

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE MEDICIÓN DE
ENERGÍA MONOFÁSICA DE USO RESIDENCIAL (S. I. M. E. M.) VERSIÓN 2.**

AUTOR

GUILLERMO ENRIQUE HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN, ESCUELA DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TRATAMIENTO DE SEÑALES,
MICROELECTRÓNICA Y SIMULACIÓN BISEMIC
BUCARAMANGA
2008**

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA MONOFÁSICA DE USO RESIDENCIAL (S. I. M. E. M.) VERSIÓN 2.

AUTOR

GUILLERMO ENRIQUE HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

Proyecto de grado para optar por título de
Ingeniero Electrónico

DIRECTORA

CLAUDIA L. RUEDA GUZMAN
Ing. Electrónico Msc. Informática

**UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN, ESCUELA DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TRATAMIENTO DE SEÑALES,
MICROELECTRÓNICA Y SIMULACIÓN BIEMIC
BUCARAMANGA
2008**

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	15
2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	16
2.1 MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA	16
2.1.1 Medidores electromecánicos	16
2.1.2 Medidores electromecánicos con registrador electrónico	16
2.1.3 Medidores totalmente electrónicos	16
2.2 MEDIDOR ELECTRÓNICO COMERCIAL DE ENERGÍA P4400	17
2.3 CONTADOR ELECTRÓNICO DE ENERGÍA RESIDENCIAL (C.E.E.R.)	18
2.4 SENSOR O TRANSDUCTOR DE CORRIENTE ELÉCTRICA	19
2.5 TIPOS DE SENSORES DE CORRIENTE	19
2.5.1 Sensor de corriente resistivo	19
2.5.2 Sensores de corriente inductivos (Transformadores de Corriente (TC))	21
2.5.3 Sensores de corriente por campo magnético (Efecto Hall)	21
2.5.4 Sensores de corriente de Bobina Rogowsky	25
2.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES DE CORRIENTE.	27
2.7 SENSOR DE CORRIENTE CSNX-25	29
2.8 INTEGRADOS DE MEDICIÓN DE ENERGÍA	30
2.8.1 Integrado de medición de energía de una sola fase, ADE7763.	33

2.9	RELOJ DE TIEMPO REAL DS1307	34
2.10	ESTÁNDAR DE COMUNICACIONES RS232	35
2.11	INTEGRADO MAX232	36
2.12	PROTOCOLO I2C	36
3	ESTRUCTURA DEL PROYECTO	38
3.1	PLANTEAMIENTO	38
3.2	OBJETIVOS GENERALES	38
3.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	38
3.4	JUSTIFICACIÓN	39
4	S.I.M.E.M.	41
4.1	DESCRIPCIÓN DETALLADA	42
4.2	HARDWARE DEL SIMEM	42
4.3	DISPOSITIVO DE MONITOREO Y CALCULO DE ENERGÍA.	43
4.4	TARJETA DEL MEDIDOR	46
4.5	EL MICROCONTROLADOR PIC18F452	49
4.5.1	Programa de operación del microcontrolador: Modo de Iniciación, Modo Normal, Modo de Configuración, Modo de Calibración, Modo de Caída de Voltaje o Apagado.	50
4.6	EL SENSOR DE CORRIENTE CSNX25	58
4.7	CIRCUITO TRAZADO PARA EL CANAL 1	62
4.8	CIRCUITO TRAZADO PARA EL CANAL 2	63
4.9	INTEGRADO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA ADE7763	64
4.9.1	Configuración y descripción de contactos	65

4.9.2	Teoría de operación	68
4.9.3	Entradas Análogas	69
4.9.4	Convertidores Análogo digital	72
4.9.5	Función de transferencia del CAD	73
4.9.6	Filtro pasa alto del canal 1	74
4.9.7	Integrador del canal 1 y el sensor de corriente	74
4.9.8	Compensación de fase	74
4.9.9	Calculo de potencia activa en el ADE7763	75
4.9.10	Calculo de energía activa en el ADE7763	79
4.9.11	Convertor de energía a frecuencia	81
4.9.12	Detección de cruce por cero	83
4.9.13	Tiempo muerto de cruce por cero	84
4.9.14	Modo de acumulación de ciclo de línea	85
4.9.15	Monitor de fuente de alimentación	86
4.9.16	Medición de periodo	87
4.9.17	Detección de caídas de voltaje	87
4.9.18	Interrupciones en el ADE7763	88
4.9.19	Circuito de referencia	89
4.9.20	Modo de acumulación solo positiva	90
4.9.21	Suspensión de funcionalidad	91
4.9.22	Interfaz serial	91
4.9.23	Características del ADE7763	96

4.9.24 Registros	97
4.9.25 Descripción de los registros	104
4.9.26 Calibrando un medidor	110
4.10 MEMORIA EEPROM 24LC512	115
4.11 RELOJ DE TIEMPO REAL DS1307	117
4.12 PUERTO RS-232	118
4.13 CONECTORES DE LA LÍNEA DE MEDICIÓN	118
4.14 FUENTE DE ALIMENTACIÓN	119
4.15 TARJETA DE INTERACCIÓN CON EL USUARIO	120
4.15.1 Visualizador LCD y teclado matricial	122
4.16 DISPOSITIVO DE COMUNICACIÓN CON EL COMPUTADOR	123
4.17 TARJETA DE COMUNICACIÓN DEL SIMEM	124
5 SOFTWARE DEL SIMEM	126
6 CALIBRACIÓN DEL SIMEM	129
6.1 CALIBRACIÓN DE CF	131
6.2 CALIBRACIÓN DE GANANCIA	133
6.3 CALIBRACIÓN DE COMPENSACIÓN	136
6.4 CALIBRACIÓN DE FASE	139
7 ANÁLISIS DE RESULTADOS	140
8 CONCLUSIONES	142
BIBLIOGRAFÍA	143

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura. 1. Imagen del medidor P4400	17
Figura. 2. Contador Electrónico de Energía Residencial	18
Figura. 3. Un modelo simple de Shunt con inductancia parasita	20
Figura. 4. Principio de un transformador de corriente	21
Figura. 5. Principio de efecto hall, sin campo magnético	22
Figura. 6. Principio de efecto Hall, con campo magnético presente	23
Figura. 7. Topología básica de un sensor de corriente de efecto hall de lazo abierto	24
Figura. 8. Topología básica de un sensor de corriente de efecto hall de lazo cerrado.	24
Figura. 9. Modelo de la bobina de Rogowski	26
Figura. 10. Medición de corriente utilizando una Bobina de Rogowski conectada a un integrador	26
Figura. 11. Sensor de corriente Honeywell CSNX 25	29
Figura. 12. Estructura de una señal por estándar RS232	35
Figura. 13. Diagrama del SIMEM	41
Figura. 14. Hardware del SIMEM	42
Figura. 15. Diagrama de las tarjetas del SIMEM	43
Figura. 16. Dispositivo de monitoreo y calculo de energía	44
Figura. 17 Tarjeta del medidor	46
Figura 18. Ubicación de los componentes de la tarjeta del medidor	47

Figura 19. Diagrama esquemático de la tarjeta de medidor	48
Figura. 20. Diagrama de flujo del programa del microcontrolador 18F452	50
Figura. 21. Esquemático de prueba del sensor CSNX25	58
Figura 22. Grafica de los valores de la tabla 5	60
Figura 23. Grafica de los valores de la tabla 6	61
Figura. 24. Circuito trazado para el canal 1	62
Figura. 25. Circuito trazado para el canal 2	63
Figura. 26. Tarjeta del circuito integrado ADE7763	64
Figura. 27. Configuración de contactos	65
Figura. 28. Diagrama de bloques de operación del ADE7763	68
Figura. 29. PGA en el canal 1	70
Figura. 30. Registro de ganancia análoga	71
Figura. 31. Efecto de la compensación en el canal 1 en el cálculo de potencia activa	71
Figura. 32. Calculo de potencia activa	76
Figura. 33. Calculo de energía activa	77
Figura. 34. Rango de salida del cálculo de potencia activa	78
Figura. 35. Escala completa de potencia para tiempo de reinicio del registro de energía	80
Figura 36. Conversión de energía a frecuencia	81
Figura. 37. Detección de cruce por cero del canal 2	82
Figura. 38. Detección de tiempo muerto por cruce por cero	83

Figura. 39. Calculo de energía en la línea de ciclo en modo de acumulación de energía	85
Figura. 40. Detección de caídas de voltaje	86
Figura.41. Salida del circuito de referencia	88
Figura. 42. Modo de acumulación solo positiva en acumulación de energía	89
Figura. 43. Direccinamiento de registros del ADE7763 vía el registro de comunicación	90
Figura. 44. Lectura de datos desde el ADE7763 vira interfaz serial	91
Figura. 45. Escritura de datos del ADE7763 vía interfaz serial	91
Figura. 46. Tiempos de escritura de interfaz serial	92
Figura. 47. Operación serial de escritura de 12 bits	93
Figura. 48. tiempos de la interfaz serial para una operación de lectura	94
Figura. 49. Registro Modo	105
Figura. 50. Registro Estados de interrupción / habilitador de interrupciones	107
Figura. 51. Registro de compensación del canal 1	108
Figura. 52. Calibración de energía activa	111
Figura. 53. Circuito de operación del reloj de tiempo real DS1307	115
Figura. 54. Fuente de alimentación de la tarjeta del medidor	117
Figura. 55. Diagrama esquemático de la fuente de alimentación de la tarjeta del medidor	117
Figura. 56. Tarjeta de iteración con el usuario	118
Figura.57. Diagrama Esquemático de la tarjeta de interacción con el usuario	119
Figura. 58. Dispositivo de comunicación con el computador	120

Figura 59. Diagrama esquemático de la tarjeta de iteración con el usuario	122
Figura 60. Panel frontal del software del SIMEM	124
Figura. 61. Configuración y manejo del puerto serial en Labview	125
Figura 62. Obtención y ordenamiento de datos de energía	126

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla. 1. Características de los sensores de corriente	28
Tabla. 2. Integrados de medición de energía de fase sencilla, con salida de Pulsos	31
Tabla. 3. Integrados de medición de energía con interfaz de puerto serial	32
Tabla. 4. Mapeo de la memoria EEPROM interna del microcontrolador	51
Tabla. 5. Datos de prueba del sensor CSNX25	59
Tabla. 6. Datos de prueba del sensor CSNX25 junto al ADE7763	60
Tabla. 7. Máximo nivel de señal de la entrada del canal 1	70
Tabla. 8. rango de corrección de compensación para el canal 1 y 2	72
Tabla. 9. Resumen de los registros del ADE7763 por direcciones	96
Tabla. 10. Registro de comunicación	103
Tabla. 11. Descripción de cada bit del registro modo	104
Tabla. 12. Bits del registro STATUS	106
Tabla. 13. Registro CH1OS	107
Tabla. 14. Palabra de datos de energía calculada por hora	113
Tabla. 15. Configuración inicial de los registro del ADE7763	129
Tabla. 16. Valores de CFDEN, CFNUM y WIDV a introducir en el ADE7763	132
Tabla. 17. Registros modificados para hallar la ganancia de vatio	132
Tabla. 18. Datos para calibración de compensación	136

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA MONOFÁSICO DE USO RESIDENCIAL (S.I.M.E.M.) VERSIÓN 2.

AUTOR(ES): GUILLERMO ENRIQUE HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): CLAUDIA LEONOR RUEDA GUZMÁN

RESUMEN

Este proyecto tuvo como finalidad diseñar y construir un prototipo de medidor electrónico de energía de uso residencial basado en el circuito integrado ADE7763. El sistema de medición mide con exactitud la energía consumida o acumulación de potencia activa en una línea de tensión secundaria bifilar monofásica de una red de distribución eléctrica donde no lo puede hacer un medidor comercial residencial. En la implementación del sistema de medición de energía, se estudia el contador electrónico de energía eléctrica residencial (primera versión). Se realiza un estudio de circuitos integrados de medición de energía pertenecientes a la firma Analog Devices, específicamente el integrado ADE7763. Se estudian sensores de corriente. Se desarrolla y construye el sistema monitoreo y medición de energía. Se realiza la calibración del dispositivo, el desarrollo del software de computador y sus respectivas pruebas. El sistema se basa en el circuito integrado de medición de energía ADE7763, un microcontrolador, un reloj de tiempo real, una memoria EEPROM y un software desarrollado en Labview. Con el propósito de que se pueda obtener datos de energía activa continuamente y en lapsos de una hora. El prototipo registra energía en un visualizador de cristal líquido para un valor máximo de hasta 99999999,999 KWh, midiendo energía por al menos 2645 años, a un voltaje de 120 voltios y una corriente de 25 amperios. Se desarrolló un software que permite al usuario interactuar con el hardware, de forma que se pueda compartir datos no perceptibles por el usuario a través de este, como lo son la energía consumida en lapsos de una hora y los datos de configuración del ADE7763. Con el prototipo se alcanzó el manejo de funciones de un medidor electrónico normal, más aquellas funciones dadas por la comunicación con un computador y el almacenamiento del registro de consumo de energía en intervalos de tiempo.

PALABRAS CLAVES: Medidores electrónicos de energía, línea de distribución, sensores de corriente.

V°B°DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN INTEGRATED SYSTEM OF SINGLE-PHASE MEASUREMENT OF ENERGY OF RESIDENTIAL USE, VERSION 2.

AUTOR(ES): GUILLERMO ENRIQUE HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): CLAUDIA LEONOR RUEDA GUZMÁN

RESUMEN

This project had as purpose of designing and of constructing a prototype of electronic measurer of energy of residential use based on integrated circuit ADE7763. The measurement system measures with exactitude the consumed energy or accumulation of active power in a line of single-phase two-wire secondary stress of a network of electrical distribution where it cannot make it a commercial residential meter. In the implementation of the measuring system of energy, the Residential Electronic Measurer of Electrical Energy studies (first version). A study of integrated circuits of measurement of energy is realised pertaining to the company Analog Devices, specifically the integrated ADE7763. Current sensors study. It is developed and it constructed to the system monitoring and measurement of energy. It is realised the calibration of the device, the development of the computer software and its respective tests. The system is based on the integrated circuit of measurement of energy ADE7763, a microcontroller, a realtime clock, a memory EEPROM and software developed in Labview V.7.1. In order that can be collected data of active energy continuously and in lapses of one hour. The prototype registers energy in a liquid crystal display for a maximum value of up to 99999999.999 KWh, measuring energy by at least 2645 years, to a nominal voltage of 120 volts and maximum current of measurement of 25 amperes. A software was developed that allows the user to interact with hardware, so that it is possible to be shared nonperceivable data by the user through this, as they are it the energy consumed in lapses of one hour and the data of configuration of the ADE7763. With the prototype the handling of functions of a normal electronic measurer was reached, plus those functions given by the communication with a computer and the storage of the registry of power consumption in time intervals.

PALABRAS CLAVES: Electronic meters of energy, distribution line, current sensors.

V°B°DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la energía eléctrica es uno de los principales factores que rigen la vida moderna y los sistemas de medición de energía juegan un papel importante en la relación económica entre las empresas generadoras, transmisoras, distribuidoras de energía y los consumidores. Por ello, se hace necesario el desarrollo de medidores electrónicos de energía que superen en funcionamiento a los medidores electromecánicos en términos de funcionalidad y utilidad.

En el pasado los primeros intentos en el diseño de medidores electrónicos de energía, derivaron de multiplicar la corriente por el voltaje en el dominio analógico para obtener potencia, pero estos dispositivos resultaron no ser muy superiores en medición a los medidores electromecánicos por variaciones con respecto a la temperatura y el tiempo. En una segunda etapa de desarrollo, estos dispositivos mejoraron al medidor electromecánico al hacer un tratamiento análogo de las señales de corriente y voltaje, acondicionándolas para luego ser llevadas en el dominio digital y así multiplicarse, conduciendo esta vez a un dispositivo con sistemas complejos y costosos a causa de la numerosa cantidad de componentes.

En la actualidad la compañía Analog Devices con una excelente reputación en el suministro y desarrollo de integrados a nivel militar y aeroespacial, dio avances en adelante en medición de energía, desarrollando circuitos integrados basados en DSP, que permiten medir energía con alta precisión incluso en condiciones variantes de tiempo y ambiente, y realizar funciones que antes eran cometidas por sistemas complejos.

Dichos avances tecnológicos en circuitos integrados son incorporados en este trabajo con el propósito de mejorar e innovar anteriores proyectos que fueron llevados a cabo en la universidad, como el diseño y construcción de un contador electrónico de energía residencial (C.E.E.R.).

Este proyecto tiene como finalidad diseñar y construir un sistema integrado de medición de energía monofásica de uso residencial basado en el circuito integrado ADE7763. El sistema de medición tiene parámetros inalterables para la medición de energía, uno de ellos es que debe medir con exactitud la energía consumida o acumulada en una línea secundaria monofásica de una red de distribución eléctrica. Las características más sobresalientes del sistema de medición serán: Su reducido tamaño, bajo costo, alta exactitud, capacidad de registro,

comunicación serial con un computador y su respectivo software. Este sistema tendrá la versatilidad de acondicionarlo en cualquier lugar para que mida el consumo de energía en sitios puntales de una vivienda u oficina, por ejemplo cuánta energía se consume en el interior de una habitación o cuánto consume un aparato eléctrico.

Para lograr el propósito de mejorar el sistema de medición de energía anteriormente realizado en la Universidad Pontificia Bolivariana, este trabajo necesitó de varias etapas antes de llegar a la implementación del sistema de medición de energía monofásico.

La primera de las etapas consistió en el estudio del contador de energía residencial, para determinar el concepto de funcionamiento de estos dispositivos.

La segunda etapa radicó en el estudio de circuitos integrados de medición de energía pertenecientes a la firma Analog Devices, con la razón de determinar qué tipo de integrado se utilizaría, para luego ser estudiado. De igual forma se realizó una investigación sobre sensores de corriente compatibles con el circuito integrado de medición de energía.

La siguiente etapa es la de desarrollo y construcción del sistema integrado de medición de energía, comprendido primordialmente por un microcontrolador, un visualizador de cristal líquido, una interfaz RS232, un reloj de tiempo real, una memoria EEPROM y el ADE7763.

Como etapa final se realiza la calibración del dispositivo, desarrollo del software del computador y pruebas al prototipo.

1 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En este trabajo se explica cómo se diseñó y construyó el prototipo de sistema de medición de energía monofásica. Se empieza con una introducción, luego la estructura del documento, el marco teórico, la explicación del hardware y software del SIMEM, calibración de medidor, y finaliza con los análisis de resultados obtenidos y conclusiones.

Este documento se concentra en siete capítulos. En los primeros dos se expone el contenido de este texto, además de lo referente al marco teórico del libro. Definiendo lo que es un medidor de energía, los medidores comerciales de hoy día, los trabajos realizados anteriormente en la universidad y toda la teoría necesaria sobre medidores de energía.

El tercer capítulo se trata de la descripción del SIMEM empezando desde el hardware que es en sí el sistema principal conformado por varios componentes explicados detalladamente en este capítulo. Posterior a este se encuentra la explicación y funcionamiento del software del sistema integrado de medición.

En el quinto capítulo se muestra el proceso de calibración del SIMEM para determinar la cantidad de energía medida por el dispositivo. Por último en los capítulos 6 y 7 se analizan los resultados y se concluye respectivamente sobre la construcción y operación de este dispositivo desarrollado.

Cabe mencionar que en el documento se enseña una serie de figuras, cálculos, tablas y diagramas que facilitan la explicación del documento sobre desarrollo y construcción del SIMEM.

2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Posteriormente se describirán las clases y tipos de medidores de energía, proyectos desarrollados anteriormente y medidores electrónicos de medición de energía.

2.1 MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los medidores de energía, técnicamente son aquellos que miden la cantidad de energía eléctrica en una carga. Existen diferentes clases de medidores de energía, que son mostrados brevemente a continuación con la intención de nombrar las características generales de estos dispositivos.

- 2.1.1 *Medidores electromecánicos o medidores de inducción*; compuestos por un conversor electromecánico (básicamente un vatímetro con su sistema móvil de giro libre) que actúa sobre un disco, cuya velocidad de giro es proporcional a la potencia demandada, y provistos de un dispositivo integrador.
- 2.1.2 *Medidores electromecánicos con registrador electrónico*: el disco giratorio del medidor de inducción se configura para generar un tren de pulsos (un valor determinado por cada rotación del disco) mediante un captador óptico que sensa marcas grabadas en su cara superior. Estos pulsos son procesados por un sistema digital el cual calcula y registra valores de energía y de demanda. El medidor y el registrador pueden estar alojados en la misma unidad o en módulos separados.
- 2.1.3 *Medidores totalmente electrónicos*: la medición de energía y el registro se realizan por medio de un proceso análogo-digital (sistema totalmente electrónico) utilizando un microprocesador, visualización digital y memorias, permitiendo así manejar datos digitales que puedan ser compartidos por otros sistemas digitales.

Cada tipo de medidor de energía se distingue en la forma como es construido de acuerdo con la tecnología utilizada, evidenciando así el desarrollo de estos dispositivos hasta la actualidad.

2.2 MEDIDOR DE ENERGÍA COMERCIAL P4400

P3 International, ofrece comercialmente en el mercado el medidor P4400 (figura 1.), este es un monitor de energía equipado con un visualizador del consumo de kilovatios hora, igual al del contador local. El monitor de energía calcula la cuenta del día, mes, incluso el año. También chequea la calidad de la potencia monitoreando el voltaje, la corriente, los VA, la frecuencia de línea, y el factor de potencia. Este dispositivo debe ser usado en sitios dentro de una edificación para medir la energía.¹

Figura. 1. Imagen del medidor P4400



http://www.p3international.com/products/images/main_p4400.jpg

El P4400 posee las siguientes especificaciones:

- Voltaje de Operación de 115VAC
- Máximo Voltaje 125VAC
- Máxima Corriente 15A
- Máxima Potencia 1875VA
- Exactitud del 0.2% en la medición.²

¹ http://www.p3international.com/manuals/p4400_manual.pdf

² <http://www.p3international.com/brochures/P4400.pdf>

2.3 CONTADOR ELECTRÓNICO DE ENERGÍA RESIDENCIAL (C.E.E.R.)

Antes de este trabajo se desarrolló el medidor de energía completamente electrónico llamado (C.E.E.R.).

Figura. 2. Contador electrónico de energía residencial



CONTRERAS, Ricardo; GARCÍA, Juan y RAMÍREZ, Carlos. Diseño de un Contador Electrónico de Energía para consumo Residencial (C.E.E.R), Universidad Pontificia Bolivariana, 2003 Pág. 129.

El contador electrónico de energía residencial (figura. 2.) es la primera versión de un medidor de energía eléctrica desarrollado en la universidad. El prototipo está diseñado para la medición de la energía consumida en una residencia. Su funcionalidad se da en tres etapas; en la primera se obtienen los datos de corriente, voltaje y ángulo de desfase en la línea residencial que se quiere medir; en la segunda se realizan los cálculos para obtener la energía consumida o potencia activa en un periodo de tiempo y en la tercera se recibe el consumo transcurrido por hora para ser debidamente almacenado en una memoria EEPROM con una capacidad máxima de almacenamiento de diez meses. Existe además una comunicación serial vía RS-232 con un computador, con el fin de que se muestre el registro de consumo hasta la fecha. En cada una de estas etapas el encargado de controlar el sistema es un microcontrolador el cual soporta las necesidades requeridas.

Adicionalmente este contador cuenta con un medio de visualización para el usuario a través de un visualizador de cristal líquido (LCD), el cual muestra los consumos de energía acumulados de la línea que este midiendo, además de

datos de fecha y hora, gracias a los datos entregados por un reloj de tiempo real (RTC) perteneciente también al contador.¹

2.4 SENSOR O TRANSDUCTOR DE CORRIENTE ELÉCTRICA.

Cualquiera que sea el sistema de medición de energía, debe tener elementos sensores de corriente y de voltaje. El sensor de corriente convierte la magnitud de corriente de una línea de distribución, a un nivel de corriente o voltaje directamente equivalente. El sensor de corriente requiere de un rango dinámico extenso de medición, sino también necesita manejar un rango de frecuencia de acuerdo al sistema de medición desarrollado.²

2.5 TIPOS DE SENSORES DE CORRIENTE

Los cuatro tipos de sensores más comunes para la medición de corriente hoy día son:

- Resistivos: Shunt. Una resistencia provoca una caída de tensión proporcional a la corriente que circula por dicha resistencia Shunt.
- Inductivos: Transformadores de Corriente. El cable a medir pasa por medio de un núcleo magnético que tiene bobinado un secundario que proporciona una tensión proporcional a la corriente que circula por el cable.
- Magnéticos (Efecto Hall): El sensor mide el campo magnético de un núcleo, generado por la corriente que circula por el cable a medir, que bobina al núcleo.
- Bobina Rogowsky: Miden los cambios de campo magnético alrededor de un hilo por el que circula una corriente para producir una señal de voltaje que es proporcional a la derivada de la corriente (di/dt).³

2.5.1 Sensor de corriente resistivo.

Las resistencias “shunt” proporcionan una medición precisa y directa de la corriente, pero no ofrecen ningún aislamiento galvánico.

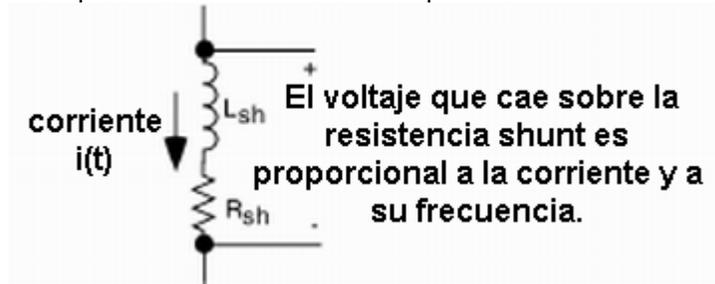
¹ CONTRERAS, Ricardo; GARCÍA, Juan y RAMÍREZ, Carlos. Diseño de un Contador Electrónico de Energía para consumo Residencial (C.E.E.R), Universidad Pontificia Bolivariana, 2003 Pág. 129.

