

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PORTÁTIL PARA LA
MEDICIÓN DIGITAL DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y
VISUALIZACIÓN DEL COSTO EQUIVALENTE**

CAMILO CASTRO DUARTE

EDWIN ARMANDO CASTRO RUIZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y

TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2012

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PORTÁTIL PARA LA
MEDICIÓN DIGITAL DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y
VISUALIZACIÓN DEL COSTO EQUIVALENTE**

CAMILO CASTRO DUARTE

EDWIN ARMANDO CASTRO RUIZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico.

Director:

Msc. Jaime Guillermo Barrero Pérez.

Codirector:

Ph.D. Gabriel Ordóñez Plata.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y

TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2012

Dedicatoria

A mis amados padres, por ser el mayor ejemplo para mi vida, por regalarme su confianza y el fruto de su trabajo, porque siempre he contando con su apoyo en todo momento a pesar de los tropiezos, sus consejos siempre sabios y oportunos, porque sin ustedes este nuevo logro no hubiera sido posible. Esto es por ustedes y para ustedes.

A mi hermano, mi primer y mejor amigo; compañero de lucha en este proceso de aprendizaje, no deja de sorprenderme su madurez y sensatez. Hermano, su apoyo constante hacen que este logro sea suyo también.

A mi novia, por su amor, su paciencia, sus palabras de ánimo y el apoyo incondicional que me ha brindado. Mi amor, has sido la compañera ideal para este momento de mi vida, tus consejos oportunos y tu confianza en mí, me han dado la fortaleza para culminar esta etapa del camino.

Edwin Armando Castro Ruiz

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
1. MARCO TEÓRICO.....	21
1.1 CONCEPTOS GENERALES.....	21
1.2 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	22
1.2.1 Kilovatio-hora.	22
1.2.2 Costo del Kilovatio-hora.	23
1.2.3 Tarifas aplicadas.	25
1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA	27
1.3.1. De acuerdo con su construcción.....	27
1.3.2. De acuerdo con la energía que miden	28
1.3.3. De acuerdo con la exactitud.....	28
1.3.4. De acuerdo con la conexión en la red.....	29
1.4 CAMPOS DE APLICACIÓN PARA EL PROTOTIPO	30
1.4.1 Redes inteligentes.....	30
1.4.2 Domótica.	31
1.4.2.1 Ahorro energético.....	31
1.4.2.2 Comunicaciones.	32
1.4.2.3 Clasificación de tecnologías de redes domésticas	32
2. CIRCUITO INTEGRADO DE PROPÓSITO ESPECÍFICO	34
2.1 ADE7953 (ANALOG DEVICES)	34
2.1.1 Descripción general.	34
2.1.2 Canales de tensión y corriente.....	35

2.1.3	Conversión analógico digital.	36
2.1.4	Mediciones realizadas.....	37
2.1.4.1	Tensión RMS.	38
2.1.4.1	Corriente RMS.....	39
2.1.4.2	Potencia instantánea y potencia activa:	40
2.1.4.3	Potencia reactiva.	41
2.1.4.4	Potencia aparente.	43
2.1.4.5	Otras mediciones.....	44
2.1.5	Protocolos de comunicación.	45
2.1.5.1	Interfaz <i>I2C</i>	47
2.1.6	Distribución de pines y esquema de conexión.	51
3.	PROTOTIPO DESARROLLADO	54
3.1	SENSADO DE TENSIÓN Y ADECUACIÓN.....	55
3.2	SENSADO DE CORRIENTE Y ADECUACIÓN.....	56
3.3	FUENTE DE ALIMENTACIÓN	58
3.4	PROCESAMIENTO DE DATOS.....	61
3.4.1	Microcontrolador <i>MC9S08JM60 (FREESCALE)</i>	61
3.4.1.1	Características del <i>MC9S08JM60</i>	61
3.4.1.2	Distribución de pines.	62
3.4.1.3	<i>FREESCALE JM60 GUI</i>	63
3.4.1.4	Montaje del <i>MC9S08JM60</i>	64
3.5	DISTRIBUCIÓN DE PERIFÉRICOS.....	64
3.6	TECLADO <i>TOUCH</i>	65
3.6.1	Características del <i>MPR121</i>	66

3.6.2	Montaje del <i>MPR121</i>	66
3.7	TRANSMISIÓN INALÁMBRICA	67
3.7.1	Protocolo <i>ZigBee</i>	67
3.7.2	<i>ZigBee VS. Bluetooth</i>	69
3.7.3	Módulos <i>XBee</i>	69
3.7.4	Tarjeta <i>XBee Explorer USB</i>	71
3.8	VISUALIZACIÓN DE DATOS	72
3.8.1	Pantalla <i>LCD</i>	72
3.8.2	Montaje de la pantalla <i>LCD</i>	72
3.9	ALMACENAMIENTO DE LAS MEDICIONES.....	73
3.9.1	Tarjeta <i>SD</i>	73
3.9.1.1	Características de la tarjeta <i>SD</i>	74
3.9.1.2	Montaje de la memoria <i>SD</i>	75
4.	PROGRAMACIÓN PARA EL MICROCONTROLADOR	76
4.1	FUNCIONAMIENTO DEL CÓDIGO	76
4.2	DIAGRAMA DE FLUJO	77
4.2.1	Rutina para el teclado <i>touch</i>	79
4.2.2	Rutina para la pantalla <i>LCD</i>	79
4.2.3	Rutina para la memoria <i>SD</i>	80
4.2.4	Rutina para mediciones.....	80
5.	INTERFAZ GRÁFICA MEDIANTE <i>LABVIEW 2009</i>	82
6.	PRUEBAS REALIZADAS.....	85
6.1	OBTENCIÓN DE CONSTANTES.....	85
6.1.1	Constante de tensión.....	85

6.1.2 Constante de Corriente.....	86
6.1.3 Constante de potencia.....	87
6.2 PRUEBAS SOBRE CARGAS LINEALES.....	89
6.3 PRUEBAS SOBRE CARGA NO LINEAL.....	106
7. CONCLUSIONES.....	111
8. RECOMENDACIONES.....	113
9. BIBLIOGRAFIA.....	115
10. ANEXOS.....	118

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Canal de corriente	35
Figura 2. Canal de tensión	36
Figura 3. Modulador Σ - Δ	36
Figura 4. Efectos del <i>Aliasing</i>	37
Figura 5. Cálculo de la tensión RMS	38
Figura 6. Calculo de la corriente RMS	39
Figura 7. Forma de onda de la potencia activa	40
Figura 8. Calculo de la potencia activa	41
Figura 9. Calculo de la potencia reactiva	43
Figura 10. Calculo de la potencia aparente	43
Figura 11. Comunicación <i>I2C</i>	48
Figura 12. Lectura <i>I2C</i>	49
Figura 13. Escritura <i>I2C</i>	50
Figura 14. Diagrama de pines <i>ADE7953</i>	51
Figura 15. Diagrama de bloques	52
Figura 16. Esquema de conexión <i>ADE7953</i>	53
Figura 17. Diagrama de bloques del medidor de energía	54
Figura 18. Esquema para sensar tensión	55
Figura 19. Tensión de salida vs. Corriente sensada	57
Figura 20. Esquema para sensar corriente	58
Figura 21. Esquema de la fuente de alimentación	60

Figura 22. Distribución de pines <i>MC9S08JM60</i>	62
Figura 23. Interfaz gráfica <i>FREESCALE JM60 GUI</i>	63
Figura 24. Distribución de periféricos	65
Figura 25. Esquema de conexión <i>MPR121</i>	67
Figura 26. De izquierda a derecha, modulo <i>XBee</i> serie 1 con antena, sin antena y con antena cerámica	70
Figura 27. Esquema de conexión para el <i>XBee</i> que opera como transmisor	71
Figura 28. Tarjeta <i>XBee Explorer</i>	71
Figura 29. Esquema de conexión pantalla <i>LCD</i>	73
Figura 30. Esquema de conexión memoria <i>SD</i>	75
Figura 31. Diagrama de flujo del código desarrollado	77
Figura 32. Rutina de ajuste del teclado <i>touch</i>	79
Figura 33. Rutina de ajuste de la pantalla <i>LCD</i>	79
Figura 34. Rutina de ajuste de la memoria <i>SD</i>	80
Figura 35. Rutina para las mediciones	81
Figura 36. Configuración del puerto serie	82
Figura 37. Lectura de datos	83
Figura 38. Proceso de lectura y escritura	83
Figura 39. Errores de tensión con relación a las tres variaciones de tensión	91
Figura 40. Errores de corriente con relación a las tres variaciones de tensión ...	91
Figura 41. Errores de potencia con relación a las tres variaciones de tensión ...	92
Figura 42. Prueba sobre lámparas en paralelo	93

Figura 43. Errores de tensión con relación a las tres variaciones de carga.....	95
Figura 44. Errores de corriente con relación a las tres variaciones de carga	96
Figura 45. Errores de potencia con relación a las tres variaciones de carga.....	96
Figura 46. Errores de tensión con relación a las cinco cargas	100
Figura 47. Errores de corriente con relación a las cinco cargas	100
Figura 48. Errores de potencia con relación a las cinco cargas	101
Figura 49. Errores de tensión con relación a las cuatro cargas	108
Figura 50. Errores de corriente con relación a las cuatro cargas	108
Figura 51. Errores de potencia con relación a las cuatro cargas	109

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Protocolos de comunicación <i>ADE7953</i>	46
Tabla 2. Resultados para tensiones de 100V, 110V y 120V	89
Tabla 3. Resultados para tensiones de 100V, 110V y 120V	92
Tabla 4. Resultados para corrientes de 4,78A, 7,45A y 9,55A	94
Tabla 5. Resultados para corrientes de 4,78A y 7,45A	97
Tabla 6. Resultados para cargas RC y RL en paralelo	97
Tabla 7. Resultados modo acumulador de energía	101
Tabla 8. Prueba de 24 horas en el modo acumulador de energía (día uno).....	102
Tabla 9. Prueba de 24 horas en el modo acumulador de energía (día dos)	103
Tabla 10. Resultados para cargas RC y RL	106

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A. Manual de usuario	118
ANEXO B. Modos de operación del módulo EFmJM60.....	122
ANEXO C. Listas de registros y direcciones	123
ANEXO D. Distribución de pines del <i>ADE7953</i>	126
ANEXO E. Distribución de pines del modulo <i>XBee</i>	127
ANEXO F. Características técnicas del medidor de potencia programable <i>HAMEG HM8115-2</i>	128

RESUMEN

TITULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PORTÁTIL PARA LA MEDICIÓN DIGITAL DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y VISUALIZACIÓN DEL COSTO EQUIVALENTE*

AUTORES: CAMILO CASTRO DUARTE, EDWIN ARMANDO CASTRO RUIZ**

PALABRAS CLAVE: Consumo de energía eléctrica, comunicación inalámbrica, medición de potencia activa, carga monofásica.

CONTENIDO: La medición del consumo de energía eléctrica, se logró a través de un prototipo electrónico, que a su vez brinda la posibilidad de visualizar el costo por cada kWh (Kilovatio-hora) consumido. Monitorizar el gasto de energía de los aparatos eléctricos que se encuentran dentro de un hogar, permite conocer realmente la cantidad de kWh que cada uno disipa, para diferentes instantes de uso y condiciones de funcionamiento, y con ello, incentivar acciones en búsqueda del ahorro de energía.

Tomando como referencia algunos trabajos de grado desarrollados en la Universidad con un propósito similar, se encamina el desarrollo del proyecto. Dentro de la selección de los diferentes dispositivos, se resalta la inclusión del circuito integrado de propósito específico *ADE7953*, clave para la obtención digital de los diferentes valores de tensión, corriente y potencia activa. El procesamiento de los datos es realizado por el microcontrolador *MC9S08JM60*, donde por medio de diferentes sentencias de programación, se leen y adecúan los registros provenientes del *ADE7953*, y se visualizan los datos de interés en una pantalla de cristal líquido. El prototipo es manipulado por medio de un teclado *touch*, guarda las mediciones en una memoria *SD*, y además las transmite inalámbricamente por medio de los módulos *Xbee* o por cable al puerto USB de cualquier computador, donde las mediciones son mostradas en una interfaz elaborada en *Labview*. Finalmente el equipo fue sometido a pruebas comparativas con el medidor *HAMEG HM8115-2*, sobre cargas lineales y no lineales.

El prototipo desarrollado cuenta con todas las etapas necesarias para su correcto funcionamiento, adquisición, adecuación, procesamiento y visualización, todas ellas debidamente estudiadas y documentadas en el presente trabajo.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Msc. Jaime Guillermo Barrero Pérez. Codirector Dr. Gabriel Ordóñez Plata.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A PORTABLE DIGITAL MEASUREMENT PROTOTYPE OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION AND EQUIVALENT COST VISUALIZATION*

AUTHORS: CAMILO CASTRO DUARTE, EDWIN ARMANDO CASTRO RUIZ**

KEY WORDS: Electric power consumption, wireless communication, power measurement, single-phase load.

CONTENT: The measurement of energy consumption was achieved through an electronic prototype, which gives the possibility to visualize the cost per kWh (kilowatt-hours) consumed every hour. Monitoring the energy expenditure of electrical devices found within a home, allow us to know the exact amount of kWh each one of them dissipates for different times of use and operating conditions, and thereby encourage actions in pursuit of energy savings.

Taking into account various degree works at the University developed for a similar purpose, is what this project is heading for. Among the selection of different devices, highlights the inclusion of special-purpose integrated circuit ADE7953, key to obtain different values of voltage, current and active power. The data processing is performed by the microcontroller MC9S08JM60 where through different programming statements are read and adapt from the ADE7953 records and displays the data of interest in a liquid crystal display. The prototype is manipulated through a touch keyboard, keep measurements on a SD memory, and also transmits wirelessly using the XBee modules or thru USB port of any computer, where the measurements are shown on an interface developed in Labview. Finally the device was subjected to comparative tests with the meter HAMEG HM8115-2, on linear and nonlinear loads.

The developed prototype has all the necessary stages needed for proper operation, such as the signal acquisition, conditioning, processing and visualization, all of which were properly studied and documented in this document.

* Degree work

** Faculty of physical and mechanical engineering. Electrical, Electronic and Telecommunication Engineering school. Director Mg. Jaime Guillermo Barrero Pérez. Director Assistant Dr. Gabriel Ordoñez Plata.

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica juega un papel de gran importancia en la vida moderna, al punto de ser imprescindible para la mayoría de las actividades humanas. Es protagonista silenciosa de hogares, industrias, instituciones, eventos y diversidad de labores cotidianas, que la mantienen como factor indispensable en la actividad económica de los países. Es por esto, que la medición de la misma es de especial interés, por ser la base de cualquier mercado energético. Aunque no solo el factor económico es el predominante, monitorizar periódicamente determinada carga, permite tener un argumento sobre el consumo generado por ésta, lo cual puede propiciar el ahorro energético y el consumo responsable.

Existen diferentes tipos de medidores dependiendo de su construcción, tipo de energía medida, exactitud (clase 0,5, 1 y 2) y conexión a la red eléctrica. Con este proyecto se logró un prototipo electrónico (estático) para la medición de energía activa, el cual puede ser conectado a cargas monofásicas bifilares, con el agregado de visualizar el costo equivalente de determinado consumo.

La evolución de los dispositivos de estado sólido ha permitido la creación de infinidad de aplicaciones en diferentes campos. Para el caso de interés, los circuitos integrados para la medición de energía eléctrica son fuertes protagonistas debido a las múltiples bondades que ofrecen, como la disminución de la incertidumbre en las mediciones, reducción de pérdidas, rapidez en la realización de análisis complejos y la capacidad de integrar nuevas tecnologías para realizar implementaciones que estén a la vanguardia. Este tipo de integrado, es llamado circuito integrado de aplicación específica (*ASIC*, por sus siglas en inglés), tiene incorporados una serie de algoritmos y registros a disposición del diseñador para

ser procesados digitalmente, lo que permite reducir la complejidad en la programación y por consiguiente la puesta a punto del mismo.

Para el desarrollo del prototipo propuesto en este proyecto, el *ASIC* utilizado es el *ADE7953* de *ANALOG DEVICES*, (cuyas características serán presentadas en el capítulo 2) además, de una serie de dispositivos y tecnologías propias de las etapas de adquisición, adecuación, procesamiento y visualización, así como una interfaz gráfica en *LabView* que permite realizar la monitorización de la información en forma remota e inalámbrica desde un computador, utilizando para ello los módulos de transmisión y recepción *Xbee*, y que además le ofrece al usuario la posibilidad de establecer el costo equivalente del consumo generado para que pueda planear un ahorro, en busca de una gestión eficiente del gasto energético ocasionado por los diferentes aparatos eléctricos presentes en una vivienda. Lo anterior se encuentra formalmente documentado y explicado en el presente escrito, acompañado además por las respectivas pruebas realizadas al prototipo.

1. MARCO TEÓRICO

El propósito de esta primera parte consiste en exponer una serie de conceptos fundamentales a tener en cuenta, al momento de analizar dispositivos capaces de medir el consumo de energía eléctrica y calcular el costo que acarrea la utilización de la misma.

1.1 CONCEPTOS GENERALES

Los conceptos de metrología presentados a continuación, se consideran de gran importancia para el desarrollo de aparatos de medición.

- **Exactitud:** Es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar resultados que se aproximen al verdadero valor de la magnitud de interés. La diferencia entre el valor medido por el instrumento y el teórico o real se denomina error absoluto; sin embargo lo más común es especificar el error como el cociente del valor absoluto y el valor teórico o real en porcentaje, tal cual se muestra en la siguiente expresión:

$$\text{Error Relativo}\% = \frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor teórico}} * 100 \quad [1]$$

- **Precisión:** Es la capacidad de un instrumento de dar el mismo valor de la magnitud medida, al medir varias veces bajo condiciones estables de operación independientemente del valor teórico o real del parámetro medido. Esta cualidad determina una garantía del valor medido por el equipo.

- **Resolución:** Se habla de resolución cuando se comparan diferentes equipos que están en capacidad de medir la misma magnitud con el fin de determinar que tan precisos pueden ser frente a otros con características similares.

- **Repetibilidad:** se habla de repetibilidad cuando un instrumento de medición es utilizado varias veces por un evaluador y mide la misma característica en un mismo punto.

- **Reproducibilidad:** Se refiere al grado de coincidencia entre distintas lecturas individuales cuando se determina el mismo parámetro mediante un mismo método de medición pero con un conjunto de medidas a largo plazo y con personas y aparatos distintos realizando la misma prueba.

1.2 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Resulta de interés para el desarrollo de este proyecto realizar un análisis del costo equivalente en relación al consumo de energía que se produce tras la utilización de una carga monofásica durante cierto periodo de tiempo, a continuación se presentan los conceptos esenciales para desentrañar esta parte.

1.2.1 Kilovatio-hora. El kilovatio-hora, simbolizado kWh, es una unidad de energía. Equivale a la energía correspondiente a una potencia de un kilovatio (kW) durante una hora y es igual a 3,6 millones de julios.

El kilovatio-hora (kWh) no debe confundirse con kilovatio por hora (kW/h), pues esta última no es una unidad de energía. La unidad del Sistema Internacional de Unidades para la potencia es el vatio (W), que es igual a un julio por segundo (J/s). Es pues erróneo indicar valores de energía en kilojulios por segundo por hora (kW/h), que equivaldría a kJ/s/h.

Un vatio es igual a un julio por cada segundo y un kW es igual a 1000 J/s; por lo tanto, el kilovatio-hora será:

$$1\text{kWh} = \frac{1000\text{J}}{1\text{s}} * 3600\text{s} = 3600000\text{J} \quad [2]$$

El funcionamiento de los aparatos eléctricos implica un consumo de energía eléctrica que depende de la potencia, resultado del diseño de los mismos, y del tiempo que permanezcan en operación. En Colombia, el consumo de energía eléctrica se contabiliza mediante un dispositivo sellado que se instala en los accesos a la vivienda, denominado contador, y que periódicamente revisa un empleado de la compañía suministradora de la electricidad anotando el consumo realizado en un período establecido.

1.2.2 Costo del Kilovatio-hora. El costo del kWh¹ (\$/kWh) se logra mediante la siguiente fórmula, la cual es fácilmente obtenida de las facturas de venta de la ESSA (Electrificadora de Santander S.A).

¹ Para más información acerca del costo equivalente del kilovatio-hora y la forma de facturar el consumo producido en una vivienda remítase a la página de la ESSA "<http://www.essa.com.co>"

$$CU = \frac{G+T}{(1-Pr)} + D + O + C^2$$

[3]

- CU: Costo Unitario de prestación del servicio
- G: Costo de compra de energía
- T: Costo de uso del STN (Sistema de Transmisión Nacional)
- D: Costo de distribución
- O: Costo adicional mercado mayorista
- C: Costo de comercialización
- Pr: Perdidas reconocidas

El costo Cu o \$/kWh es el mismo para todo el Departamento de Santander y para todos los clientes. Pero el valor a pagar varía de acuerdo a los siguientes aspectos:

Propiedad de los activos, quien es el dueño del transformador y las redes.

