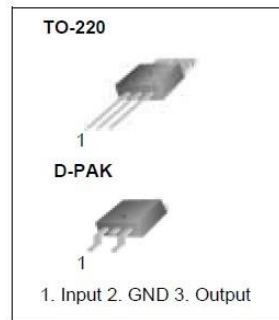
3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator

Features

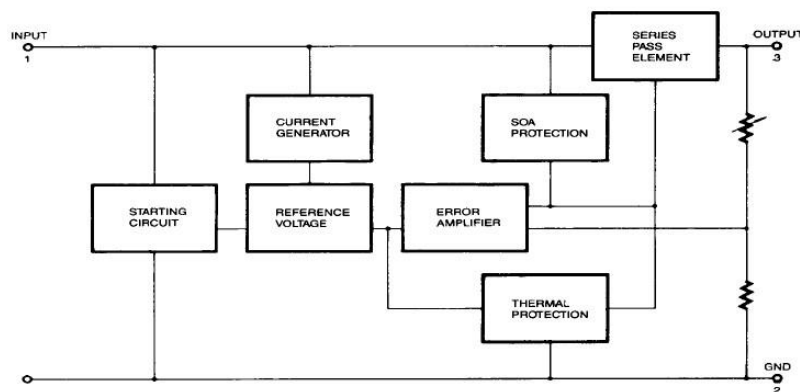
- Output Current up to 1A
- Output Voltages of 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24V
- Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

Description

The MC78XX/LM78XX/MC78XXA series of three terminal positive regulators are available in the TO-220/D-PAK package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut down and safe operating area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.



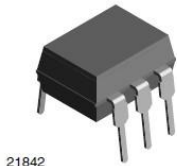
Internal Block Diagram



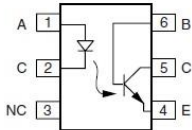
Rev. 1.0.1

4N25, 4N26, 4N27, 4N28

Vishay Semiconductors

**Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection**

21842



H79004-5

DESCRIPTION

The 4N25 family is an industry standard single channel phototransistor coupler. This family includes the 4N25, 4N26, 4N27, 4N28. Each optocoupler consists of gallium arsenide infrared LED and a silicon NPN phototransistor.

FEATURES

- Isolation test voltage 5000 V_{RMS}
- Interfaces with common logic families
- Input-output coupling capacitance < 0.5 pF
- Industry standard dual-in-line 6 pin package
- Compliant to RoHS directive 2002/95/EC and in accordance to WEEE 2002/96/EC

RoHS
COMPLIANT**APPLICATIONS**

- AC mains detection
- Reed relay driving
- Switch mode power supply feedback
- Telephone ring detection
- Logic ground isolation
- Logic coupling with high frequency noise rejection

AGENCY APPROVALS

- UL1577, file no. E52744
- BSI: EN 60065:2002, EN 60950:2000
- FIMKO: EN 60950, EN 60065, EN 60335

ORDER INFORMATION

PART	REMARKS
4N25	CTR > 20 %, DIP-6
4N26	CTR > 20 %, DIP-6
4N27	CTR > 10 %, DIP-6
4N28	CTR > 10 %, DIP-6

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ⁽¹⁾

PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
INPUT				
Reverse voltage		V _R	5	V
Forward current		I _F	60	mA
Surge current	t ≤ 10 μs	I _{FSM}	3	A
Power dissipation		P _{diss}	100	mW
OUTPUT				
Collector emitter breakdown voltage		V _{CEO}	70	V
Emitter base breakdown voltage		V _{EBO}	7	V
Collector current		I _C	50	mA
	t ≤ 1 ms	I _C	100	mA
Power dissipation		P _{diss}	150	mW



1135 - Precision Voltage Sensor



Product Description

The Voltage Sensor measures the differential voltage between the input terminals and outputs the difference proportionally. The maximum differential voltage that can be measured accurately is $\pm 30V$.

Product Specifications

Sensor Properties

Sensor Type	Voltage (DC)
Sensor Output Type	Non-Ratiometric
Voltage Difference Max	± 30 V DC
Relative Input Voltage Max	± 40 V DC
Voltage Resolution	73 mV DC
Measurement Error Max	2 %
Sensor Response Time Max	10 ms
Voltage Offset Max	± 100 mV DC