² KOON, William. Current sensing for energy metering. USA: Analog Devices, Inc. Pág. 1.

³ <www.jcee.upc.es/JCEE2002/MAYNEPONENCIA.pdf>. Pág. 50.

La corriente shunt es la solución menos costosa disponible hoy día para la medición de corriente. Un modelo simple para la medición de corriente es mostrado en la figura.

Figura. 3. Un modelo simple de Shunt con inductancia parasita.



KOON, William. Medición de corriente para medidores de energía. Analog Devices, Inc. Pág. 2.

Un Shunt está conformado por una resistencia de precisión de valor óhmico por el cual pasa una corriente $i(t)$, permitiendo que un voltaje proporcional a la corriente y a su frecuencia caiga entre los terminales de la resistencia shunt.

La baja resistencia de corriente de shunt ofrece buena exactitud a bajo costo y la medición de corriente es simple. Cuando hablamos de alta precisión en la medición de corriente, se debe considerar la inductancia parásita del shunt. La inductancia es típica en el orden de solo unos pocos nanos henrios. Esto afecta en la magnitud de las impedancias del shunt a frecuencias relativamente altas. Sin embargo, su efecto sobre la fase es suficientemente importante incluso en la frecuencia de línea, para causar un notable error a un factor de potencia bajo.

La resistencia de Shunt es algo confiable y barato. Es una elección popular para medidores de energía. Sin embargo, porque la corriente de shunt es fundamentalmente un elemento resistivo, el calor generado en la resistencia es proporcional a la corriente que pasa a través de ella. Este problema de calentamiento hace que el shunt rara vez sea utilizado para la medición de corrientes altas.

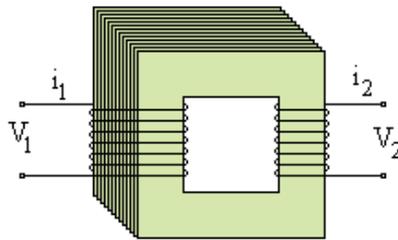
Al seleccionar una resistencia “shunt” para la medición de corriente; esta debe tener un valor muy bajo de resistencia para minimizar la disipación de potencia, un valor bajo de inductancia y una tolerancia razonable pequeña para mantener una precisión global en el circuito. Aunque al bajar el valor de la resistencia, el sensor de corriente, disminuye la disipación de potencia, también disminuye el voltaje de salida a fondo de escala aplicado. Si la resistencia del sensor es demasiado pequeña, el offset de entrada se puede hacer porcentual mente grande a fondo de escala.¹

¹ KOON, William. Medición de corriente para medidores de energía. Analog Devices, Inc. Pág. 2-4.

2.5.2 Sensores de corriente inductivos (Transformadores de corriente (TC))

El transformador de corriente (TC) es un transformador como se muestra en la figura. 4. Utiliza el principio de un transformador el cual convierte la corriente primaria a una corriente secundaria más pequeña. La función de un transformador de corriente es la de reducir la corriente de un sistema eléctrico a valores normales y no peligrosos, con el fin de permitir el empleo de aparatos de medición normalizados, mas económicos y que pueden manipularse sin peligro.

Figura. 4. Principio de un transformador de corriente.



<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/acoplados/acoplados2.gif>

Un transformador de corriente es un transformador de medición, donde la corriente secundaria está, dentro de las condiciones normales de operación, prácticamente un valor de corriente normalizado proporcional a la corriente primaria, y desfasada de ella un ángulo cercano a cero.

El TC es el sensor más común hoy día entre los medidores de energía de estado sólido de alta corriente. El transformador de corriente puede medir con muy alta precisión y consume poca energía. Adicionalmente, el material de ferrita usado en el núcleo puede saturarse a altas corrientes. Una vez magnetizado, el núcleo contendría histéresis y la exactitud podría decaer a menos que sea desmagnetizado de nuevo. La saturación del TC puede ocurrir cuando la corriente aumenta más allá de la corriente que puede medir del transformador de corriente, o cuando hay una componente cuantiosa de DC en la corriente. Hoy día la solución para los problemas de saturación está en usar en el núcleo un material de ferrita con alta permeabilidad.¹

2.5.3 Sensores de corriente por campo magnético (Efecto Hall)

El efecto Hall fue descubierto por el Doctor Edwin Hall en 1879. Hall estuvo atento

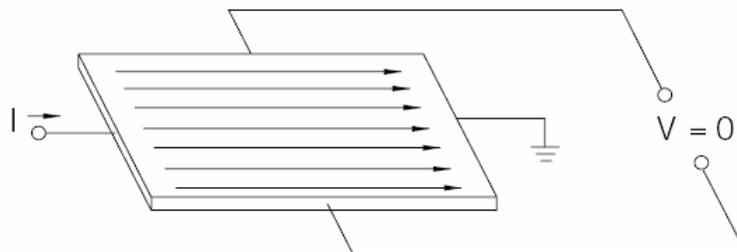
¹ KOON, William. Medición de corriente para medidores de energía. USA: Analog Devices, Inc. Pág. 2-4.

en verificar la teoría del flujo de electrones propuesta por Kelvin algunos 30 años atrás. El Doctor Hall encontró que cuando un imán fue colocado de modo que su campo era perpendicular a una cara de un rectángulo delgado de oro por el cual fluía corriente, una diferencia en el potencial apareció en los bordes de enfrente. Él encontró que este voltaje era proporcional a la corriente que fluye por el conductor y la densidad de flujo o la inducción magnética perpendicular al conductor.

El principio de medición de la corriente con un sensor magneto-resistivo es directo. Si una corriente “ i ”, que fluye a través de un hilo, genera un campo magnético “ H ” alrededor del mismo que es directamente proporcional a la corriente. Midiendo la intensidad de este campo magnético con un sensor magneto-resistivo, se puede determinar exactamente la corriente.

Cuando un conductor lleva una corriente, esta produce un campo magnético, y se genera un voltaje que es perpendicular tanto para la corriente como para el campo. Este principio es conocido como el efecto Hall.

Figura. 5. Principio de efecto Hall, sin campo magnético.

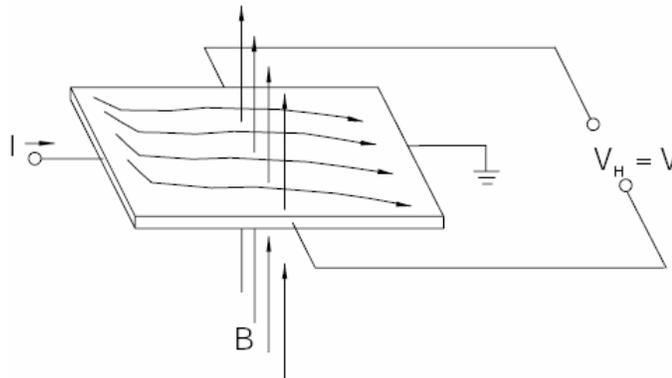


Medición y Aplicación de Efecto Hall, Honeywell, www.honeywell.com Pág.3.

En la figura 5 se ilustra el principio básico del efecto Hall. Este muestra un material semiconductor (Elemento Hall) por el cual le atraviesa una corriente. La conexión de salida es perpendicular a la dirección de la corriente. Cuando no hay un campo magnético presente, la distribución de la corriente es uniforme y no hay diferencia de potencial vista en la salida.

Cuando un campo perpendicular está presente, como se muestra en la figura 6, una fuerza de Lorentz es ejercida sobre la corriente. Esta fuerza perturba la distribución de la corriente, resultando una diferencia de potencial (Voltaje) a través de la salida. Este voltaje es el voltaje de Hall (V_h).

Figura. 6. Principio de efecto Hall, con campo magnético presente.



Medición y Aplicación de Efecto Hall, Honeywell, www.honeywell.com Pág.4.

El elemento Hall es básicamente un sensor magnético. Este requiere de acondicionador de señal para hacer que la salida sea usada para la mayoría de las aplicaciones.¹

La sensibilidad de los sensores magneto-resistivos se puede ajustar fácilmente, utilizando diferentes configuraciones, un sensor individual se puede optimizar para una aplicación de medición de corriente específica. Los factores que afectan a la precisión son las tolerancias mecánicas (tales como la distancia entre el sensor y el conductor que lleva la corriente primaria), la desviación de la temperatura y la sensibilidad electrónica de la etapa acondicionadora.

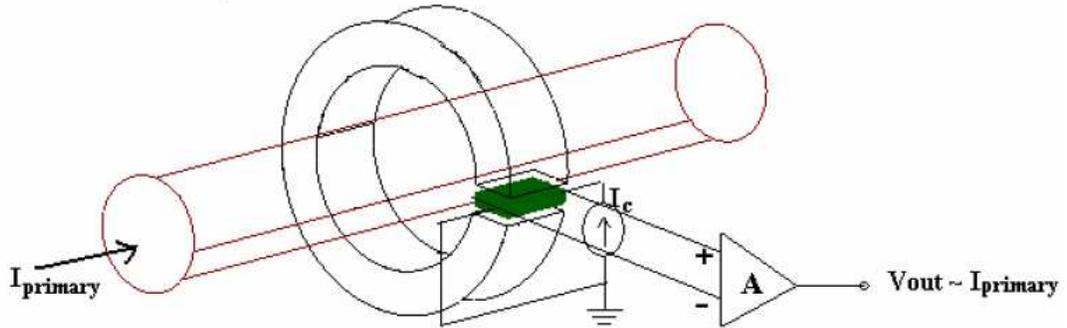
Existen dos tipos principales de sensores de Efecto Hall: de lazo abierto (open-loop) y de lazo cerrado (Close-loop). El segundo ofrece mejor precisión pero a un costo mayor, y la mayoría de los sensores de efecto hall que se encuentran en medidores de energía usan el diseño de anillo abierto para lograr costos más bajos. Estos sensores tienen una excelente respuesta a frecuencia y están capacitados para medir corrientes muy altas.

En una topología de lazo abierto (open-loop), el elemento Hall de salida es simplemente un amplificador y la salida es leída por un voltaje de medición que representa la medición de corriente a través de un factor de escala representado en la figura 7.

¹

<http://www.honeywell.hu/sensing/catalogues/Hall%20Effect%20Sensing%20And%20Application%20Handbook.pdf>, Hall effect sensing and application, Pág. 3, 4.

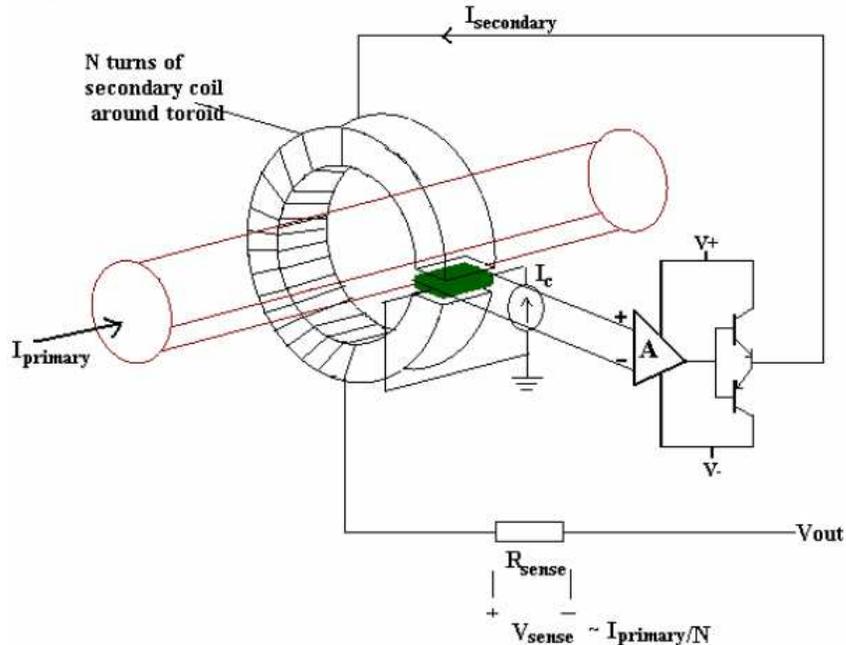
Figura. 7. Topología básica de un sensor de corriente de efecto Hall de lazo abierto.



Richard Dickinson & Shaun Milano, Sensor de corriente aislado de lazo abierto utilizando el efecto Hall, Tecnología en optimización de circuitos magnéticos, Allegro MicroSystems, Inc. Pág. 3.

En una topología de lazo cerrado, la salida del elemento Hall maneja una bobina secundaria que generará un campo magnético para cancelar el campo de la corriente primaria. La corriente secundaria, es proporcional en escala a la corriente primaria por la proporción de la bobina secundaria. Que puede medirse a través de un voltaje en la resistencia de salida del sensor, tal como se muestra en la figura 8.

Figura. 8. Topología básica de un sensor de corriente de efecto Hall de lazo cerrado.



Richard Dickinson & Shaun Milano, Sensor de corriente aislado de lazo abierto utilizando el efecto Hall, Tecnología en optimización de circuitos magnéticos, Allegro MicroSystems, Inc. Pág. 3.

Por mantener el campo resultante en cero, los errores asociados con el flujo de compensación o niveles de voltaje por la temperatura, el flujo de sensibilidad y la saturación del corazón magnético también serán eficientemente cancelados. El sensor de corriente de efecto hall de lazo cerrado también provee la respuesta más rápida en el tiempo. Sin embargo, con el uso de una bobina secundaria se hace necesario manejar unos miliamperios de corriente, haciendo que el consumo de potencia sea mucho más alto en un dispositivo de efecto hall de topología de lazo cerrado que en uno de lazo abierto. La configuración de lazo cerrado también tiene sus límites de magnitud de corriente que puede ser medida desde el dispositivo sólo porque maneja una cantidad finita de compensación de corriente.¹

2.5.4 Sensores de corriente de Bobina Rogowsky

Una bobina Rogowski es un inductor el cual tiene inductancia mutua con el conductor que lleva la corriente primaria (Figura 9). La bobina Rogowski es normalmente hecha por una bobina con núcleo de aire de forma que no haya histéresis, saturación y que hace que la señal de salida del este sensor no sea igual a la señal de la línea.²

La bobina de Rogowski es usada para la medición de corriente alterna. Ella trabaja midiendo el campo magnético (B) causado por la corriente (i(t)) sin necesidad de hacer contacto eléctrico con el conductor. Esta bobina ha sido usada en varias formas para detectar y medir corrientes eléctricas por décadas pero sólo hasta años recientes, está siendo potencialmente hecha a escala comercial.

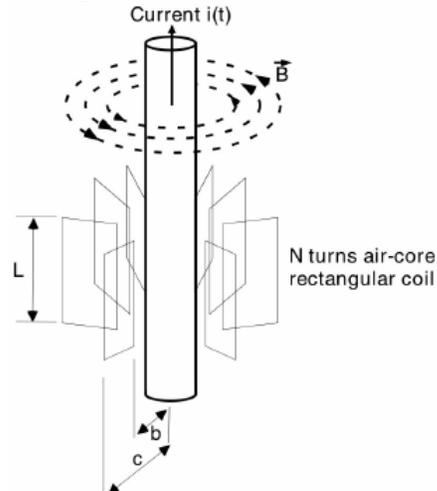
Este sensor opera bajo un principio simple. En una bobina de núcleo de aire con forma toroidal y N vueltas, es colocado alrededor de un conductor. Cuando una corriente pasa a través del conductor, este induce un campo magnético alterno que produce un voltaje en los borde de la bobina de núcleo de aire. La bobina es eficazmente una inductancia mutua acoplada al conductor medido y el voltaje de salida es proporcional a la rata de cambio de la corriente. El voltaje de salida de la bobina son solamente valores di/dt que cambian de acuerdo a la corriente primaria, por eso a este transductor se le debe integrar el voltaje de salida, para proveer una salida que pueda reproducir la forma de onda de la corriente.

Para proveer una salida del sensor que reproduzca la forma de onda de la corriente, la combinación de bobina e integrador en la figura 10 provee un sistema donde la salida es independiente de la frecuencia, el cual permite tener exactitud

¹ Richard Dickinson & Shaun Milano, Sensor de corriente aislado de lazo abierto utilizando el efecto Hall, Tecnología en optimización de circuitos magnéticos, Allegro MicroSystems, Inc. Pág. 2, 3.

² KOON, William. Medición de corriente para medidores de energía. Analog Devices, Inc. Pág. 5.

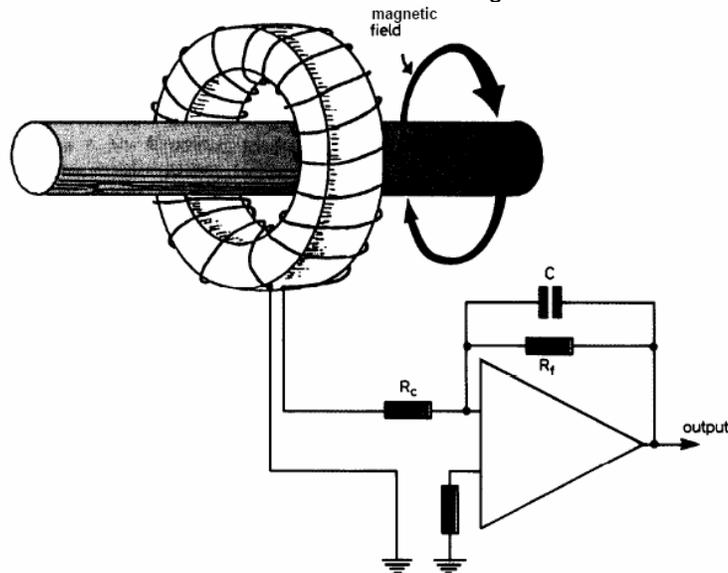
Figura. 9. Modelo de la bobina de Rogowski



KOON, William. Medición de corriente para medidores de energía. Analog Devices, Inc. Pág. 5.

de respuesta de fase, y el cual permite la medición de formas de onda de corriente complejas. La salida del integrador puede ser usado con cualquier forma de dispositivo de indicación electrónica como un voltímetro, osciloscopio, sistemas de protección o equipo de medición.

Figura. 10. Medición de corriente utilizando una bobina de Rogowski conectada a un integrador



David A. Ward and John La T. Exon, Utilizando Bobina de Rogoski como transductor de corriente en mediciones, IEE Engineering and Science Journal, June 1993, Pág. 107.

Adicionalmente, este tipo de sensor puede fácilmente ser usado para medir corriente por encima de miles de amperios. Esto es el porque este sensor es muy usado en varias aplicaciones de medición de corrientes altas. Al no tener este

sensor un núcleo de hierro, este posee linealidad sobre un muy amplio rango de medición (desde cientos de amperios hasta miliamperios).

Debido a que la bobina Rogowski es confiable en medición de campos magnéticos, esto hace que este tipo de sensor sea susceptible a campos magnéticos externos.¹

2.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES DE CORRIENTE.

Las principales características que debe poseer un sensor de corriente para el diseño de un sistema de medición de energía son:

Rango de medición de corriente: Establece la escala de aproximación de medición de corriente de línea en que se encuentra el medidor, su valor de rango de medición depende de la cantidad de energía que debe medir en el sistema, que de acuerdo a los criterios de diseño de este prototipo son el de consumo promedio de un hogar.

Costo: Entre menos costoso sea el sensor menos costoso será el medidor de energía para una posible construcción en serie.

Linealidad sobre rango de medición: Este sensor debe tener linealidad en su respuesta, esto quiere decir que la señal de salida del sensor debe ser proporcional con respecto a la señal de corriente de la línea que este midiendo el sensor.

Consumo de potencia: El sensor de corriente debe consumir la menor cantidad de energía necesaria para realizar la medición.

Problemas de saturación de corriente alta: Es necesario que este sensor de corriente en su señal de salida no se sature para valores superiores al valor máximo de medición de corriente de línea para el cual el sensor fue elaborado.

Variación de la salida con respecto a la temperatura: Es preciso que este sensor sea lo más exacto posible ante cambios de temperatura. Esto significa que el sensor debe realizar mediciones con exactitud y sobre un rango de temperatura, especificado por el fabricante. Entre menor sea el impacto de la temperatura sobre la exactitud del sensor mejor será el sensor.

Nivel de Offset: Es inevitable que un sensor de corriente posea la menor cantidad de offset en la señal de salida a escala completa, por la medición de corriente.

¹ David A. Ward and John La T. Exon, Using Rogowski coil for Transient current measurements, IEE Engineering and Science Journal, June 1993. Pág. 105-113.

Saturación e histéresis: Es importante que este sensor no tenga histéresis por medición de corriente ya hechas, ni tampoco saturación por la histéresis, porque la señal de salida del sensor alcanzaría su valor superior antes de llegar al valor máximo de corriente de la línea para el cual el sensor fue hecho.

Exactitud: Es vital que el sensor de corriente sea lo más exacto posible, ya que este prototipo es un sistema de medición.

La tabla 1 muestra las fortalezas y debilidades de las características antes mencionadas.

Tabla 1. Características de los sensores de corriente.

Sensores de corriente	Resistencia de shunt	Transformador de corriente	Sensor de efecto hall	<i>Bobina de Rogowski</i>
Costo	Bastante bajo	Medio	Alto	<i>Bajo</i>
Linealidad sobre rango de medición	Bastante bueno	Regular	Pobre	<i>Bastante bueno</i>
Capacidad de medición de alta corriente	Bastante pobre	Bien	Bien	<i>Bastante bueno</i>
Consumo de potencia	Alto	Bajo	Medio	<i>Bajo</i>
Problema de saturación a alta corriente	No	Sí	Sí	<i>No</i>
Variación de salida con respecto a la temperatura	Medio	Bajo	Alto	<i>Bastante bajo</i>
Problema de Offset	Sí	No	Sí	<i>No</i>
<i>Saturación y problemas de histéresis.</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>No</i>

KOON, William. Current sensing for energy metering. Analog Devices, Inc. Pág. 9.

De la tabla 1 se concluye que la bobina de Rogowski, combinado con un integrador digital, ofrece un costo de competitivo de tecnología de sensores de corriente. De manera contraria el único tipo de sensor no recomendado para la

medición de corriente sería la resistencia de Shunt, por su alto consumo de potencia y disipación de calor.¹

2.7 SENSOR DE CORRIENTE MAGNETO RESISTIVO DE LAZO CERRADO - HONEYWELL CSNX25

El CSNX25 es un sensor de corriente de alto desempeño y de alta exactitud en aplicaciones de medición de corriente. Este es un sensor de campo magnético o de Efecto hall, de lazo cerrado.

Figura. 11. Sensor de corriente Honeywell CSNX 25.



Fotografía del sensor de corriente Honeyweel CSNX25.

El sensor de corriente utiliza circuitos integrados de aplicación específica y un sensor magnético magneto resistivo Honeywell proveyendo extremadamente bajos niveles de voltaje offset ocasionados por la temperatura, con resultados de temperatura estable y exactitud en la medición.

El sensor opera desde una fuente unipolar de +5 voltios y posee un acceso a un voltaje de referencia de 2.5 voltios. El sensor puede operar con el voltaje de referencia interno o a un voltaje de referencia externo, esto permite que el sensor pueda ser utilizado sin que haya variaciones en la medición ocasionada por el offset. Los tres primeros contactos habilitan al sensor a ser configurado para diferentes rangos de medición y la señal de corriente de salida permite diferentes cargas resistivas para ser usada dependiendo de la aplicación.

Este sensor puede ser utilizado en manejadores de servos, discos de velocidad variable, convertidores de frecuencia, sistemas de fuente de alimentación, sistemas de protección de corriente, fuente de alimentación ininterrumpidas (UPS) y medidores de potencia.

¹ KOON, William. Current sensing for energy metering. Analog Devices, Inc. Pág. 9.

Las principales características del sensor CSNX25 son:

- Ultra bajo offset por temperatura.
- Fuente de alimentación unipolar.
- Exactitud sobre un rango de temperatura entre los -40 a 85 grados Celsius
- Ajuste individual de ganancia.
- Acceso a voltaje de referencia.
- Rápida calibración.
- Salida de corriente.
- Diseñado para auto configurarse.¹

2.8 INTEGRADOS DE MEDICIÓN DE ENERGÍA.

Los circuitos integrados de medición de energía de Analog Devices son referenciados por su siglas en inglés ADE (Analog Devices Energy). Estos dispositivos poseen el mejor rendimiento en su clase a costos atractivos, ofreciendo soluciones para sistemas polifásicos o monofásicos, este último en medición de energía o en comunicación de datos.

En detalle los circuitos integrados ADE digitalizan señales de corriente y voltaje por medio de CADs (convertidores análogo-a-digital) antes de hacer los cálculos de energía. El procesamiento de señal digital de las señales permite un cálculo estable y exacto por encima de las variaciones de tiempo y medio ambiente.

Analog Devices, inc. ofrece en el mercado, la familia ADE, con una gran variedad de integrados capaces de resolver la gran gama de variaciones de configuraciones de sistemas de medición en el mundo, incluyendo la de este trabajo. Permitiendo a diseñadores escoger componentes diferentes de la familia dependiendo del tipo de medidor que se desea construir. La familia de integrados ADE se divide en dos grupos, la de medición de energía monofásica y la de polifásica, donde cada uno de estos grupos posee subgrupos con varios tipos de integrados. El grupo de medición monofásica tiene dos subgrupos que son explicados a continuación como posibles soluciones a este trabajo.

Los circuitos integrados del primer subgrupo tienen la particularidad de generar una salida de pulsos proporcional a la cantidad de energía eléctrica consumida. Como se puede apreciar en la tabla 2, este grupo posee varios circuitos integrados con diferentes características.