- Propiedad del cliente.
- Propiedad de la empresa.

Clase de servicio, dependiendo del uso dado al consumo y al estrato del cliente, reciben subsidio o aportan así:

² La ecuación 3 fue tomada del sitio web "http://www.essa.com.co/essa/tarifas_aplicadas.aspx"

a. RESIDENCIALES

- Estrato 1: Reciben subsidio (aproximado 50%)
- Estrato 2: Reciben subsidio (aproximado 35%)
- Estrato 3: Reciben subsidio (15%)
- Estrato 4: Tarifa Plena
- Estrato 5: Pagan contribución 20%
- Estrato 6: Pagan contribución 20%

b. COMERCIALES Pagan contribución 20%

c. INDUSTRIALES Pagan contribución 20%

d. ACUEDUCTOS Pagan contribución 12%

e. OFICIALES Tarifa Plena

Nivel de tensión al cual esté conectado el cliente, cambia el valor del dato D.

- Nivel 4 \geq 62.000 V
- Nivel 3 $<$ 62.000 V
- Nivel 2 $<$ 30.000 V
- Nivel 1 $<$ 1.000 V

1.2.3 Tarifas aplicadas. Las tarifas aplicadas cada mes a los consumos de los clientes de la ESSA, corresponden a las tarifas calculadas de acuerdo a la regulación vigente determinada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG.

Las Leyes 142 y 143 de 1994, establecieron los siguientes criterios a tener en cuenta para la expedición del régimen aplicable a las fórmulas tarifarias así: eficiencia, económica, suficiencia financiera, equidad, transparencia, simplicidad, solidaridad y redistribución del Ingreso.

El valor que deben pagar los usuarios de los servicios públicos domiciliarios, es equivalente al producto entre el consumo (metros cúbicos de agua/mes, kilovatios hora/mes, impulsos telefónicos/mes, etc.) y el costo de prestación del servicio, (Costo de Referencia “Cu”).

Valor a Pagar = CONSUMO * (TARIFA * P%)

A través de la TARIFA, o costo de referencia, las empresas recuperan sus costos y gastos propios de operación, expansión, reposición y mantenimiento, la tecnología y administración para garantizar la calidad, continuidad y seguridad en la prestación del servicio, además de la remuneración del patrimonio de los inversionistas.

- La tarifa influye directamente en el valor a pagar, dado que sus componentes generan diferencias considerables entre las tarifas que maneja cada empresa que presta un mismo servicio.
- La tarifa no depende de la capacidad de pago de los usuarios.
- La tarifa es establecida por la CREG mensualmente.

La estratificación socioeconómica establecida en el artículo 14.8 de la Ley 142 de 1994 como “La clasificación de los inmuebles residenciales de un municipio” define el porcentaje del subsidio o contribución a aplicar a los usuarios en función de su nivel de ingresos y por eso depende del estrato socioeconómico al que pertenezca cada predio.

Para el caso del equipo desarrollado en este proyecto se introdujo la tarifa establecida en la factura de la ESSA del mes de agosto de 2011, en una vivienda estrato 4 en donde el costo del kWh es equivalente a 381,66 \$/kWh, y con base en esto se estableció el costo equivalente dependiendo del consumo de energía activa.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

1.3.1. De acuerdo con su construcción.

➤ **Medidores de inducción (Electrónicos)**

Es un medidor en el cual las corrientes en las bobinas fijas reaccionan con las inducidas en un elemento móvil, generalmente un disco, haciéndolo mover. El principio de funcionamiento es muy similar al de los motores de inducción y se basa en la teoría de la relación de corriente eléctrica con los campos magnéticos.

➤ **Medidores estáticos (Electrónicos)**

Medidores en los cuales la corriente y la tensión actúan sobre elementos de estado sólido (electrónicos) para producir pulsos de salida y cuya

frecuencia es proporcional a los Vatios-hora ó Var-hora. Están contruidos con dispositivos electrónicos, generalmente son de mayor precisión que los electromagnéticos y por ello se utilizan para medir en centros de energía, donde se justifique su mayor costo.

1.3.2. De acuerdo con la energía que miden

➤ **Medidores de energía activa**

Mide el consumo de energía activa en kilovatios – hora.

➤ **Medidores de energía reactiva**

Mide el consumo de energía reactiva en kilovares – hora. La energía reactiva se mide con medidores electrónicos que miden tanto la energía activa como la energía reactiva.

1.3.3. De acuerdo con la exactitud

Según la norma NTC 2288 y 2148, los medidores se dividen en 3 clases: 0.5, 1 y 2.

➤ **Medidores clase 0.5**

Se utilizan para medir la energía activa suministrada en bloque en punto de frontera con otras empresas electrificadoras o grandes consumidores alimentados a 115 kV.

➤ **Medidores clase 1**

Incluye los medidores trifásicos para medir energía activa y reactiva de grandes consumidores, para clientes mayores de 55 Kw. Cuando el cliente

es no regulado la tarifa es horaria, por tanto el medidor electrónico debe tener puerto de comunicación o modem para enviar la información a través de la línea telefónica.

➤ **Medidores clase 2**

Es la clasificación básica e incluye los medidores monofásicos y trifásicos para medir energía activa en casas, oficinas, locales comerciales y pequeñas industrias con cargas menores de 55 kW.

El índice de clase 0,5, 1, y 2 significa los límites de error porcentual admisible para todos los valores de corriente entre el 10% nominal y la I máxima con un factor de potencia igual a uno.

1.3.4. De acuerdo con la conexión en la red

➤ **Medidor monofásico bifilar**

Se utiliza para el registro de consumo en una acometida que tenga un solo conductor activo o fase y un conductor no activo o neutro.

➤ **Medidor monofásico trifilar**

Se utiliza para el registro del consumo de una acometida monofásica de fase partida (120/240 V) donde se tienen dos conductores activos y uno no activo o neutro.

➤ **Medidor bifásico trifilar**

Se utiliza para el registro del consumo de energía de una acometida en B.T de dos fases y tres hilos, alimentadas de la red de B.T de distribución trifásica.

➤ **Medidor trifásico tetrafilar**

Se utiliza para el consumo de energía de una acometida trifásica en B.T de tres fases y cuatro hilos.

➤ **Medidor trifásico trifilar**

Se utiliza para el registro de consumo de energía de una acometida trifásica de tres fases sin neutro.

1.4 CAMPOS DE APLICACIÓN PARA EL PROTOTIPO

1.4.1 Redes inteligentes. La rápida evolución que ha tenido la tecnología en las últimas dos décadas, ha permitido el desarrollo de infinidad de aplicaciones para satisfacer necesidades de entretenimiento, seguridad, comodidad, comunicación, procesamiento de información, ahorro energético, entre otras. Esta evolución va de la mano con cambios que se prevén en la red eléctrica integrada con las Tecnologías de la Información y las comunicaciones TIC's, para lograr lo que se conoce como redes inteligentes (*Smart Grids*). Una *Smart Grid* es una red de transporte y distribución de energía eléctrica que tiene la capacidad de entender, asimilar, elaborar información y utilizarla adecuadamente, haciendo un uso intensivo de las tecnologías de la información y las comunicaciones.

Uno de los aspectos a considerar para la implementación de una *Smart Grid*, y sobre el cual existe un avance considerable, es en la infraestructura de medida con los conocidos "medidores inteligentes". Estos sistemas se basan en comunicaciones bidireccionales cuyas principales tecnologías de base están asociadas a comunicaciones por radio frecuencia inalámbricas de banda estrecha

o en comunicaciones *PLC (Power Line Carrier)* o bien en opciones de banda ancha como *Broadband over Power Lines (BPL)* o redes inalámbricas.

La funcionalidad deseable de los medidores inteligentes podría ser la siguiente: comunicaciones bidireccionales con la compañía eléctrica y con otros dispositivos, posibilidad de lecturas planificadas además de bajo demanda o en tiempo real, sincronizaciones de fecha y registro automático de incidentes, detección de fraudes o ataques así como alarmas asociadas a calidad del suministro, personalización de la contratación, planificación y posibilidad de pujar y compra de la electricidad en los momentos deseados, control de cargas, etc.

1.4.2 Domótica. El término domótica proviene de la unión de las palabras *domus* (que significa casa en latín) y *tica* (de automática, palabra en griego, 'que funciona por sí sola'). Se entiende por domótica al conjunto de sistemas capaces de automatizar una vivienda, aportando servicios de gestión energética, seguridad, bienestar y comunicación, y que pueden estar integrados por medio de redes interiores y exteriores de comunicación, cableadas o inalámbricas, y cuyo control goza de cierta ubicuidad, desde dentro y fuera del hogar. Se podría definir como la integración de la tecnología en el diseño inteligente de un recinto cerrado.

1.4.2.1 Ahorro energético. El ahorro energético no es algo tangible, sino un concepto al que se puede llegar de diferentes maneras. En muchos casos no es necesario sustituir los aparatos o sistemas del hogar por otros que consuman menos sino una gestión eficiente de los mismos.

- Climatización: programación y zonificación.
- Gestión eléctrica:
 - Racionalización de cargas eléctricas: desconexión de equipos de uso no prioritario en función del consumo eléctrico en un momento dado.

- Gestión de tarifas, derivando el funcionamiento de algunos aparatos a horas de tarifa reducida.
- Uso de energías renovables.

1.4.2.2 Comunicaciones. Son los sistemas o infraestructuras de comunicaciones que posee el hogar.

- Ubicuidad en el control tanto externo como interno, control remoto desde Internet, PC, mandos inalámbricos (p.ej. *PDA* con *WiFi*), aparellaje eléctrico.
- Tele asistencia.
- Tele mantenimiento.
- Informes de consumo y costes.
- Transmisión de alarmas.
- Intercomunicaciones.

1.4.2.3 Clasificación de tecnologías de redes domésticas

Interconexión de dispositivos:

- IEEE 1394 (*FireWire*)
- *Bluetooth*
- *USB*
- *IrDA*

Redes de control y automatización:

- *KNX*
- *X10*

- *EIB*
- *EHS*
- *Batibus*
- *ZigBee*

Redes de datos:

- *Ethernet*
- *Homeplug*
- *HomePNA*
- *Wifi*

2. CIRCUITO INTEGRADO DE PROPÓSITO ESPECÍFICO

Para llevar a cabo los diferentes cálculos requeridos para obtener digitalmente las variables de tensión, corriente, potencia activa y energía, de interés para la implementación de este proyecto, se decidió hacer uso de un circuito integrado de propósito específico (*ASIC* por sus siglas en inglés) que incorpora una serie de algoritmos para poder facilitar el trabajo del diseñador y reducir el procesamiento del microcontrolador a utilizar.

2.1 *ADE7953 (ANALOG DEVICES)*

Este *ASIC* resulto ser la mejor opción para el proyecto, ya que maneja una excelente relación costo beneficio, además es uno de los más modernos que se puede conseguir en el mercado para el desarrollo de aplicaciones de tipo monofásicas, como es el caso del prototipo propuesto.

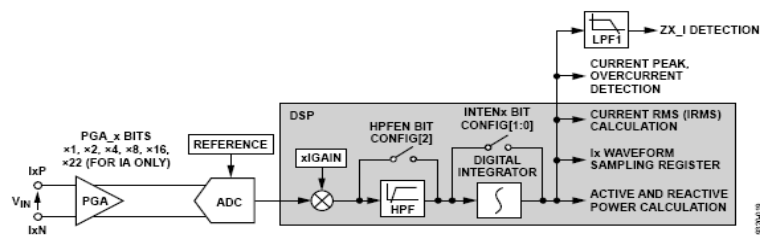
2.1.1 Descripción general. El *ADE7953* es un dispositivo diseñado y elaborado por la empresa *ANALOG DEVICES*; su propósito fundamental es el de realizar mediciones de energía eléctrica con alta precisión en sistemas monofásicos. Para ello, se vale de 3 canales de entrada que están en capacidad de recibir las señales analógicas entregadas por sensores de tensión y corriente mediante la adecuación sugerida por el fabricante. Internamente el *ADE7953* cuenta con un sistema de conversión A/D del tipo Σ - Δ , además dispone de una serie de etapas que permiten realizar mediciones de potencia activa, reactiva, aparente, valor eficaz para tensión y corriente, factor de potencia, detección de cruces por cero,

detección de picos, entre otras. También ofrece la opción de trabajar en uno de tres posibles protocolos de comunicación como es el caso la comunicación *SPI*, *I2C* y *UART*, con el fin de generar una interacción con un microcontrolador para de este modo, tener acceso a la información almacenada en registros.

2.1.2 Canales de tensión y corriente. El *ADE7953* incluye tres entradas analógicas, dos de estas son denominadas canales de corriente A (IAP, IAN) y B (IBP, IBN) y la tercera es el canal de tensión (VP, VN). Tanto para los canales de tensión como de corriente la señal de entrada se encuentra restringida a un valor diferencial máximo de +/-0,5V. Internamente existe la posibilidad de trabajar con *PGA* (amplificadores de ganancia programable) los cuales ayudan a ajustar los valores de entrada para una mayor precisión, en el caso del canal A la *PGA* puede tomar valores de ganancia de 1, 2, 4, 8, 16 y 22, mientras que para el canal B y el canal de tensión la ganancia puede oscilar entre 1, 2, 4, 8 y 16. Teniendo en cuenta los sensores de corriente manejados existe un rango dinámico de 1mA a 10 A correctamente adecuados para la entrada de dichos canales.

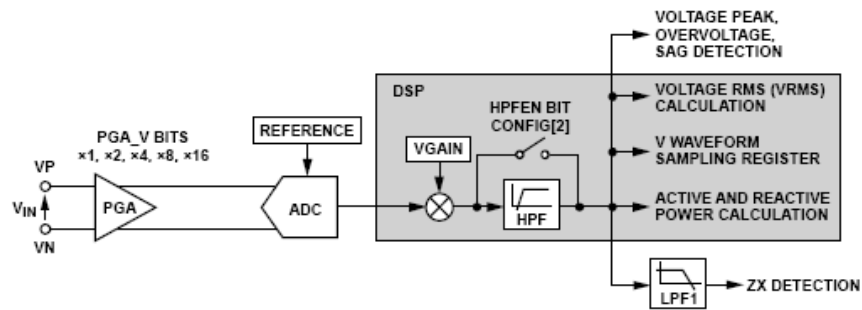
A continuación se presentan los diagramas de bloques para los canales de corriente y tensión.

Figura 1. Canal de corriente



Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

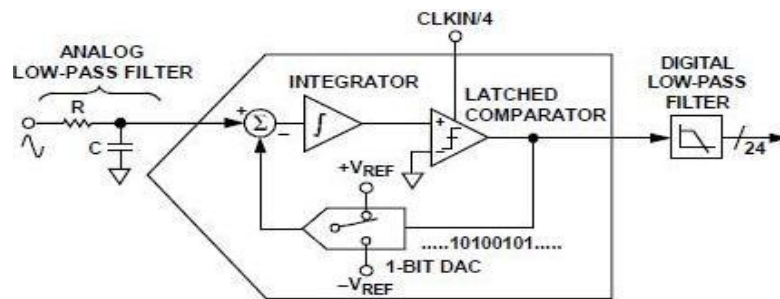
Figura 2. Canal de tensión



Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

2.1.3 Conversión analógico digital. La conversión A/D en el *ADE7953* se lleva a cabo mediante moduladores Σ - Δ de segundo orden, en la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques para dicha modulación.

Figura 3. Modulador Σ - Δ

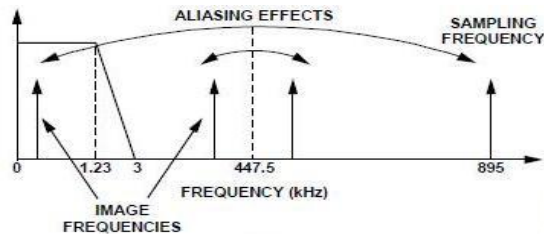


Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

El modulador Σ - Δ se encarga de digitalizar la señal de entrada a una frecuencia de muestreo de 895KHz la cual está determinada por el oscilador externo ($CLKIN/4$).

A la entrada del modulador es indispensable la ubicación de un filtro analógico RC pasa bajas, cuya función es evitar el fenómeno de *Aliasing*. Este efecto se muestra a continuación:

Figura 4. Efectos del *Aliasing*



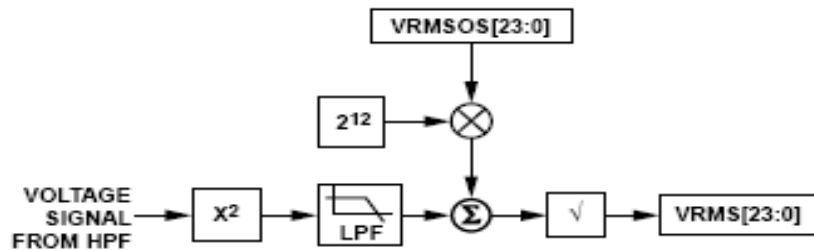
Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

En la imagen se observa como las componentes de frecuencia (indicadas por flechas negras) sobre la mitad de la frecuencia de muestreo (conocida también como frecuencia de *Nyquist*) son captadas bajo 450KHz (flechas discontinuas), un filtro RC pasa bajas (*LPF*) con un solo polo y una atenuación de -20dB/dec es la forma más simple de reducir los ruidos de altas frecuencias y prevenir así la distorsión de la banda de interés.

2.1.4 Mediciones realizadas. El *ADE7953* puede efectuar una gran cantidad de cálculos y análisis sobre las señales introducidas, sin embargo se procesan únicamente los registros de mayor relevancia para el tema; a continuación se muestran la forma en que el integrado realiza los cálculos con las respectivas definiciones físicas y matemáticas utilizadas por este, para cada una de las variables solicitadas.

2.1.4.1 Tensión RMS. El canal de tensión del *ADE7953* proporciona la opción de realizar una medición del valor eficaz. La trayectoria que debe realizar la señal se observa en la figura 5.

Figura 5. Cálculo de la tensión RMS



Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

Matemáticamente el valor RMS de una señal $V(t)$ se define como:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad [4]$$

En la expresión anterior V_{RMS} es el valor eficaz de la señal, y T el periodo de la señal. Si se trabajan con señales muestreadas, este cálculo implica la potenciación de la señal al cuadrado, la realización del promedio y la obtención de la raíz cuadrada para cada muestra entrante.

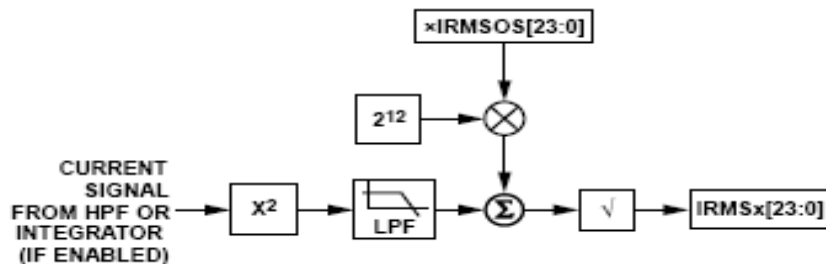
³ Las ecuaciones 4 y 5 fueron tomadas de la hoja de datos del CI ADE7953

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N V^2(t)} \quad [5]$$

La medición resultante es de 24 bits sin signo y se encuentra disponible en el registro *VRMS* cuya dirección es *0x21C* y *0x31C*.

2.1.4.1 Corriente RMS. Los canales A y B están en capacidad de realizar el cálculo de corriente eficaz referente a cada uno de ellos. El procesamiento de la señal es idéntico al implementado para el canal de tensión tal como se aprecia en el siguiente diagrama.

Figura 6. Cálculo de la corriente RMS

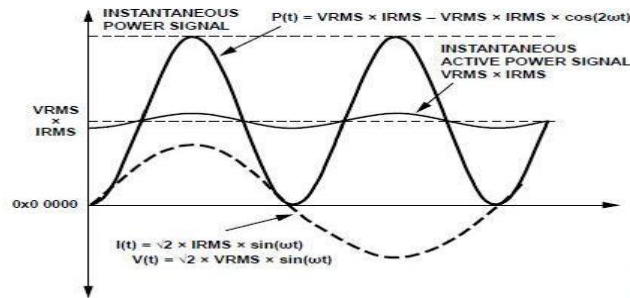


Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

La medición resultante es de 24 bits sin signo para ambos canales y se encuentra disponible en los registros *IRMSA* (*0x21A* y *0x31A*) e *IRMSB* (*0x21B* y *0x31B*), dichos registros se actualizan a una tasa de 6.99KHZ.

2.1.4.2 Potencia instantánea y potencia activa: La señal obtenida del producto entre la tensión y la corriente eficaz de los respectivos canales del integrado se denomina potencia instantánea, sus unidades son los vatios (W).

Figura 7. Forma de onda de la potencia activa



Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

$$V(t) = \sqrt{2} * V * \text{sen}(\omega t) \quad [6]$$

$$I(t) = \sqrt{2} * I * \text{sen}(\omega t) \quad [7]$$

$$P(t) = V(t) * I(t) \quad [8]$$

En donde V es el voltaje rms e I la corriente rms.