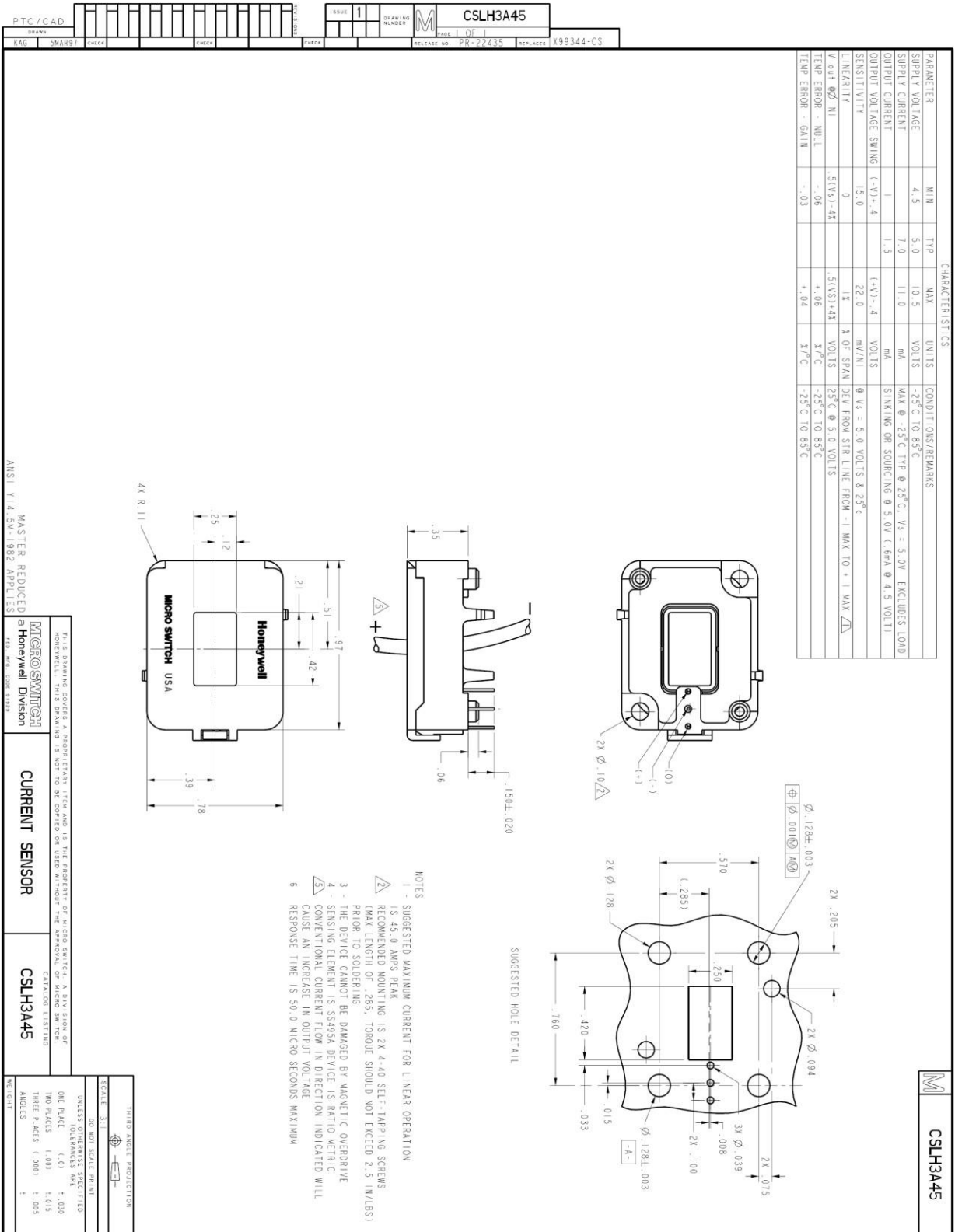
Electrical Properties

Supply Voltage	5 V DC
Current Consumption Max	3.6 mA
Sensor Input Impedance	1 M Ω
Output Voltage Min	0 V DC
Output Voltage Max	5 V DC

Physical Properties

Recommended Wire Size	16 - 26 AWG
Operating Temperature Min	-40 °C
Operating Temperature Max	85 °C

FiguraA.10. Hojadedatos del sensor devoltaje deprecisión PH1135



FiguraA.11. Hojadedatos del sensor decorrente por efecto Hall CSLH3A45

Apéndice B: Análisis de costos.

TablaB.1. Análisis de costos de los componentes del prototipo.