¹ Hoja Característica. Sensor de corriente magneto resistivo CSNX 25. 2003. www.honeywell.com/sensing
<www.honeywell.hu/sensing/catalogues/CSN%20Series%20Magneto-resistive%20Closed%20Loop.pdf>

Tabla. 2. Integrados de medición de energía de fase sencilla, con salida de pulsos

ADE	7751	7755	7757A	7768	7769	7760	7761
Fases							
Una fase dos cables	x	x	x	x	x	x	x
Transductor de corriente.							
Shunts y Transformadores de corriente	x	x	x	x	x	x	x
Características Principales							
Energía activa	x	x	x	x	x	x	x
Salida de alta frecuencia	x	x	x	x	x	x	x
Pulso baja frecuencia	x	x	x	x	x	x	x
Calibración por hardware	x	x	x	x	x	x	x
Facturación tolerante a fallos	x						x
Oscilador integrado			x	x	x	x	x
Indicación de potencia inversa	x	x		x	x	x	x
Acumulación solo positiva					x		
Indicación de no carga						x	
Tipo de encapsulado							
SSOP	24 pines	24 pines					20 pines
SOIC			16 pines	16 pines	16 pines	16 pines	

Página Web del Analog Devices Inc.

<<http://www.analog.com/en/subCat/0,2879,760%255F790%255F0%255F%255F0%255F,00.html>>

El grupo de integrados presentado en la tabla 2 está diseñado para controlar en forma directa un contador con motor electrónico de pasos (motor paso a paso). En términos de costos, el motor electrónico de pasos es popular porque brinda una manera práctica para construir un medidor de estado sólido económico. Cuando hay una falla en el fluido eléctrico el contador simplemente deja de girar. Otras soluciones como pantallas (displays) de diodos emisores de luz (LEDs) o pantallas de cristal líquido (LCDs) requieren controladores (drivers) de segmentos encendidos y métodos para almacenar las lecturas durante las pérdidas del fluido eléctrico.

Tabla. 3. Integrados de medición de energía con interfaz de puerto serial.

	ADE7753	ADE7756	ADE7759	ADE7763
Fases				
Fase sola, 2 cables	x	x	x	x
Interfaz				
Shunts, transformador de corriente, efecto hall.	x	x	x	x
Bobina de rogowski	x		x	x
Características principales				
Energía Activa	x	x	x	x
Energía aparente, Vrms y Irms	x			x
Energía Reactiva	x			
Salida de pulso de alta frecuencia.	x	x	x	x
Interfaz serial y calibración por software.	x	x	x	x
Salida lógica de cruce por cero	x	x	x	x
Modo de acumulación solo positiva	x			x
Supervisión de calidad de potencia	x	x	x	x
Opciones de encapsulado				
SSOP SOIC	20-pines	20-pines	20-pines	20-pines

Página Web del Analog Devices Inc.

<<http://www.analog.com/en/subCat/0,2879,760%255F790%255F0%255F%255F0%255F,00.html>>

Los circuitos integrados con salida de pulsos proporcional a la energía, anteceden al segundo subgrupo de integrados de medición, pues poseen una interfaz de puerto serie que permite las comunicaciones bidireccionales con microprocesadores. En la tabla 3 se hace una comparación de los integrados pertenecientes al segundo subgrupo.

Como se puede ver en la tabla 3, los integrados de medición de energía que poseen un puerto de comunicación serie. Posibilitan además de la acumulación de energía, el monitoreo de esta a través de la medición de valores RMS y pico tanto de la corriente como la del voltaje, medición de energía aparente, VA y la frecuencia. Adicional al puerto de comunicación serie, estos integrados tienen una salida de pulsos igual a la del primer subgrupo de integrados de medición de energía monofásico. Sólo que los pulsos de salida en vez de hacer girar un motor paso a paso para cuantiar una cantidad de energía, estos van al microprocesador indicando una interrupción que determina el tipo de acción que debe tomar el microprocesador.

Continuando con el desarrollo de dispositivos de medición de energía, Analog Devices, Inc. ha desarrollado recientemente circuitos integrados mejores que el usado en este trabajo, que ayudan a reducir los costos de los medidores de energía al tener soluciones de bajo costo para las fuentes de potencia, los transductores de corriente, los osciladores, y la calibración externa de ganancia. En última instancia, estos productos son altamente integrados diseñados para lograr las agresivas metas de costos con una gran cantidad de elementos de funcionalidad al trabajar estrechamente con empresas fabricantes de medidores y distribuidores de energía. Los circuitos integrados mencionados no fueron estudiados en este trabajo debido a que fueron hasta hace poco introducidos al mercado.¹

2.8.1 Integrado de medición de energía de una sola fase, ADE7763

El ADE7763 es el integrado que utiliza el SIMEM para monitorear la energía. Su disponibilidad y sus características técnicas fueron suficiente razón para utilizarlo en este trabajo. Este circuito integrado de medición de energía posee una interfaz serial y una salida de pulso. Además, este incorpora dos ADCs (analog-to-digital converter o convertidor Análogo-a-digital) de segundo orden en sigma-delta, un integrador digital sobre el canal 1, circuito de referencia, sensor de temperatura, y todo el procesamiento de señal requerido para llevar a cabo la medición de energía aparente y activa con calibración digital, como también rms y mediciones pico sobre canales de corriente y voltaje.

¹ Pagina Web del Analog Devices Inc.
<<http://www.analog.com/en/subCat/0,2879,760%255F790%255F0%255F%255F0%255F,00.html>

El ADE7763 puede conectarse con una gran variedad de transductores de corriente incluyendo las resistencias bajas shunts y transformadores de corriente. Adicionalmente, un integrador digital montado que provee una interfaz directa para sensores de corriente como la bobina de Rogowski, el cual posee una salida di/dt. Esta interfaz directa elimina la necesidad de un integrador externo análogo, y la solución provee excelente estabilidad a largo plazo y encajar precisamente la fase, la corriente y el voltaje entre los canales. El integrador puede ser activado o desactivado dependiendo del sensor de corriente seleccionado.

El ADE7763 provee una interfaz serial para leer datos y una frecuencia de pulsos de salida que es proporcional a la potencia activa. Posee características como varios sistemas de calibración, corrección del offset o nivel DC, corrección de fase, y calibración de potencia asegurando alta precisión. Este integrado detecta durante pequeñas duraciones, variaciones de voltajes picos bajos y altos.

En modo de acumulación positiva da la opción de calcular energía sólo cuando la parte positiva de la energía es detectada. Un umbral de no carga interno se asegura que no exhiba la parte de ruido que no se quiere leer. La salida de cruce por cero es producida por un pulso que es sincronizado por el detector de cruce por cero en la línea de voltaje. Esta señal es usada internamente en los modos de acumulación de energía aparente y activa de ciclo de línea, lo que permite una calibración rápida.¹

2.9 RELOJ DE TIEMPO REAL, DS1307

El DS1307 es un reloj serial de tiempo real de baja potencia, proveyendo directamente, reloj y calendario en código binario decimal, BCD, además de 56 bytes de memoria nano volátil SRAM. El reloj es provisto en horas, minutos, segundos y en modo 12 horas con indicador de a.m./p.m o 24 horas, y el calendario en día, mes y año. La fecha de fin de mes es automáticamente ajustada para meses con menos de 31 días, incluyendo correcciones de años bisiestos. El DS1307 ha sido construido con un circuito sensor de potencia que detecta una falla de potencia en la fuente primaria, y automáticamente cambia a la batería suplementaria para continuar con el conteo de tiempo.

EL DS1307 opera como un dispositivo esclavo sobre un bus serial controlado por un microcontrolador utilizando una comunicación serial síncrona I²C, por dos hilos.

El acceso es obtenido implementado una condición de "inicio" y proveyendo un código de identificación del dispositivo seguido por una dirección de registro.

¹ WWW.ANALOG.COM, hoja característica del ADE7763
<http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADE7763.pdf>

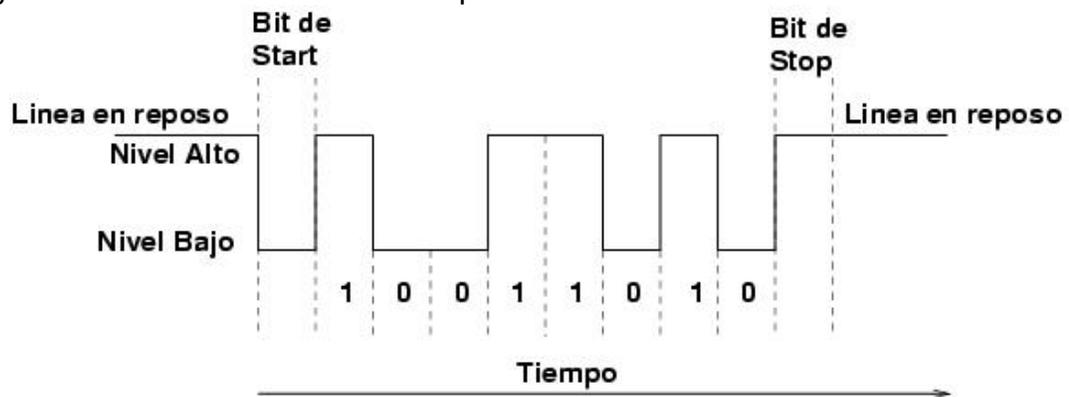
Subsecuentemente los registros pueden accederse en forma secuencial hasta que una condición de “parar” sea ejecutada. Cuando la fuente de alimentación primaria decae por debajo de 1.25 por el voltaje de la batería suplementaria, el dispositivo finaliza un acceso en progreso y resetea el contador de dirección del dispositivo. Las entradas para al dispositivo no serán reconocidas al mismo tiempo para impedir datos erróneos de ser escrito el dispositivo desde una salida de un sistema de tolerancia. Cuando la fuente primaria decae por debajo de la batería suplementaria, el dispositivo cambia a un modo de respaldo de corriente baja. En el encendido, el dispositivo cambia desde la batería a la fuente de alimentación primaria cuando la fuente de alimentación llega a un voltaje mayor que el de la batería más 0.2 voltios y reconoce entradas cuando la fuente primaria sea mayor que el voltaje de la batería por 1.25.¹

2.10 ESTÁNDAR DE COMUNICACIONES RS-232C

El puerto serie RS-232C es la forma mas comúnmente usada para realizar transmisiones de datos. Es una interfaz estándar común para equipos de comunicación de datos.

El RS-232 transmite datos de forma serial en grupos de 8 bits, en forma asíncrona, para lo cual no es necesaria una señal de reloj independiente de que sincronice la señal de entrega de datos. Una vez comenzando la transmisión de datos, los bits tienen que llegar uno detrás de otro a una velocidad constante y en determinados instantes de tiempo.²

Figura 12. Estructura de una señal por estándar RS232.



Tomado de Curso avanzado de Microcontroladores PIC, CEKIT.

¹ Tomado de la hoja característica del Reloj de Tiempo Real DS1307.

² HERNÁNDEZ, Carlos Gerardo. Microcontroladores de Microchip, Universidad Pontificia Bolivariana, 2000 pag 91.

La estructura de la señal serial es mostrada en la figura 12, en donde la entrega de datos empieza con un bit de "inicio" seguido de los bits de datos desde el menos significativo hasta el más significativo, finalizando con el bit de parada.

El RS-232C consiste en un conector DB-9 de 9 pines, empleado comúnmente en computadores para la entrada y salida de datos para una extensión no mayor a 15 metros, dependiendo de la velocidad de transmisión.

La velocidad de transmisión y recepción de datos en una comunicación, es determinada en baudios, y es escogida entre velocidades específicas de 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 14100, 19200 hasta 11200 baudios o bits por segundo. Tanto el aparato a conectar como el computador (o el programa terminal) tienen que usar la misma velocidad de entrega de datos serie para comunicarse entre si.

2.11 CIRCUITO INTEGRADO MAX-232

El MAX-232 es un circuito integrado que soluciona el problema de diferencia de niveles voltajes que hay entre el puerto RS-232, y los de un sistema que maneja niveles de voltaje TTL. El circuito integrado es un transmisor-receptor de línea dirigido a la interfaz de comunicación RS-232 donde no hay disponibilidad de una fuente de ± 12 voltios, ya que este solamente utiliza una fuente de alimentación de + 5 voltios para su operación.

El circuito integrado lleva internamente dos conversores de nivel de TTL a RS-232 y otros dos de RS-232 a TTL con lo que en total podremos manejar cuatro señales del puerto serie del PC. Por lo general las más usadas son; TX, RX, RTS, CTS. Para que el MAX-232 funcione correctamente se deben poner unos condensadores externos como lo muestra la siguiente figura, donde además se han cableado las líneas TX y RX que son usadas en este trabajo.¹

2.12 ROTOCOLO I2C

El protocolo I²C (Inter-Integrated-Circuit) utiliza únicamente dos líneas para la transferencia de la información entre los elementos que se acoplan al bus. Una de las líneas es la encargada de soportar todos los datos, se caracteriza por ser bidireccional y se identifica como SDA; la otra línea cumple la función de reloj para la sincronización, es unidireccional y se llama SCL; esta labor siempre es generada por el dispositivo que cumple la función de maestro, es decir, el que con-

¹ <http://www.x-robotics.com/hardware.htm>

trola la comunicación y debe garantizar la sincronización de todos los dispositivos esclavos que están soportados en las dos líneas.

Las características principales del protocolo I²C son:

- Requiere sólo de dos líneas, la de datos (SDA) y la de reloj (SCL).
- El bus permite la conexión de varios Maestros, ya que incluye un detector de colisiones.
- El protocolo de transferencia de datos y direcciones posibilita diseñar sistemas completamente definidos por software.
- El Maestro es el dispositivo que inicia la transferencia en el bus y genera la señal de Reloj, el Esclavo es el dispositivo direccionado.

Las líneas SDA (serial Data) y SCL (serial Clock) deben conectarse a la línea de alimentación a través de unas resistencias de pull-up; por lo tanto cuando el bus está libre, ambas líneas están en nivel alto.

La transmisión bidireccional serial de datos puede realizarse en dos modos de transferencia, a 100Kbits/s en el modo estándar, ó 400Kbits/s en el modo rápido.¹

¹ DUQUE, Edison. Curso avanzado de microcontroladores PIC, CEKIT Pág. 45.

3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

3.1 PLANTEAMIENTO

Mejoramiento del Contador Electrónico de Energía Residencial (C.E.E.R.), desarrollado en la Universidad Pontificia Bolivariana, implementando el diseño y construcción de un sistema menos costoso y menos complejo basado en el integrado de medición de energía ADE7763, para generar, visualizar y almacenar datos más exactos de energía eléctrica consumida en vatios/hora en una línea de distribución monofásica durante el tiempo en que el sistema esté en funcionamiento.

3.2 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo de sistema integrado de medición de energía eléctrica monofásica para uso interno residencial, segunda versión del prototipo (C.E.E.R.) para llevar un registro de energía consumida en lapsos de tiempo de una hora así como durante el tiempo que este funcione y poder compartirlas con un PC.

3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar del Contador Electrónico de Energía Eléctrica para uso Residencial desarrollado en la Universidad Pontificia Bolivariana.
- Estudiar de los circuitos integrados ADE77, pertenecientes a la firma Analog Devices, que tienen como propósito la medición de energía en una línea monofásica.
- Analizar el funcionamiento y operabilidad del circuito integrado de medición de energía ADE7763.
- Investigar y escoger un sensor de corriente lo más apropiado posible a la solución de este trabajo.
- Diseñar y construir el sistema de monitoreo de energía, basado en el circuito integrado de medición de energía ADE7763, controlado por un microcontrolador, con el propósito de obtener datos de potencia activa, guardarlos en una memoria nanovolátil y compartirlos con computador personal.

- Estudiar y desarrollar un programa en LABVIEW que permita una comunicación con el (S.I.M.E.M.) de forma asíncrona empleando el puerto RS-232 de un computador personal y que permita el intercambio de datos.

3.4 JUSTIFICACIÓN

La razón principal para la elaboración de este proyecto es la de mejorar la confiabilidad y simplicidad de operación de un dispositivo anteriormente desarrollado en la universidad como lo fue el contador electrónico de energía para uso residencial, sin perder la línea de investigación trazada, y como continuación del trabajo realizado sobre desarrollo de contadores electrónicos de energía.

El contador electrónico de energía para uso residencial (C.E.E.R.) obtiene el consumo de energía a partir de las señales de corriente y voltaje en una línea de distribución. A través de varios amplificadores operacionales las señales análogas son procesadas, filtrándolas y adecuándolas para luego ser digitalizadas por un convertidor análogo digital. El (C.E.E.R.) posee un sistema de procesamiento de señal análogo-digital que lo pone en desventaja con los actuales sistemas de monitoreo de energía acá presentados y que hacen que el procesamiento de señales se haga de forma digital desde un inicio.

Con los nuevos adelantos en circuitos integrados programados de procesamiento de señal digital DSP, se justifica rediseñar este sistema de medición adoptando estas soluciones electrónicas más modernas, ya que la medición de energía por parte de un circuito integrado de medición de energía que usa esta tecnología, establece un alto grado de exactitud en la medición deseada, permitiendo el mejoramiento de los dispositivos de medición actual desarrollado en la universidad, con el fin de optimizar directamente la simplicidad del todo el sistema e indirectamente en futuro próximo la generación, distribución, el servicio al cliente y facturación de la cuenta. Cabe recordar que el contador representado aquí tiene como fin cubrir los más amplios y diversos lugares, por ejemplo, oficinas, hogares, locales comerciales, parqueaderos, centros de servicios, etc. Con el fin exclusivo de hacer efectivo el propósito que es lograr que el diseño satisfaga y supere las características de los contadores electromecánicos y electrónicos, ya existentes, de forma que este medidor posea, bajo costo y facilidad de manipulación e instalación en sitios puntuales donde se desee medir energía.

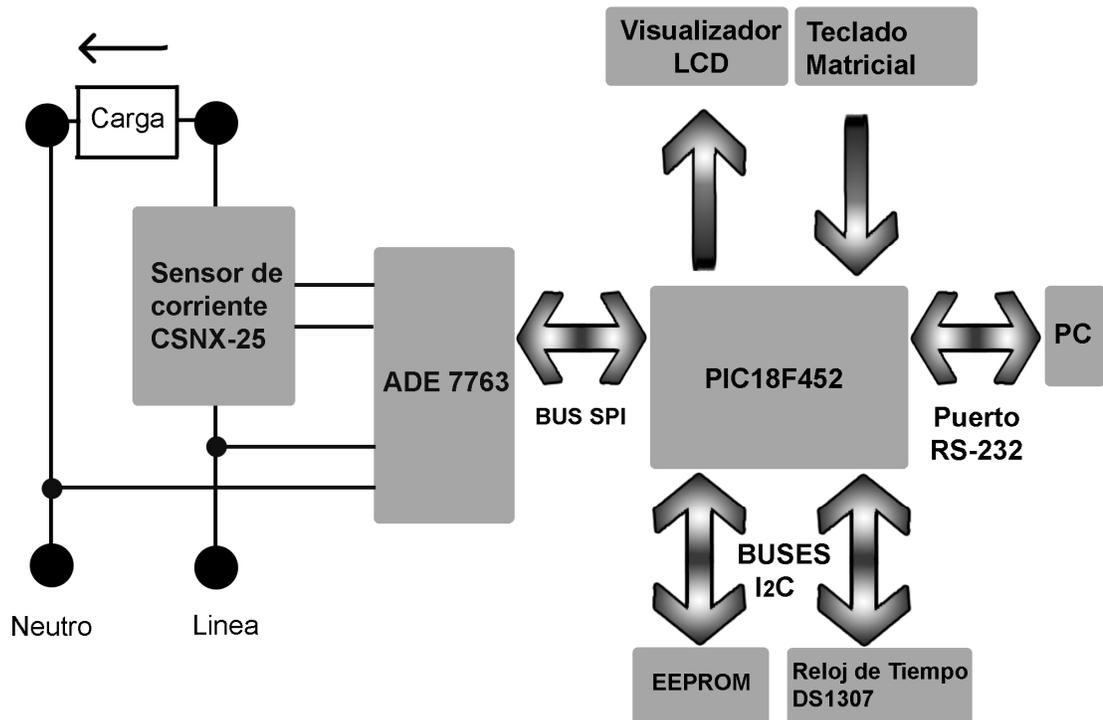
Con base a lo anterior, el medidor electrónico pasa a esta etapa de mejoramiento de sus características técnicas en el sistema de medición de energía con respecto a su versión anterior. Una de las características que mejorará el (S.I.M.E.M), es que será más preciso en su medición porque el manejo de señales ya no se realizará de forma discreta debido a que se utiliza un circuito integrado, que internamente posee circuitos convertidores de señal de alto desempeño, que hacen posible un mejor manejo de señales, aumentando precisión y disminuyendo

costo por lo que se tiene un integrado empleado en funciones anteriormente realizadas por varios amplificadores operacionales. Además, con el uso de este nuevo sistema de medición no sólo se puede obtener información de potencia activa, sino da la posibilidad de generar datos como la potencia aparente, corriente RMS y voltaje RMS.

4 S.I.M.E.M. (SISTEMA INTEGRADO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA MONOFÁSICO)

Este trabajo describe un Sistema de Medición de Energía Monofásico (S.I.M.E.M.) de alta exactitud, compacto y de bajo costo. Este sistema mide continuamente y en lapsos de una hora la energía eléctrica consumida por una carga en una línea de distribución eléctrica monofásica de dos cables localizada en sitios puntuales. Además un software permite a un usuario, compartir y controlar todo el sistema de medición. El diseño del prototipo está comprendido principalmente como lo muestra la figura 13 por el ADE7763, un sensor de corriente, un microcontrolador, una memoria EEPROM, un visualizador de cristal líquido (LCD), un teclado matricial, una interfaz serial RS232, el software correspondiente, un reloj de tiempo real y fuentes de alimentación de voltaje.

Figura. 13. Diagrama del SIMEM



4.1 DESCRIPCIÓN DETALLADA

El SIMEM tiene una parte de hardware y otra de software. Relacionadas por una interfaz, el hardware es todo lo físico que representa el sistema y es la parte más importante de él. El hardware va acoplado directamente a la línea, a la carga y al computador. En el hardware se llevan a cabo los cálculos de energía y el control de todo el sistema, sin importar que este esté conectado al software. El software es un programa de computador que permite al usuario configurar la parte de medición de energía, además de obtener y visualizar datos que no se enseñan en la parte de hardware del sistema.

4.2 HARDWARE DEL SIMEM

En el hardware del prototipo se encuentran dos dispositivos como lo muestra la figura 14. El primero de caja azul, nombrado como de monitoreo y cálculo de energía es el más indispensable y es donde se realiza los cálculos de medición de energía, el registro de la hora y la fecha, la configuración del dispositivo y la interfaz de manejo del dispositivo tanto para el usuario como para el software. El segundo corresponde al dispositivo de comunicación con el computador, tiene como principal propósito acoplar el primero dispositivo con el computador.

Figura. 14. Hardware del S.I.M.E.M.



Si los dos dispositivos no conformaran el hardware del SIMEM, entonces lo harían tres tarjetas, cada una de ellas conectadas entre si como lo muestra la figura 15. Dos de ellas se localizan en el dispositivo de monitoreo y cálculo de energía y la otra en el dispositivo de comunicación con el computador. La tarjeta del medidor y la tarjeta de interacción con el usuario se localizan en el dispositivo de monitoreo y

cálculo de energía, mientras que la tarjeta de comunicación se ubica en el dispositivo de comunicación con el computador.

Figura. 15. Diagrama de las tarjetas del SIMEM

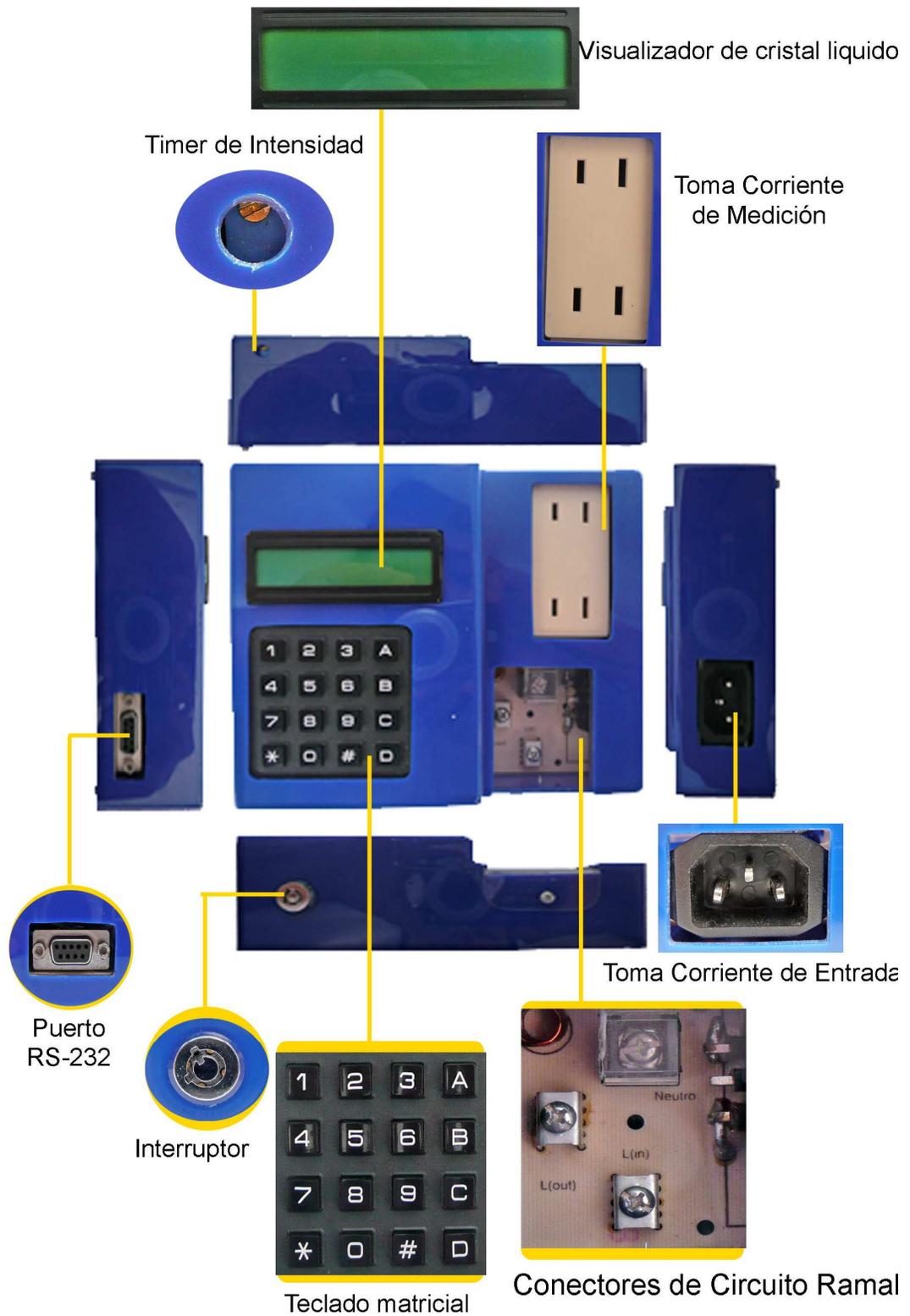


4.3 DISPOSITIVO DE MONITOREO Y CÁLCULO DE ENERGÍA.

El frente terminado del dispositivo de monitoreo y cálculo de energía (DMCE) se muestra en la figura 16. Está comprendido por la salida de la línea de distribución de energía de baja corriente (Toma corriente), el visualizador de cristal líquido (LCD), el teclado matricial y, bajo una tapa transparente, los conectores de entrada y salida de alta corriente en una línea de distribución, así como el conector del neutro del mismo.