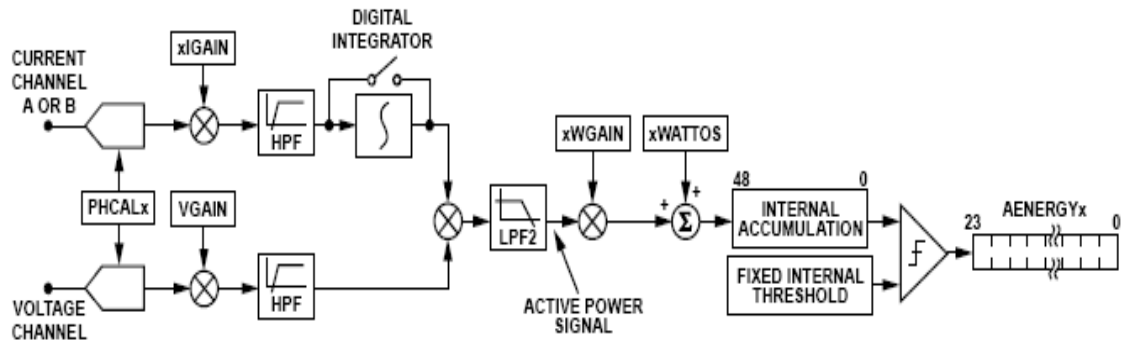
La potencia activa es la asociada al trabajo útil que se realiza en un circuito eléctrico. La potencia activa promedio sobre un número de ciclos (n) está dada por la expresión:

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} P(t) dt \quad [9]$$

⁴ Las ecuaciones 6, 7 y 8 fueron tomadas de la hoja de datos del CI ADE7953

Donde T es el periodo del ciclo de línea.

Figura 8. Cálculo de la potencia activa



Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011.
Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

El *ADE7953* calcula la potencia activa de forma simultánea para los canales de corriente A y B en relación al canal de tensión, la medición resultante se almacena en los registros *AWATT* (0x212 y 0x312) y *BWATT* (0x213 y 0x313), estos registros se actualizan a una tasa de 6.99KHz.

2.1.4.3 Potencia reactiva. Esta componente de la potencia no se transforma en trabajo útil. Su origen está en la capacidad que tienen los condensadores y bobinas de almacenar energía. La potencia reactiva se define como el producto de la forma de onda de voltaje y la corriente cuando una de estas señales es desplazada en fase 90°. La forma de onda resultante se llama señal instantánea de potencia reactiva.

⁵ La ecuación 9 fue tomada de la hoja de datos del CI ADE7953

$$RP(t) = V(t) * I'(t) \quad [10]$$

$$V(t) = \sqrt{2} * V * \text{sen}(wt + \theta) \quad [11]$$

$$I(t) = \sqrt{2} * I * \text{sen}(wt) \quad [12]$$

$$I'(t) = \sqrt{2} * I * \text{sen}(wt + \frac{\pi}{2}) \quad [13]$$

En donde V es la tensión rms, I la corriente rms y θ es la diferencia de fase entre el canal de tensión y corriente.

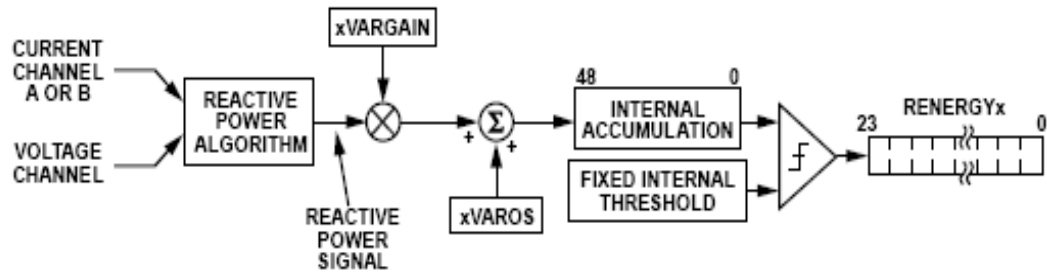
La potencia reactiva promedio sobre un número de ciclos de línea (n) está dada por la siguiente expresión:

$$RP = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} RP(t) dt = VI \text{sen}(\theta)^6 \quad [14]$$

Al igual que para el caso de la potencia activa, la componente de DC que contiene la potencia reactiva es extraída mediante un filtrado pasa bajas presente en cualquiera de los canales, siendo acumulada constantemente esta señal en los registros internos de energía para su continua actualización a una tasa de 6.99KHZ. Los resultados de esta medición son almacenados en los registros *AVAR* (0x214 y 0x314) y *BVAR* (0x215 y 0x315).

⁶ Las ecuaciones 10, 11, 12, 13 y 14 fueron tomadas de la hoja de datos del CI ADE7953

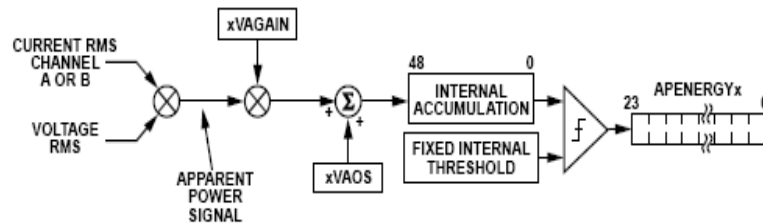
Figura 9. Cálculo de la potencia reactiva



Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

2.1.4.4 Potencia aparente. La potencia aparente se define como la potencia máxima que se puede enviar a una carga.

Figura 10. Cálculo de la potencia aparente



Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

$$V(t) = \sqrt{2} * V_{RMS} * \text{sen}(wt) \quad [15]$$

$$I(t) = \sqrt{2} * I_{RMS} * \text{sen}(wt + \theta) \quad [16]$$

$$P(t) = V(t) * I(t) \quad [17]$$

La potencia aparente está dada por la siguiente expresión:

$$P(t) = V_{RMS} * I_{RMS} * \cos(\theta) - V_{RMS} * I_{RMS} * \cos(2\omega t + \theta) \quad ^7 \quad [18]$$

A diferencia de la potencia activa y reactiva, no existen registros para compensar el nivel de offset, lo cual se debe a que la compensación realizada en los registros de tensión y corriente es más que suficiente. La medición resultante es almacenada en los registros *AVA* (0x210 y 0x310) Y *BVA* (0x211 y 0x311).

Es de notar que este integrado, realiza los cálculos para las potencias siguiendo la teoría clásica de circuitos eléctricos. Estudios recientes (ver referencia [13]) han demostrado, que para circuitos no lineales y trifásicos desbalanceados, esta teoría es inconsistente con la ley de Joule. Aunque la norma IEEE 1459-2000 intenta resolver este problema, las nuevas definiciones propuestas por esta, no resuelven las inconsistencias de la potencia, como es el caso de la compensación reactiva. Para el caso del presente proyecto, en el que el interés radica en la medición de potencia activa, estas inconsistencias no son problema, ya que por ejemplo, para el caso de circuitos no lineales, los errores se presentan con la definición de potencia reactiva *Q*.

2.1.4.5 Otras mediciones.

➤ **Medición del período:**

Si es requerido se puede realizar una medición del período del canal de tensión, el que se encuentra disponible en un registro de 16 bits (0x10E), su actualización se lleva a cabo una vez cada período de línea y tiene un tiempo de establecimiento de 30ms a 40ms; este período tiene una

⁷ Las ecuaciones 15, 16, 17 y 18 fueron tomadas de la hoja de datos del CI ADE7953

resolución de 4.4ms, lo que representa 0.0224% cuando la frecuencia de línea es 50Hz y de 0.0268% cuando es 60Hz. La fórmula para la medición del período es mostrada a continuación:

$$T_L = \frac{\text{PERIOD}[15:0]+1}{223\text{kHz}} \text{sec}^8 \quad [19]$$

➤ **Calibración del nivel de *offset*:**

Este dispositivo tiene la opción de calibrar los niveles de *offset* que se presenten en los registros de potencia activa, reactiva, aparente y en los registros de tensión y corriente RMS, tanto del canal A como del canal B, lo que permite aumentar la precisión en las mediciones que se lleven a cabo. Para compensar el *offset* de la potencia activa se tienen los registros *AWATTOS* (0x289 y 0x389) y *BWATTOS* (0x295 y 0x395), potencia reactiva *AVAROS* (0x28A y 0x38A) y *BVAROS* (0x296 y 0x396), potencia aparente *AVAOS* (0x28B y 0x38B) y *BVAOS* (0x297 y 0x397), tensión RMS *VRMSOS* (0x288 y 0x388) y corriente RMS *AIRMSOS* (0x286 y 0x386) y *BIRMSOS* (0x292 y 0x392), todos los registros anteriormente enunciados son de 24 bits y la variación de cada bit implica una compensación en la medición de 0.001953.

2.1.5 Protocolos de comunicación. El *ADE7953* ofrece la posibilidad de trabajar con tres interfaces de comunicación⁹ diferentes para poder acceder a la

⁸ La ecuación 19 fue tomada de la hoja de datos del CI ADE7953

⁹ Para mayor información acerca de los protocolos de comunicación del ADE7953 remítase a la hoja de datos de este, sección comunicación

información que se encuentre contenida en los registros, las opciones son *SPI*, *I2C* y *UART*.

Estas interfaces manejan el mismo grupo de pines, por tanto, es necesario decidir desde un principio cuál de ellas se pretende utilizar en el diseño a implementar. El circuito integrado maneja un sistema de detección que percibe el tipo de interfaz que se esté usando, el pin 28 (*CS*) determina si el método de comunicación es *SPI* mientras que el pin 25 (*SCLK*) establece si se trata de una comunicación *I2C* o *UART*. La tabla presentada a continuación permite visualizar de mejor forma la selección del protocolo:

Tabla 1. Protocolos de comunicación *ADE7953*

Interfaz de comunicación	Pin 28 (CS)	Pin 25 (SCLK)	Pin 27 (MOSI/SCL/Rx)	Pin 26 (MISO/SDA/Tx)
SPI	0	No importa	MOSI	MISO
I2C	1	1	SCL	SDA
UART	1	0	Rx	Tx

Después de haber seleccionado el protocolo de comunicación (que para el presente proyecto fue *I2C*) es indispensable bloquear la interfaz para evitar que esta cambie inadvertidamente, esta función de bloqueo viene desactivada por defecto, para su configuración es necesario manipular el bit 15 del registro *CONFIG (0x102)*, después de bloqueada la interfaz seleccionada (*SPI*, *I2C*, *UART*), el método de comunicación no se puede cambiar sin reiniciar el *ADE7953*. En caso de seleccionar la interfaz de comunicación *SPI* el pin 28 (*CS*) debe mantenerse en bajo durante 1.2ms después del último *SCLK*.

2.1.5.1 Interfaz I²C. I²C es un *bus* de comunicaciones en serie. Su nombre viene de *Inter-Integrated Circuit* (Circuitos Inter-Integrados). La velocidad es de 100Kbits por segundo en el modo estándar, aunque también permite velocidades de 3.4 Mbit/s. Es un bus muy usado en la industria, principalmente para comunicar microcontroladores y sus periféricos en sistemas integrados (*Embedded Systems*) y en forma general, para comunicar circuitos integrados entre sí que normalmente residen en un mismo circuito impreso.

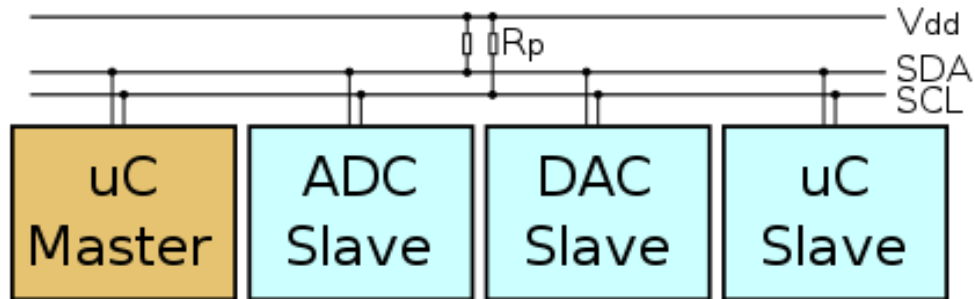
La principal característica de I²C es que utiliza dos líneas para transmitir la información una para los datos y otra para la señal de reloj. También es necesaria una tercera línea, pero esta sólo es la referencia (masa). Como suelen comunicarse circuitos en una misma placa que comparten una misma masa esta tercera línea no suele ser necesaria.

Las líneas se llaman:

- SDA: datos
- SCL: reloj
- GND: tierra

Las dos primeras líneas son drenador abierto, por lo que necesitan resistencias de *pull-up*.

Figura 11. Comunicación I2C



Fuente: Autores

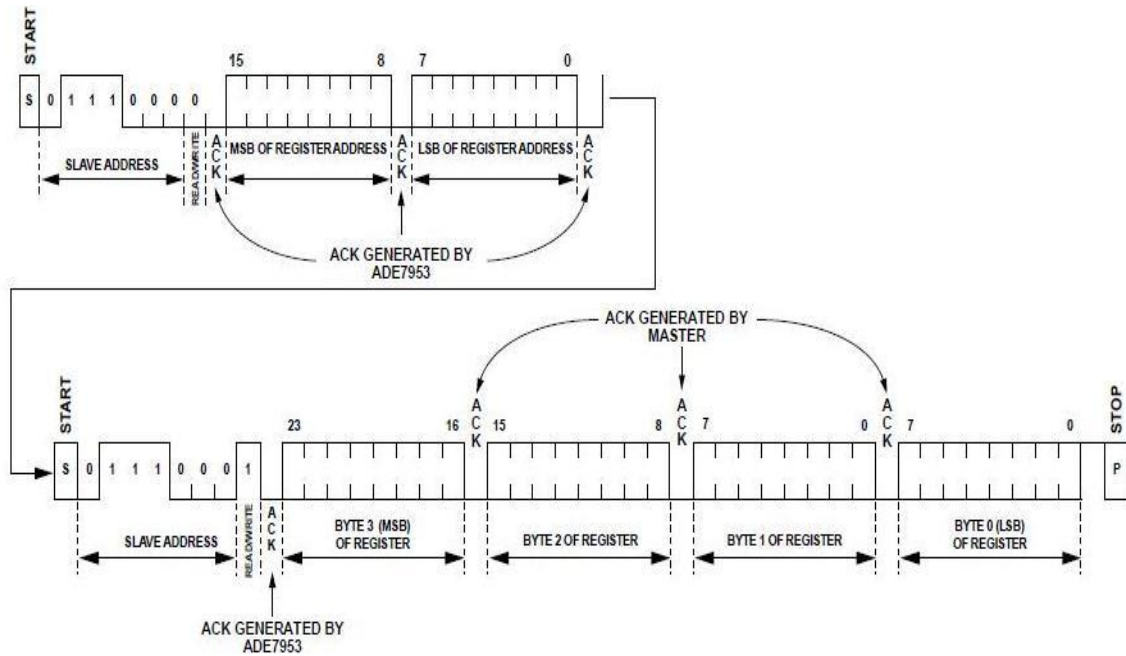
Los dispositivos conectados al bus I2C tienen una dirección única para cada uno. También pueden ser maestros o esclavos. El dispositivo maestro inicia la transferencia de datos y además genera la señal de reloj, pero no es necesario que el maestro sea siempre el mismo dispositivo, esta característica se la pueden ir pasando los dispositivos que tengan esa capacidad. Esta característica hace que al bus I2C se le denomine *bus* multimaestro.

Para el caso del ADE7953 la interfaz I2C funciona a una frecuencia de reloj máxima de 400KHz, la dirección del integrado es 0111000X, en donde el bit 8 indica si leer (1) o escribir (0), los pines a utilizar son 26 (SDA), 27 (SCL), 28 (CS) y 25 (SCLK), estos 2 últimos a VCC para que el sistema de auto detección identifique el bus I2C.

Para llevar a cabo una operación de lectura lo primero que se hace es emitir una condición de arranque seguida por la dirección del esclavo (ADE7953), después el bit de escritura (0) y posteriormente la dirección del registro que se quiere leer. Lo siguiente es generar una señal de re-start seguida nuevamente por la dirección del esclavo pero esta vez acompañada por el bit de lectura (1); finalmente el ADE7953

responderá con la información contenida en el registro. Logrado lo precedente, se ubica una señal de parada para cerrar la comunicación.

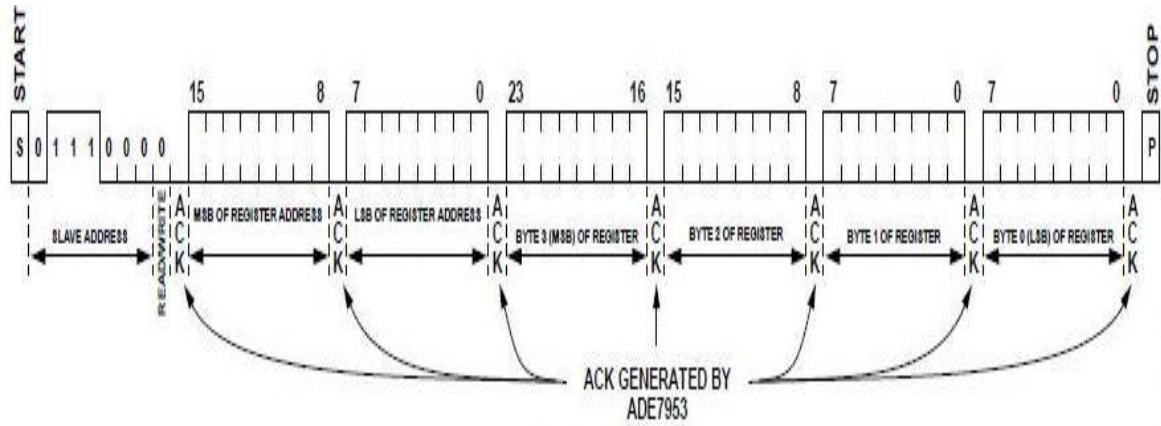
Figura 12. Lectura I2C



Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

El proceso de escritura es igual al de lectura, simplemente hay que tener en cuenta que el bit posterior a la dirección del dispositivo es el de escritura (0) y que después de encajar la dirección del registro de escritura al cual se quiere acceder se debe introducir la secuencia que incluye las respectivas modificaciones del registro.

Figura 13. Escritura I2C



Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

2.1.5.1.1 Ventajas y desventajas de la comunicación I2C

Ventajas

La inclusión de dispositivos I2C adicionales solo requiere de una conexión a las dos únicas líneas del bus (*SDA*, *SCL*).

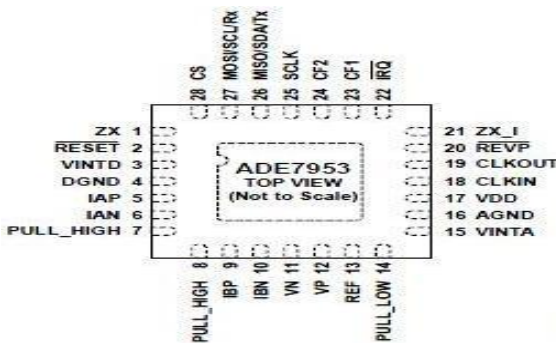
- Los intercambios se realizan utilizando los mismos subprogramas para todos.
- La tensión de funcionamiento va de 2,5V a 5,5V y no es necesario la presencia de drivers de adaptación externos ya que los mismos dispositivos los incluyen.
- Puede abarcar largas distancias para el flujo de datos.

Desventajas

- La velocidad de transmisión de información es mucho menor en comparación con *SPI*.
- Normalmente es necesario agregar las resistencias de *pull-up* las cuales no vienen incluidas en el dispositivo.