Parte	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Subtotal
PIC16F877A-I/P	PIC16F877A-I/P	1	\$89.66	\$89.66
40P	BASE DOBLE CONTACTO PARA CI 40P	1	\$4.31	\$4.31
LM324N	AMP. OPER. BAJA POTENCIA CUADRUPLE	1	\$5.06	\$5.06
14P	BASE DOBLE CONTACTO PARA CI 14PINS	1	\$2.56	\$2.56
XB24-AWI-001	OEM,XBEE SER1,1MW,WIRE ANT,250 KBPS	2	394.83	\$789.66
WRL-11373	XBEE EXPLORER REGULATED SPARKFUN	1	\$160.35	\$160.35
WRL-11697	XBEE EXPLORER DUNGLE SPARKFUN	1	\$481.03	\$481.03
4N25	OPTOACOPLADOR SALIDA TRANSISTOR NPN	1	\$4.31	\$4.31
8P	BASE DOBLE CONTACTO PARA CI 8 PINS	1	\$1.73	\$1.73
20MHZ	CRISTALES DE CUARZO 20MHZ	1	\$5.18	\$5.18
CC-33/1000V	CAPACITOR CERAMICO 33PF	3	\$0.87	\$2.61
CC-.1/50V	CAPACITOR CERAMICO .1UF	2	\$0.87	\$1.74
L7805CV	REGULADOR DE VOLTAJE 5V 1 AMPERE	1	\$5.19	\$5.19
CE-.33/50V	CONDENSADOR ELECTROLITICO 85C	1	\$2.56	\$2.56
CE-.1/50V	CONDENSADOR ELECTROLITICO 105C	1	\$2.59	\$2.59
CE-3300/10V	CONDENSADOR ELECTROLITICO 105C	1	\$4.75	\$4.75
1N4007	DIODO RECTIFICADOR 1A/1000	1	\$0.87	\$0.87
CC-560/1000V	CAPACITOR CERAMICO 560PF	1	\$0.87	\$0.87
PUSH-1	MICROSWITCH PUSH MINI 1 MM 4 PINS	1	\$1.73	\$1.73
DISIPA-TO300	DISIPADOR PARA TO-220 40LX38AX13MM	1	\$26.73	\$26.73
HEADER-1	TIRA CON 40 TERMINALES 1 LINEA	1	\$1.73	\$1.73
TRT-02	BORNERA P/CIRCUITO IMPRESO 2 TERMIN	3	\$4.32	\$12.96
RC-1K/1/2	RESISTENCIAS DE CARBON 5% TOL 1/2W	4	\$0.87	\$6.09
RC-10K/1/2	RESISTENCIAS DE CARBON 5% TOL 1/2W	7	\$0.87	\$0.87
RC-100K/1/2	RESISTENCIAS DE CARBON 5% TOL 1/2W	1	\$0.87	\$0.87
RC-1M/1/2	RESISTENCIAS DE CARBON 5% TOL 1/2W	1	\$0.87	\$2.61
RC-2K2/1/2	RESISTENCIAS DE CARBON 5% TOL 1/2W	3	\$0.87	\$8.70
RC-330E/1/2	RESISTENCIAS DE CARBON 5% TOL 1/2W	10	\$0.87	\$0.87
PC-10X15	PLACA FENOLICA UNA CARA 10X15CM	1	\$16.38	\$16.38
CSLH3A45	785-CSLH3A45	1	\$236.50	\$236.50
	Horas hombre	320	\$70.10	\$22,432
			Subtotal	\$24,315.69
			IVA	\$3,890.51
			Total	\$28,206.20

Bibliografía

- [1] IEA, *WorldEnergyOutlook 2014*: IEA.
- [2] R. Alexandri Rionda and L. G. Guerrero Gutiérrez, "Prospectiva del Sector Eléctrico2014-2028," SENER, Ed., ed,2014.
- [3] B. Petroleum, "BP energy outlook 2035," *BP stats, Jan*, 2014.
- [4] W. C. Turner and S. Doty, *Energy management handbook*: The Fairmont Press,Inc., 2007.
- [5] P. Srividya Devi, D. Pusphalatha, and P. Sharma, "Measurement of Power and Energy Using Arduino," *Res. J. Eng. Sci*, vol. 2, pp.10-15, 2013.
- [6] G. Sandoval, "Power Factor in Electrical Power Systems with Non-Linear Loads," *ARTECHE/INELAP SA Available: http://www.artechepq.com/assets/files/PF_nonlinearloads.pdf*.
- [7] R. Fransiska, E. Septia, W. Vessabhu, W. Frans, and W. Abednego, "Electrical power measurement using Arduino Uno microcontroller and LabVIEW," in *Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME), 2013 3rd International Conference on*, 2013, pp.226-229.
- [8] A. Fehér and Z. Puklus, "Definitions and Measurement of Power Factor," in *8th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence and Informatics*, 2007, pp.623-632.
- [9] W. M. Grady and S. Santoso, "Understanding power system harmonics," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, pp. 8-11, 2001.
- [10] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems," *IEEE Std 519-1992*, pp.1-112, 1993.
- [11] S. Yang, "Method of measuring power quality and development of monitor device," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, 2010, pp.1-4.

- [12] E. Oruklu, R. Hanley, S. Aslan, C. Desmouliers, F. M. Vallina, and J. Saniie, "System-on-Chip Design Using High-Level Synthesis Tools," *Circuits and Systems*, vol. 3, p.1, 2012.
- [13] E. O. Brigham, "The Fast Fourier Transform and Its Applications. 1988," ed: Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.
- [14] P. Martí i Puig, "Two families of radix-2 FFT algorithms with ordered input and output data," 2009.
- [15] D. Jones, "Decimation-in-time (DIT) Radix-2 FFT," *Connexions*, September, vol. 15, p.2006,2006.
- [16] J. A. Reyes and C. S. Forgach, "Un complemento al teorema de Nyquist," *Revista mexicana de física E*, vol. 56, pp.165-171, 2010.
- [17] S. Rustemli and M. Ates, "Measurement and simulation of power factor using pic16f877," *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY.(Electrical Review)*, ISSN, pp. 0033-2097, 2012.
- [18] R. V. Dukkupati, *MATLAB: An Introduction with Applications*. New Age International, 2010.
- [19] S. T. Smith, *MATLAB: advanced GUI development*. DogEar Publishing, 2006.