Al costado derecho del dispositivo (viéndolo de frente), se encuentra un conector de entrada de voltaje, al cual se le conecta un cable de poder para corrientes relativamente bajas. Al costado opuesto, se encuentra un puerto RS232 (hembra) que va conectado al dispositivo de comunicación con el computador, que al mismo tiempo va conectado al computador. En la parte lateral inferior se encuentra un interruptor accionado por una llave, que permite apagar o encender el SIMEM por él usuario. Finalmente en el costado superior del dispositivo de monitoreo y cálculo de energía tiene un pequeño orificio por el cual, introduciendo un destornillador de pala, permite graduar la intensidad del LCD.

Figura. 16. Dispositivo de monitoreo y cálculo de energía.



El dispositivo de monitoreo y cálculo de energía puede conectarse de dos formas para medir la energía. Una desde una toma corriente y la otra desde un circuito ramal de una edificación. Cada forma de conexión entre el medidor y una línea de distribución, depende de la aplicación que se le quiera dar al SIMEM.

Teniendo en cuenta que estas formas de conexión son distintas, se recomienda conectar sólo una forma de estas al DMCE. Cada una de estas conexiones difiere de la otra en la manera de conectarse a la tarjeta del medidor, y en la cantidad de corriente posible que este puede manejar.

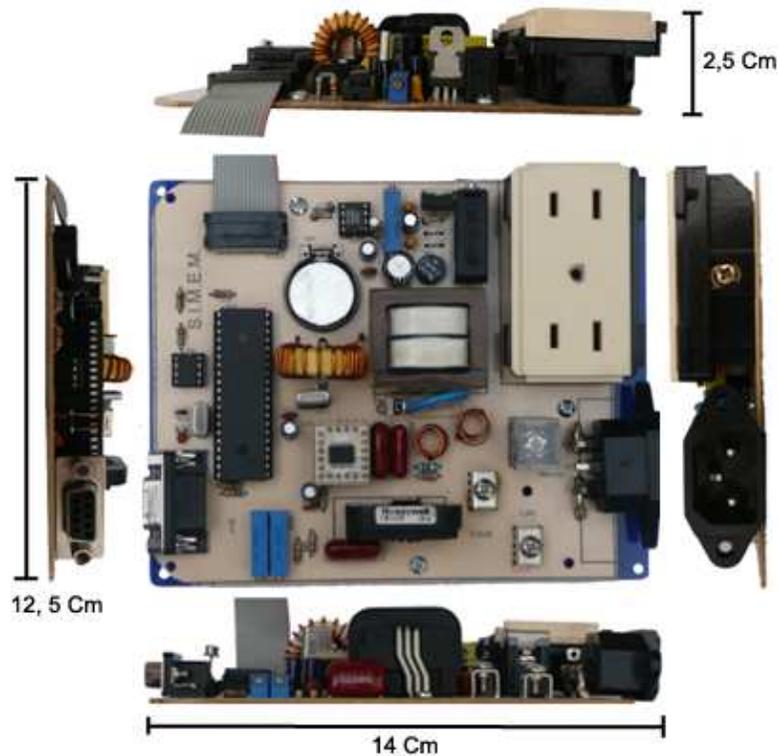
La primera forma de conexión que se puede hacer al DMCE es aquella que soporta una corriente relativamente baja, de hasta 10 amperios. La conexión se realiza de la siguiente forma: la línea de distribución, que para este caso es una toma corriente de una edificación, es enchufada a través de un cable que va conectado al conector de poder del dispositivo de monitoreo y cálculo de energía. La línea de distribución medida por el dispositivo sale entonces por el toma corriente situado en la parte superior del mismo. Si todos los aparatos eléctricos que se conectan ahí, generan en el SIMEM un consumo de energía.

La otra forma de conexión del DMCE se realiza para cuando se quiere medir energía en un circuito ramal en una edificación. Para esto debe considerarse que no haya fluido eléctrico en la edificación, y que en el tablero de distribución de la edificación este identificado el circuito ramal al cual se le medirá energía. Considerando lo anterior, deben realizarse tres conexiones en el DMCE: La primera conexión es entre del dispositivo de protección de sobrecorriente donde esta la línea de distribución de energía, y el conector donde se indica cómo la entrada de la línea a medir. La segunda conexión consiste en que el conector de salida debe conectarse al circuito de distribución de energía de la edificación que se mediría. Igualmente el neutro debe ir conectado como referencia para completar la conexión. Una limitación de esta forma de conexión, es que la corriente que pasa por el DMCE no puede exceder los 25 amperios. Es importante que los conductores usados en esta forma de conexión tengan capacidad de corriente superior o igual a la máxima permisible por el SIMEM.

4.4 TARJETA DEL MEDIDOR

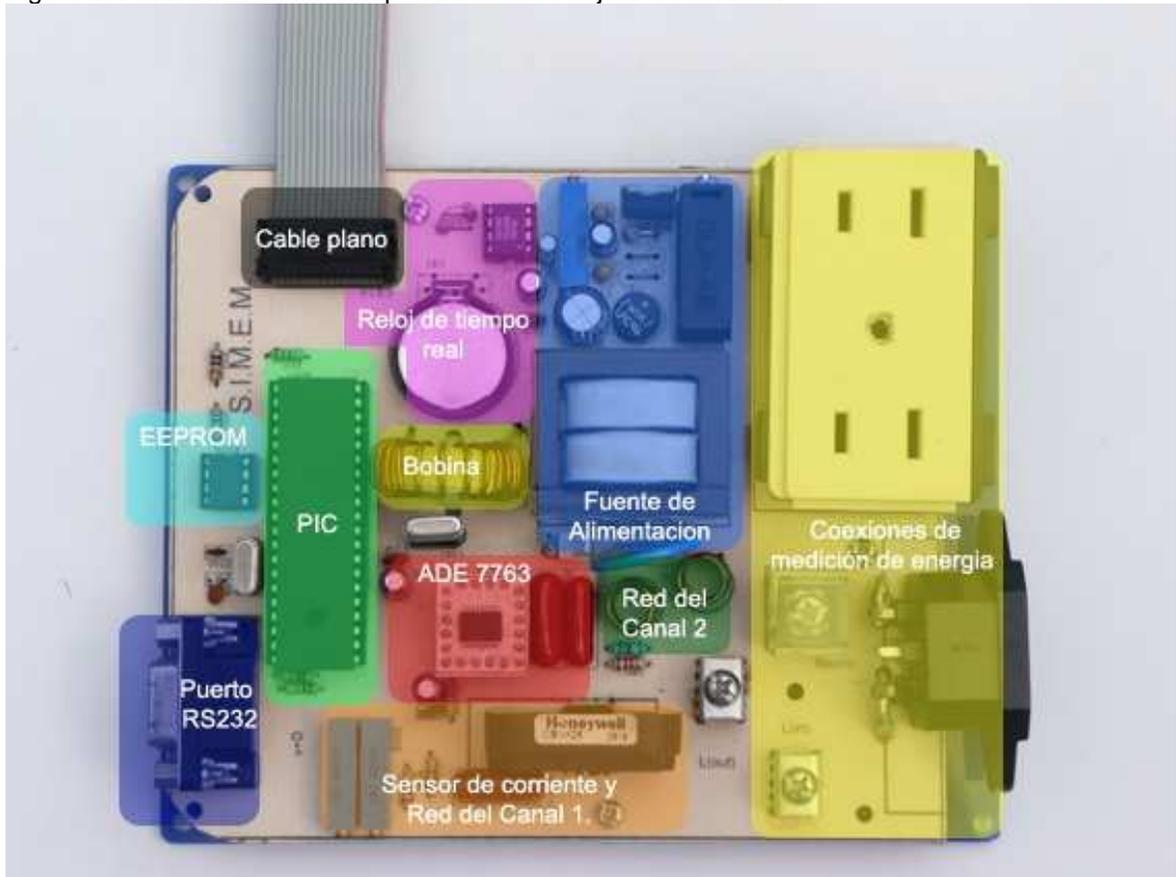
La tarjeta del medidor (figura 17) es la parte más importante del SIMEM porque en ella se realiza todo lo referente a llevar el registro del tiempo, medición, monitoreo, cálculos y almacenamiento de energía. Desde allí se maneja todo el sistema, desde lo que se proyecta en el LCD hasta lo que se muestra en software.

Figura. 17 Tarjeta del medidor



En la figura 18 se muestra la distribución física de los circuitos que le dan su funcionalidad. Estos circuitos son: el del ADE7763, el de tratamiento de la señal de corriente de línea (canal 1), otro es el de tratamiento de la señal de voltaje de línea (canal 2), el del microcontrolador, la EEPROM, el puerto RS232, el reloj de tiempo real, la fuente de alimentación, el cable plano, los elementos de conexión de medición de energía y la bobina con núcleo de ferrita.

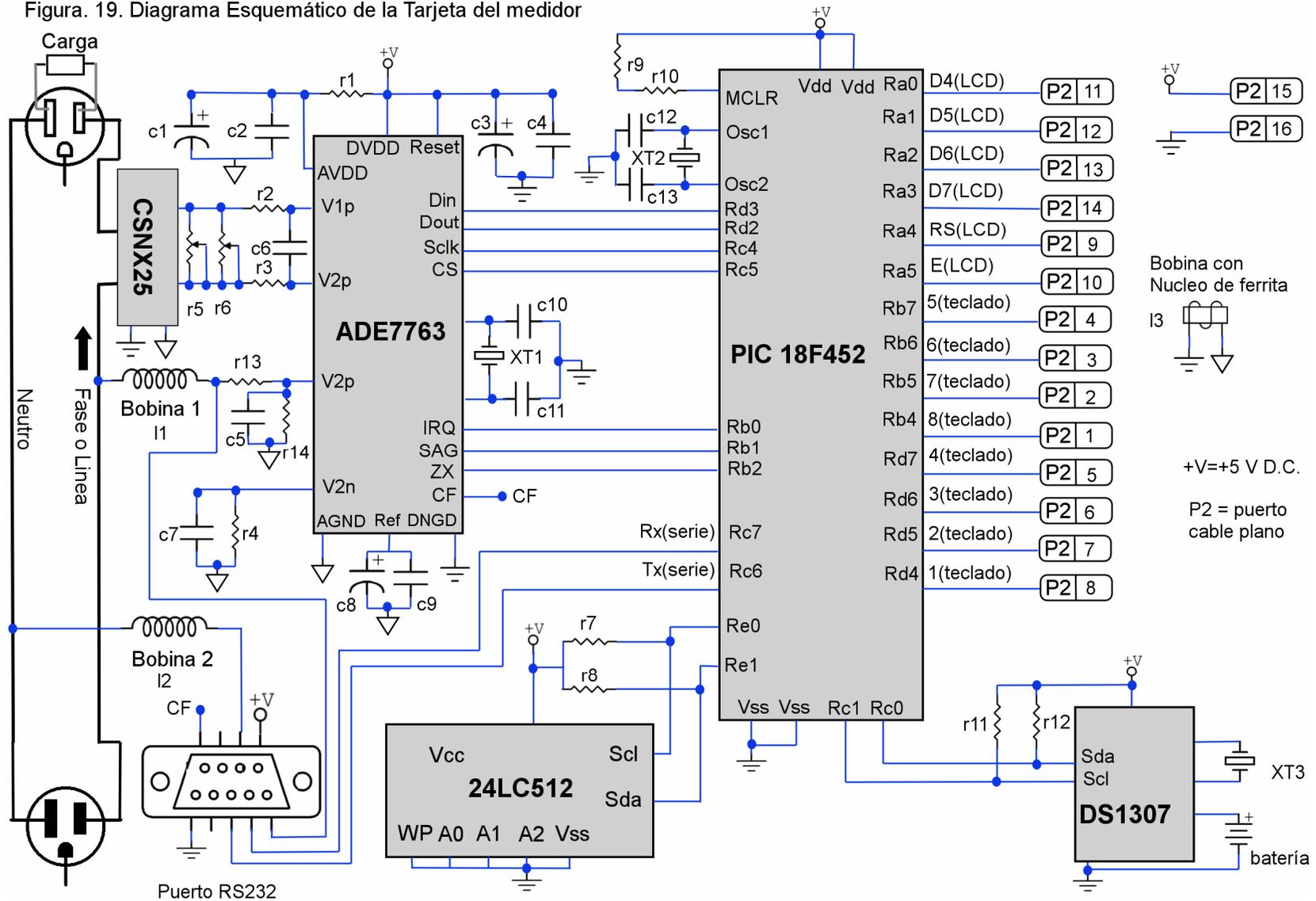
Figura 18. Ubicación de los componentes de la tarjeta del medidor



El ADE7763 provee la medición de energía para el sistema. El microcontrolador suministra control del medidor como también comunicación. La bobina con núcleo de ferrita une el plano de tierra digital con el plano de tierra análogo. La EEPROM permite el almacenamiento nano volátil de datos. El reloj de tiempo real lleva el registro de la fecha y la hora de forma exacta. Las circuitos para los canales 1 y 2 se encarga de normalizar las señales de voltaje y corriente en la línea, el cable plano comunica esta tarjeta con la tarjeta de interfaz con el usuario. Los elementos de conexión de medición de energía enlazan la carga y la línea de distribución a esta tarjeta, y la fuente de alimentación provee energía suficiente para el funcionamiento del sistema.

El diagrama esquemático de la tarjeta del medidor se muestra en la figura 19. De este diagrama se puede destacar la conexión entre los planos de tierras. Esto con el fin de que el ruido generado por las señales digitales afecte lo menos posible a las señales análogas tomadas por los canales uno y dos. También se puede observar que dos resistencias variables hacen de resistencia de carga del sensor de corriente. Conectadas en paralelo, mantienen el valor de resistencia de carga estable sin perder la resistencia equivalente de carga calculada.

Figura. 19. Diagrama Esquemático de la Tarjeta del medidor



4.5 MICROCONTROLADOR PIC18F452

El microcontrolador es el circuito integrado encargado de controlar todas funciones del SIMEM, enviando datos al LCD, leyendo caracteres del teclado matricial, almacenando y leyendo datos de información en las EEPROM's, intercambiando datos con el PC, manejando el reloj de tiempo real, y ejerciendo control de muchas más funciones que desempeña el SIMEM. Brevemente el microcontrolador es aquel dispositivo encargado del manejo de todos los dispositivos digitales que hacen parte del sistema y que forman el SIMEM.

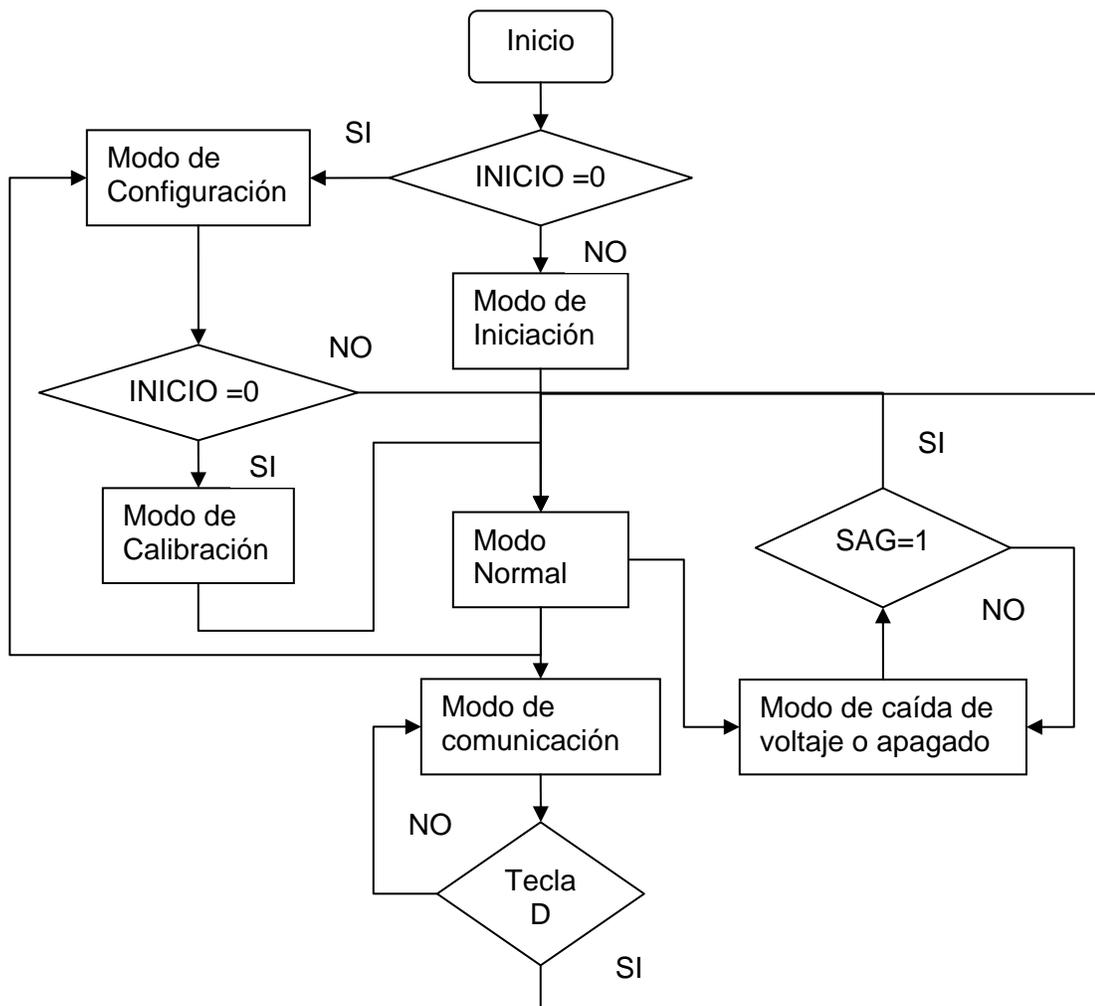
La memoria EEPROM interna del microcontrolador almacena parámetros del medidor. Algunos de estos datos son almacenados desde que se programa el microcontrolador, otros mientras se ejecuta el programa del PIC y otros distintos en el proceso de calibración del SIMEM.

Los datos de la memoria EEPROM del microcontrolador son utilizados por el SIMEM de acuerdo con la función de cada byte almacenado. A través de la tabla 3 se observan los datos de la memoria. El byte de inicio (00)_{hex} establece en el microcontrolador dos cosas: La primera, es el modo de operación en que debe funcionar el microcontrolador cuando se enciende el SIMEM y la segunda la forma como almacena los datos la memoria EEPROM externa cuando esta se llena. Los bytes de contraseña (01:04)_{hex}, como su nombre lo indica, resulta ser la contraseña para calibrar, configurar y establecer comunicación en el SIMEM. Los bytes de las localidades (05:22)_{hex} son los bytes de los coeficientes de configuración del ADE7763. Los bytes del (23)_{hex} al (25)_{hex} corresponden al registro de cálculo de energía RAENERGY del ADE7763; estos tres bytes son escritos cuando en el programa del PIC se llega al modo de caída de voltaje o al modo apagado y son leídos sobre el encendido del SIMEM para calcular la energía. Los siguientes bytes en la memoria EEPROM son los que representan la energía activa total medida por el SIMEM. Almacenados en las localidades (25:2D)_{hex}, son los primeros bytes leídos al encenderse el SIMEM y son los bytes escritos durante una operación de cálculo de energía. Los datos almacenados en la dirección (2E)_{hex} y (2F)_{hex} son los bytes de una dirección de referencia de la memoria EEPROM externa. Siempre son escritos sobre el final de cálculo de energía en lapsos de una hora y para cuando SIMEM lleva al software los datos almacenados en la EEPROM externa. Estos dos últimos bytes mencionados siempre será la dirección del registro de la EEPROM externa sobre el cual el PIC escribe la siguiente palabra de datos. Por otra parte los bytes CUENTA (30)_{hex} y CUENTB (31)_{hex} son los bytes que llevan el conteo de tiempo en el SIMEM para el cálculo de energía cada hora. Estos dos bytes son escritos en la memoria cada vez que se realiza un cálculo de energía, ocurra una caída de voltaje o se apague el SIMEM. Los últimos bytes (32:39)_{hex} de la tabla son los datos de referencia de energía activa medida para el cálculo de energía consumida cada hora.

4.5.1 Programa del microcontrolador

El programa del microcontrolador describe cómo el SIMEM es operado. La operación del microcontrolador puede explicarse en seis modos de trabajo. Los modos de trabajo del PIC no existen ni siquiera como subrutinas en el programa del PIC, pero están implícitamente en el programa del PIC de acuerdo con las funciones específicas que realiza el SIMEM. Los modos de operación son: modo de iniciación, modo normal, modo de calibración, modo de configuración, modo de comunicación, y modo de apagado o caída de voltaje. Los modos de operación están entrelazados como lo muestra la figura 20.

Figura. 20. Diagrama de flujo del programa del microcontrolador 18F452.



- **Modo de Iniciación**

Al encenderse el microcontrolador lo primero que realiza el programa es la configuración de varios registros como los de propósito específico, los de puertos y los de propósito general; luego se verifica en la localidad (00)_{hex} de la memoria EEPROM interna del PIC el dato que esta tenga para determinar el siguiente modo de operación. El valor del dato que posee esta localidad depende de que el SIMEM haya sido configurado y calibrado por primera vez. Si el dato es cero significa que el sistema es iniciado por primera vez y el microcontrolador entra al modo de configuración para luego ir al de calibración, de lo contrario, si el dato es uno indica que ya el sistema fue configurado y calibrado anteriormente y que se va al modo de iniciación para después pasar al modo normal de operación.

La rutina de iniciación consiste en que el microcontrolador lee todos los datos desde su memoria EEPROM interna para luego transferirlos hacia el ADE7763 y hacia unos registros de propósito general del mismo. El mapeo de la memoria EEPROM interna del microcontrolador se muestra en la tabla 4.

Tabla. 4. Mapeo de la memoria EEPROM interna del microcontrolador.