2.1.6 Distribución de pines y esquema de conexión. El *ADE7953*¹⁰ posee un encapsulado tipo *CP* de 28 pines especial para montajes superficiales, sus dimensiones son de 5,1mm*5,1mm ancho-largo y 0,8mm de alto, su distribución de pines se presenta a continuación:

Figura 14. Distribución de pines *ADE7953*

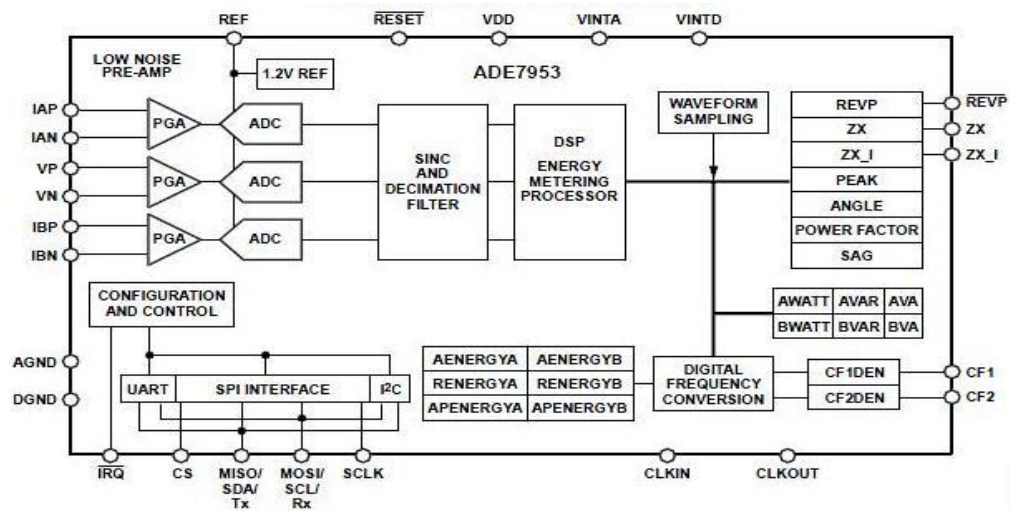


Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo *ADE7953*. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

Un diagrama de bloques generalizado del sistema interno que conforma el *ADE7953* es presentado a continuación:

¹⁰ Para más información acerca de la distribución de pines del *ADE7953* remítase al Anexo D

Figura 15. Diagrama de bloques



Fuente: ANALOG DEVICES INC. Hoja de datos del dispositivo ADE7953. 2011. Disponible en www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7953.pdf

El diagrama de conexión sugerido por el fabricante no considera la independencia que tiene la tierra analógica de la digital mediante un correcto aislamiento, lo cual es de vital importancia al momento de interconectar este integrado con los sensores seleccionados, el microcontrolador y los demás elementos que conforman el dispositivo.

Teniendo en cuenta lo anterior se desarrolló el esquemático pertinente para esta etapa del prototipo:

3.1 SENSADO DE TENSIÓN Y ADECUACIÓN

El sensor de tensión empleado es básicamente un divisor resistivo entre la fase y el neutro de la señal de alterna reducida por el transformador de tensión que se seleccionó, el cual entrega en el secundario +/-12V.

$$V_o = \left(\frac{R_2}{R_1+R_2} \right) * V_{in} \quad [20]$$

Los valores escogidos para el divisor resistivo se calcularon teniendo en cuenta que la señal recibida por el canal de tensión del *ADE7953* tiene que estar entre +/- 0,5V máximo; las resistencias seleccionadas son:

$$R_1=25K\Omega \quad (\text{Tolerancia } +/-5\%)$$

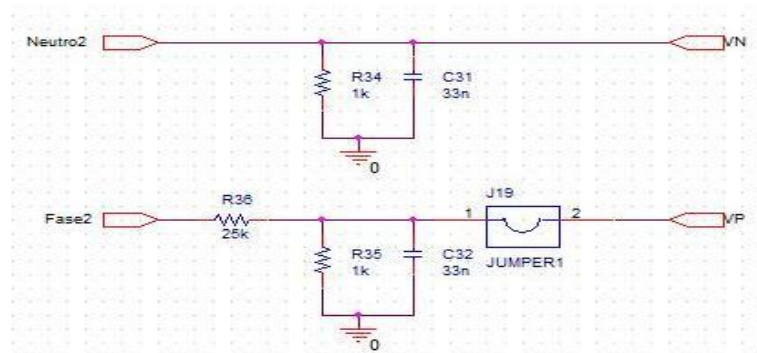
$$R_2=1K\Omega \quad (\text{Tolerancia } +/-5\%)$$

$$V_{in}= +/-12V$$

$$V_o= +/- 0,4615 V$$

Se presenta el esquema propuesto para sensar tensión:

Figura 18. Esquema para sensar tensión



Fuente: Autores

3.2 SENSADO DE CORRIENTE Y ADECUACIÓN

Teniendo en cuenta las recomendaciones del fabricante en relación a la escogencia del sensor de corriente para aplicaciones que involucren la utilización del *ADE7953* en medidores de energía, se eligió la siguiente opción.

Transformador de corriente AC1020: El *AC1020*¹¹ es básicamente un dispositivo que está en capacidad de percibir las variaciones del campo magnético mediante su bobinado interno en relación a la fase del dispositivo a sensar. El flujo producido induce un voltaje en la bobina secundaria el cual es usado para saber a qué corriente se está operando.

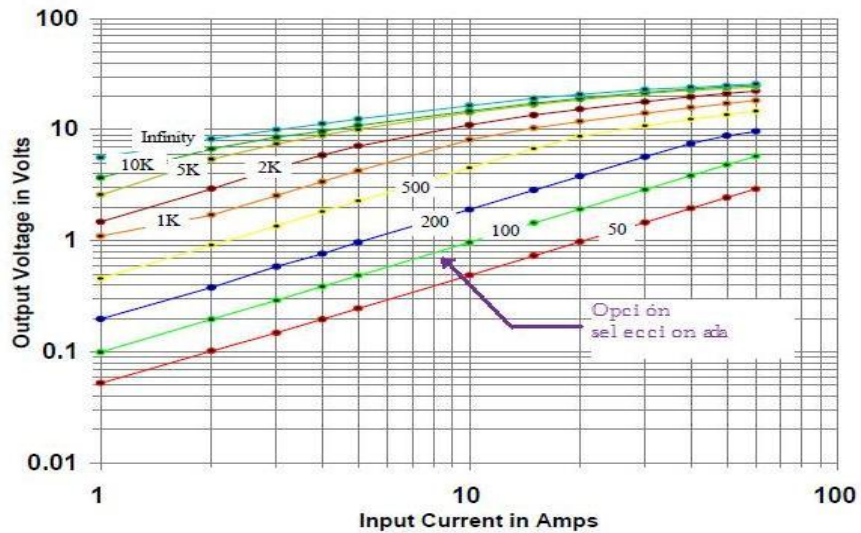
Las características más relevantes del sensor son:

- No requiere una tensión de referencia.
- Relación de espiras 1000:1 nominal.
- Resistencia de DC 41,8Ω.
- Rango de medición entre 0 y 60A.

Este sensor requiere de una resistencia en el secundario para poder ajustar el rango de la tensión de salida en relación a la corriente sensada, con la finalidad de brindar diferentes opciones para determinadas aplicaciones. Para el caso del prototipo desarrollado, se decide utilizar una resistencia de 100Ω. En la siguiente gráfica se puede apreciar de mejor forma el funcionamiento del sensor respecto a la resistencia seleccionada.

¹¹ Si se desea más información de este dispositivo dirijase a su hoja de datos en "www.amveco.com/pdf/AC1020_11-01.pdf"

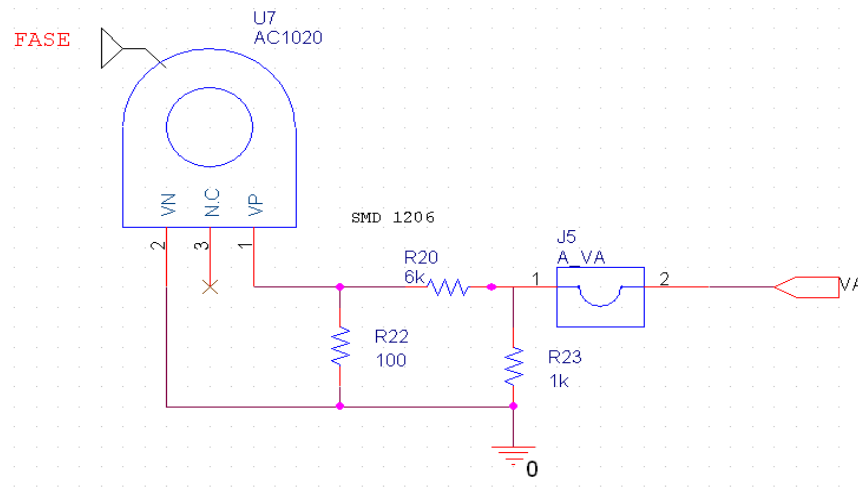
Figura 19. Tensión de salida vs. Corriente sensada



Fuente: Amveco Magnetics. Hoja de datos de AC1020. 2012. Disponible en: http://www.amveco.com/pdf/AC1020_11-01.pdf.

El transformador de corriente AC1020 entrega en el secundario una tensión completamente diferencial, la cual tendrá que ser reducida mediante un divisor resistivo para garantizar una señal de +/-0,5V, teniendo en cuenta para este caso, que la máxima tensión entregada es de 3V para una corriente máxima a sensar de 30A (como se mostró en la gráfica anterior para R=100Ω) se proponen entonces como valores del divisor resistivo, R1=6KΩ y R2=1KΩ, después se tiene un filtro RC pasa-bajas (R=1KΩ, C=33nF) para reducir el ruido y un jumper para habilitar o deshabilitar el canal de corriente A. En la figura 20 se muestra el esquema propuesto para sensar corriente:

Figura 20. Esquema para sensar corriente



Fuente: Autores

3.3 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para implementar la fuente de alimentación de los circuitos integrados de la tarjeta del circuito, se utilizó un transformador laminado de tensión monofásico de montaje superficial, referencia 020-5411.0 de la empresa *Pulse*, el cual entrega una señal diferencial reducida de $\pm 12\text{VAC}$ rectificada por un puente *2KBP04M* y posteriormente pasada por un filtro capacitivo para obtener un nivel de tensión de 12VDC que se distribuye en dos reguladores, *MC33269DT-5.0* (*ON Semiconductor*) y *LM7833-3.3* (*TAITRON*).

Características relevantes de los elementos que conforman la fuente de alimentación.

➤ **Transformador *Pulse 020-5411.0*:**

Se tomó la decisión de trabajar con este transformador puesto que tiene un tamaño bastante aconsejable para llevar a cabo montajes superficiales, además de entregar una corriente de salida muy pequeña lo cual es favorable en aplicaciones donde se requiere un bajo consumo de potencia.

- Tensión en el primario: 115V
- Tensión en el secundario: 12V
- Corriente en el secundario: 58mA
- Frecuencia: 50/60Hz

➤ **Rectificador de onda completa *2KBP04M*:**

Este dispositivo toma la señal reducida por el transformador de tensión y le realiza un proceso de rectificación de onda completa por medio de un clásico puente de diodos, el cual es acompañado por un acople capacitivo; todo esto con la intención de obtener una señal de DC proporcional a la amplitud máxima del secundario del transformador (12V).

- Tensión máxima de entrada: 280V
- Corriente máxima de salida: 2A
- Frecuencia de operación: entre 40Hz y 1000Hz

➤ **Regulador *MC33269DT-5.0*:**

La utilización de este regulador se hace necesaria para suministrar un nivel de +5VDC a elementos tales como la pantalla *LCD*. Tensión de salida: 5V

- Tensión de entrada: entre 1,25V y 15V
- Corriente de salida: 800mA

➤ Empaquetado: *DPAK TO-252*

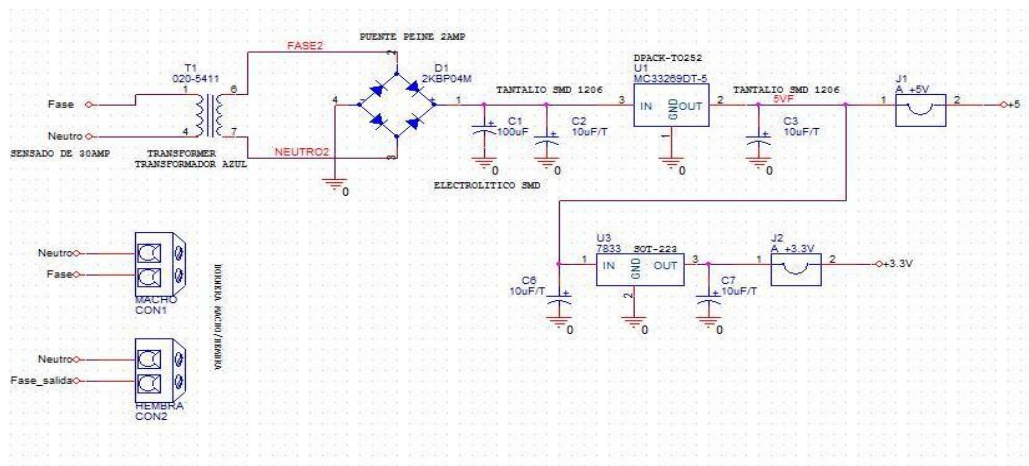
➤ **Regulador *LM7833-3.3V:***

Este regulador de tensión se encarga de suministrar un nivel de +3,3VDC a la mayoría de periféricos, teclado *touch (MPR121)*, memoria *SD*, módulo *XBee* y el circuito integrado *ADE7953*.

- Tensión de salida: 3,3V
- Tensión de entrada: entre 3,3V y 18V
- Corriente de salida: 1A
- Empaquetado: *DPAK TO-252*

Montaje de la fuente de alimentación: Con base en los elementos ya mencionados y teniendo en cuenta las conexiones recomendadas en las hojas de datos de los fabricantes se implementó la siguiente fuente de alimentación.

Figura 21. Esquema de la fuente de alimentación



Fuente: Autores

3.4 PROCESAMIENTO DE DATOS

La etapa siguiente a la adquisición de las señales por parte del *ADE7953* tiene que ver con el procesamiento de la información contenida en los registros de este integrado. Para ello se decidió hacer uso de un microcontrolador, de referencia *MC9S08JM60* de la empresa *FREESCALE*, el cual cuenta con las características necesarias para establecer una comunicación adecuada entre éste y los demás periféricos que conforman el proyecto.

3.4.1 Microcontrolador *MC9S08JM60* (*FREESCALE*). El microcontrolador *MC9S08JM60*¹² de 8 bits adquirido para este proyecto, tiene precargado un programa *Bootloader* (gestor de arranque) cuya única tarea es la de servir como puente entre el usuario que crea la aplicación y la memoria *FLASH* interna del microcontrolador, de modo tal que se pueda programar la memoria *FLASH* y actualizarla sin necesidad de comprar un programador aparte para ejecutar dicha tarea.

3.4.1.1 Características del *MC9S08JM60*.

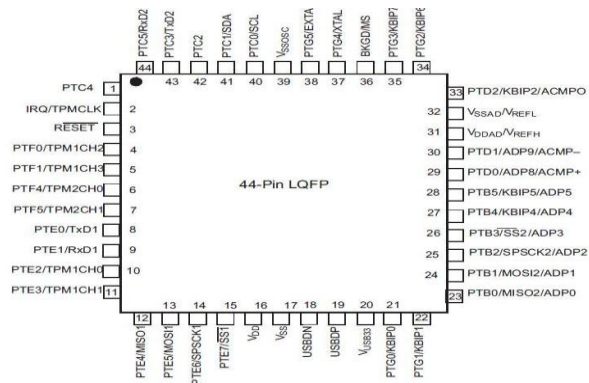
- Arquitectura *Von Neumann* – *CISC* (conjunto de instrucciones computacionales complejas) Núcleo de procesamiento tipo *HCS08* de *Freescale*.
- Velocidad de oscilador máxima de 48MHz con bus interno de 24MHz.
- 60KB de memoria *Flash*, 4KB de memoria *RAM*, y 256 Bytes de memoria *RAM* dedicada para el puerto *USB*.

¹² Para más información en relación a esta etapa consulte el siguiente enlace de un grupo de desarrolladores de la ciudad de Bucaramanga “<http://www.octoplus.com.co/store/index.php/efm-jm60.html>”

- 12 canales ADC de 12 bits.
- Comparador análogo.
- 2 Módulos *SCI* (interfaz de comunicación serial) para comunicación *RS232*.
- 2 Módulos *SPI* (interfaz de periféricos serial).
- 1 Módulo *I2C*.
- 1 temporizador de 2 canales y 1 temporizador de 4 canales con resolución de 16bits.
- 8 Canales PWM (modulación por ancho de pulso).
- 1 temporizador *RTC* con modo seleccionable de conteo binario o en décadas.

3.4.1.2 Distribución de pines. El *MC9S08JM60* utilizado tiene un encapsulado *QFP* (encapsulado cuadrado plano) de montaje superficial con 44 pines, cuya distribución se muestra a continuación.

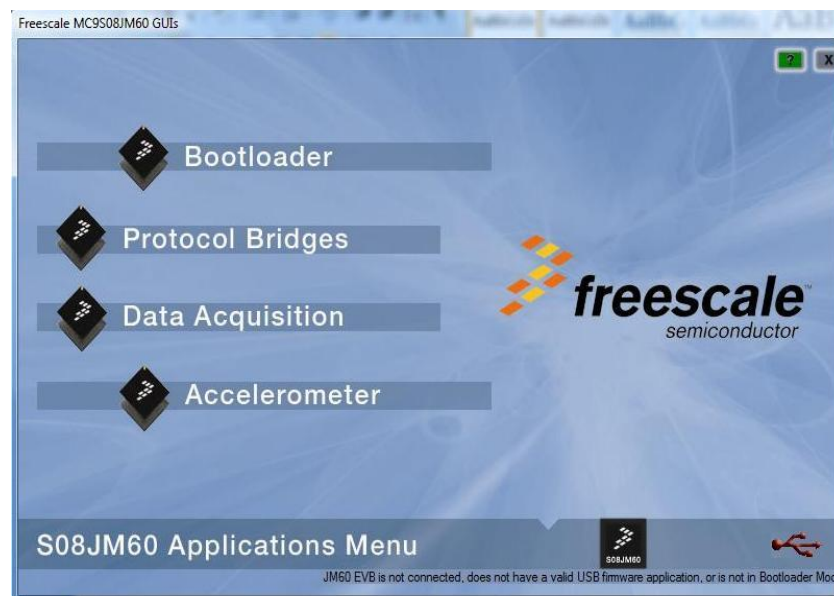
Figura 22. Distribución de pines *MC9S08JM60*



Fuente: Freescale Semiconductors. Hoja de datos *MC9S08JM60*. 2009.
 Disponible en:
www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC9S08JM60.pdf.

3.4.1.3 FREESCALE JM60 GUI. La transferencia de la programación realizada sobre el microcontrolador se realizó mediante la interfaz visual *FREESCALE JM60 GUI*, la cual se encarga de leer y enviar el archivo de extensión .s19 generado en el proceso de compilación que se realiza en *CodeWarrior* y que es almacenado normalmente en la carpeta bin donde esté guardado el código desarrollado.

Figura 23. Interfaz gráfica *FREESCALE JM60 GUI*



Fuente: Freescale Semiconductor. Disponible en:
https://www.freescale.com/webapp/sps/download/license.jsp?colCode=JM60_GUI_INSTALLER

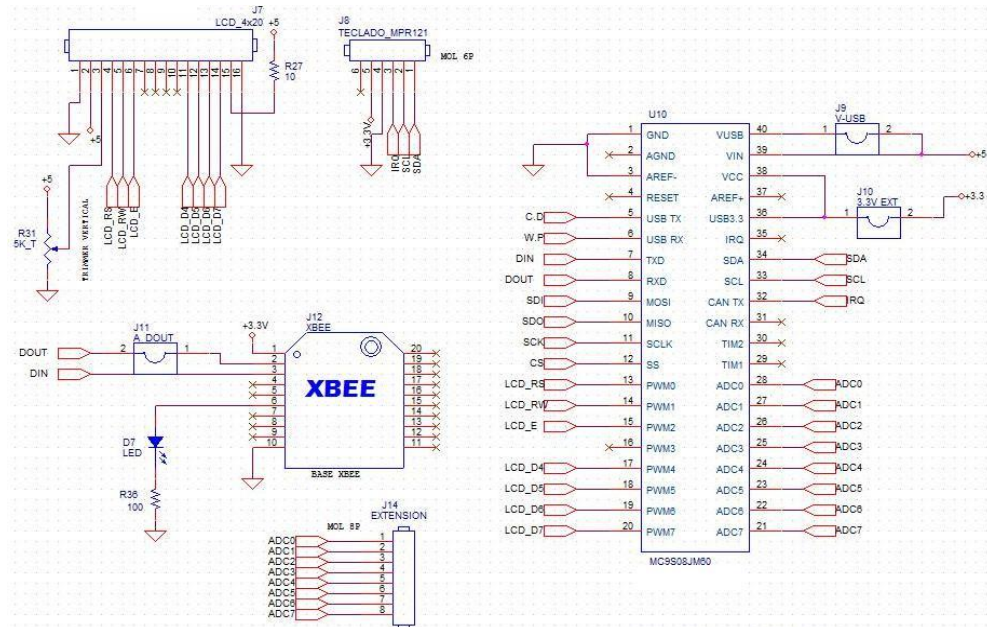
La interfaz ofrece además otras opciones adicionales como por ejemplo el manejo de protocolos *SPI* y *UART* (transmisión y recepción asíncrona universal), para facilitar el proceso de visualización de los datos entrantes o salientes por puerto *USB* del PC utilizado, también le permite al usuario visualizar datos de sensores como acelerómetros y de conversiones *ADC*; esta aplicación puede ser descargada de forma gratuita directamente de la página oficial de *FREESCALE*.

3.4.1.4 Montaje del *MC9S08JM60*. Para un correcto funcionamiento de este microcontrolador es indispensable la conexión de dos grupos de pines; en primer lugar el 37 (EXTAL) y 38 (XTAL) los cuales van a un oscilador externo de 12MHz, y en segundo lugar, los pines 18 (USBN) y 19 (USBP) que son utilizados para establecer la comunicación con el PC vía puerto mini *USB*; adicional a esto se habilita una etapa *BDM* por medio de la cual se puede realizar la carga del Bootloader en el microcontrolador mediante un programador externo (proceso que se realiza una única vez). En cuanto a la tensión de alimentación el *MC9S08JM60* puede operar ya sea a 5V o a 3,3V, para este proyecto se trabajó a 3,3V puesto que todos los periféricos que se comunican con el microcontrolador lo hacen a 3,3V (módulo *XBee*, *MPR121*, memoria *SD*, *ADE7953*).

3.5 DISTRIBUCIÓN DE PERIFÉRICOS

Con base en las capacidades del microcontrolador y teniendo en cuenta los periféricos a utilizar se realizó una distribución de dichos recursos de la siguiente forma.

Figura 24. Distribución de periféricos



Fuente: Autores

3.6 TECLADO TOUCH

Se decidió incluir una interfaz por medio de la cual, el usuario se pueda comunicar con el medidor de una forma simple, cómoda y directa. Para ello se diseñó e implementó un teclado *touch* con base al sensor capacitivo *MPR121* de la empresa *FREESCALE*, segunda generación de este tipo de sensores y en contraste con la primera generación (*MPR03x*) incluye un mayor número de electrodos (12), comunicación *I2C*, sistema antirrebote y una mejora significativa en cuanto a la sensibilidad de la matriz táctil para garantizar un proceso óptimo de auto detección y proximidad.

3.6.1 Características del *MPR121*.

➤ **Sensado Capacitivo:**

El *MPR121* puede manejar variaciones capacitivas que van desde 10pF hasta 2000pF; esto se hace mediante la manipulación de la corriente y de la cantidad de tiempo que ésta es suministrada a cada electrodo; dicho arreglo se realiza ingresando al modo de configuración manual, el cual permite manipular cada electrodo por separado.

➤ **Sensado de proximidad:**

El sensado de proximidad es una nueva característica del *MPR121*. Esta permite cortocircuitar todos los electrodos del sistema para crear un electrodo muy grande con la capacidad de detectar la proximidad de un objeto hacia el panel dentro de un par de centímetros.

➤ **Control de LEDs:**

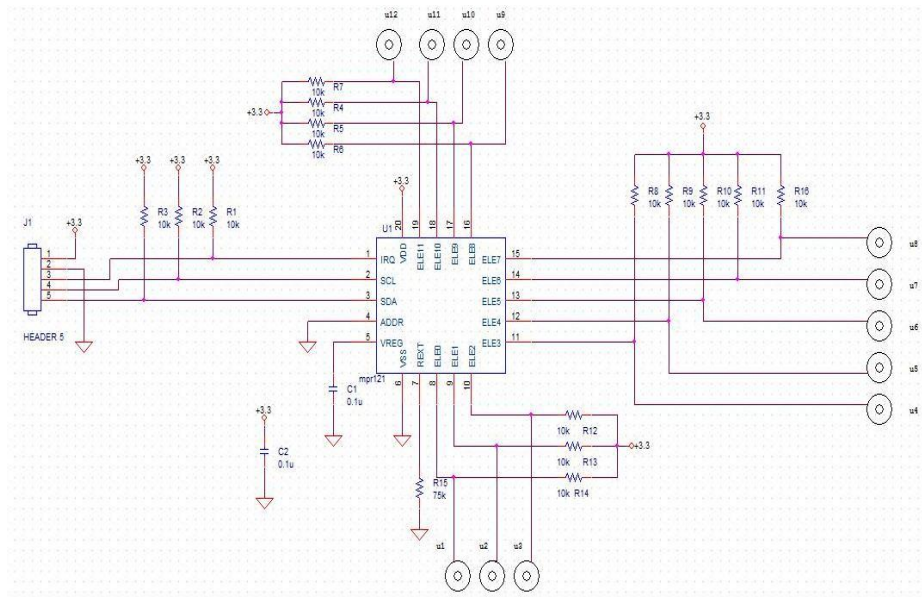
El *MPR121* incluye 8 pines (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19) que pueden ser utilizados como electrodos o como salidas para el control de *leds* en aplicaciones que lo requieran.

➤ **Comunicación I2C:**

Este integrado trabaja únicamente bajo el protocolo de comunicación *I2C*; los pines utilizados para entablar la comunicación son: 1 (*IRQ*), 2 (*SCL*), 3 (*SDA*); Todos ellos deben ser conectados a una resistencia de *Pull-up* ya que el *MPR121* no incluye internamente estas resistencias.

3.6.2 Montaje del *MPR121*. Para la implementación del teclado *touch* con base en el sensor capacitivo *MPR121* se partió del esquema de conexión presente en la hoja de datos del fabricante; además, se tuvo en cuenta una tensión de operación de 3,3V ya que es la tensión de trabajo del microcontrolador.

Figura 25. Esquema de conexión *MPR121*



Fuente: Autores

3.7 TRANSMISIÓN INALÁMBRICA

El prototipo desarrollado cuenta con un sistema de comunicación inalámbrica regido por el estándar IEEE 802.15.4 ya que los módulos *XBee* utilizados son serie 1; sin embargo, se puede utilizar módulos *XBee* serie 2 sin ningún problema ya que éstos cuentan con el protocolo *ZigBee* el cual está basado en el estándar IEEE 802.15.4. El prototipo brinda la posibilidad de realizar monitorización en forma remota de las mediciones que se estén llevando a cabo sobre determinada carga lo cual es de gran importancia en toda aplicación domótica desarrollada en la actualidad.

3.7.1 Protocolo *ZigBee*. *ZigBee* es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su

utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (*wireless personal area network, WPAN*). Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

Los protocolos *ZigBee* están definidos para su uso en aplicaciones encastradas con requerimientos muy bajos de transmisión de datos y consumo energético. Se pretende su uso en aplicaciones de propósito general con características autoorganizativas y bajo costo (redes en malla, en concreto). Puede utilizarse para realizar control industrial, albergar sensores empotrados, recolectar datos médicos, ejercer labores de detección de humo o intrusos, o domótica. La red en su conjunto utilizará una cantidad muy pequeña de energía de forma que cada dispositivo individual pueda tener una autonomía de hasta cinco años antes de necesitar un recambio en su sistema de alimentación.

El estándar trabaja sobre las bandas ISM de uso no regulado de 2,4 GHz, en la que se definen hasta 16 canales en el rango con anchos de banda de 5 MHz. Utiliza modulación *QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)*, que transmite dos bits por símbolo, lo cual permite tasas de transmisión en el aire de hasta 250 kbit/s con alcances de unos 75 metros.

En una red *ZigBee* pueden haber hasta 254 nodos (punto de intersección o unión de varios sensores que confluyen en el mismo lugar), no obstante, según la agrupación que se haga, se pueden crear hasta 255 conjuntos/clusters de nodos con lo cual se puede llegar a tener 64770 nodos para lo que existe la posibilidad de utilizar varias topologías de red: en estrella, en malla o en grupos de árboles.

3.7.2 *ZigBee VS. Bluetooth.*

- Una red *ZigBee* puede constar de un máximo de 65535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos, frente a los 8 máximos de una subred (*Piconet Bluetooth*).
- Menor consumo eléctrico que el de Bluetooth. En términos exactos, *ZigBee* tiene un consumo de 30 mA transmitiendo y de 3 uA en reposo, frente a los 40 mA transmitiendo y 0,2 mA en reposo que tiene el Bluetooth. Este menor consumo se debe a que el sistema *ZigBee* se queda la mayor parte del tiempo dormido, mientras que en una comunicación Bluetooth esto no se puede dar, y siempre se está transmitiendo y/o recibiendo.
- Tiene una velocidad de hasta 250 kbps, mientras que en Bluetooth es de hasta 3 Mbps.
- Debido a las velocidades de cada uno, uno es más apropiado que el otro para ciertas cosas. Por ejemplo, mientras que el *Bluetooth* se usa para aplicaciones como los teléfonos móviles y la informática casera, la velocidad del *ZigBee* se hace insuficiente para estas tareas, desviándolo a usos tales como la domótica, los productos dependientes de la batería, los sensores médicos, y en artículos de juguetería, en los cuales la transferencia de datos es menor.

3.7.3 Módulos XBee. Los módulos *XBee* son dispositivos de radio frecuencia que trabajan en la banda de 2,4GHz con protocolo de comunicación *ZigBee* basado en el estándar IEEE 802.15.4. Son utilizados normalmente en automatización de casas, sistemas de seguridad, monitoreo de sistemas remotos,

aparatos domésticos, alarmas contra incendios, plantas tratadoras de agua, instrumental médico y por supuesto en medidores de energía eléctrica.

Para el caso de este proyecto se adquirieron dos módulos *XBee* serie 1 con antena para poder entablar una comunicación inalámbrica punto a punto entre el prototipo y un único computador. Sin embargo, haciendo uso de más módulos *XBee* como estos y más medidores de energía es posible establecer una red inteligente punto a multipunto para llegar a automatizar el proceso de medición a gran escala.

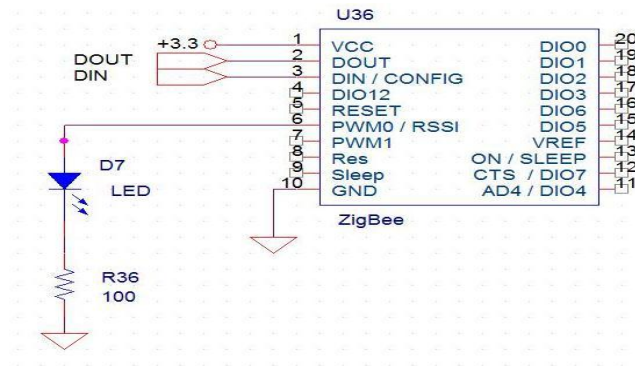
Figura 26. De izquierda a derecha, modulo *XBee* serie 1 con antena, sin antena y con antena cerámica



Fuente: MaxStream. Hoja de datos XBee/ XBee-pro OEM RF. 2006. Disponible en: <http://www.libelium.com/squidbee/upload/3/31/Data-sheet-max-stream.pdf>.

Los módulos *XBee* serie 1 tienen un alcance en interiores de 30m y en exteriores de hasta 100m, manejan una corriente de 50mA en funcionamiento y de 10uA en modo *sleep*. De igual forma existe una gama de estos módulos con un mayor alcance de transmisión conocidos como *XBee PRO* serie 1 los cuales pueden llegar hasta 100m en interiores y a 1,5Km en exteriores.

Figura 27. Esquema de conexión para el XBee que opera como transmisor



Fuente: Autores

3.7.4 Tarjeta XBee Explorer USB. Para poder establecer la comunicación entre el XBee utilizado como receptor y el computador se adquirió una tarjeta conocida como XBee Explorer USB¹³ la cual incluye un integrado FT232RL para hacer la conversión de serial a USB y facilitar la conexión del módulo con el PC para visualizar los datos mediante una interfaz gráfica. Se presenta enseguida la tarjeta mencionada.

Figura 28. Tarjeta XBee Explorer



Fuente: Autores

¹³ Para más información de esta tarjeta consulte la página del proveedor seleccionado en la ciudad de Bucaramanga "<http://dynamoelectronics.com/>"

Respecto al cable utilizado para conectar la tarjeta con el computador es simplemente un cable con conexión mini *USB* a *USB*.

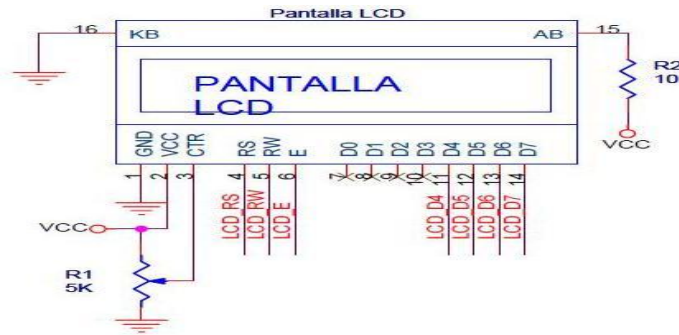
3.8 VISUALIZACIÓN DE DATOS

El proyecto dispone de dos formas diferentes para la visualización de las mediciones, una de estas es mediante un PC con una interfaz gráfica elaborada en *LabView*, que se explica más adelante, y la otra se realiza con una pantalla *LCD* incrustada en el prototipo la cual es presentada a continuación.

3.8.1 Pantalla *LCD*. Una pantalla *LCD* es un dispositivo que muestra caracteres alfanuméricos en una pantalla de varias líneas, la cual posee un microcontrolador interno que se encarga de gobernar su funcionamiento (el más común es el *Hitachi 44780*), este microcontrolador tiene unos pines para comunicarse con el mundo exterior y así poder realizar las distintas operaciones sobre la pantalla *LCD*, lo que facilita el manejo de la pantalla y el merecimiento de tenerla en cuenta en proyectos de este tipo.

3.8.2 Montaje de la pantalla *LCD*. La conexión de esta pantalla es algo muy básico de modo que se puede encontrar considerable información al respecto; se suelen utilizar los pines 11, 12, 13 y 14 para el envío de caracteres; el pin 5 para establecer una lectura o escritura, el pin 6 para habilitar o deshabilitar el módulo y los demás pines son para ajustar la nitidez y la intensidad de la luz de fondo, teniendo en cuenta esto se tiene el siguiente esquema de conexión.

Figura 29. Esquema de conexión pantalla *LCD*



Fuente: Autores

3.9 ALMACENAMIENTO DE LAS MEDICIONES

El presente proyecto cuenta con un sistema de almacenamiento de las mediciones realizadas a través de una memoria *SD* (seguridad digital) que puede ser extraída del prototipo y conectada posteriormente en algún PC que cuente con un puerto *SD* para de esta forma, realizar un análisis de los datos obtenidos si el usuario lo requiere.

3.9.1 Tarjeta *SD*. La memoria *Secure Digital* (también conocida como *SD* o tarjeta *SD*) es un tipo de tarjeta de memoria que está desarrollada específicamente para almacenar datos, imágenes y video de dispositivos tales como filmadoras, reproductores *mp3*, *PDA*s, *GPS*, y por supuesto, medidores de energía. Esta memoria tiene la particularidad de no requerir una alimentación constante (por ejemplo baterías) para retener la información que quede contenida en ella.

3.9.1.1 Características de la tarjeta *SD*.

- **Formato:** El formato es asimétrico, por lo tanto, no hay riesgo de ser insertada por error en un equipo a pesar de tener un tamaño bastante pequeño:

Memoria *SD* tradicional: 32 mm x 24 mm x 2.1 mm

Memoria Mini *SD*: 20 mm x 21,5 mm x 1,4 mm

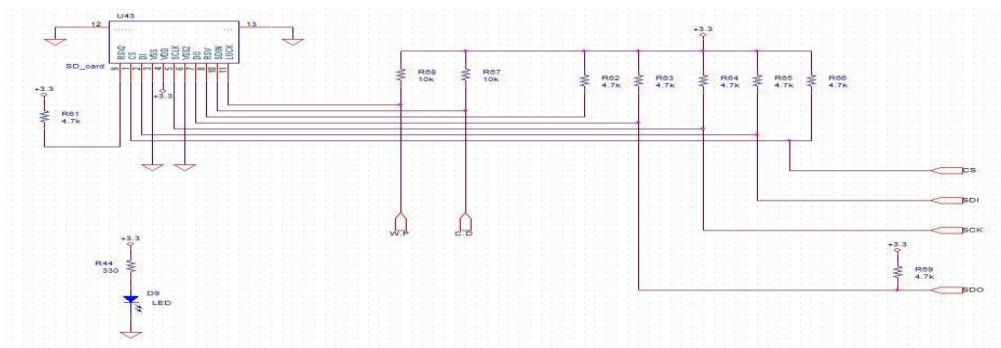
Memoria Micro *SD*: 11 mm x 15 mm x 1 mm

- **Capacidad:** Se encuentran con diferentes capacidades, 8, 16, 32, 64, 128, 256 y 512 MB. También en capacidades de 1, 2, 4, 6 y 8 GB. Es importante recordar que no todos los equipos poseen soporte para tarjetas con 2 GB o más, debido a la diferencia en el formateo (algunas veces el problema es resuelto por actualización de *firmware* de dicho equipo). En el caso de este proyecto la mayor capacidad permisible para la memoria *SD* es de 2GB; al hacer uso de memorias con mayor capacidad se presentan bloqueos en el funcionamiento del sistema por requerir de la programación de rutinas diferentes para su manipulación.
- **Protección:** La memoria *SD* posee un interruptor que imposibilita la escritura en la tarjeta, algo similar a los interruptores que incluían los antiguos diskettes de 3.5. En el mercado se pueden encontrar modelos de tarjetas más económicas sin esta función. Sin embargo, a diferencia de los diskettes, este bloqueo es realizado por el *firmware* del aparato el cual detecta si la llave está activada.

- **Velocidad:** Puede poseer diferentes velocidades de transferencia (lo que varía también en el precio), conforme a la versión utilizada. La velocidad es medida en múltiplos de 150K (igual al *CD-ROM*). Lo más usual es encontrar tarjetas o equipamientos que utilizan hasta velocidades de 16x (2,4 MByte/seg), y algunos más rápidos de 66x (10 MByte/seg), aunque también pueden encontrarse tarjetas ultra-rápidas de 133x o hasta 150x.
- **Comunicación SPI:** Las memorias *SD* trabajan bajo el protocolo de comunicación *SPI* en donde es necesario hacer uso de cuatro pines en particular, pin 2 (*MOSI*), pin 7 (*MISO*), pin 5 (*SCK*), pin 1 (*CS*). Este se convierte en el único periférico dentro de todo el proyecto que trabaja bajo el protocolo de comunicación *SPI*.

3.9.1.2 Montaje de la memoria SD. Para poder manipular la memoria *SD* en conjunto con los demás periféricos se instaló un adaptador para memoria *SD* que permite insertar y retirar la tarjeta en el momento que sea requerido; cabe resaltar que este módulo trabaja a 3.3V al igual que los demás periféricos del prototipo. La presente etapa se diseñó con base en el siguiente esquemático.

Figura 30. Esquema de conexión memoria *SD*



Fuente: Autores

4. PROGRAMACIÓN PARA EL MICROCONTROLADOR

Como ya fue mencionado con anterioridad el microcontrolador utilizado para este prototipo es un *MC9S08JM60* (*FREESCALE*), el que se programó a través del *software CodeWarrior* siguiendo las pautas necesarias para poder cargar el código mediante un *Bootloader* previamente instalado. La programación que se desarrolló está basada en un conjunto de librerías especialmente elaboradas para la manipulación de los diversos periféricos que conforman a este medidor de energía así como el respectivo código fuente (*main.c* y *main.h*) que manipula toda la estructura de programación.

4.1 FUNCIONAMIENTO DEL CÓDIGO

El código que se desarrolló cuenta con una serie de etapas y librerías (unas propias y otras de código libre) que se encargan de inicializar y ajustar todos los periféricos (*LCD*, teclado *touch*, tarjeta *SD*, conversor serial a *USB*, módulo *XBee* y *ADE7953*), lo cual se hace con la intención de poder ejecutar un correcto análisis de las cargas monofásicas que se pretendan monitorizar.

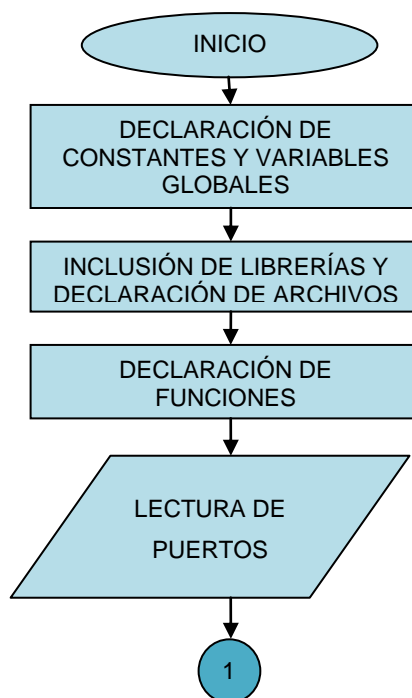
La primera etapa desarrollada en el código fuente trata de una serie de declaraciones de variables globales, constantes y funciones. Luego aparece la etapa de lectura de puertos seguido por una inicialización de protocolos de comunicación (*I2C* y *UART*) y de periféricos, en donde se encuentra la pantalla *LCD*, el teclado *touch* basado en el sensor capacitivo *MPR121*, memoria *SD*, módulo *XBee*, salida *USB* y el *ADE7953*.