Dirección en la EEPROM del PIC	Nombre	Dirección en el ADE7763	Descripción	Valor del registro
00H	INICIO	--	INICIO	(00) _{hex}
01H	CLAVE	--	Contraseña	(12) _{hex}
02H	CLAVE	--	Contraseña	(34) _{hex}
03H	CLAVE	--	Contraseña	(56) _{hex}
04H	CLAVE	--	Contraseña	(78) _{hex}
05H	WGAINH	12-(0001 0010)	Ganancia de Potencia activa	1111_1111-(FF) _{hex}
06H	WGAINL		(181)	1110_0111-(E7) _{hex}
07H	APOSH	11-(0001 0001)	Compensación de potencia Activa	1111_1011-(FB) _{hex}

08H	APOSL		(-29)	0111_1001-(79) hex
09H	GAIN	0F-(0000 1111)	Ganancia, CH1 y CH2	0000_0000-(00) hex
0AH	CH1OS	0D-(0000 1101)	Compensación en CH1	0000_0000-(00) hex
0BH	CH2OS	0E-(0000 1110)	Compensación en CH2	0000_0000-(00) hex
0CH	PHCAL	10-(0001 0000)	Compensación de fase	0000_1101-(0D) hex
0DH	IPKLVL	20-(0010 0000)	Valor de CH1 Pico	1111_1111-(FF) hex
0EH	VPKLVL	21-(0010 0001)	Valor de CH2 Pico	1111_1111-(FF) hex
0FH	LINECYCH	1C-(0001 1100)	# de medios ciclos 2000	0000_0111-(07) hex
10H	LINECYCL			1101_0000-(D0) hex
11H	MODEH	09-(0000 1001)	Registro Modo de trabajo	1000_0000-(80)
12H	MODEL			0000_0000-(00) hex
13H	IRQENH	0A-(0000 1010)	Habilitador de interrupciones	0000_0000-(00)
14H	IRQENL			1000_0011-(83) hex
15H	WDIV	13-(0001 0011)	Divisor de energía activa	0000_0000-(00) hex
16H	VADIV	1B-(0001 1011)	Divisor de Potencia aparente	0000_0000-(00)
17H	SAGCYC	1E-(0001 1110)	# Ciclos de ciclos de caída de voltaje	0000_0100-(04) hex
18H	SAGLVL	1F-(0001 1111)	Nivel de voltaje de caída	0001_1001-(19) hex
19H	CFDENH	15-(0001 0101)	Denominador CF	1111_1001-(F9)
1AH	CFDENL			0010_1001-(29) hex
1BH	CFNUMH	14-(0001 0100)	Numerador CF	0000_0000-(00)
1CH	CFNUML			0000_0000-(00) hex

1DH	IRMSOSH	18-(0001 1000)	Compensación de CH1	0000_0000-(00) hex
1EH	IRMSOSL			0000_0000-(00)
1FH	VRMSOSH	19-(0001 1001)	Compensación de CH2	0000_0000-(00) hex
20H	VRMSOSL			0000_0000-(00) hex
21H	VAGAINH	1A-(0001 1010)	Ganancia de potencia aparente	0000_0000-(00) hex
22H	VAGAINL			0000_0000-(00) hex
23H	RAENERGYL	04-(0000 0100)	Registro de energía activa	0000_0000-(00)
24H	RAENERGY		Registro de energía activa	0000_0000-(00) hex
25H	RAENERGYM		Registro de energía activa	0000_0000-(00) hex
26H	AENERGY0		Almacena conteo de energía	0000_0000-(00) hex
27H	AENERGY1		Almacena conteo de energía	0000_0000-(00) hex
28H	AENERGY2		Almacena conteo de energía	0000_0000-(00) hex
29H	AENERGY3		Almacena conteo de energía	0000_0000-(00) hex
2AH	AENERGY4		Almacena conteo de energía	0000_0000-(00)
2BH	AENERGY5		Almacena conteo de energía	0000_0000-(00) hex
2CH	AENERGY6		Almacena conteo de energía	0000_0000-(00) hex
2DH	AENERGY7		Almacena conteo de energía	0000_0000-(00) hex
2EH	DIRECCION EEPROML		Direccionamiento del 24LC512	0000_0000-(00) hex
2FH	DIRECCION EEPROMH		Direccionamiento del 24LC512	0000_0000-(00) hex
30H	CUENTA		Control de tiempo	0000_0000-(00) hex

31H	CUENTB		Control de tiempo	0000_0000-(00) hex
32H	AENERGY0A		Almacena energía	0000_0000-(00) hex
33H	AENERGY1A		Almacena energía	0000_0000-(00) hex
34H	AENERGY2A		Almacena energía	0000_0000-(00) hex
35H	AENERGY3A		Almacena energía	0000_0000-(00) hex
36H	AENERGY4A		Almacena energía	0000_0000-(00) hex
37H	AENERGY5A		Almacena energía	0000_0000-(00) hex
38H	AENERGY6A		Almacena energía	0000_0000-(00) hex
39H	AENERGY7A		Almacena energía	0000_0000-(00) hex

En los datos almacenados en la memoria EEPROM interna del microcontrolador se encuentran los de configuración del ADE7763, que van desde la dirección 05H hasta 22H. Una detallada descripción de la rutina de calibración es discutida en una sección luego para entender estos datos del ADE7763. Adicional a los datos de configuración del ADE7763, varios parámetros son leídos dentro del microcontrolador. Esto incluye los datos de acumulación de energía medida por el SIMEM (26H-0DH), la energía previamente almacenada a una caída de voltaje (33H-35H), la energía almacenada durante la última hora de medición (32H-39H), la clave de configuración del SIMEM (01H-04H), el direccionamiento de la memoria EEPROM externa (2EH-2FH) y el conteo de tiempo para el almacenamiento de energía (30H-31H).

De los datos de la EEPROM interna del microcontrolador, la energía acumulada por el SIMEM es la colocada en un registro de 8 bytes de propósito general en el microcontrolador, y es la energía acumulada total medida por SIMEM desde su puesta en funcionamiento. La energía salvada producto de una caída de voltaje es el registro RAENERGY de tres bytes del ADE7763. Esta es calculada por el microcontrolador usando una constante y es sumada también a los ocho bytes de acumulación de energía del SIMEM. La energía almacenada durante la última hora de medición es utilizada como referencia para el cálculo de energía consumida durante una hora. Los demás datos leídos de la EEPROM interna del

microcontrolador sirven como referencia en el manejo de tiempos, almacenamiento de energía y direccionamiento de la memoria EEPROM externa.

- **Modo normal.**

En este modo el SIMEM mantiene actualizado en la pantalla LCD, la hora, la fecha, el año, y la cantidad de energía medida por el ADE7763, así como también está pendiente cuándo el usuario quiera cambiar de modo. Todas estas funciones del modo normal se efectúan gracias al microcontrolador que continuamente está pendiente del teclado matricial, del almacenamiento de energía consumida en una hora, y de las interrupciones ocasionadas por parte del temporizador cero y por el ADE7763. (Ver la sección del ADE7763 para una descripción detallada de la medición de potencia y descripción de registros.)

El desbordamiento del temporizador cero es una de las interrupciones que ocurren en este modo y es aquella que sucede con mayor frecuencia cada 1,04 segundos. Proveniente internamente del microcontrolador, hace que este lea durante la interrupción, el reloj de tiempo real y refresque la hora en el LCD. Aprovechando que esta es una interrupción de tiempo, también en esta interrupción se lleva a cabo un conteo y control del tiempo en que se ha estado en modo de operación, de tal forma que transcurrida una hora en el que el microcontrolador entra y sale de esta interrupción, procede al cálculo y almacenamiento de energía consumida en dicha hora. Para este cálculo el microcontrolador lee primero el registro RAENERGY del ADE7763, luego lo multiplica por una constante y lo suma a la cantidad medida actualmente para después calcular el dato. Restando la cantidad de energía actual, medida con la ya almacenada una hora antes. Finalmente hallada la energía consumida, esta es guardada en la memoria EEPROM externa junto con la fecha y la hora que se hizo esta operación.

La medición total de energía es visualizada sobre el LCD en kilovatios hora y es actualizada de dos formas: La primera, cuando se realiza el cálculo de energía consumida cada hora, y la segunda, cuando la energía medida en una hora es mayor a la máxima posible por el ADE7763. Para el segundo caso en que se actualiza la energía, el microcontrolador monitorea el contacto IRQ del ADE7763 durante el modo de operación normal, ya que el consumo de energía también puede ser generado desde el registro AENERGY del ADE7763, AENERGY es un registro que multiplicado por una constante obtiene un valor de energía en kilovatios hora. Al desbordarse el valor del registro AENERGY una interrupción en el contacto IRQ indica al microcontrolador que se aumentó la cantidad de energía total medida en valor, al equivalente del valor máximo del registro de AENERGY, multiplicado por la constante. Además del contacto IRQ, el contacto SAG del

ADE7763, también es monitoreado por el microcontrolador. Cuando una caída de voltaje o un apagado son detectados por el ADE7763, el contacto SAG genera una interrupción en el microcontrolador que pone a este en modo de caída de voltaje o de apagado.

El teclado matricial es escaneado permanentemente por el microcontrolador para que en el momento en que un usuario oprima la tecla A se despliegue un menú en el LCD, este permite al usuario la posibilidad de escoger uno de los dos modos, el de comunicación o el de configuración. Escogido uno de estas opciones el sistema solicita la clave para poder ingresar al modo. Dado el caso en que se oprime una tecla incorrecta, se digite mal la clave, o se demore más de seis segundos en un menú. El sistema reinicia este modo de operación.

- **Modo de configuración.**

En modo de configuración, el usuario puede configurar en el SIMEM la hora y la fecha del reloj de tiempo real. El microcontrolador a través del LCD muestra al usuario cómo realizarlo y el usuario, por medio del teclado matricial, lo configura. El microcontrolador, teniendo los datos a configurar, modifica el reloj de tiempo real para volver al modo de donde fue llamado. Para el caso en que el SIMEM es configurado por primera vez, el modo continuo a este es el modo de calibración.

- **Modo de calibración.**

En modo de calibración, la tarjeta de comunicación debe estar conectada para que el SIMEM pueda comunicarse con el PC y para que pueda mirarse la salida CF del ADE7763. El microcontrolador provee la comunicación entre el computador, el usuario y el ADE7763. Los coeficientes de la calibración son calculados por el usuario según la información que se muestra en el computador, y que son basados en el mediciones que se realizan con el ADE7763. (Una sección más adelante explicará cómo se realiza la calibración).

Durante la calibración, el usuario a través del PC sólo puede leer y escribir en los registros del ADE7763, simulando escribir en el registro de comunicación del mismo. Un usuario puede acceder a la calibración del SIMEM desde el computador, utilizando un software que interprete y envíe caracteres ASCII o utilizando el software correspondiente del SIMEM. El usuario debe comprobar inicialmente que la comunicación entre el computador y el sistema estén dados en este modo; para esto el usuario una vez tenga conectados los dispositivos y habilitados los puertos, envía cualquier carácter ASCII desde el PC hacia el

sistema; este a su vez debe enviar junto con el mensaje el carácter confirmando la comunicación.

En la calibración, el usuario se comunica de forma interactiva como se lo indica el microcontrolador. El usuario sólo puede enviar caracteres ASCII (unos (1) y ceros (0)) de la forma en que se estuvieran escribiendo en los bytes de los registros del ADE7763. Lo mismo sucede en la lectura de bytes mostrados del ADE desde el PC. Debe tenerse en cuenta que al final de cada byte escrito en el software debe adicionarse un separador (-) que indica el final del byte.

Sólo oprimiendo la tecla A en el teclado matricial se sale de este modo, pero no antes de la confirmación del contenido de los coeficientes. El microcontrolador muestra un resumen de todos coeficientes en el PC para su verificación. Concluida esta verificación por parte del usuario, este da la confirmación por el teclado matricial para que el microcontrolador guarde los coeficientes en la memoria EEPROM interna.

- **Modo de caída de voltaje o apagado.**

El microcontrolador, a través de un puerto de entrada supervisa el contacto SAG del ADE7763 para la detección de la interrupción que conlleva a este modo de operación.

Siempre que el ADE7763 (ver sección de detección de caídas de voltaje del ADE7763) ocasione esta interrupción por el contacto SAG hacia el microcontrolador, este procede inicialmente al inicio de este modo a que rápidamente se almacenen datos de prioridad del SIMEM en la memoria EEPROM del PIC antes de que caiga el voltaje de la fuente. Los datos guardados incluyen el registro de almacenamiento de energía del ADE7763 así como los de operación del SIMEM.

Con base en lo que suceda en la línea de distribución, el ADE7763 provee esta interrupción bajo las siguientes condiciones: a) Por apagado o falta de potencia en la línea, que sucede cuando la línea cae inesperadamente a una tensión de 0 voltios; b) por una caída de voltaje en la línea, que sucede al tiempo en que el voltaje nominal de la línea cae por debajo de un umbral establecido.

Sin importar cual condición de las anteriores ocurra, siempre un evento de este tipo inicia por la caída del voltaje de línea. Ocurrida la interrupción en el ADE7763, inicialmente el microcontrolador salvaguarda los datos de prioridad, luego verifica el origen de la interrupción al tratarse de una interrupción enmascarada. Terminado la verificación, el voltaje de la línea es monitoreado esperando a que

vuelvan a subir los valores normales de tensión. Siendo así, el microcontrolador calcula la energía que almacenó durante la caída de tensión y la suma al valor de energía total calculada, volviendo finalmente al modo de donde fue llamado. Dado que ocurriera lo contrario en que la tensión vaya a cero, el microcontrolador tendrá los datos almacenados en memoria interna.

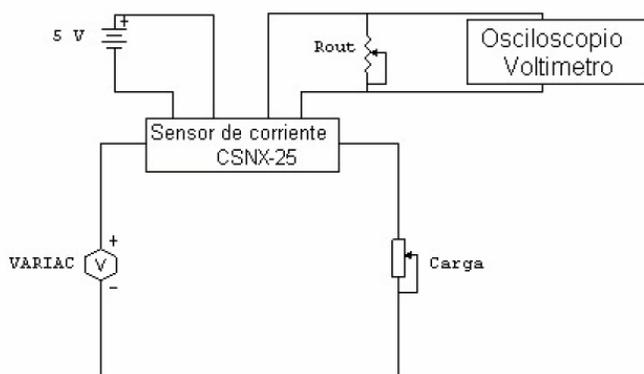
Al encenderse de nuevo la secuencia de iniciación, se restablecen los datos de los registros del ADE7763 seguidos de los datos almacenados en este modo. Todos los coeficientes son restablecidos volviendo al modo normal.

4.6 SENSOR DE CORRIENTE CSNX 25

El CSNX25 es un sensor de corriente de Efecto Hall de lazo cerrado. De acuerdo con la hoja característica el CSNX25 fue diseñado para medir una corriente máxima de 25 Amperios RMS. Para lograr esto, el sensor en el SIMEM se configuró de la siguiente forma: Los contactos principales de entrada y salida de la línea están conectados en paralelo para lograr la máxima cantidad de corriente medida por el sensor y la salida del sensor de corriente está conectada a una resistencia de carga. La configuración del sensor en el SIMEM fue probada en un circuito independiente para verificar su funcionamiento tal como se muestra en la figura 21. En ella se corroboró que, a medida que se aumentaba la corriente en la línea de medición, también la tensión en la resistencia de carga aumentaba.

El CSNX25 proporciona una corriente eficaz teórica de 12,5 miliamperios a la resistencia de carga a la salida para cuando se está midiendo en la línea una corriente máxima de 25 Amperios RMS. El comportamiento del sensor y la proporción de exactitud se corroboraron (tabla 5) en el laboratorio antes de acoplarse al SIMEM.

Figura. 21. Esquemático de prueba del sensor CSNX25



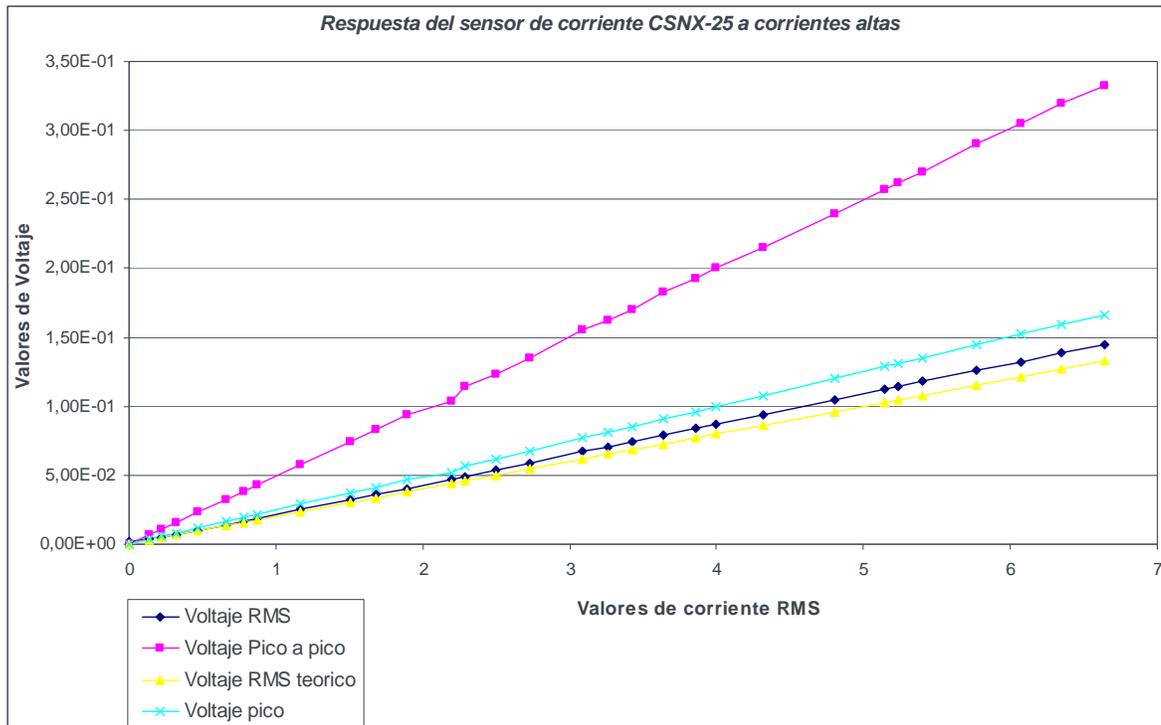
Con el sensor configurado con una resistencia de carga de salida de 40 ohmios, se pudo obtener un valor de voltaje del variac variando la resistencia de carga en la línea: Los valores de corriente pico y RMS de resistencia de salida.

Tabla. 5. datos de prueba del sensor CSNX25

Corriente de la línea RMS	Voltaje RMS	Voltaje Pico a pico	Voltaje RMS teórico	Voltaje pico	Error porcentual
0	1,80E-03	0	0	0	-
0,14	3,50E-03	7,00E-03	0,0028	0,0035	25
0,22	5,00E-03	1,10E-02	0,0044	0,0055	13,6
0,32	6,90E-03	1,60E-02	0,0064	0,008	7,8
0,47	1,01E-02	2,30E-02	0,0094	0,0115	7,4
0,66	1,41E-02	3,25E-02	0,0132	0,01625	6,8
0,78	1,67E-02	3,85E-02	0,0156	0,01925	7,0
0,87	1,87E-02	4,30E-02	0,0174	0,0215	7,4
1,17	2,51E-02	5,79E-02	0,0234	0,02895	7,2
1,51	3,23E-02	7,40E-02	0,0302	0,037	6,9
1,68	3,58E-02	8,30E-02	0,0336	0,0415	6,5
1,89	4,05E-02	9,40E-02	0,0378	0,047	7,1
2,2	4,69E-02	1,04E-01	0,044	0,052	6,5
2,29	4,89E-02	1,14E-01	0,0458	0,057	6,7
2,5	5,34E-02	1,23E-01	0,05	0,0615	6,8
2,73	5,90E-02	1,35E-01	0,0546	0,0675	8,0
3,09	6,70E-02	1,55E-01	0,0618	0,0775	8,4
3,26	7,00E-02	1,63E-01	0,0652	0,08125	7,3
3,43	7,44E-02	1,70E-01	0,0686	0,085	8,4
3,64	7,94E-02	1,83E-01	0,0728	0,09125	9,0
3,86	8,40E-02	1,93E-01	0,0772	0,09625	8,8
4	8,72E-02	2,00E-01	0,08	0,1	9
4,32	9,43E-02	2,15E-01	0,0864	0,1075	9,1
4,8	1,05E-01	2,40E-01	0,096	0,12	8,8
5,14	1,12E-01	2,58E-01	0,1028	0,12875	9,3
5,24	1,15E-01	2,63E-01	0,1048	0,13125	9,2
5,4	1,18E-01	2,70E-01	0,108	0,135	9,2
5,77	1,26E-01	2,90E-01	0,1154	0,145	9,4
6,07	1,32E-01	3,05E-01	0,1214	0,1525	8,9
6,35	1,39E-01	3,20E-01	0,127	0,15975	9,2
6,64	1,45E-01	3,33E-01	0,1328	0,16625	9,2

De los datos obtenidos en el la tabla 5 se obtuvo la grafica de respuesta del sensor de corriente CSNX-25 a corrientes altas (figura. 22.).

Figura 22. Grafica de los valores de la tabla 5.



También se observó el comportamiento del sensor de corriente con el integrado ADE7763. Para esto, el sensor CSNX25 se acopló al circuito integrado ADE7763 con una resistencia de carga igual a 40 ohmios y con un circuito igual al usado en trazado del circuito para el canal 1. La tabla 6 muestra los resultados de la prueba.

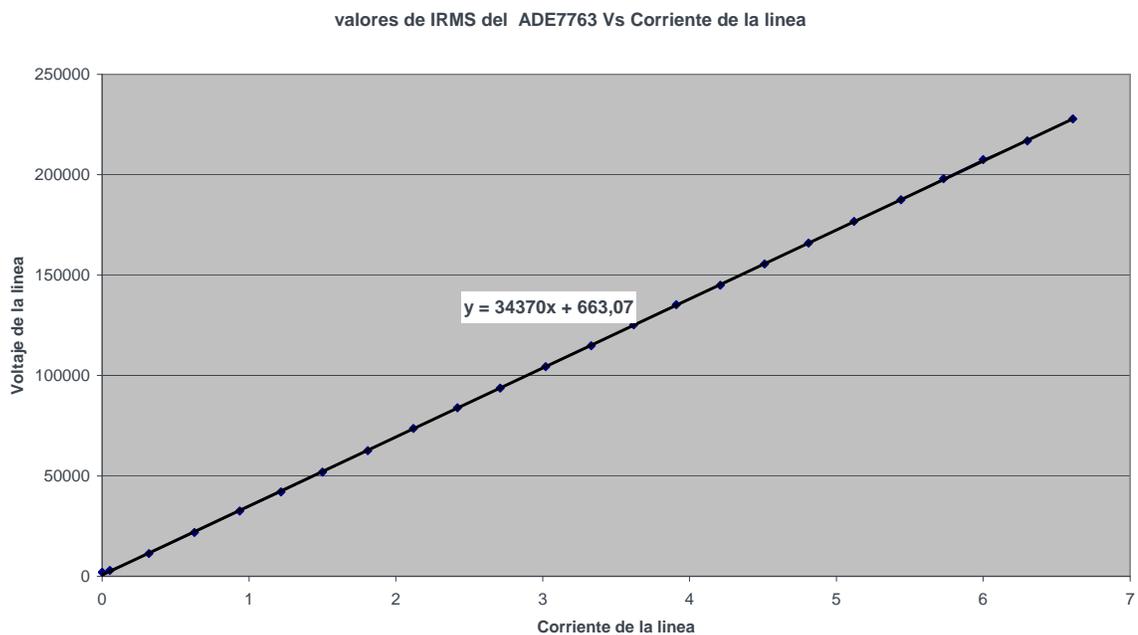
Tabla. 6. datos de prueba del sensor CSNX25 junto al ADE7763.

corriente de la línea	Valor del registro IRMS en el ADE7763
0	1986
5,29E-02	2934
0,318	11310
0,628	21827
0,937	32518
1,218	42047

1,5	51921
1,809	62612
2,12	73640
2,42	83979
2,71	93710
3,02	104364
3,33	114815
3,62	125189
3,91	135309
4,21	144942
4,51	155549
4,81	165960
5,12	176707
5,44	187512
5,73	198017
6	207566
6,3	216870
6,61	227844

De la tabla 6 se obtuvo la gráfica 23 de valores de registro de corriente rms del ADE7763 contra la corriente rms de la línea.

Figura 23. Gráfica de los valores de la tabla 6



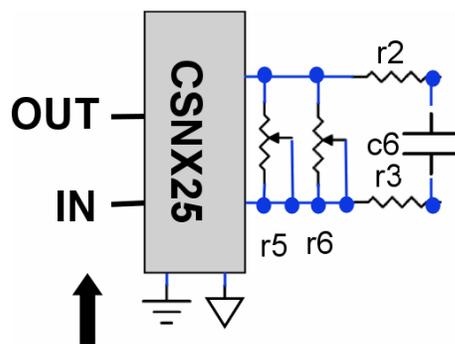
La gráfica anterior muestra el comportamiento de medición de corriente utilizando el CSNX-25 y el integrado ADE7763. La gráfica azul está trazada para valores que se hallaron en el laboratorio, mientras que la línea negra es una aproximación del comportamiento lineal de la medición hecha. La ecuación que aparece en la mitad de la gráfica es la relación matemática que hay entre la corriente de la línea y el valor del registro del integrado ADE7763.

4.7 CIRCUITO TRAZADO PARA EL CANAL 1

Por intermedio de este circuito, el SIMEM representa la señal de corriente de la línea. La figura 24 muestra este circuito. Este circuito se puede dividir en dos etapas, la primera que consiste en la representación de la forma de onda de la señal de corriente y la otra etapa en un filtrado pasivo de la misma.

La medición de corriente en la línea se logra a través del transductor CSNX25. Este sensor de corriente junto a las resistencias R5 y R6 en la entrada, representan proporcionalmente la forma de onda de la señal de corriente de la línea. Posteriormente a la obtención de esta señal, ésta es filtrada por un filtro pasa-bajo con frecuencia de corte de 4.8Khz. El filtro rechaza las frecuencias espejo que se generan por el muestreo de la señal por parte del ADE. Este filtro es llamado filtro Antialias, y busca que la señal del transductor no tenga ruido. Los elementos de este filtro son las resistencias R2 y R3 y la capacitancia C6.

Figura. 24. Circuito trazado para el canal 1.



El valor de las resistencias R5 y R6 depende de las corrientes de salida y al rango de entrada que tiene el CSNX25. Teniendo en cuenta que 12,5 mA rms es el máximo valor de corriente a la salida del CSNX25 y que el voltaje de entrada

máximo para el canal 1 es de 0.5 voltios en el ADE7763, se calcula la resistencia de carga que va conectada a la salida del CSNX-25 de la siguiente manera.

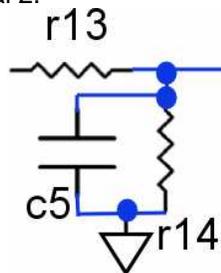
$$R = \frac{0.5 / \sqrt{2}}{12,5} = 28.28 \text{ _ohmios}$$

Hallada la impedancia, deben seleccionarse las resistencias de carga R5 y R6 para equivalgan al valor hallado. Las resistencias variables R5 y R6 fueron conectadas en paralelo, para lograr estabilidad en valor de impedancia de salida del CSNX25.

4.8 CIRCUITO TRAZADO PARA EL CANAL 2

De la sección anterior, puede verse que el medidor simplemente atenuando el voltaje de la línea, el medidor obtiene la señal del canal 2 en el ADE. El voltaje de la línea es simplemente atenuado por un divisor de tensión como se muestra en la figura 25. La topología de la red se hace de esta forma para que no haya ningún tipo de desfase entre el canal 1 y 2.

Figura. 25. Circuito trazado para el canal 2.

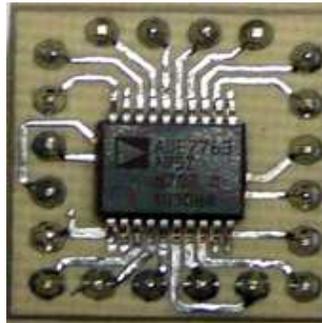


Debido a que el SIMEM va a ser usado en una línea de distribución que tiene un voltaje nominal de 120 voltios, se escogieron valores de resistencias R13 y R14 de forma que permitan medir tensiones mayores a esta. Con la resistencia de 592 Kohmios y 1199 ohmios en el divisor de tensión, el SIMEM puede medir energía con tensiones en la línea de hasta 174,919 voltios rms o 247.37 voltios pico. El condensador C5 permite filtrar las señales de ruido que pueden presentar en la entrada del canal 2 en el ADE.