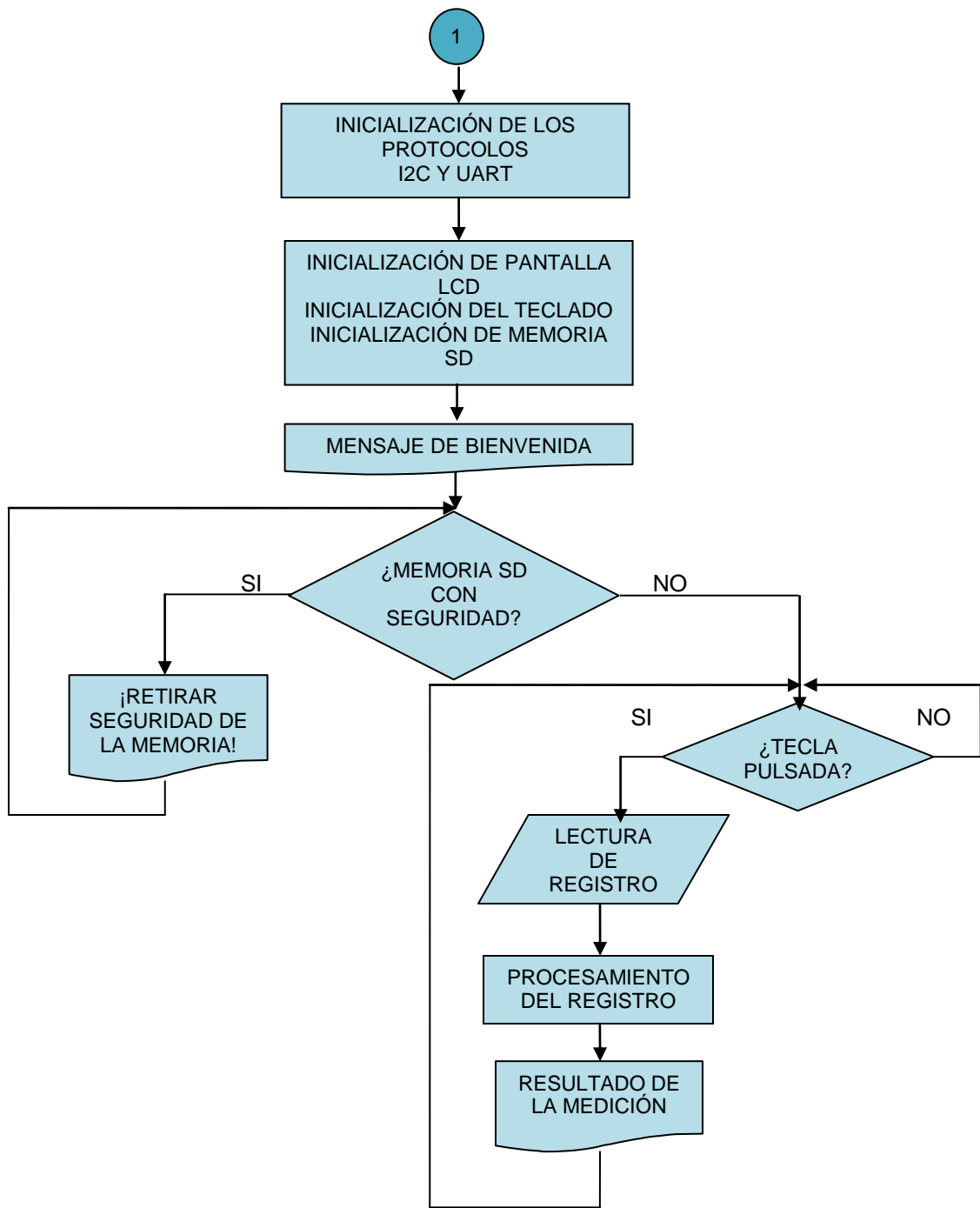
La tercera etapa de este código es básicamente un mensaje de bienvenida para el usuario y la cuarta etapa consiste, en generar una orden mediante el teclado para llevar a cabo una medición en particular que podrá ser visualizada de forma directa mediante la pantalla *LCD*, o a través de un PC haciendo uso de la conexión *USB* en forma directa o inalámbrica. Toda la información recolectada en la medición también estará disponible en formato *.txt* mediante un historial que se encuentra dentro de la memoria *SD*.

4.2 DIAGRAMA DE FLUJO

A continuación se presenta el diagrama de flujo general que describe el proceso que realiza el código implementado en el microcontrolador *MC9S08JM60* teniendo en cuenta las etapas de programación anteriormente citadas.

Figura 31. Diagrama de flujo general referente al código desarrollado





Fuente: Autores

4.2.1 Rutina para el teclado *touch*. Esta rutina se encarga de preparar el teclado para su utilización dentro del proceso. Por defecto configura todos los 12 electrodos del *MPR121* para que puedan ser utilizados según las necesidades del diseño.

Figura 32. Rutina ajuste del teclado *touch*



Fuente: Autores

4.2.2 Rutina para la pantalla LCD. Esta rutina está diseñada para configurar en su totalidad las pantallas *LCD* 2x16 (alfanuméricas) y desde luego aquellas 4x20, ya que en esencia poseen el mismo controlador (HD44780) y manejan las mismas líneas de datos.

Figura 33. Rutina ajuste de pantalla *LCD*



Fuente: Autores

4.2.3 Rutina para la memoria SD. Esta rutina se encarga de detectar y preparar la memoria *SD* estableciendo su respectivo protocolo de comunicación (*SPI*), para que de esta forma pueda ser utilizada como medio de almacenamiento de datos.

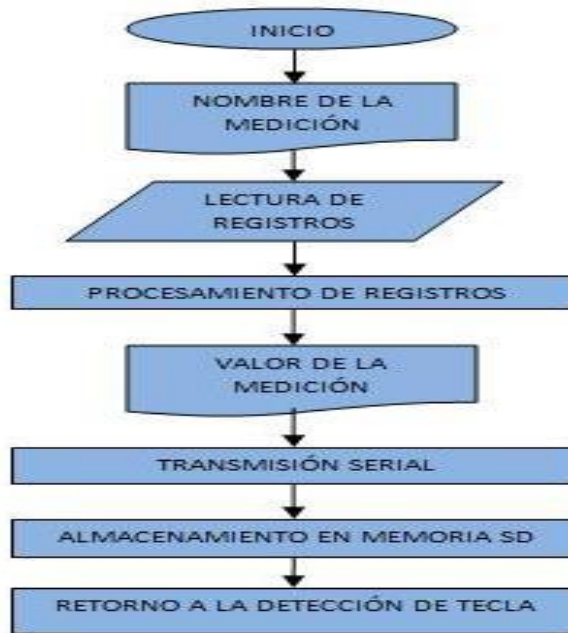
Figura 34. Rutina ajuste de memoria *SD*



Fuente: Autores

4.2.4 Rutina para mediciones. Por medio de esta rutina se extrae y procesa la información de los registros del *ADE7953* para que se puedan visualizar las diferentes mediciones, ya sea por medio de la pantalla *LCD* o por medio de un *PC* haciendo uso de la comunicación serial.

Figura 35. Rutina para mediciones



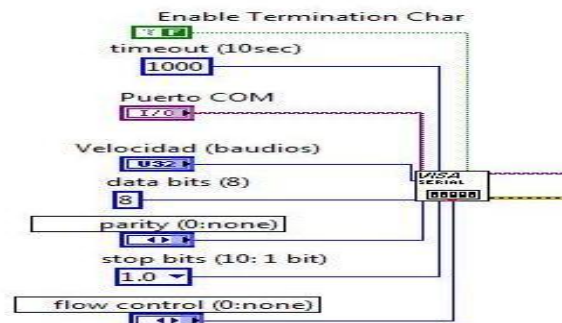
Fuente: Autores

5. INTERFAZ GRÁFICA MEDIANTE *LABVIEW 2009*

En este capítulo se indica la estructura y funcionamiento de la programación gráfica desarrollada mediante *LabView 2009*, la cual está centrada en la manipulación del puerto *USB* del PC para la comunicación con el prototipo mediante un proceso de transmisión y recepción de datos serie (*FT232*). El programa está en capacidad de indicar las mediciones realizadas por el equipo (tensión, corriente, potencia, costo equivalente, frecuencia y período) según la manipulación del usuario; también se resalta que puede ser utilizado tanto para la comunicación inalámbrica como para la comunicación cableada.

El puerto serial se configuró mediante la utilización de uno de los módulos *VISA* (*SERIAL*), este módulo permite adecuar varios parámetros referentes a este tipo de comunicación, como por ejemplo la velocidad de transmisión de los datos que para este caso es de 57600 baudios por ser la velocidad a la cual fueron programados los *XBee*. También permite seleccionar el puerto COM que se esté utilizando en el equipo de cómputo, entre otros parámetros como por ejemplo paridad, control de flujo, bits de parada, etc.

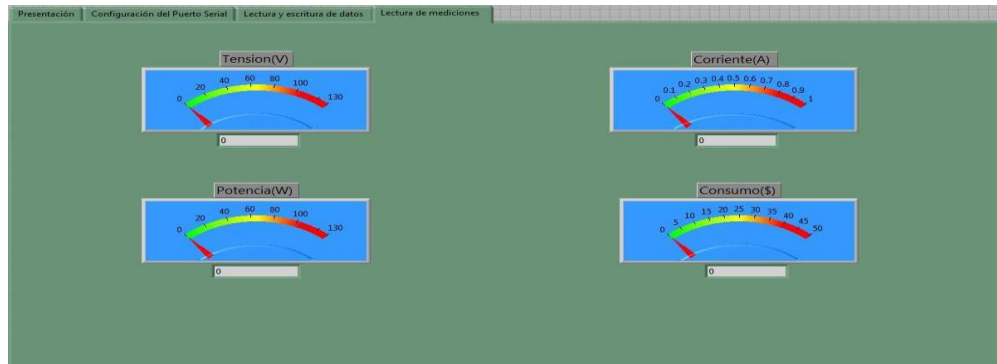
Figura 36. Configuración del puerto serie



Fuente: Autores

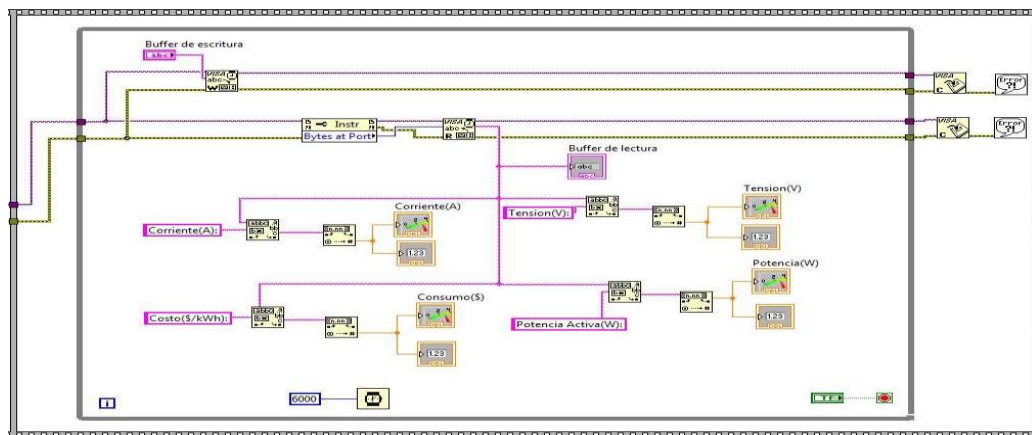
La interfaz tiene configurado un proceso de lectura y escritura mediante los bloques *VISA READ* y *VISA WRITE* respectivamente; con el bloque de lectura se lleva a cabo el procesamiento de los datos recibidos en *buffer* (mediciones) para su visualización en el panel frontal y con el bloque de escritura se puede enviar alguna orden del PC al prototipo.

Figura 37. Lectura de datos



Fuente: Autores

Figura 38. Proceso de lectura y escritura



Fuente: Autores

La estructura general del programa está regida por un ciclo *WHILE* que solo se detendrá si se oprime el botón de parada (*STOP*); del mismo modo no se producirán lecturas si éstas no son ordenadas desde el teclado del medidor.

6. PRUEBAS REALIZADAS

Se realizaron tres pruebas: la primera, consiste en la obtención de las constantes de tensión, corriente y potencia para ajustar con la mayor exactitud posible el prototipo (dentro de las posibilidades que brindan los laboratorios de la Universidad); la segunda es una prueba sobre cargas lineales y por último la prueba con carga no lineal.

6.1 OBTENCIÓN DE CONSTANTES

La idea fundamental de esta prueba es la de obtener las constantes que permitan calibrar en forma adecuada el equipo, para lo cual se realizaron variaciones de tensión y corriente sobre cargas netamente resistivas (bombillos). La toma de datos y en general todas las pruebas se contrastaron con el equipo *HAMEG HM8115-2*¹⁴ (medidor de potencia programable perteneciente al laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Industrial de Santander).

6.1.1 Constante de tensión. La carga usada para esta prueba es un bombillo de 100W; se realizaron tres (3) variaciones de tensión sobre esta carga (100V, 110V y 120V) con la finalidad de obtener la constante de tensión independientemente para cada variación para luego establecer un promedio general.

➤ **Calculo para tensiones de 100V, 110V y 120V**

Para tensiones de 100V, 110V y 120V se tiene una señal diferencial de 0,28V, 0,3V y 0,325V respectivamente a la entrada del canal. Del mismo

¹⁴ Las características técnicas del medidor pueden ser consultadas en el Anexo F.

modo se obtienen valores promedio del registro de tensión (32 bits) equivalentes a 6799961, 7414600,6 y 7939257,8 (decimal). Posteriormente, se aplica una regla de tres para obtener la constante (K_v) en cada caso.

$$V_1 = \frac{(Data\ complete) * 100}{6799961} = 0,0000147 * (Data\ complete)$$

$$K_{V1} = 0,0000147$$

$$K_{V2} = 0,0000148$$

$$K_{V3} = 0,0000151$$

6.1.2 Constante de Corriente. Necesariamente la variación de tensión (100V, 110V y 120V) sobre una misma carga generará un cambio en la corriente, con base en lo cual se hace un análisis similar al caso anterior.

➤ **Cálculo para corrientes de 0,75A, 0,79A y 0,82A**

Para corrientes de 0,75A, 0,79A y 0,82A se tiene una señal diferencial de 0,025V, 0,027V y 0,028V a la entrada del canal; del mismo modo se obtuvieron valores promedio del registro de corriente (32 bits) equivalentes a 551744,2, 582145,8 y 616061,2 (decimal); después de esto se aplica una regla de tres para obtener la constante (K_i) en cada caso.

$$I_1 = \frac{(Data\ complete) * 0,75}{551744,2} = 0,00000136 * (Data\ complete)$$

$$K_{I1} = 0,00000136$$

$$K_{I2} = 0,00000136$$

$$K_{I3} = 0,00000133$$

- Se lograron igualmente, constantes para mediciones de corriente mayores a 1A (bombillos en paralelo) con la finalidad de obtener un promedio más exacto; los resultados fueron:

4,78A:

$$K_{I4} = 0,00000132$$

7,45A:

$$K_{I5} = 0,00000132$$

9,77A:

$$K_{I6} = 0,00000133$$

6.1.3 Constante de potencia. El análisis para esta constante es el mismo que para la corriente y la tensión.

- **Cálculo para potencias de 70W, 80W y 94W**

Para potencias de 70W, 80W y 94W se tiene una medición promedio del registro de potencia (32 bits) equivalente a 199303,2, 224676,8 y 239485,4 (decimal) respectivamente; luego de lo anterior se aplica una regla de tres para obtener las constantes (K_P).

$$P_1 = \frac{(Data\ complete) * 70}{199303,2} = 0,000351 * (Data\ complete)$$

$$K_{P1} = 0,000351$$

$$K_{P2} = 0,000356$$

$$K_{P3} = 0,000392$$

- Del mismo modo se obtuvieron constantes para mediciones de potencia mayores a 100W (bombillos en paralelo) con la finalidad de obtener un promedio más exacto, cuyos resultados fueron:

526W:

$$K_{P4} = 0,000387$$

818W:

$$K_{P5} = 0,000385$$

1063W:

$$K_{P6} = 0,000388$$

Logrados los anteriores valores se procede a calcular una constante promedio para cada uno de los tres casos (tensión, corriente y potencia).

- **Constante de tensión:**

$$K_V = \frac{(0,0000147+0,0000148+0,0000151)}{3} = 0,0000149$$

- **Constante de corriente:**

$$K_I = \frac{(0,00000136 + 0,00000136 + 0,00000133 + 0,00000132 + 0,00000132 + 0,00000133)}{6} \\ = 0,00000134$$

- **Constante de potencia:**

$$K_P = \frac{(0,000351+0,000356+0,000392+0,000387+0,000385+0,000388)}{6} = 0,000376$$

Las anteriores constantes son introducidas dentro de la programación del dispositivo para poder realizar su respectiva calibración.

6.2 PRUEBAS SOBRE CARGAS LINEALES

Después de tener calibrado el prototipo con las anteriores constantes y teniendo en cuenta que el costo del kWh establecido por la ESSA es de \$381,66kWh (valor costo establecido por la CREG para el mes de agosto de 2011 en una residencia estrato 4) se llevaron a cabo las siguientes pruebas.

- **Prueba 1:** Esta prueba se realizó respecto a un bombillo de 100W; 120V ($fp=1$) en donde los porcentajes de error se establecieron teniendo en cuenta las mediciones arrojadas por el prototipo contrastadas con las realizadas por el equipo *HAMEG HM8115-2* (medidor de potencia programable) el cual posee una clase de exactitud de 0,4% para tensión, 0,4% para corriente y 0,5% para potencia activa. Se realizaron variaciones de tensión de 100V, 110V y 120V, los resultados se pueden apreciar en la siguiente tabla.

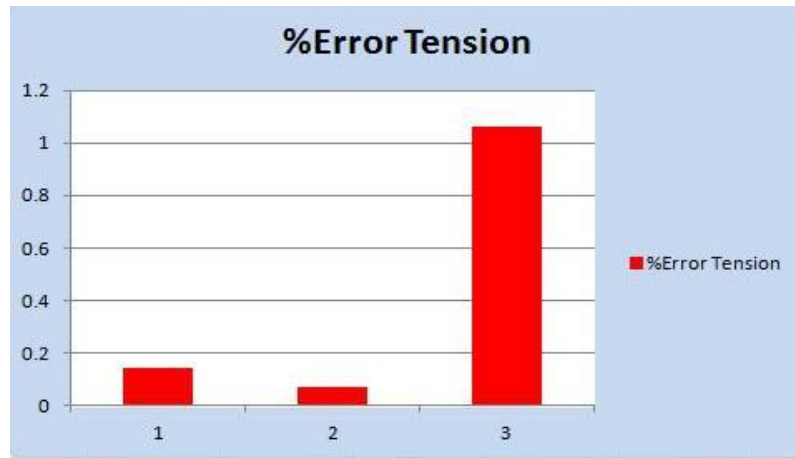
Tabla 2. Resultados para tensiones de 100V, 110V y 120V

Medición	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1	100,23	0,74	70,22
2	99,93	0,74	70,02
3	99,72	0,74	69,56
4	99,70	0,75	69,61

5	99,72	0,75	69,61
Promedio prototipo	99,86	0,74	69,80
Dispersión	0,22	5,4*10⁻³	0,29
Incertidumbre	0,10	2,4*10⁻³	0,13
HAMEG	100	0,75	70
%Error	0,14	1,33	0,28
1	110,33	0,74	79,56
2	110,11	0,74	79,23
3	110,12	0,74	79,12
4	110,09	0,74	79,06
5	109,76	0,74	78,92
Promedio prototipo	110,08	0,74	79,18
Dispersión	0,20	0	0,24
Incertidumbre	0,08	0	0,10
HAMEG	110	0,76	80
%Error	0,073	2,63	1,02
1	118,34	0,82	93,64
2	118,12	0,82	94,44
3	118,66	0,82	95,78
4	118,66	0,82	94,33
5	119,80	0,82	92,66
Promedio prototipo	118,72	0,82	94,17
Dispersión	0,64	0	1,14
Incertidumbre	0,29	0	0,51
HAMEG	120	0,82	94
%Error	1,06	0	0,18
Correlación prototipo	0,95		

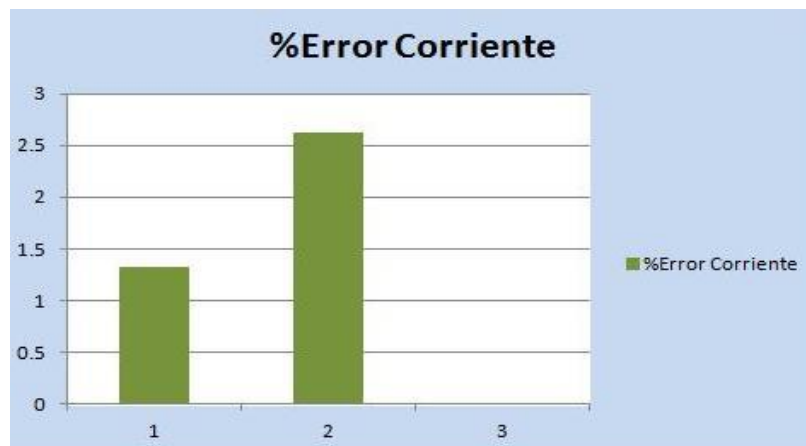
A continuación se presentan las gráficas con relación a los porcentajes de error obtenidos.

Figura 39. Errores de tensión con relación a las tres variaciones de tensión



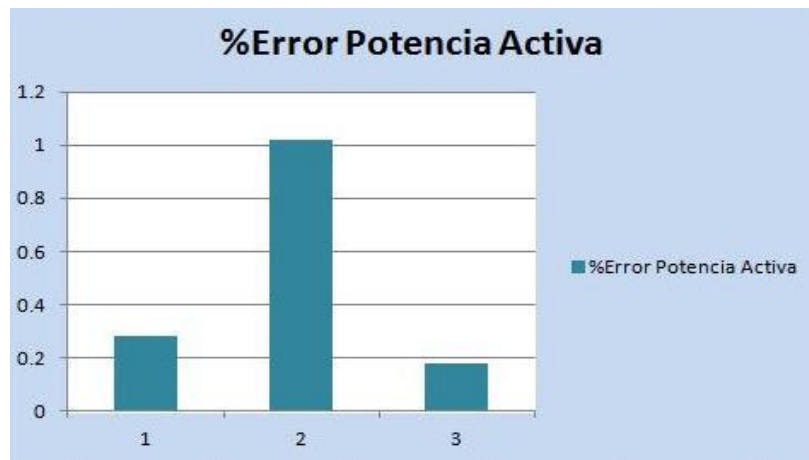
Fuente: Autores

Figura 40. Errores de corriente con relación a las tres variaciones de tensión



Fuente: Autores

Figura 41. Errores de potencia con relación a las tres variaciones de tensión



Fuente: Autores

Para comprobar la repetibilidad del equipo, se realizó la misma prueba días después, los resultados fueron:

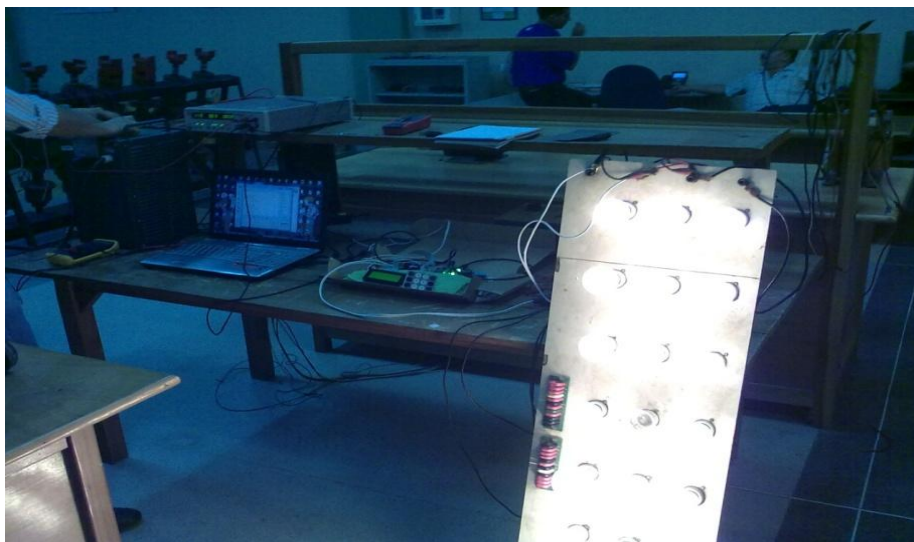
Tabla 3. Resultados para tensiones de 100V, 110V y 120V

	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Promedio prototipo	100,11	0,77	82,44
HAMEG	100	0,76	76,60
%Error	0,11	1,31	7,62
Promedio prototipo	110.40	0,79	89.56
HAMEG	110	0,79	88,10
%Error	0,36	0	1,65

Promedio prototipo	119,60	0,82	99,22
HAMEG	120	0,83	101.00
%Error	0,33	1,20	1,76
Correlación prototipo	0,98		

- **Prueba 2:** La siguiente prueba se realizó con una tensión fija de 110V y se varió la carga (lámparas en paralelo) con la finalidad de alcanzar valores de corriente más elevados en comparación con la prueba anterior.

Figura 42. Prueba sobre lámparas en paralelo



Fuente: Autores

Tabla 4. Resultados para corrientes de 4,78A, 7,45A y 9,55A

Medición	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1	110,47	4,76	533,10
2	110,49	4,76	533,23
3	110,45	4,76	533,44
4	110,40	4,76	533,22
5	110,45	4,76	532,62
Promedio prototipo	110,45	4,76	533,12
Dispersión	0,03	0	0,31
Incertidumbre	0,01	0	0,14
HAMEG	110	4,78	526
%Error	0,41	0,42	1,35
1	110,45	7,45	822,44
2	110,45	7,44	822,33
3	110,33	7,45	823,02
4	110,37	7,45	822,44
5	110,17	7,45	821,23
Promedio prototipo	110,35	7,45	822,29
Dispersión	0,11	$4,47 \cdot 10^{-3}$	0,65
Incertidumbre	0,05	$1,99 \cdot 10^{-3}$	0,29
HAMEG	110	7,45	818
%Error	0,32	0	0,52
1	110,45	9,55	1049,11
2	110,47	9,55	1049,27
3	110,48	9,55	1049,31
4	110,48	9,55	1049,35
5	110,43	9,55	1049,20

Promedio prototipo	110,46	9,55	1049,25
Dispersión	0,02	0	0,09
Incertidumbre	$9,39 \cdot 10^{-3}$	0	0,04
HAMEG	110	9,55	1048
%Error	0,42	0	0,12
Correlación prototipo	0,99		

A continuación se presentan las gráficas con relación a los porcentajes de error obtenidos.

Figura 43. Errores de tensión con relación a las tres variaciones de carga



Fuente: Autores

Figura 44. Errores de corriente con relación a las tres variaciones de carga



Fuente: Autores

Figura 45. Errores de potencia con relación a las tres variaciones de carga



Fuente: Autores

Para comprobar la repetibilidad del equipo, se realizó la misma prueba días después, los resultados fueron:

Tabla 5. Resultados para corrientes de 4,78A y 7,45A

	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Promedio prototipo	109,55	4,72	530,55
HAMEG	110	4,78	520
%Error	0,41	1,25	2,02
Promedio prototipo	109,70	7,43	822,07
HAMEG	110	7,45	816
%Error	0,27	0,26	0,74
Correlación prototipo	0,99		

- **Prueba 3:** La siguiente prueba se realizó con tensiones de 110V y 120V y se utilizaron cargas RC y RL en paralelo.

Tabla 6. Resultados para cargas RC y RL en paralelo

Medición	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
R=97Ω C=2.5μF			
1	111,67	1,08	127,33
2	111,44	1,08	127,11
3	111,62	1,08	127,21

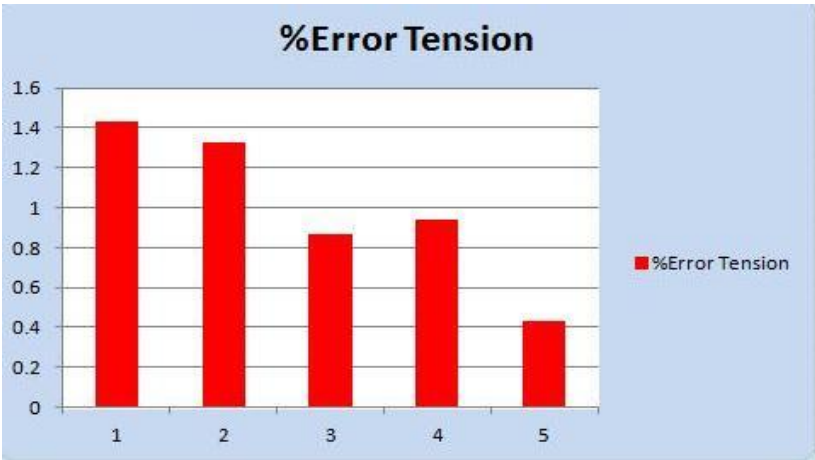
Promedio prototipo	111,58	1,08	127,22
Dispersión	0,12	0	0,11
Incertidumbre	0,07	0	0,06
HAMEG	110	1,09	121,10
Valor Teórico	110	1,13	124,74
%Error	1,43	0,92	5,05
R=97Ω C=28μF			
1	111,22	1,56	135,11
2	111,76	1,56	135,71
3	111,44	1,56	135,30
Promedio prototipo	111,47	1,56	135,37
Dispersión	0,27	0	0,31
Incertidumbre	0,15	0	0,18
HAMEG	110	1,60	132,90
Valor Teórico	110	1,62	124,74
%Error	1,33	2,50	1,85
R=32.33Ω C=84μF			
1	118,81	5,11	457,62
2	119,01	5,11	460,33
3	119,03	5,11	460,33
Promedio prototipo	118,95	5,11	459,42
Dispersión	0,12	0	1,56
Incertidumbre	0,07	0	0,90
HAMEG	120	5,10	436
Valor Teórico	120	4,87	374,26
%Error	0,87	0,19	5,37
R=97Ω L=1,56H			
1	111,12	1,11	120,44

2	110,93	1,11	120,33
3	111,07	1,11	120,33
Promedio prototipo	111,04	1,11	120,36
Dispersión	0,09	0	0,06
Incertidumbre	0,05	0	0,04
HAMEG	110	1,12	122,1
Valor Teórico	110	1,14	124,74
%Error	0,94	0,89	1,42
R=32,33Ω L=0,085H			
1	110,44	4,79	302,01
2	110,44	4,78	302,11
3	110,55	4,79	301,22
Promedio prototipo	110,47	4,79	301,78
Dispersión	0,06	5,77*10⁻³	0,48
Incertidumbre	0,03	3,33*10⁻³	0,27
HAMEG	110	4,74	388
Valor Teórico	110	4,83	374,30
%Error	0,43	1,05	22,22
R=infinita L=0,085 H			
1	110,82	3,44	25670
2	110,78	3,44	25669,61
3	110,92	3,44	25670,41
Promedio prototipo	110,84	3,44	25670
Dispersión	0,07	0	0.4
Incertidumbre	0,04	0	0,23
HAMEG	111	3,4	36
Valor Teórico	110	3,43	0
%Error	0,76	0,29	Indefinido

Correlación prototipo	0,99
----------------------------------	-------------

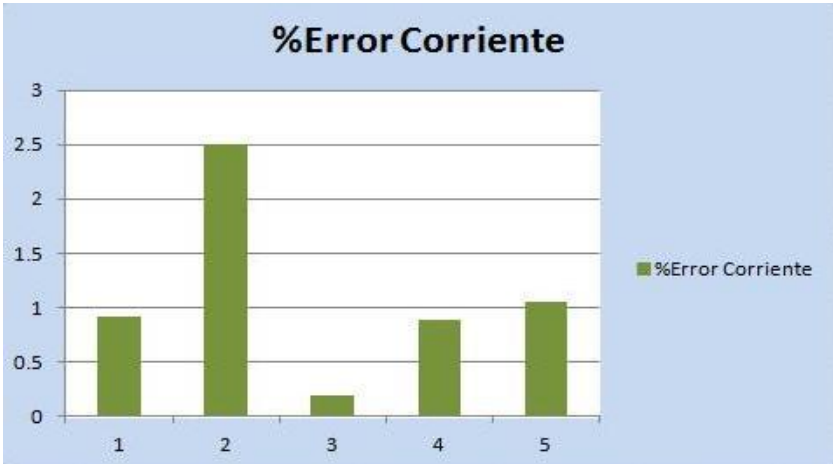
A continuación se presentan las gráficas de los porcentajes de error obtenidos.

Figura 46. Errores de tensión con relación a las cinco cargas



Fuente: Autores

Figura 47. Errores de corriente con relación a las cinco cargas



Fuente: Autores

Figura 48. Errores de potencia con relación a las cinco cargas



Fuente: Autores

- **Prueba 4:** La siguiente prueba consistió en la utilización del equipo en modo acumulador de energía, esto con la finalidad de establecer el consumo realizado por una carga resistiva en diferentes instantes de tiempo.

Tabla 7. Resultados modo acumulador de energía

	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Costo (\$)	Período (minutos)
Prototipo	110	6,34	699,6	22,11	5
Valor Teórico	110	6,36	700	22,26	5
%Error	0	0,31	0,06	0,67	
Prototipo	110	6,34	698,2	44,22	10
Valor Teórico	110	6,36	700	44,52	10

%Error	0	0,31	0,25	0,67	
Prototipo	108,90	6,34	688,1	65,11	15
Valor Teórico	110	6,36	700	66,75	15
%Error	1	0,31	1,70	2,45	
Prototipo	108,60	6,34	687,2	87,01	20
Valor Teórico	110	6,36	700	89	20
%Error	1,27	0,31	1,82	2,23	

Tabla 8. Prueba de 24 horas en el modo acumulador de energía (día uno)

Hora	Costo (\$)
9:07 am	0
10:22 am	282,222
12:14 pm	581,332
2:01 pm	866,9
4:00 pm	1339,22
6:00 pm	1731,32
8:00 pm	2106,81
6:11 am	2977,34
8:04 am	3254,82
9:07 am	3449,71

Tabla 9. Prueba de 24 horas en el modo acumulador de energía (día dos)

Hora	Costo (\$)
10:31 am	0
11:31 am	194.8
2:41 pm	765
6:16 am	2347,6
8:04 am	2585
9:07 am	2686,5
10:35 am	2973,22

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas anteriores se puede concluir lo siguiente:

- Los márgenes de error en las mediciones se atribuyen a varios factores, uno de ellos es el error introducido por los divisores resistivos (+/-5%), el error introducido por defecto por parte del *ADE7953* (0,1%), y a esto se le suma también el error del equipo usado como patrón (0,4%) para contrastar las mediciones (*HAMEG HM8115-2*) y establecer las constantes de calibración del prototipo.

- Teniendo en cuenta las variaciones sutiles que se presentan entre una medida y otra durante un período de tiempo se puede decir que existe cierto grado de imprecisión atribuible al transductor de tensión.

- Para la comprobación de la repetibilidad del prototipo se realizaron los mismos procedimientos de medición días después, utilizando los mismos instrumentos de medida y los mismos observadores, todo esto en el mismo lugar en el cual se ejecutaron las primeras pruebas (laboratorio de maquinas eléctricas).

- Con base en los resultados se puede decir que el equipo presenta una repetibilidad aceptable ya que las mediciones son similares a pesar de haber sido realizadas tiempo después (teniendo en cuenta las condiciones ya mencionadas).

- En el modo de acumulación de energía se aprecia que para periodos de tiempo no mayores a una hora se mantiene una proporcionalidad en las lecturas, sin embargo para periodos de tiempo prolongados (24 horas) se generan incrementos inesperados que afectan significativamente la medición, al no encontrarse problemas dentro de la programación del microcontrolador, se llegó a la conclusión de que el *ADE7953* presenta fallos en este tipo de medición en particular, ya que en las demás lecturas realizadas no se encontraron anomalías.

- Las diferencias encontradas en las pruebas en el modo de acumulación de energía tanto para el día uno y dos, se pueden atribuir a la inestabilidad de la red eléctrica, con la cual se alimentó el sistema para dicha prueba.

- En una de la medición de potencia con carga RL ($R=\text{inf.}\Omega$ $L=0,085H$) se identifico una inconsistencia con este dato por parte del prototipo como del *HAMEG*, dicho error se atribuye a un mal funcionamiento por parte de la carga inductiva que se utilizo, la cual podría estar dañada en alguna de las posiciones seleccionadas.

- Para el análisis de la confiabilidad del equipo se aplico el método de medida de estabilidad (*test-retest*), en donde un mismo instrumento de medición es utilizado dos veces para realizar las mismas pruebas después de cierto periodo de tiempo. La idea del método es verificar el coeficiente de correlación de Pearson (o coeficiente de confiabilidad) en las pruebas; los resultados arrojaron un coeficiente cercano a 1 (máximo de confiabilidad) lo cual indica que el equipo presenta un grado de confiabilidad bastante bueno.

- Para los cálculos de incertidumbre se tuvo en cuenta que esta se obtiene a partir de las observaciones repetidas de determinada magnitud, en donde entran a jugar factores importantes en el análisis, como es el caso de la media de los resultados individuales:

$$X_i = \bar{q} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n q_j \quad [21]$$

La dispersión (desviación estándar) de los resultados de la medición:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad [22]$$

Y finalmente la incertidumbre como el cálculo de la desviación estándar experimental de la media:

$$U(X_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad [23]$$

6.3 PRUEBAS SOBRE CARGA NO LINEAL

- **Prueba 1:** Para esta prueba se utilizó la conexión de un puente de diodos y se aplicaron cargas RC y RL.

Tabla 10. Resultados para cargas RC y RL

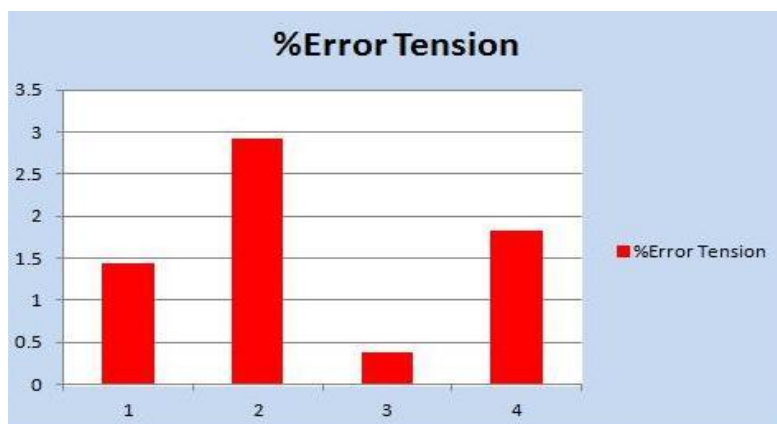
Medición	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
R=2520Ω C=84μF (Paralelo)			
1	118,33	0,13	12,23
2	118,11	0,13	12,22
3	118,40	0,13	12,33
Promedio prototipo	118,28	0,13	12,26
Dispersión	0,15	0	0,06
Incertidumbre	0,09	0	0,03
HAMEG	120	0,14	12,60
Valores simulados	120	1,13	10,44
%Error	1,43	7,14	2,69
R=279Ω C=84μF (Paralelo)			

1	116,22	1,08	86,50
2	116,66	1,09	87,44
3	116,60	1,09	87,41
Promedio prototipo	116,49	1,09	87,12
Dispersión	0,23	5,77*10⁻³	0,53
Incertidumbre	0,14	3,33*10⁻³	0,31
HAMEG	120	1,10	86,5
Valores simulados	120	1,62	97,44
%Error	2,92	0,90	0,71
R=31Ω C=84μF (Paralelo)			
1	120,00	4,56	414,01
2	120,50	4,56	423,01
3	121,10	4,56	423,00
Promedio prototipo	120,53	4,56	420,00
Dispersión	0,55	0	0,58
Incertidumbre	0,32	0	0,33
HAMEG	121	4,59	455
Valores simulados	120	4,95	487,90
%Error	0,38	0,65	7,69
R=31Ω L=4,68H (Serie)			
1	117,80	0,92	92,90
2	117,80	0,92	93,90
3	117,82	0,92	93,90
Promedio prototipo	117,80	0,92	93,56
Dispersión	0,01	0	0,57
Incertidumbre	6,35*10⁻³	0	0,33
HAMEG	120	0,94	103,60

Valores simulados	120	0,59	56,20
%Error	1,83	2,12	9,69

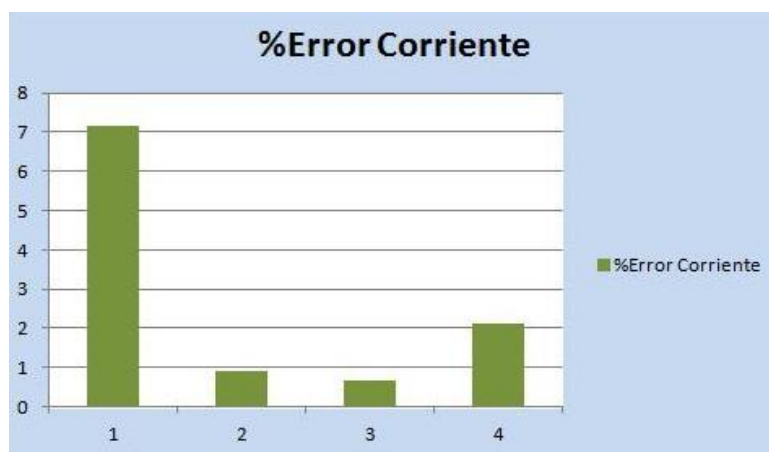
A continuación se presentan las gráficas con relación a los porcentajes de error obtenidos.