4.9 INTEGRADO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA DE UNA SOLA FASE, ADE7763

El ADE7763 es un integrado de medición de energía de alta precisión incluso en condiciones variantes de ambiente y tiempo. Disponible en encapsulado SSOP de veinte contactos (ver figura 26). El ADE7763 incorpora dos convertidores análogo-a-digital delta-sigma de segundo orden y 16 bits, un integrador digital en el canal uno, un circuito de referencia, un sensor de temperatura y todo lo que se necesita para el procesamiento de señal requerido en la medición de energía aparente y activa, medición del periodo de una señal de voltaje en la línea, y cálculo de valores eficaces tanto de voltaje como de corriente de la misma.

Figura. 26. Tarjeta del circuito integrado ADE7763.



El ADE7763 provee en sus puertos de entrada y salida una interfaz serial para leer y transmitir datos, la detección de cruce por cero en la línea, la localización de una caída de voltaje en su fuente de alimentación, un indicador de interrupciones del integrado y una frecuencia de pulsos de salida que es proporcional a la potencia activa.

Además, al integrado se le deben suministrar las señales de entrada proporcionales a la corriente y el voltaje en la línea, por el canal 1 y 2 respectivamente, una fuente de alimentación tanto para el trazado digital como para el análogo del integrado, así como sus respectivas tierras.

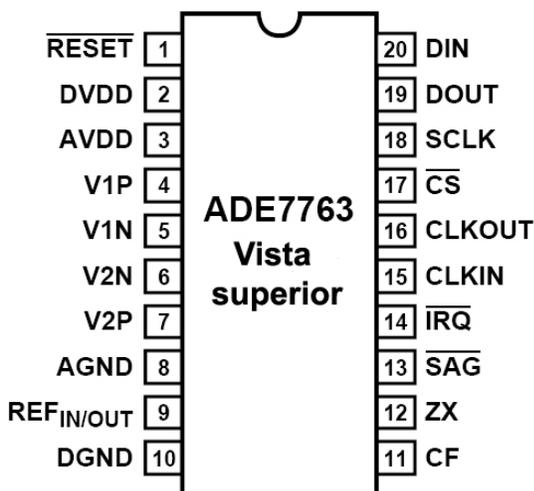
Posee características como varios sistemas de calibración que permiten la corrección del offset, corrección de fase y calibración de potencia, asegurando alta precisión. Modo de acumulación de energía sólo positiva. Un umbral interno de no carga el cual se asegura que la parte de la señal de ruido no aparezca en la acumulación de potencia cuando en la línea no se tiene ninguna carga.

Lo que hace que el SIMEM sea un medidor de energía es el ADE7763. Este componente está conectado al microcontrolador por una interfaz serial (SPI); ésta permite el intercambio de datos con el microcontrolador y éste a su vez concede al usuario calibrar varios componentes del medidor como la ganancia, los niveles de voltaje y los errores de fase.

4.9.1 Configuración de contactos y descripción de funciones.

El ADE7763 tiene distribuidos los contactos según la figura 27. A continuación se explica la función de cada uno de ellos.

Figura. 27. Configuración de contactos.



- **Contacto número 1 (RESET):** Contacto de reseteo del ADE7763. Un bajo lógico en este contacto mantiene a los CADs y al circuito digital (incluyendo la interfaz seriales) en condición de reseteado.
- **Contacto número 2 (DVDD):** Fuente de alimentación digital. Este contacto proporciona una fuente de voltaje para el trazado de circuito digital. El voltaje de fuente se debe mantener es de 5 voltios a $\pm 5\%$ para la operación especificada.
- **Contacto número 3 (AVDD):** Fuente de alimentación analógica. Este contacto proporciona una fuente de voltaje para el trazado del circuito

analógico. La fuente se debe mantener en 5 voltios a $\pm 5\%$ para la operación especificada.

- **Contactos números 4 y 5 (V1P, V1N):** Entrada análoga para el canal 1. Este canal es provisto para uso con un transductor de corriente, es decir, una bobina de Rogowski u otro sensor actual tal como un transformador corriente (TC). Estas entradas de información son de tipo de voltaje diferencial, con niveles diferenciados máximos de la señal de entrada de información de $\pm 0.5V$, $\pm 0.25 V$, y $\pm 0.125 V$, dependiendo de la escala seleccionada en el registro ganancia (ver sección del registro ganancia). El nivel máximo de la señal en estos contactos con respecto la referencia análoga es de $\pm 0.5 V$. Ambas entradas de información tienen trazado de circuito interno de protección ESD, y que pueden sostener una sobre tensión de $\pm 6 V$ sin riesgo de daño permanente.
- **Contactos números 6 y 7 (V2N, V2P):** Entradas de información analógica para el canal 2. Este canal se piensa para uso con el transductor de voltaje. Estas entradas de información son entradas de información completamente de voltaje diferencial con un nivel diferencial máximo de señal de $\pm 0.5V$ con respecto a la referencia análoga. También estas entradas de información tienen trazado de circuito interno de protección ESD y que pueden sostener una sobre tensión de $\pm 6 V$ sin riesgo de daño permanente.
- **Contacto número 8 (AGND):** Referencia de tierra Analógica. Este contacto proporciona la referencia de tierra para el trazado de circuito analógico, es decir, CADs y referencia. Esta referencia de tierra debe utilizarse para todo el trazado de circuito analógico, tal como filtros de antialias y transductores de corriente y de voltaje.
- **Contacto número 9 (REF in/out):** Acceso al voltaje de referencia del integrado. La referencia del integrado tiene un valor nominal de $2.4 V$ a $\pm 8\%$ y un coeficiente típico de temperatura de $30 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Una fuente externa de referencia se puede también conectar en este contacto. En cualquier caso, este contacto se debe desacoplar a AGND con un condensador de cerámica de $1\mu\text{F}$.
- **Contacto número 10 (DGND):** Referencia de tierra Digital. Este contacto proporciona la referencia de tierra para el trazado de circuito digital, es decir, multiplicador, filtros, y convertidor digital a frecuencia. Como las corrientes de vuelta digitales en el ADE7763 son pequeñas, es aceptable conectar este contacto con el plano de tierra analógico del sistema. Sin

embargo, la alta capacitancia del bus en el contacto DOUT podría dar lugar a la corriente digital ruidosa, que podría afectar el funcionamiento.

- **Contacto número 11 (CF):** Salida lógica de frecuencia de calibración. La salida lógica CF da la información de la potencia activa. Esta salida se piensa para ser utilizada para los propósitos operacionales y de calibración. La frecuencia a escala completa de salida puede ser ajustada escribiendo a los registros CFDEN y CFNUM (ver la sección de conversión de energía a frecuencia).
- **Contacto número 12 (ZX):** Salida de cruce por cero de la forma de onda del Voltaje del canal 2. Esta salida acciona un alto lógico y un bajo lógico en el cruce por cero de la salida diferencial del canal 2 al detectar el cruce por cero.
- **Contacto número 13 ($\overline{\text{SAG}}$):** Esta es una salida lógica que se muestra activa con un estado bajo lógico cuando no se detecta ningún cruce por cero o un umbral de baja tensión en el canal 2.
- **Contacto número 14 ($\overline{\text{IRQ}}$):** Salida requerida de interrupciones, esta se activa en un nivel lógico bajo cuando ocurre una interrupción dentro del ADE7763. Una interrupción enmascarada hace reiniciar el registro de energía activa, el nivel medio del registro de energía activa, y la llegada de nuevas muestras de forma de onda (ver la sección de interrupciones).
- **Contacto número 15 (CLKIN):** Reloj principal para los CADs y el procesamiento de señal digital. Un reloj externo se puede proporcionar en esta entrada de información lógica. Alternativamente, en paralelo un cristal resonante se puede conectar a través de CLKIN y CLKOUT para proporcionar una fuente del reloj para el ADE7763. La frecuencia de reloj para la operación especificada es 3.579545 megaciclos.
- **Contacto número 16 (CLKOUT):** Un cristal se puede conectar a través de este contacto y CLKIN, según lo descrito para el contacto 15, para proporcionar una fuente de reloj para el ADE7763. El contacto CLKOUT puede manejar una carga CMOS cuando ninguna señal de reloj externo se provee en CLKIN o cuando un cristal este siendo utilizando.
- **Contacto número 17 (CS):** Selección del Chip. Parte de la interfaz en serie de cuatro conexiones SPI. Esta entrada de información se activa con un bajo lógico que permite al ADE7763 comparta el bus serial con varios dispositivos de interfaz serial.

- **Contacto número 18 (SCLK):** Entrada de información del reloj serial para la interfaz serial sincronía. Todas las transferencias de datos seriales se sincronizan a este reloj en la sección de interfaz en serie. El SCLK tiene un Schmitt-trigger en la entrada de información para el uso con la fuente de reloj que tenga un tiempo lento de transición de flanco, tal como una salida de un optoacoplador.
- **Contacto número 19 (DOUT):** Salida de datos para la interfaz en serie. Los datos se cambian de estado hacia fuera en este contacto sobre el flanco que sube de la señal SCLK. Esta salida lógica está normalmente en un estado de alta impedancia, a menos que esté conduciendo datos sobre el bus correspondiente.
- **Contacto número 20 (DIN):** Entrada de información de datos para la interfaz en serie. Los datos se cambian de puesto adentro de este contacto sobre el flanco que cae de la señal SCLK.

4.9.2 Teoría de operación

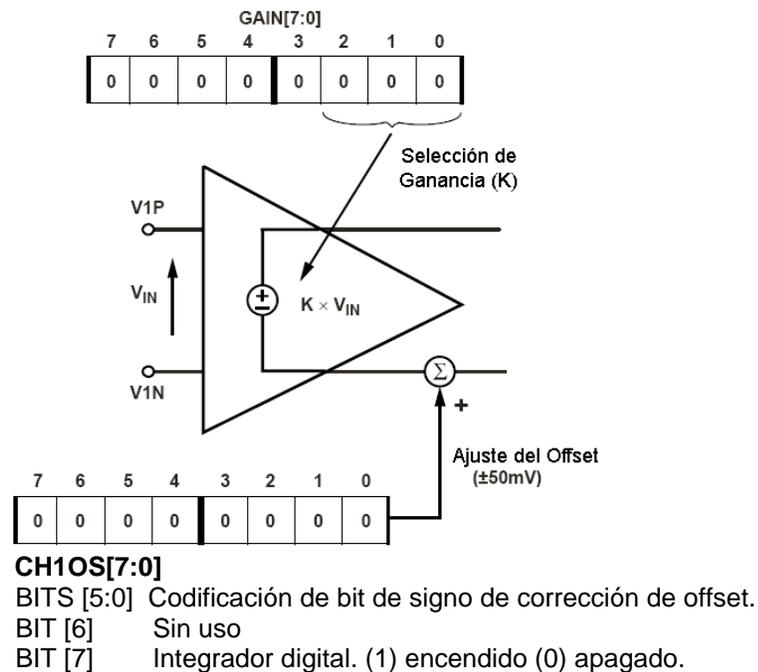
El ADE7763 contabiliza la energía consumida por una carga en una línea de distribución a partir de las señales proporcionales de voltaje y corriente en la línea. El ADE a través de transductores toma dichas señales para el procesamiento de señal que se da en el integrado y que se muestra en el diagrama de bloques de la figura 28. Cada cuadro dentro del diagrama de bloques representa un proceso, o una función específica del integrado. Para cuando el bloque es un proceso, significa que una señal digital es procesada, ya sea para generar el cálculo de energía o para el monitoreo de la línea. Los otros bloques son los que cumple una función específica del integrado, realizan configuraciones del integrado o llevan datos a microprocesadores, ya que en sí solo este integrado no puede funcionar como un sistema de medición de energía.

Los bloques que corresponden al cálculo de energía son: el de entradas análogas, HPF1 (filtro pasa alto), la integral en el tiempo, la compensación de fase, calculo de potencia activa, cálculo de energía, modo de acumulación por ciclo de línea y CFE (convertidor frecuencia-a-energía). Por otra parte los bloques de monitoreo de la línea son: el de detección de caídas de voltaje, el de localización cruces por cero, medición de periodo, cálculo de potencia aparente, el de datos de formas de onda de las señales de corriente, voltaje, y potencia activa y el de cálculo de valores eficaces, tanto para las señales de corriente y voltaje. Los bloques de funciones específicas son: el de registros e interfaz serial, el de monitoreo de

offset. Para la señal del canal 1 corresponde a la señal que proviene del transductor de corriente, puede recibir igual tratamiento que la señal del canal 2, además de la posibilidad de modificarse la escala a fondo completo de la señal de entrada para el CAD de este canal. El voltaje de entrada análoga máxima para cada canal de entrada es de ± 0.5 V con respecto a AGND.

Cada canal de entrada de información analógica tiene un amplificador de ganancia programable (AGP) con posibles selecciones de ganancia de 1, 2, 4, 8, y 16, ver la figura 29. Las selecciones de ganancia son hechas escribiendo el registro de ganancia (GAIN). Los Bits del 0 al 2 selecciona la ganancia para el AGP en el canal 1; la selección de ganancia para el AGP en el canal 2 se hace con los dígitos binarios del 5 a 7. La figura 29 también muestra cómo una selección de ganancia para el canal 1 es hecha usando el registro ganancia.

Figura. 29. PGA en el canal 1.



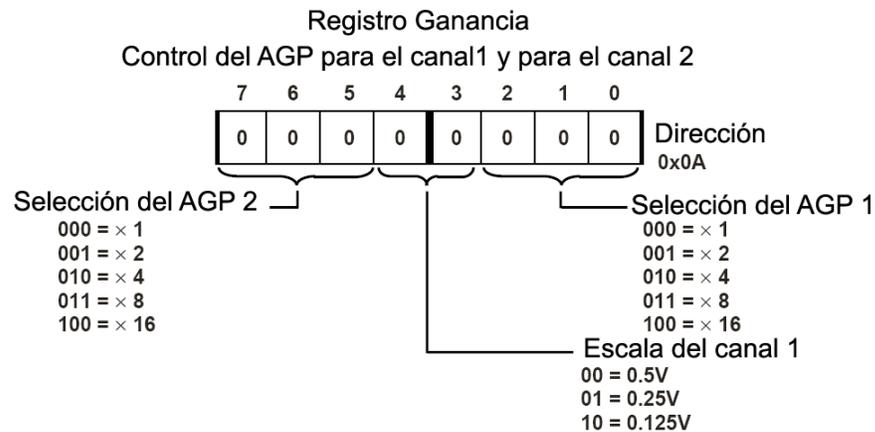
Adicionalmente al PGA, el canal 1 también tiene un rango de selección para la entrada a escala completa para el CAD. La selección del rango de la entrada análoga del CAD es también hecha usando el registro de ganancia, (ver la figura 30). Como antes se mencionó, el voltaje máximo de la entrada diferencial es de ± 0.5 V. Sin embargo, usando los Bits 3 y 4 en el registro de ganancia, el rango de voltaje del CAD máximo puede ser puesto a 0.5 V, 0.25 V, o 0.125 V. Esto es

conseguido ajustando la referencia del CAD - ver la sección de circuito de referencia. La tabla 7 resume el nivel de señal de entrada diferencial máxima sobre el canal 1 para el rango de variación del CAD y las selecciones de ganancia.

Tabla. 7. Máximo nivel de señal de la entrada del canal 1.

Máxima señal Canal 1	Selección del rango de entrada del CAD		
	0.5V	0.25V	0.125V
0.5 V	Ganancia = 1	-	-
0.25 V	Ganancia = 2	Ganancia = 1	-
0.125 V	Ganancia = 4	Ganancia = 2	Ganancia = 1
0.0625 V	Ganancia = 8	Ganancia = 4	Ganancia = 2
0.0313 V	Ganancia = 16	Ganancia = 8	Ganancia = 4
0.0156 V	-	Ganancia = 16	Ganancia = 8
0.00781V	-	-	Ganancia = 16

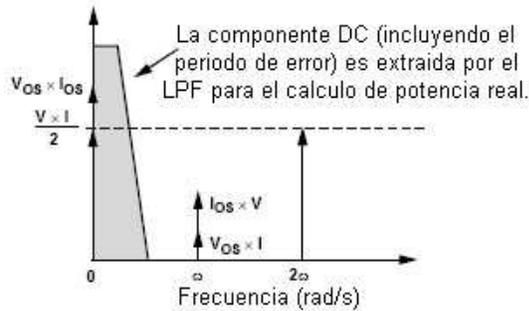
Figura. 30. Registro de ganancia análoga.



Es también posible ajustar los errores de compensación sobre el canal 1 y el canal 2 escribiendo a los registros de rectificación de compensación (CH1OS y CH2OS, respectivamente). Estos registros permiten compensación del canal en un rango de ± 20 milivoltios a ± 50 milivoltios (dependiendo del ajuste de ganancia) de ser retirados. Se observa que no es necesario efectuar una rectificación de compensación en una aplicación de medición de energía si HPF en el canal 1 está activado. La figura 31 indica el efecto de las compensaciones sobre el cálculo de potencia real. Como se puede ver en la figura 31, una compensación sobre el canal 1 y el canal 2 aporta un componente DC después de la multiplicación.

Porque este componente DC es extraído por LPF2 para generar la información de potencia activa (Real), las compensaciones aportan un error al cálculo de potencia activa. Este problema es evitado fácilmente permitiendo HPF en el canal 1. Retirando la compensación de al menos un canal, ningún componente de error DC es generado por la multiplicación. Los términos de error como COS (WT) son quitados por LPF2 y por la integración de la señal de potencia activa en el registro de energía activa (energía [23: 0]) - Ver la sección de cálculo de energía.

Figura. 31. Efecto de la compensación en el canal 1 en el cálculo de potencia activa.



Los contenidos de los registros de corrección de compensación son de seis bits, bit de signo y la magnitud programada. El peso del menos significativo depende del ajuste de ganancia, dependiendo de si es 1, 2, 4, 8, o 16. La tabla 8 indica la compensación de corrección para cada uno de los ajustes de ganancia y los pesos del bit menos significativo (milivoltios) para los registros de rectificación de compensación.

Tabla. 8. rango de corrección de compensación para el canal 1 y 2.

Ganancia	Corrección	Peso del LSB
1	± 50mV	± 1.61mV/LSB
2	± 37mV	± 1.19mV/LSB
4	± 30mV	± 0.97mV/LSB
8	± 26mV	± 0.84mV/LSB
16	± 24mV	± 0.77mV/LSB

Para llevar a cabo un ajuste de compensación, se conectan las entradas de análogas a AGND; ninguna señal debe haber sobre el canal 1 o el canal 2. Una lectura desde el canal 1 o el canal 2 usando el registro de forma de onda muestra la compensación en el canal. Esta compensación puede ser cancelada al escribir un valor de compensación igual y opuesto al que está en el registro de compensación del canal 1, o igual al registro de compensación del canal 2. La

corrección de compensación puede ser confirmada llevando a cabo otra lectura. Se observa que cuando se ajusta la compensación del canal 1, el integrador digital y el HPF debe ser desactivado.

4.9.4 Conversión Análogo a digital (CAD)

El ADE7763 posee por cada canal de señal de entrada un CAD. En esta sección se lleva a cabo la conversión de las señales del plano análogo al plano digital de las señales del canal 1(corriente) y del canal 2(voltaje). Dentro del ADE esto se lleva a cabo usando dos CADs delta-sigma de segundo orden. Por simplicidad el CAD convierte una señal de entrada en una cadena serial continua de unos y ceros a un muestreo determinado de CLKIN/4. En el CAD sólo cuando un número grande de muestras es procesado puede a la salida obtenerse un resultado. A la salida del CAD se puede encontrar un filtro pasa bajo que puede producir una palabra de 24 bit de datos proporcional a la señal de entrada.

El CAD para conseguir alta resolución utiliza el *sobremuestrear*. Sobremuestrear significa que una señal es muestreada a una tasa de frecuencia muchas veces mayor al ancho de banda de interés. Por ejemplo la tasa de muestreo en el ADE7763 CLKIN/4(894KHz) y la banda de interés es de 40 HZ a 2KHz.

4.9.5 Función de transferencia del CAD

La siguiente expresión muestra la salida de del filtro pasa bajo a la salida del CAD para una entrada de nivel de señal análoga. Ambos CADs en el ADE7763 están diseñados para producir el mismo código de salida para el mismo nivel de señal de entrada.

$$Code(CAD) = 3.0492x \frac{V_{in}}{V_{out}} x 262.144 \quad (1)$$

Por lo tanto, con una señal a escala completa sobre la entrada de $\pm 0.5V$ y una referencia interna de 2.42V, el CAD a la salida tiene una cifra nominal de $\pm 165,151$, o $0x2851F$. El valor máximo del CAD es $\pm 262,144$; este es equivalente a un nivel de señal de entrada de $\pm 0.794V$. Sin embargo por el rendimiento especificado en la hoja técnica, este no excede los 0.5V en el nivel de señal de entrada.

4.9.6 Filtro pasa alto (HPF1)

En el momento en que la señal de corriente este en el plano digital sobre el canal 1, un filtro HPF1 toma el offset de esta señal y lo remueve, permitiendo que el cálculo potencia no se vea afectado por este offset.

4.9.7 Integrador Digital y el Sensor de Corriente

El integrador digital es habilitado en al ADE para medir la corriente de la línea a través de un sensor de tipo inductivo (bobina de Rogowski). Como la señal de salida de voltaje del sensor de corriente sería di/dt , es necesario un integrador para restaurar la señal a su forma original. El ADE7763 tiene un integrador digital incorporado que recupera la señal en curso del sensor di / dt . El integrador digital sobre canal 1 está apagado cuando el ADE7763 es energizado. Ajustando el bit más significativo del registro CH1OS se activa el integrador.

4.9.8 Compensación de fase

Cuando el filtro HPF1 está inhabilitado, el error de fase entre el canal 1 y el canal 2 es de cero para una señal de corriente continua hasta 3.5 KHz. Cuando HPF1 está activado, el canal 1 tiene la respuesta de fase de casi cero de 45 Hz a 1 KHz, el cual es todo lo que es requerido en típicas aplicaciones de medición de energía. Sin embargo, a pesar de ser compensado en fase internamente, el ADE7763 debe funcionar con transductores, que pueden tener errores de fase inherentes. Por ejemplo, un error de fase de 0.1° a 0.3° no es poco común para un transformador de corriente (CT). Los errores de fase pueden desviarse de parte a parte y deben ser corregidos para llevar a cabo los cálculos de potencia exactos. Los errores relacionados con fases irregulares son particularmente perceptibles en factores de potencia baja. El ADE7763 provee unos medios para la calibrar digitalmente estos errores de fase pequeños permitiendo que un pequeño tiempo de retraso o un avance de tiempo sea introducido en la cadena de procesamiento de señal para compensar estos errores. Como la compensación es en el tiempo, esta técnica debe ser usada solamente para los errores de fase pequeños de 0.1° a 0.5° .

El registro que se utiliza para la calibración de la fase es el PHCAL [5: 0]. El PHCAL o registro de calibración es un registro en complemento a dos, con bit de magnitud que tiene valores que se extienden desde $0x21$ (- 31d) a $0x1F$ (+31d).

El registro es centrado en $0x0DH$, entonces escribir $0x0DH$ al registro reduce a cero el retraso. Cambiando el registro de PHCAL, el tiempo de retraso en la señal del canal 2 puede cambiar desde -102.12 microsegundos a 39.96 microsegundos

(CLKIN = 3.579545 MHz). El bit menos significativo es equivalente a 2.2 microsegundos (CLKIN/8) tiempo de retraso o de avance. Una frecuencia de línea de 60 HZ da una resolución de fase de 0.048° (360°x2. 22usegx60Hz) en la parte fundamental.

4.9.9 Cálculo de potencia Activa en el ADE7763

Una señal senoidal, tensión o corriente, se expresa matemáticamente en función del tiempo por la siguiente ecuación.

$$a(t) = A_o * \text{Sen}(Wt + B)$$

Donde:

A_o es la amplitud en voltios o amperios (también llamado valor máximo pico), W es la velocidad angular (rad/seg) y B es el ángulo de desfase inicial, el cual se asume como cero.

El valor eficaz de una señal, es aquel valor que produce el mismo efecto calórico que su equivalente en corriente continua, lo que se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$A_o = \sqrt{2} * A$$

Donde:

A es el valor eficaz

A_o es la amplitud

Suponiendo que a una carga se le aplica una tensión V(t).

$$v(t) = v * \text{sen}(wt) \tag{1}$$

Donde:

v es un valor pico de voltaje

w es la velocidad angular

Esto produce una corriente

$$i(t) = i * \text{sen}(wt) \tag{2}$$

Donde:

i es un valor pico de corriente

La potencia instantánea vendrá dada como el producto de las expresiones 1 y 2, y es igual a la tasa de circulación de energía en cualquier momento. La unidad de la potencia se da en vatios o julios/s.

$$p(t) = v(t) * i(t) = v * \text{sen}(wt) * i * \text{sen}(wt) \quad (3)$$

Donde p(t)= es la potencia instantánea.

Sustituyendo los valores pico por valores eficaces en la ecuación 3

$$v = V * \sqrt{2}$$

$$i = I * \sqrt{2}$$

Donde:

V es el valor eficaz o RMS del voltaje

I es el valor eficaz o RMS de la corriente

Queda que:

$$p(t) = \sqrt{2} * V * \text{sen}(wt) * \sqrt{2} * I * \text{sen}(wt) \quad (4)$$

Mediante trigonometría la expresión 4 puede transformarse en la ecuación 5.

$$p(t) = V * I - V * I * \cos(2wt) \quad (5)$$

La potencia promedio sobre un número de ciclos de línea (n) es dado por la expresión en la ecuación 6.

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t) dt = V * I \quad (6)$$

Donde:

T es el periodo ciclo de la señal

P es potencia activa o potencia real o potencia promedio

Se observó que la potencia activa es igual a la componente DC de la señal de potencia instantánea en la ecuación 5.

Potencia Activa

$$P = V * I$$

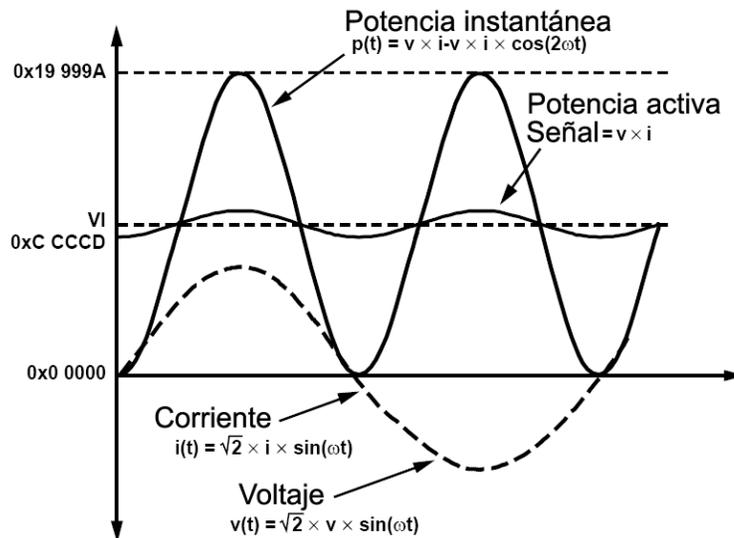
Potencia Instantánea

$$p(t) = (V * I) - (V * I * \cos(2\omega t))$$

$$p(t) = (\text{componente_DC}) - (\text{Potencia_fluctuante})$$

Esta relación es usada para calcular la potencia activa en el ADE7763. La señal de potencia instantánea $p(t)$ es generada por la multiplicación de las señales de corriente y voltaje. La componente DC de las señal de potencia instantánea es luego extraída por el LPF2 (filtro pasa bajo) para obtener la información de potencia activa. Este proceso es ilustrado en la figura 32.

Figura. 32. Cálculo de potencia activa.

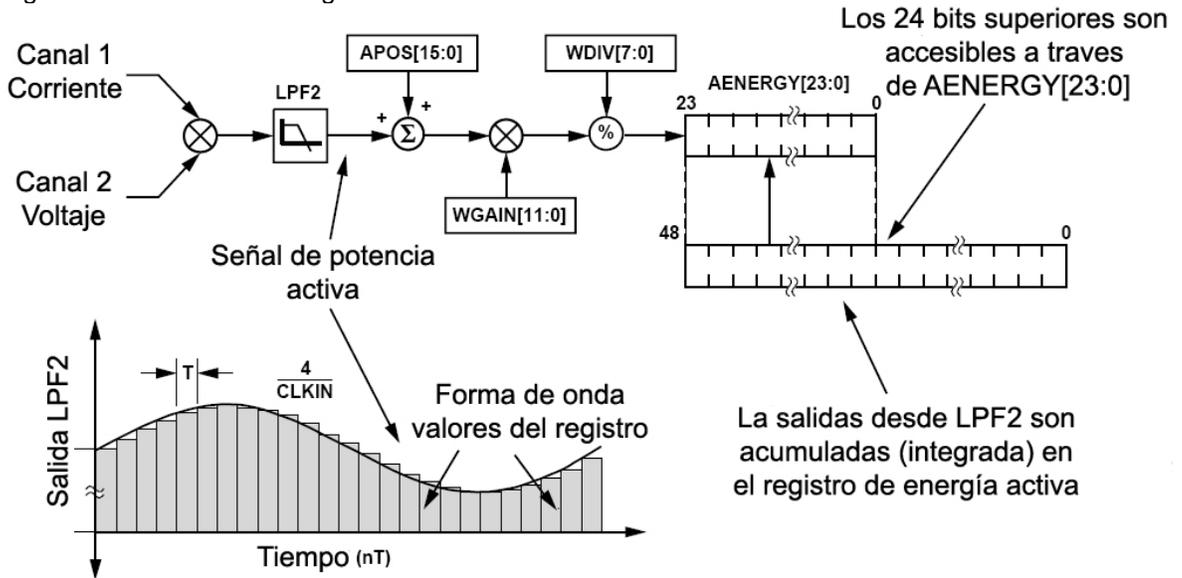


Como LPF2 no posee un comportamiento ideal de respuesta en frecuencia, la señal de potencia activa tiene un rizado debido a la señal de potencia instantánea. Este rizado es sinusoidal y tiene una frecuencia igual al doble de la línea de frecuencia. Ya que el rizado es sinusoidal por naturaleza, esta es removida cuando la potencia activa es integrada para el cálculo de energía.

La figura 33 muestra la cadena de procesamiento de señal para el cálculo de potencia activa. La potencia activa es calculada filtrando la señal de potencia instantánea en un filtro pasa bajo. Se observa que cuando se leen las muestras de forma de onda de la salida LPF2, la ganancia de la energía activa puede ser ajustada usando el multiplicador y el registro ganancia de watio (WGAIN [11:0]). La

ganancia es ajustada escribiendo en complemento a dos una palabra de 12 bits en el contenido del registro de ganancia de vatio.

Figura. 33. Cálculo de energía activa.

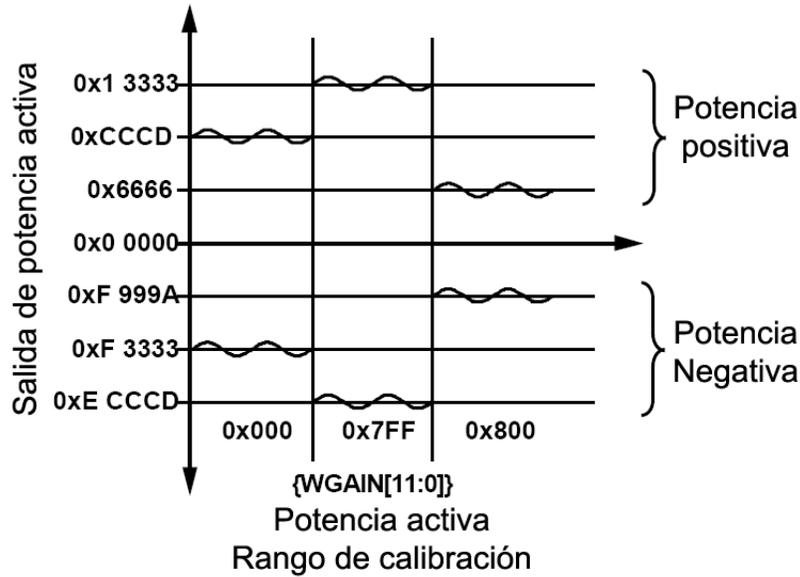


La ecuación 7 muestra cómo la ganancia puede ser ajustada con relación al contenido en el registro de ganancia de vatio.

$$Output\ WGAIN = \left(Active\ Power \times \left\{ 1 + \frac{WGAIN}{2^{12}} \right\} \right) \quad (7)$$

Por ejemplo, cuándo 0x7FF es escrito en el registro de ganancia de vatio, la salida de potencia es puesta en alto por un 50 %. $0x7FF = 2047d$, $2047/2^{12} = 0.5$. Similarmente. $0x800 = -2048d$ (complemento a dos) y la potencia de salida por 0.0244%. En la figura 34 se muestra el máximo valor (hexadecimal) del rango de salida para la señal de potencia activa (LPF2). Se observó que el rango de salida cambia dependiendo del contenido del registro de ganancia de potencia. El mínimo rango de salida está dado cuando en el registro de ganancia de potencia contiene un valor igual a 0x800, y el rango máximo está dado cuando escribimos 0x7FF en el registro de ganancia de vatio. Este puede ser usado para calibrar el cálculo de potencia activa (o energía).

Figura. 34. Rango de salida del cálculo de potencia activa.



4.9.10 Cálculo de energía en el ADE7763

Como la potencia está definida por la rata de energía que fluye, la relación es expresada matemáticamente en la ecuación 1.

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (1)$$

Donde:

P es igual a la potencia

E es igual a la energía

Despejando, la energía es dada como la integral de la potencia.

$$E = \int P.dt$$

El ADE7763 consigue la integración de la señal de potencia activa por la acumulación continua de la señal de potencia activa en un registro de energía interno ilegible de 49 bits. El registro de energía activa (AENERGY[23:0]) representa los 24 BIT superiores de este registro interno. Esta acumulación en tiempo discreto o sumatoria es equivalente a la integración continua del tiempo. En la ecuación 2 se expresa esta relación.

$$E = \int p(t)dt = \lim_{t \rightarrow 0} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} p(nT) \times T \right\} \quad (2)$$

Donde:

n es el número muestra de tiempo discreto.

T es el periodo de muestra.

El tiempo discreto de periodo de muestra (t) para el registro de acumulación es de 1.1us (4/clkin). Adicionalmente, para calcular la energía, esta integración remueve cualquier componente sinusoidal que pueda ir en la señal de potencia activa.

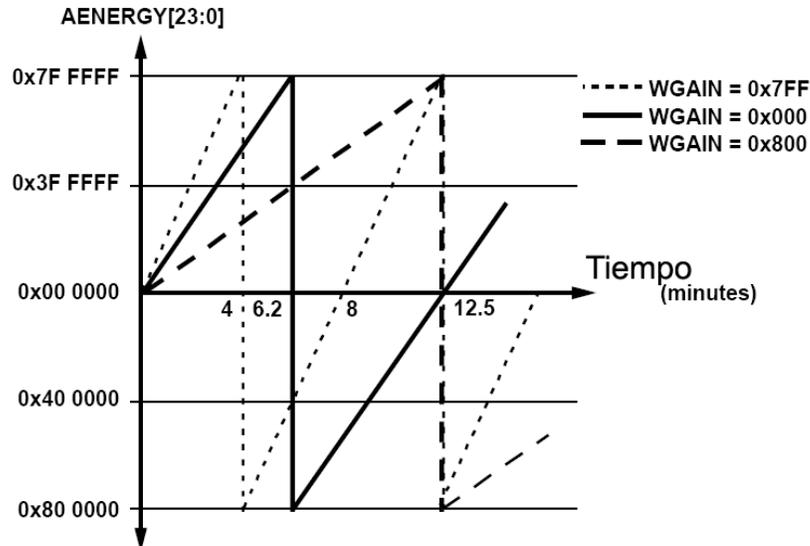
La señal de potencia activa es constantemente añadida al registro interno de energía activa. Esta suma es una adición con signo; por lo tanto, la energía negativa es sustraída del contenido de energía activa. La excepción a esto es cuando POAM es seleccionada en el registro MODE [15:0], en tal caso solo la energía positiva contribuye a la acumulación de la energía activa – ver la sección de modo de acumulación positiva.

La salida del multiplicador es dividida por WDIV. Si el valor en el registro WDIV es igual a 0, entonces el registro de energía activa es dividido por 1. WDIV es un registro de 8 bits y sin firmar. Después de dividir por WDIV, la energía activa es acumulada en un registro interno de acumulación de energía de 49 bits. Los 24 bits más significativos de este registro son accedidos a través de la lectura del registro de energía activa (AENERGY [23:0]). Una lectura al registro RAENERGY reinicia el contenido del registro AENERGY, y los 24 BIT más significativos del registro interno en el valor inicial de 0.

La figura 35 indica la acumulación de la energía para las señales totales (sinusoidal) en las entradas análogas. Las tres curvas ilustran el tiempo mínimo que el registro de energía para renovar cuando el registro de ganancia de potencia activa contenga 0x7FF, 0x000, y 0x800. El registro de ganancia de vatio es usado para llevar a cabo la calibración de potencia. Como se mostró, la rápida integración en el tiempo ocurre cuando el registro de potencia de ganancia de vatio es puesto a máximo escala llena, 0x7FF.

Se observó que el contenido del registro de energía se renueva hacia el total negativo (0x80 0000) y continúa incrementado en valor cuando el flujo de potencia o energía fluye positiva – ver la figura 34. Contrariamente, si la potencia fuera negativa, el registro de energía sobrepasaría a total positivo (0x7F FFFF) y continuaría disminuyendo en valor.

Figura. 35. Escala completa de potencia para tiempo de reinicio del registro de energía.



Usando el registro habilitador de interrupción, el ADE7763 puede configurarse para emitir una interrupción (IRQ) cuando en el registro de energía activa esta más de la mitad de lleno (positivo o negativo), o cuando un desborde o un sobrepaso ocurra.

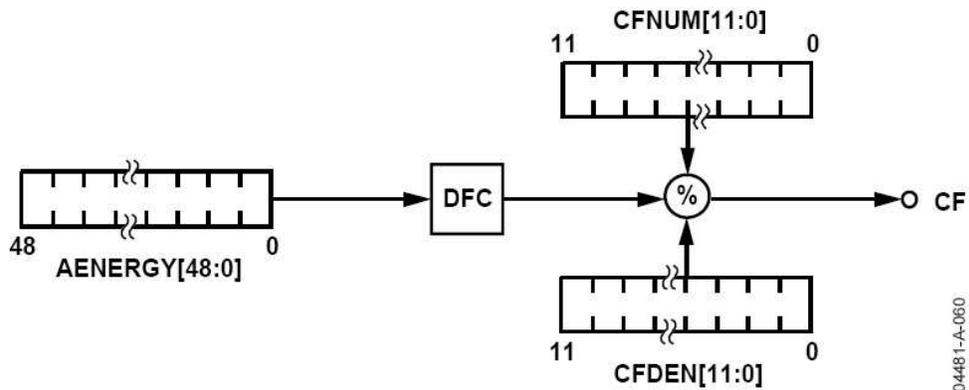
4.9.11 Conversión de energía a frecuencia

El ADE7763 provee una conversión de energía a frecuencia para propósitos de calibración. Después de la calibración inicial del fabricante, el fabricante o el consumidor a menudo verifican la calibración del medidor. Una manera conveniente de verificar la calibración del medidor por parte del fabricante es proveer una salida de frecuencia, que es proporcional a la energía o a la potencia activa bajo condiciones de carga regulares. Esta señal de frecuencia de salida puede ser provista simplemente de un solo cable, con interfaz ópticamente aislado para un equipo de calibración externo. La figura 36 ilustra la conversión de energía-a-frecuencia.

Un convertidor digital-a-frecuencia (CEF) es usado para generar la salida de pulsos en el contacto CF. El CEF genera un pulso cada vez que un bit menos significativo es acumulado en el registro de energía activa. Una salida de pulsos es generada cuando $(CFDEN+1)/(CFNUM+1)$ número de pulsos son generados

en la salida CEF. Bajo las condiciones de carga regular, la frecuencia de salida es proporcional a la potencia activa.

Figura 36. Conversión de energía a frecuencia.



La frecuencia máxima de salida, con una entrada de señal AC a escala completa, con CFNUM=0x00, y CFDEN=0x00, es aproximadamente 23Khz.

Hay dos registros de 12 bits sin bit de signo, CFNUM[11:0] y CFDEN[11:0], que pueden ser usado para configurar la frecuencia CF en un amplio rango de valores. Estos registros de escala de frecuencia son de 12 bits que pueden adaptar la frecuencia de salida.

Si el valor 0 es escrito a alguno de estos registros, el valor de 1 sería el valor aplicado para el registro. La proporción $(CFNUM+1)/(CFDEN+1)$ muestra que esta relación debe ser menor a uno para asegurar una propia operación. Si la proporción de los registros $(CFNUM+1)/(CFDEN+1)$ es mayor que uno, los valores de los registros serían ajustados a una proporción $(CFNUM+1)/(CFDEN+1)$ menor a 1.

Cuando los registros CFNUM y CFNEM son ambos puestos en uno lógico, el ancho del pulso de CF es arreglado a $16 \text{ CLKIN}/4$ ciclos de reloj, aproximadamente a $18\mu\text{s}$ con un $\text{CLKIN}=3.579545 \text{ MHz}$. Si la salida de pulso CF dura más de 180ms para una frecuencia de energía activa de menos de 5.56HZ, el ancho del pulso es fijado a 90 ms. De otra manera, el ancho de pulso es 50% del ciclo de servicio.

La frecuencia de salida tiene una onda leve en una frecuencia igual a dos veces a la frecuencia de la línea. Esto es atribuible al imperfecto filtrando de la señal de

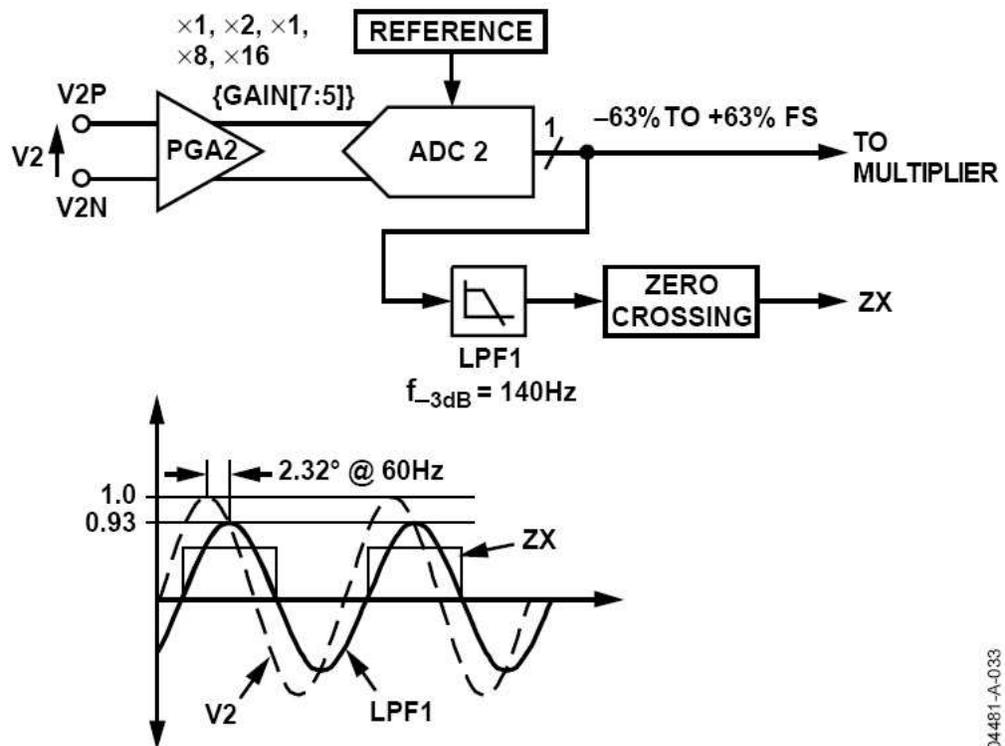
potencia instantánea para generar la señal de potencia activa – ver la sección de cálculo de potencia activa. Por consiguiente, un poco de onda sinusoidal en la señal de energía es observable en la salida de frecuencia. Eligiendo una frecuencia de salida más baja para CF para la calibración se puede reducir la onda significativamente. También, puede promediarse la frecuencia de salida usando un tiempo de compuerta largo para contrarrestar conseguir los mismos resultados.

4.9.12 Detección de cruce por cero

El ADE7763 posee un circuito detector de cruce por cero sobre el canal 2. Este cruce por cero es usado para producir un cruce por cero externo en la señal (ZX), el cual es usado en el modo de calibración (ver la sección de calibración de medición de energía). Esta señal es también usada para iniciar la medición de temperatura (Ver la sección de medición de temperatura).

En la figura 37 se muestra cómo es la señal de cruce por cero generada por la salida LPF1.

Figura. 37. Detección de cruce por cero del canal 2.



04481-A-033

La señal ZX va a ser un alto lógico cuando en la línea de medición se detecta un cruce por cero y la señal va a positivo y es un bajo lógico cuando en la línea de medición se detecta un cruce por cero de la señal cuando esta va a negativa en el canal 2. La señal ZX es generada de la salida LPF1. LPF1 tiene un lapso de fase entre la señal de entrada análoga V2 y la salida de LPF1. La respuesta de atraso en fase de LPF1 resulta en un atraso aproximado a 1.14ms (60hz) entre el cruce por cero en la entrada análoga del canal 2 y el flanco de ascenso o decaimiento de ZX.

La detección del cruce por cero también conduce a la bandera de interrupción ZX en el registro STATUS o estado. Un bajo lógico activo en la salida IRQ aparecerá si el correspondiente bit de la interrupción es habilitado en el registro con un estado lógico 1.

La bandera indicadora en el registro de estado de interrupción y la salida IRQ son puestos en sus valores por defecto cuando (RSTSTATUS) es leído en el registro de estado de interrupción.

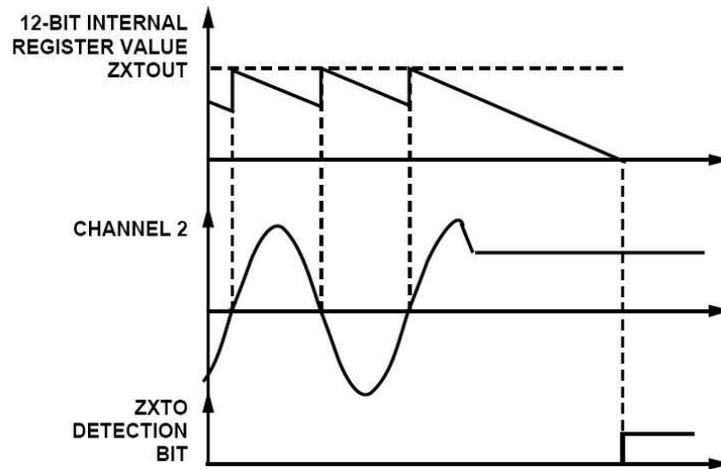
4.9.13 Tiempo Muerto de cruce por cero

El detector de cruce por cero tiene asociado un registro de tiempo muerto, ZXOUT. Este registro de 12 bits sin magnitud es decrementado de a un bit (menos significativo) cada $128/CLKIN$ segundos. El registro es reseteado al valor programado por usuario, que es el valor máximo cuando un cruce por cero en el canal 2 es detectado. Al encenderse el valor de este registro es 0xFFF. Si el registro interno decrementa a 0 antes de que un cruce por cero es detectado y el bit DISSAG en el registro modo es 0 lógico, el contacto SAG irá activo a bajo. La ausencia del cruce por cero también indicada en el contacto IRQ si la bandera ZXTO en el registro habilitador de interrupciones es siempre habilitado cuando el registro ZXOUT es decrementado a 0 – ver la sección de interrupción.

Debido a que la resolución del registro es $128/CLKIN$ segundos por bit menos significativo, el máximo retardo para una interrupción es de 0.15 segundos.

La figura 38 muestra el tiempo muerto de cruce por cero cuando la línea de voltaje permanece a un nivel de componente continua de corriente por más de $CLKIN/128 * ZXOUT$ segundos.

Figura. 38. Detección de tiempo muerto por cruce por cero.



4.9.14 Modo de acumulación de energía de ciclo de línea

En el modo de acumulación de energía de ciclo de línea, la acumulación de energía en el ADE7763 puede sincronizarse con el detector de cruce por cero del canal 2, de forma que la energía activa acumulada se calcula sobre una integral numérica de la medios ciclos de línea.

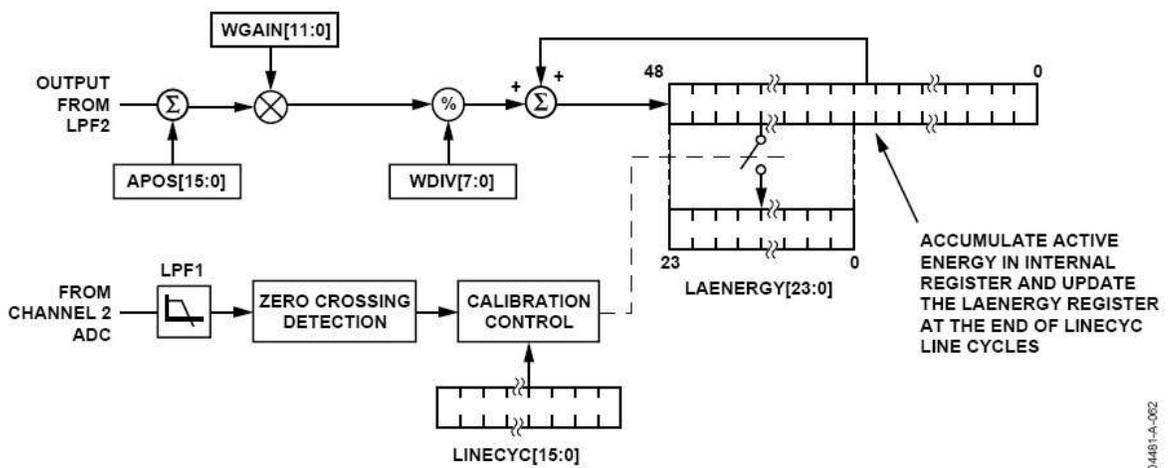
La ventaja de sumar la energía activa sobre un número esencial de ciclos de línea es que la componente sinusoidal en la energía activa es reducida a cero. Esto elimina el ruido en el cálculo de energía. La energía es calculada con más exactitud y en un tiempo más breve porque el período de integración es acortado.

Usando el modo de acumulación de energía de ciclo de línea, la calibración de energía puede estar enormemente simplificada, y el tiempo requerido para calibrar el medidor puede ser significativamente reducido.

El ADE7763 es puesto en el modo de acumulación de energía de ciclo de línea habilitando el bit 7 (CYCMODE) en el registro modo. En el modo de acumulación de energía de ciclo de línea, el ADE7763 acumula la señal de potencia activa en el registro de LAENERGY (dirección 0x04) para un número integral de ciclos de línea, como se muestra en la figura 38. El número de medios ciclos de línea es especificado en el registro LINECYC (dirección 0x1C). El ADE7763 puede acumular potencia activa para hasta 65,535 medios ciclos de línea.