Figura 49. Errores de tensión con relación a las cuatro cargas



Fuente: Autores

Figura 50. Errores de corriente con relación a las cuatro cargas



Fuente: Autores

Figura 51. Errores de potencia con relación a las cuatro cargas



Fuente: Autores

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas anteriores se puede concluir lo siguiente:

- La presencia de componentes de continua como en el caso de un rectificador de media onda, afecta de gran forma las mediciones de corriente y potencia de este prototipo, esto se debe a que el transductor de corriente que se utilizó es un transformador de corriente el cual no está en capacidad de medir componentes de DC.
- Para obtener una mayor exactitud en las mediciones de corriente al momento de analizar cargas de tipo no lineal, es recomendable hacer uso de sensores de efecto Hall, o bobinas Rogowski ya que estos están en capacidad de medir corrientes de DC.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en todas las pruebas realizadas (cargas lineales y no lineales) en el presente capítulo, y

considerando factores como la exactitud y la precisión en las mediciones, la repetibilidad, confiabilidad, además de esto características propias del equipo como el aislamiento de las señales sensadas para la protección de este, su funcionamiento autónomo, el buen sincronismo de los diferentes periféricos que lo conforman y su fácil portabilidad, lo convierten en un prototipo seguro a la hora de conectar una carga a la cual se le quiera realizar un análisis de energía eléctrica (tensión, corriente, potencia y costo equivalente) sin llegar a perjudicar de alguna forma su buen funcionamiento, se considera también que el equipo presenta un mejor desempeño al momento de analizar cargas lineales en comparación con las no lineales .

7. CONCLUSIONES

- La utilización de circuitos integrados para la medición de energía como el *ADE7953* empleado en este proyecto resulta ser una gran ayuda, ya que sin él, la obtención y procesamiento de las mediciones sería responsabilidad del microcontrolador, lo que aumentaría el grado de complejidad de la programación.
- Se desarrolló un prototipo electrónico digital que se encuentra en capacidad de realizar mediciones de tensión, corriente, potencia activa y costo equivalente a un consumo, en relación a cargas monofásicas.
- El manejo de los tres protocolos de comunicación del microcontrolador *MC9S08JM60* (*SPI*, *I2C* y *UART*) facilita la integración de una gran gama de periféricos evitando restringir el sistema a dispositivos obsoletos presentes en la mayoría de proyectos que hasta la fecha han sido desarrollados en el área de la medición de energía.
- El prototipo está en capacidad de adquirir y digitalizar tensiones de hasta 120V y corrientes entre 0.1A y 10A; las mediciones son mediante una pantalla *LCD* y transmitidas inalámbricamente.
- Se implementó una interfaz gráfica haciendo uso de *Labview* 2009 mediante la cual se puede monitorizar las lecturas realizadas por el prototipo, haciendo uso de una conexión inalámbrica (módulos *XBee*) o cableada (*FT232RL*).

- Teniendo en cuenta que el costo equivalente a un consumo determinado varia todos los meses en función a una serie de parámetros como por ejemplo el estrato de la vivienda, es necesario hacer una calibración del medidor antes de ponerlo en funcionamiento para garantizar exactitud en este tipo de mediciones.

- Se elaboró un algoritmo capaz de procesar los datos contenidos en el *ADE7953* y de sincronizar los diferentes periféricos que conforman el prototipo.

- Se realizaron las pruebas necesarias para calibrar el prototipo tomando como patrón el equipo *HAMEG HM8115-2*, mediante el cual se establecieron comparaciones entre mediciones para obtener los respectivos márgenes de error.

8. RECOMENDACIONES

- Si es necesario cubrir una distancia mayor a 50m en interiores, entre este prototipo y el PC que actúa como receptor, se recomienda hacer uso de *XBee PRO* serie 1 o serie 2 para que el proceso de comunicación tenga mayor estabilidad, la programación de los *XBee PRO* es idéntica a la que se realizó para el caso de los *XBee* serie 1 usados en este proyecto y su conexión dentro del prototipo no varía, de modo que basta con retirar el uno y poner el otro.
- La máxima corriente que se puede sensar en este medidor de energía es de 10A. Para futuros proyectos se aconseja trabajar con sensores capaces de medir una mayor corriente como por ejemplo el sensor de efecto *hall ACS758LCB-100 (ALLEGRO)* que se caracteriza por sensar corrientes de hasta 100A. Esto se haría con el fin de poder analizar cargas industriales y de esta forma darle una mayor cobertura a este medidor de energía.
- Se recomienda la utilización del circuito integrado *ADE7953* no solo para aplicaciones que requieran medición de energía en relación a cargas monofásicas como es el caso de este proyecto sino también en otros donde se desee procesar formas de onda de tensión, corriente y potencia para visualizarlas mediante pantallas graficadoras (Osciloscopios). De igual manera, en investigaciones sobre la calidad de las señales mediante análisis de armónicos, factor de potencia, detección de cruces por cero, detección de picos, etc.

- El prototipo de medidor que se desarrolló cuenta con una ranura de expansión (*j14*) que está disponible para adecuar alguna tarjeta adicional que permita potenciar el sistema.
- El módulo *EFMJM60* puede ser removido de forma cómoda ya que está montado sobre su propia *PCB*, de modo que si este llega a presentar algún fallo simplemente habría que reemplazarlo por otro de los mismos.
- Se recomienda como una segunda fase para este prototipo la programación y adecuación de una gama más amplia de registros del *ADE7953* para poder realizar otras mediciones como potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, etc.
- Otra opción que debería ser evaluada en una segunda fase de este estudio, consiste en la realización de pruebas tomando como base un equipo patrón con una mayor exactitud que el utilizado en este proyecto (*HAMEG HM8115-2*), lo cual permitiría calibrar el equipo de mejor forma.
- La versatilidad del prototipo se puede aumentar introduciendo dentro de la programación la opción de obtener el costo del kWh dependiendo del estrato donde se realice la medición.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] ACOSTA ROMERO Jorge Alberto y CORZO SUÁREZ Edgar Alfonso. Medición de energía eléctrica usando circuitos integrados de propósito específico. Trabajo de grado Ingeniero electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2009.
- [2] ALLEGRO MICROSYSTEMS. Hall effect current sensor, ACS714 (Hoja de datos). <http://www.allegromicro.com>
- [3] ANALOG DEVICES. A power meter reference design based on the ADE7756 (Nota de aplicación).
- [4] ANALOG DEVICES. Evaluation board for the ADE7953 single phase energy metering IC (Nota de aplicación).
- [5] ANALOG DEVICES. Single phase, multifunction metering IC whit neutral current measurement, ADE7953 (Hoja de datos). <http://www.analog.com>
- [6] BOAL Jaime. “Smart Grid”, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas, 2009.
- [7] CODENSA. Medidores de energía eléctrica. Gerencia de distribución, división, ingeniería y obras. Departamento de normas, 2001.

- [8] DE LEÓN, F. y COHEN, J. Inconsistencias de las definiciones de potencia y factor de potencia en circuitos no lineales y/o desbalanceados ¿Es la norma IEEE 1459-2000 la solución? Morelia Michoacan. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de ingeniería eléctrica, 2002.
- [9] FERRADA BAUTISTA Federico Manuel y SILVA PEÑALOZA Mayra del Pilar. Medición digital de la potencia activa para un sistema de calentamiento eléctrico monofásico. Trabajo de grado Ingeniero electricista. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2005.
- [10] FREESCALE. HCS08 Microcontrollers, MC9S08JM60 (Hoja de datos). <http://freescale.com>
- [11] FTDI CHIP. FT232R USB UART IC (Hoja de datos). <http://www.ftdichip.com>
- [12] GAMEZ LAMUS Edward Yesid y QUINTERO FRIAS Oscar. Contadores de estado sólido y digitales: análisis de los algoritmos de medición de energía e índices de calidad de onda que se pueden evaluar. Trabajo de grado Ingeniero electricista. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2004.
- [13] GONZÁLEZ SUA Gabriel Eduardo. Diseño e implementación de un prototipo de contador electrónico digital trifásico de energía eléctrica para control y monitorización remota. Trabajo de grado Magíster en ingeniería electrónica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2010.

[14] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Medidores estáticos de energía clase 1 y 2. NTC 4052: 2000, Bogotá DC.

[15] LÁZARO Antonio Manuel. Labview, programación gráfica para el control de la programación, 1997.

[16] NUVOTEM TALEMA. 30 Amp current transformer, AC1020 (Hoja de datos). <http://www.talema.net>

[17] TEXAS INSTRUMENTS. Precision micropower shunt voltage reference, LM4040 (Hoja de datos).

[18] TEXAS INSTRUMENTS. Quad, low power, single supply, wideband operational amplifier, OPA4830 (Hoja de datos). <http://www.ti.com>

10. ANEXOS

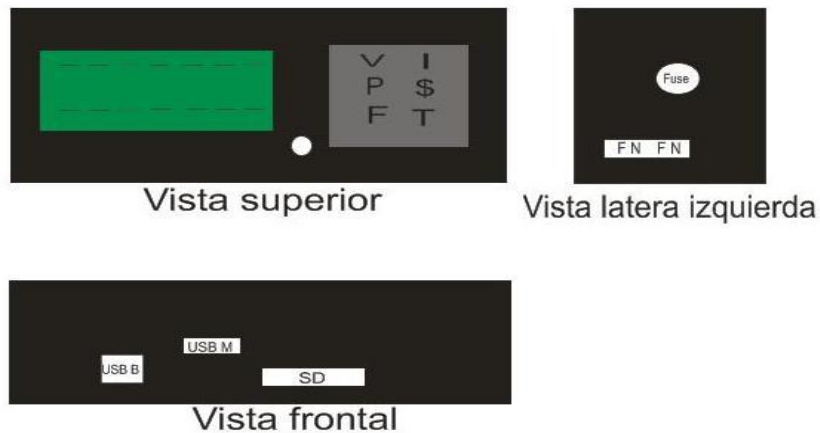
Anexo A: Manual de usuario.

A continuación se presenta el manual de usuario en relación a este medidor de energía.

Descripción general del equipo:

Este es un prototipo estático electrónico para la medición de energía eléctrica en cargas monofásicas de tipo residencial, está compuesto por una pantalla de cristal líquido para visualizar las mediciones referentes a tensión, corriente, potencia activa, costo equivalente al consumo y frecuencia; un panel táctil con 6 teclas las cuales representan de forma simbólica las medición que se encuentran habilitadas; una salida *USB* tipo B para interconexión con un equipo de cómputo que permita visualizar las mediciones mediante un cableado de hasta 8 metros; una salida mini *USB* para realizar la programación del microcontrolador; conector de memoria *SD* para almacenamiento de las mediciones; conexión inalámbrica de 100 metros mediante protocolo *ZigBee*; conectores macho y hembra para la interconexión con la carga.

Figura 1. Vistas del medidor



Fuente: Autores

Conexión con cargas:

Para analizar una carga monofásica (máximo 30A) basta con conectar el medidor a la red eléctrica (120V) mientras la carga a analizar es conectada en el medidor, también es necesario conectar un PC vía puerto *USB* para generar la alimentación del dispositivo y sus periféricos, después de esto el sistema tardará unos segundos en inicializarse para luego estar a disposición del usuario.

Modos de operación configurables por *Hardware*:

Internamente este prototipo puede ser configurado de diferentes formas mediante la conexión y desconexión de *jumpers*, una de estas configuraciones tiene que ver con la activación de los sensores de corriente, por defecto se encuentra activado el sensor *AC1020* por medio del *jumper j5* mientras que el sensor *ACS714* esta desactivado, sin embargo puede ser activado con *j4*.

Si en determinado caso es necesario entablar una comunicación serial bidireccional (del PC al medidor y del medidor al PC) será necesario activar los *jumpers j11 (XBee)* o *j3 (FT232RL)* ya que por defecto esta activa únicamente la comunicación del medidor al PC (unidireccional).

Por otra parte el puerto de expansión *j14* se encuentra disponible para la inclusión de alguna tarjeta externa que quiera ser añadida al microcontrolador para su procesamiento (es requerida una nueva programación del sistema), también se encuentra disponible la salida *j6* que ofrece la opción de extraer del *ADE7953* señales de interrupciones (*IRQ*), detección de cruces por cero (*Zx, Zx_l*) y calibración de frecuencia.

Otra opción que se encuentra disponible sobre esta tarjeta tiene que ver con la re inicialización del microcontrolador *MC9S08JM60* y del circuito integrado *ADE7953*, esto se hace mediante los pulsadores nombrados *Reset* y *Reset SW2*, operación que es necesario realizar en caso de presentarse bloqueos en el funcionamiento.

Otro punto importante es la forma de alimentación, el medidor fue diseñado para ser energizado de 2 formas, la primera es mediante el puerto mini USB del microcontrolador, activando los *jumpers j9* y *j10* y desactivando *j1* y *j2*, la segunda por medio de la red eléctrica deshabilitando *j9* y *j10* y habilitando *j1* y *j2*, esta última opción no es recomendada ya que presenta fallos.

Figura 2. *Hardware*



Fuente: Autores

Modo de programación:

Si se requiere hacer algún ajuste de programación del microcontrolador la forma adecuada de hacerlo es primero que todo conectar el medidor por medio del puerto mini *USB* a un ordenador y oprimir simultáneamente los pulsadores *Reset* y *G0* y luego soltar *G0* y después *Reset*, seguido de esto el equipo estará en modo de programación, si se requiere salir de este modo bastara con oprimir únicamente *Reset*.

Anexo B: Modos de operación del módulo *EfmJm60*.

➤ Modo de auto programador:

El prototipo que se implemento ofrece la opción de reprogramar el microcontrolador cuantas veces sea necesario si lo que se quiere es hacer un ajuste determinado del *software* o la reinstalación completa de este.

Para activar este modo de operación es necesario que el dispositivo esté conectado a un PC mediante el puerto mini *USB* y posteriormente presionar simultáneamente los pulsadores *RESET* y *PTG0*, después se debe soltar *RESET* y luego *PTG0* hasta que *Windows* reconozca el dispositivo, si esta operación se hace por primera vez en determinado ordenador es necesario esperar a que los *drivers* se instalen automáticamente para poder continuar, este paso es indispensable si lo que se quiere es cargar en el microcontrolador algún ajuste que se desee hacer del código que se propone originalmente.

➤ Modo de operación normal:

Para entrar en este modo simplemente se debe oprimir el pulsador *RESET* una sola vez, con eso bastara para que el microcontrolador ejecute los procesos que le han sido programados.

Anexo C: Listas de registros y direcciones.

Tabla 1. Registros de 8 bits

DIRECCION	REGISTRO	L/E	DEFECTO	TIPO	DESCRIPCION
0x000	SAGCYC	L/E	0x00	Sin signo	Ciclos Sag
0x001	DISNOLOAD	L/E	0x00	Sin signo	Detección de carga desactivada
0x007	PGA_V	L/E	0x00	Sin signo	Ganancia del canal de tensión
0x008	PGA_IA	L/E	0x00	Sin signo	Ganancia del canal de corriente A
0x009	PGA_IB	L/E	0x00	Sin signo	Ganancia del canal de corriente B
0x0FD	LAST_OP	R	0x00	Sin signo	Ultimo proceso de lectura o escritura
0x0FF	LAST_RWDATA	R	0x00	Sin signo	Ultimo dato leído o escrito
0x040	WRITE_PROTECTION	L/E	0x00	Sin signo	Protección de escritura

Tabla 2. Registros de 16 bits

DIRECCION	REGISTRO	L/E	DEFECTO	TIPO	DESCRIPCION
0x100	ZXTOUT	L/E	0xFFFF	Sin signo	Tiempo de cruce por cero
0x102	CONFIG	L/E	0x8004	Sin signo	Registro de configuración

0x103	CF1DEN	L/E	0x003F	Sin signo	Divisor de frecuencia 1
0x104	CF2DEN	L/E	0x003F	Sin signo	Divisor de frecuencia 2
0x108	PHCALA	L/E	0x0000	Con signo	Calibración de fase del canal A
0x109	PHCALB	L/E	0x0000	Con signo	Calibración de fase del canal B
0x10A	PFA	L	0x0000	Con signo	Factor de potencia del canal A
0x10B	PFB	L	0x0000	Con signo	Factor de potencia del canal B
0x10E	Period	L	0x0000	Sin signo	Registro del periodo
0x1FE	LAST_ADD	L	0x0000	Sin signo	Dirección del último registro acezado
0x1FF	LAST_RWDA TA	L	0x0000	Sin signo	Ultimo dato leído o escrito

Tabla 3. Registros de 24 y 32 bit

DIRECCION		REGISTRO	L/E	DEFECTO	TIPO	DESCRIPCION
24 bits	32 bits					
0x200	0x300	SAGLVL	L/E	0x000000	Sin signo	Nivel del voltaje Sag
0x201	0x301	ACCMODE	L/E	0x000000	Sin signo	Modo de acumulación
0x210	0x310	AVA	L	0x000000	Con signo	Potencia aparente del canal A
0x211	0x311	BVA	L	0x000000	Con signo	Potencia aparente del canal B

0x212	0x312	AWATT	L	0x000000	Con signo	Potencia activa del canal A
0x213	0x313	BWATT	L	0x000000	Con signo	Potencia activa del canal B
0x214	0x314	AVAR	L	0x000000	Con signo	Potencia reactiva del canal A
0x215	0x315	BVAR	L	0x000000	Con signo	Potencia reactiva del canal B
0x21A	0x31A	IRMSA	L	0x000000	Sin signo	Corriente RMS del canal A
0x21B	0x31B	IRMSB	L	0x000000	Sin signo	Corriente RMS del canal B
0x21C	0x31C	VRMS	L	0x000000	Sin signo	Tensión RMS
0x226	0x326	VPEAK	L	0x000000	Sin signo	Tensión pico
0x228	0x328	IAPEAK	L	0x000000	Sin signo	Corriente pico del canal A
0x22A	0x32A	IBPEAK	L	0x000000	Sin signo	Corriente pico del canal B
N/A	0x37F	CRC	L	0xFFFFFFFF	Sin signo	Suma de comprobación
0x287	0x387	VOS	L/E	0x000000	Con signo	Tensión de offset
0x288	0x388	VRMSOS	L/E	0x000000	Con signo	Tensión RMS de offset
0x2FF	0x3FF	LAST_RW DATA	L	0x000000	Sin signo	Ultimo dato leído o escrito

Anexo D: Distribución de pines del *ADE7953*.

Tabla 4. Descripción de pines *ADE7953*

Numero	Nombre	Descripción
1	ZX	Detección de cruces por cero del canal de tensión
2	RESET	Reinicia el sistema con un nivel bajo
3	VINTD	Tensión de referencia digital
4	DGND	Tierra digital
5, 6	IAP, IAN	Entrada analógica del canal de corriente A
7, 8	PULL_HIGH	Pines que deben estar referidos a VDD
9, 10	IBP, IBN	Entrada analógica del canal de corriente B
11, 12	VN, VP	Entrada analógica al canal de tensión
13	REF	Provee acceso a la tensión de referencia del chip
14	PULL_LOW	Debe estar conectado a AGND
15	VINTA	Tensión de referencia analógica
16	AGND	Tierra analógica
17	VDD	Fuente de alimentación (3.3V) ADE7953
18	CLKIN	Un cristal externo de 3.58MHz deber ser ubicado
19	CLKOUT	Un cristal externo de 3.58MHz deber ser ubicado
20	REVP	Potencia inversa producida
21	ZX_I	Detección de cruces por cero
22	IRQ	Interrupción
23	CF1	Calibración de frecuencia 1
24	CF2	Calibración de frecuencia 2
25	SCLK	Entrada de reloj serial
26	MISO/SDA/Tx	Datos de salida SPI/ Datos bidireccionales I2C/ Transmisión UART
27	MOSI/SCL/Rx	Datos de entrada SPI/ Interfaz serial I2C/ Recepción UART
28	CS	Chip Select

Anexo E: Distribución de pines del modulo *XBee*.

Tabla 5. Distribución de pines *XBee* serie 1

PIN	NOMBRE
1	VCC
2	DOUT
3	DIN
4	DIO12
5	RESET
6	PWM0
7	PWM1
8	Reservado
9	DTR
10	GND
11	AD4
12	CTS
13	ON
14	VREF
15	AD5
16	RTS
17	AD3
18	AD2
19	AD1
20	AD0

Anexo F: Características técnicas del medidor de potencia programable *HAMEG HM8115-2*.

Figura 3. *HAMEG HM8115-2*



Fuente: 8kW Power-Meter HM8115-2 [online]. Mainhausen (Hesse): HAMEG instruments, enero de 2001- [consultado el 17 de febrero de 2012]. Disponible en internet: <http://www.akh.se/hameg/hm81/hm8115-2.pdf>.

- Rango de potencia: 1mW a 8kW.
- Rango de tensión: 100mV a 500V.
- Rango de corriente: 1mA a 16A.
- Clase de exactitud para mediciones de tensión: +/- 0,4% (20Hz a 1kHz), DC: +/- 0,6%.
- Clase de exactitud para mediciones de corriente: +/- 0,4% (20Hz a 1kHz) , DC: +/- 0,6%.
- Clase de exactitud para mediciones de potencia activa: +/- 0,5% (20Hz a 1kHz), DC: +/-0,5%.
- Clase de exactitud para mediciones de potencia reactiva: +/- 2,5% (20Hz a 400Hz).
- Clase de exactitud para mediciones de potencia aparente: +/- 0,8% (20Hz a 1kHz).
- Conexión RS-232, IEEE-488 y USB.
- Tasa de transferencia: 9600Baudios.