Debido a que la potencia activa está integrada sobre un número esencial de ciclos de línea, el indicador CYCEND en el registro estado de interrupciones es puesto en alto al final de un ciclo de acumulación de energía de ciclo de línea. Si el bit habilitador CYCEND es habilitado en el registro habilitador de interrupciones, la salida IRQ también iría activa con un bajo lógico. Por lo tanto, la línea IRQ puede también ser usada para marcar la terminación de acumulación de energía de ciclo de línea. Otra calibración por ciclo puede empezar mientras el bit CYCMODE en el registro de modo es fijado.

Figura. 39. Cálculo de energía en la línea de ciclo en modo de acumulación de energía.



Se observó que en este modo, los 16 bits del registro LINECYC pueden mantener un valor máximo de 65,535. En otras palabras, el modo de acumulación de energía de línea puede ser usado para acumular la energía activa por una duración máxima de 65,535 medios ciclos de línea. A una frecuencia de línea de 60Hz; esto se traduce a una duración de $65,535 / 120\text{Hz} = 546$ segundos en total.

4.9.15 Monitor de fuente de alimentación en el ADE7763

El ADE7763 contiene en el integrado un monitor de fuente de alimentación. La alimentación análoga (AVDD) es continuamente monitoreada. Si la alimentación es menos de $4\text{V} \pm 5\%$ el ADE7763 irá a un estado inactivo y no habrá acumulación de energía. Esto es útil para asegurar el correcto funcionamiento de operación durante los estados de encendido y apagado. Adicionalmente, posee histéresis y filtrado que ayudan a prevenir falsos niveles de voltaje debido al ruido provocado.

El contacto SAG puede ser usado para el monitoreo de la fuente de alimentación en una entrada del microcontrolador. El contacto SAG se coloca en un estado lógico bajo cuando el ADE7763 está en un estado inactivo. La fuente de alimentación en AVDD no debe exceder de $5V \pm 5\%$, para una operación normal.

4.9.16 Medición de periodo

El ADE7763 provee la medición de periodo de la línea. El registro PERIOD es un registro sin bit de magnitud, Es un registro de 16-bit que es actualizado cada periodo y siempre tiene el bit más significativo es cero.

Cuando $CLKIN = 3.579545$ Mhz, la resolución de este registro es de 2.2 ms/LSB, el cual representa el 0.013% cuando la frecuencia de la línea es de 60 Hz. Cuando la frecuencia de la línea es de 60 Hz, el valor del registro de periodo es aproximadamente 7457d. La longitud del registro permite la medición de las frecuencias de línea de hasta 13.9Hz.

El registro de periodo es estable a ± 1 bit menos significativo para cuando la línea es establecida y la medición no tiene cambios. Este filtro es asociado con un tiempo establecido de 1.8 segundos antes de que la medición sea establecida. Ver la sección de calibración de medición de energía para más del registro de periodo.

4.9.17 Detección de caídas de voltaje en el ADE7763

Para detectar la pérdida de voltaje en la línea cuando no hay cruces de cero en el canal de voltaje, el ADE7763 también puede ser programado para detectar cuando pasa por un ciclo en donde el valor absoluto de voltaje de la línea cae por debajo de un valor pico especificado. Esta condición es ilustrada en la figura 40.

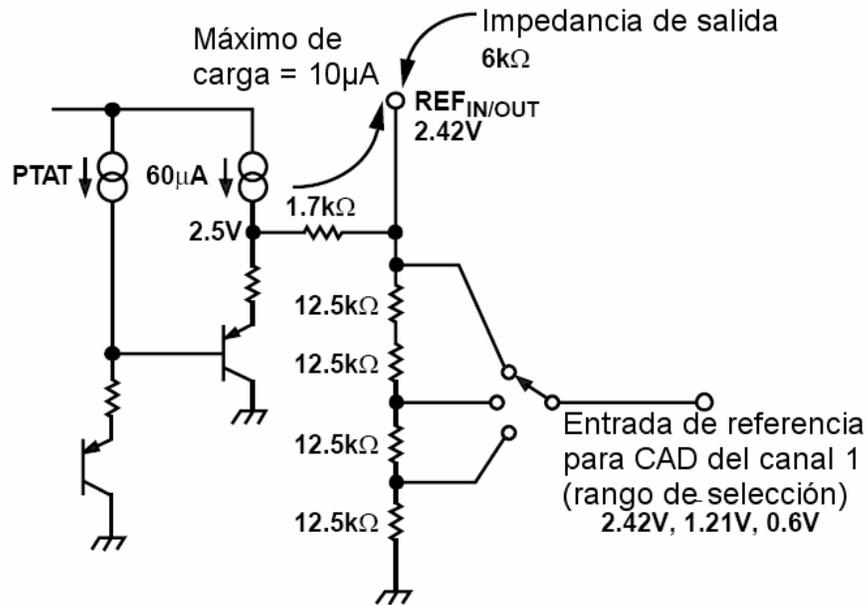
En la Figura 40 el voltaje de la línea cae por debajo del un umbral que ha sido establecido en el registro de nivel de caída de voltaje (SAGLVL[7:0]) para tres ciclos de línea. Las cantidades de 0 y 1 no son válidas para el registro SAGCYC, y el contenido del registro representa uno más del número designado de los ciclos de línea. Por ejemplo, si el bit DISSAG en el registro modo es cero lógico y el registro SAGSYC contiene 4, el contacto SAG va a activo a bajo lógico al final del tercer ciclo de línea el cual el voltaje de línea (señal del canal 2) cae por debajo del umbral. Como es el caso cuando una detección de cruce por cero no es llevada cabo por largo tiempo, un evento SAG también es guardado por la opción de bandera SAG en el registro de estado de interrupciones STATUS. Si se habilita el bit SAG con uno lógico, la salida lógica IRQ iría activa a bajo lógico como en la sección de interrupciones. El contacto SAG va a lógico alto una vez

de ocurra esto, un estado lógico bajo otra vez se muestra para mostrar la interrupción pendiente.

4.9.19 Circuito de referencia

La figura 41 se muestra una versión simple del circuito de referencia del circuito de salida. El voltaje de referencia nominal en el contacto REF_{IN/OUT} es 2.42V. Este el voltaje de referencia usado para el CADs. Sin embargo, el canal 1 tiene tres opciones de rangos de entrada que son seleccionados por dividir por debajo el valor de referencia usado para el CAD en el canal 1. El valor de referencia usado para el canal 1 es dividido abajo a ½ y ¼ del valor nominal al usar un divisor de voltaje interno, como se muestra en la figura 41.

Figura. 41. Salida del circuito de referencia.



El contacto REF_{in/out} puede ser conector a una fuente externa de 2.5V de referencia. Se observó que el valor nominal de referencia que tiene los CADs es ahora 2.5V, no 2.42V, el cual incrementa el rango de señal de la entrada analoga nominal por $2.5/2.42 \times 100\% = 3\%$ ó desde 0.5V a 0.5165V.

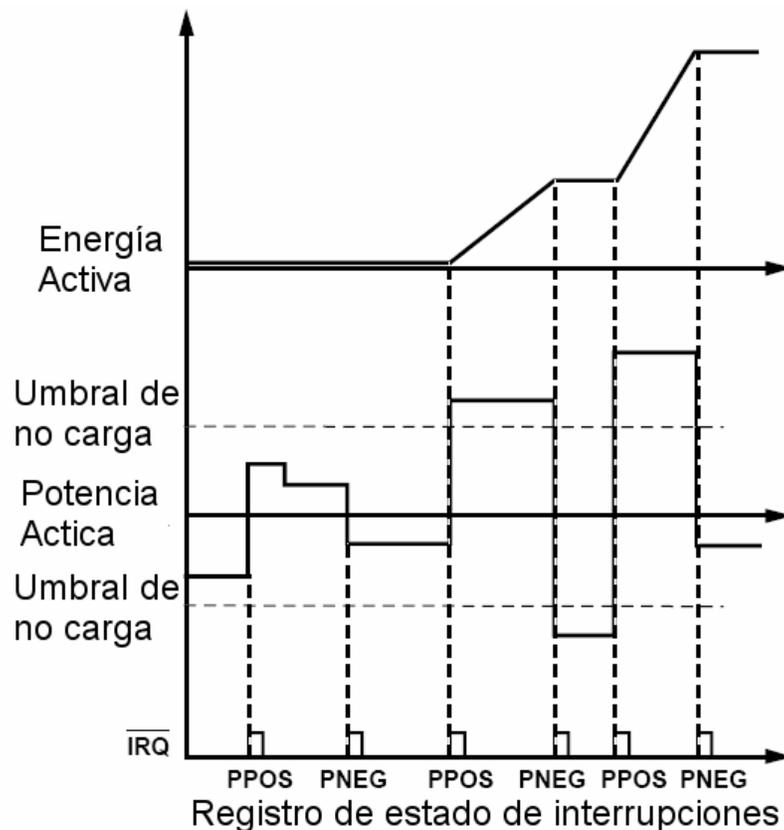
El voltaje de referencia del ADE7763 varía ligeramente con cambios en temperatura. Como la referencia es usada para ambos CADs en el canal 1 y 2,

cualquier porcentaje de desviación en la referencia resulta en desviación dos veces el porcentaje en la predicción de la medición. La desviación de la referencia que resulta de los cambios de temperatura es usualmente muy pequeña, típicamente mucho más pequeña que la desviación por otros componentes en el medidor.

4.9.20 Modo de acumulación sólo positivo

En modo de acumulación positiva, la acumulación de energía es sólo hecha para potencias positivas, ignorando toda ocurrencia de potencia negativa en promedio o por encima del umbral de no carga- ver la sección de características del ADE7763, umbral de no carga. Como se muestra en la figura 42. La salida de pulso CF también refleja este método de acumulación cuando se está en este modo.

Figura. 42. Modo de acumulación solo positiva en acumulación de energía.



El modo de acumulación sólo positivo es activado en la opción del bit más significativo del registro modo (MODE[15]). El valor por defecto de este registro es apagado.

Transiciones en la dirección del flujo de potencia, van desde negativo a positivo o viceversa, el contacto IRQ será activo a bajo si los bits PPOS y PNEG son activados en registro habilitador de interrupciones. Los correspondientes bits PPOS y PNEG en el registro de estado de interrupciones STATUS muestra cuál transición ha ocurrido.

4.9.21 Suspensión de funcionalidad

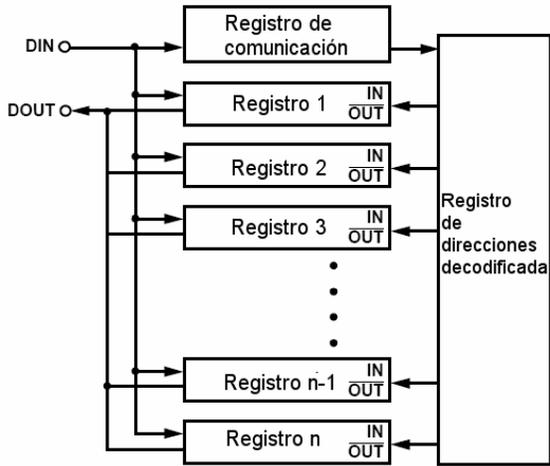
El circuito análogo y digital puede ser suspendido separadamente. La proporción análoga puede ser suspendida por opciones del bit 4 de ASUSPEND del registro de modo para lógica positiva – ver la sección del registro de modo (0x09). Dentro del modo suspendido, todas las muestras de formas de onda de los convertidores análogos digitales son puestos en cero. El circuito digital puede ser detenido al suspender la entrada de CLKIN. El ADE7763 puede ser reactivado por restaurar el CLKIN en la entrada y la opción de ASUSPEND en el bit 4 con un estado lógico bajo.

4.9.22 Interfaz serial o SPI

Toda funcionalidad del ADE7763 es accesible a los varios registros en el chip – ver la figura 43. El contenido de esos registros puede ser actualizados o leídos usando la interfaz serial del chip. Después de encendido o activar el RESET con un bajo en el contacto y un flanco de bajada en CS, el ADE7763 es puesto en modo de comunicación. En modo de comunicación, el ADE7763 espera escritura para el registro de comunicación. Los datos escritos para el registro de comunicación determinan si la próxima operación de transferencia de datos es lectura o escritura y cuál registro es accedido. Por lo tanto, toda operación de transferencia de datos con el ADE7763, si es lectura o escritura, debe empezar con escritura en el registro de comunicación.

El registro de comunicación es un registro de 8 bits de par en par. Los bits más significativos determinan si la próxima operación de transferencia de datos es una lectura o una escritura. Los 6 bits menos significativos contiene la dirección del registro a acceder – ver la sección de descripción de registros para mayor información.

Figura. 43. Direccionamiento de registros del ADE7763 vía el registro de comunicación.



En la figura 44 y la figura 45 se muestra la secuencia de transferencia de datos para la operación de lectura o escritura, respectivamente. Sobre la terminación de transferencia de datos (lectura escritura), el ADE7763 otra vez entra al modo de comunicación. Una transferencia de datos es completada cuando el bit menos significativo del registro seleccionado del ADE7763 (para escribir o leer) es transferido hacia o desde el ADE7763.

Figura. 44. Lectura de datos desde el ADE7763 vira interfaz serial.

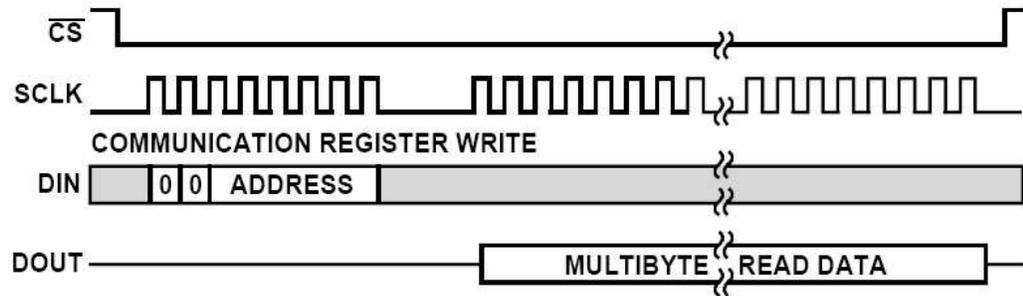
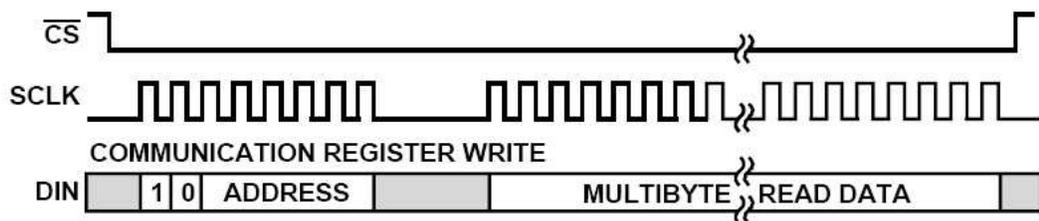


Figura. 45. Escritura de datos del ADE7763 vía interfaz serial.



La interfaz serial del ADE7763 es hecha por cuatro señales: SCLK, DIN, DOUT, y CS. El reloj serial para la transferencia de datos es aplicado en la entrada lógica SCLK. Esta entrada lógica posee una entrada estructurada schmitt-trigger que permite usar flancos de bajada y flanco de subida. Todas las operaciones de transferencia de datos están sincronizadas con el reloj serial. Los datos son cambiados dentro de la entrada lógica DIN del ADE7763 sobre el flanco de caída de SCLK. El cambio de datos de salida del ADE7763 en la salida lógica DOUT sobre el flanco de subida presente en SCLK. La entrada lógica CS es la entrada de selección de chip. Esta entrada es usada cuando múltiples dispositivos utilizan el bus serial. El flanco de bajada sobre CS también resetea la interfaz serial y posiciona el ADE7763 en modo de comunicación. La entrada CS debe mantenerse en bajo durante la operación de transferencia de datos. Traer CS a alto durante una operación de transferencia de datos aborta la transferencia y posiciona el bus serial en estado de alta impedancia. La entrada lógica CS puede mantenerse en bajo si el ADE7763 es solo un dispositivo en el bus serial. Sin embargo, con el CS mantenido en bajo, toda operación de transferencia de datos al iniciar deber ser completada, por lo tanto los bits menos significativos de cada registro deben ser transferidos porque no existe otra manera de traer el ADE7763 dentro del modo de comunicación sin resetear el dispositivo usando el RESET.

- **Operación de escritura en el ADE7763**

La secuencia de escritura serial toma lugar como a continuación: Con el ADE7763 en modo de comunicación (La entrada lógica CS en bajo), primero ocurre una escritura en el registro de comunicación. El BIT más significativo de esta transferencia de BIT es 1, indicando que la operación de transferencia de datos es una escritura. Los bits menos significativos del byte contiene la dirección del registro que será escrito. El ADE7763 empieza cambiando en el registro de datos sobre el siguiente flanco de bajada subsiguiente de los pulsos de SCLK. Ver la figura 46.

Como se explicó antes, la escritura de datos es iniciada al escribir en el registro de comunicación seguido por datos. Durante la operación de escritura de un dato, el dato es transferido a todos los registros del chip de a un byte al tiempo. Después de que un byte es transferido hacia el puerto serial, hay un tiempo finito antes de que sea transferido a uno de los registro del integrado ADE7763. Aunque otra transferencia de byte para el puerto serie puede empezar mientras el byte previo está siendo transferido a un registro del integrado, este segundo byte transferido no debe finalizar al menos después de 4us del final del byte previamente transferido. Si la operación de escritura es abortada durante la transferencia de

datos (CS es puesto en alto), luego el byte no puede ser escrito para el registro destino.

Figura. 46. Tiempos de escritura de interfaz serial.

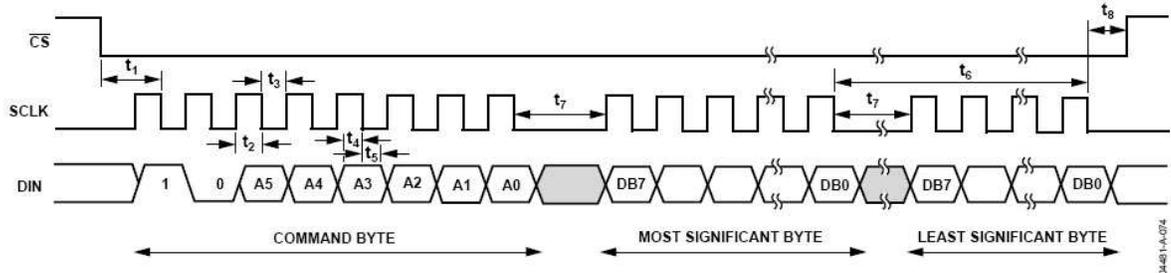
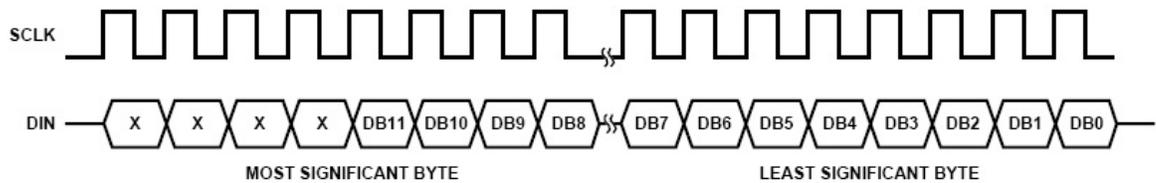


Figura. 47. Operación serial de escritura de 12 bits.



El registro destino puede tener hasta 3 bytes de par en par. Por lo tanto el primer byte cambiado en el puerto serie en DIN es transferido hacia los bits más significativos del registro destino. Si, por ejemplo, si el registro dirección tiene 12 bits de ancho, una transferencia de 2 bytes deben tener lugar. Como se asume que los datos son asumidos a que estén a la derecha, en este caso los 4 bits más significativos del primer byte se haría caso omiso y los 4 menos significativos del primer byte del ADE7763 serían los 4 bits más significativos de la palabra de 12 bits. Figura 47 (Operación serial de escritura de 12 bits).

- **Operación de lectura serial**

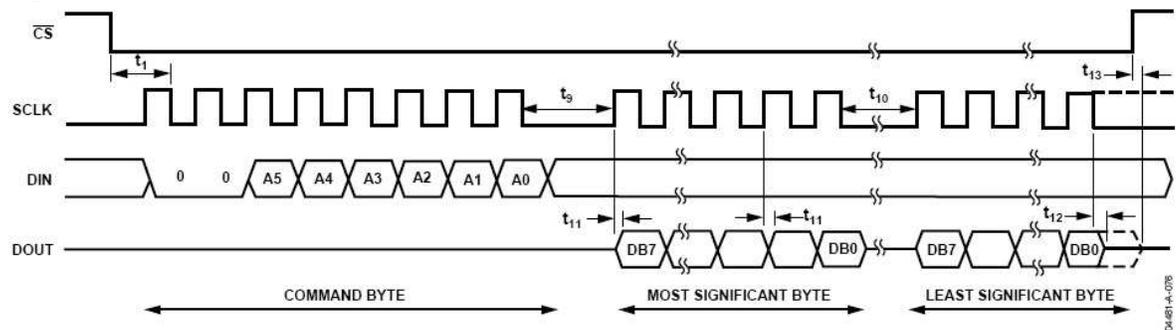
Durante una operación de lectura de datos del ADE7763, el dato cambiado a la salida lógica DOUT ocurre cuando se produce un flanco de subida sobre SCLK. Como el caso con la operación de escritura de datos, una escritura al registro de comunicación debe preceder a una lectura de datos.

Con el ADE7763 en modo de comunicación (CS en bajo lógico), primero ocurre una escritura de los 8 bits del registro de comunicación. El bit más significativo de

esta transferencia de byte es cero 0, indicando que la próxima operación de transferencia de datos es una lectura. Los bits menos significativos de este byte contienen la dirección del registro que será leída. El ADE7763 empieza a cambiar los datos afuera del registro sobre el próximo flanco en aumento de SCLK – ver Figura 48.

Hasta este momento, la salida lógica DOUT deja su estado de alta impedancia y empieza a mover el bus de datos. Todos los bits faltantes del registro de datos son cambiados a la salida sobre los siguientes flancos de aumento SCLK. La interfaz serial también entra en modo de comunicación tan pronto como sea posible completar la lectura sea completada. Luego, la salida lógica DOUT entra en un estado de alta impedancia sobre el flanco de caída del último pulso de SCLK. La operación de lectura puede ser suspendida por la entrada lógica CS al ponerse en alto antes de que los datos se transfirieran completamente. La salida DOUT entra en un estado de impedancia alto sobre el flanco en aumento de CS.

Figura. 48. tiempos de la interfaz serial para una operación de lectura.



Cuando un registro del ADE7763 es direccionado para una operación de lectura, el contenido entero de ese registro es transferido al puerto serie. Esto permite al ADE7763 modificar los registros del integrado sin poner en riesgo corromper los datos durante una transferencia multibyte.

Para cuando una operación de lectura sigue a una operación de escritura, el comando leer (Escribir al registro de comunicación) no debe ocurrir para al menos 4 μ s después del final de la operación de escritura. Si el comando de lectura es enviado dentro de 4 μ s de la operación de escritura, el último byte de la operación de escritura podría perderse. Esta restricción de cronometraje es dada dentro de la especificación de cronometraje de la hoja técnica.

4.9.23 Características del ADE7763.

- *Umbral de no carga:* El ADE7763 incluye una característica de umbral de no carga en el medidor sobre la energía activa que elimina cualquier efecto de fluencia. Esto se debe a que la energía no se acumula si la salida del multiplicador está por debajo del umbral de no carga. Este umbral es 0.001 % de la frecuencia de salida total del multiplicador.
- *Tiempos de integración:* Como se menciona en la sección de cálculo de energía en el ADE7763, el periodo de muestreo de tiempo discreto (T) para el registro de acumulación es de 1.1us (4/CLKIN). Con señales sinusoidales máximas sobre la entradas análogas y el registro WGAIN colocado en 0x000, el valor de cada palabra promedio de LPF2 es 0xC CCCD- ver la figura 20. El valor máximo positivo que puede ser registrado en el registro interno de 49 bits antes de que se sobrepase de 2^{48} , o de (0xFFFF-FFFF-FFFF). El tiempo de integración bajo estas condiciones con WDIV=0 es calculada a continuación.

$$\text{Tiempo_de_integracion} = \frac{0xFFFF - FFFF - FFFF}{0xC - CCCD} \times 1.2\mu s = 375.8s = 6.26 \text{ min}$$

Cuando WDIV es puesto en un valor diferente de 0, el tiempo de integración varia, como se muestra en la ecuación.

$$\text{Tiempo_de_integracion} = (\text{Tiempo_wdiv} = 0) \times (\text{Wdiv})$$

- *Frecuencia CLKIN:* En la hoja de características, se muestran los aspectos más representativos del ADE7763 cuando la frecuencia CLKIN es igual a 3.579545MHz. Sin embargo, el ADE7763 está diseñado para tener la misma precisión para cualquier frecuencia en CLKIN sin ningún rango de especificación. Si la frecuencia CLKIN no es 3.579545 Mhz, sería necesario redefinir varios tiempos y características de filtros con la nueva frecuencia CLKIN. Por ejemplo todos los cortes de los filtros, tanto como LPF1, LPF2, o HPF1, cambian en proporción al cambiar la frecuencia CLKIN.

El cambio en la frecuencia CLKIN no afecta el tiempo característico de la interfaz serial porque los datos transferidos están sincronizados con la señal de reloj (SCLK).

4.9.24 Registros del ADE7763

A continuación se muestra un resumen de los registros que posee el ADE7763. En la tabla 9 se deben tener en cuenta las siguientes nomenclaturas y especificaciones.

lo = valor por defecto del registro. Todos los valores de los registros están en hexadecimal.

E = Registro de Escritura.

L = Registro de lectura.

Dirección = La dirección por la cual es llamado el registro desde el registro de comunicación. Los valores presentados en esta casilla están en hexadecimal.

Tipo de decodificación del registro:

U = sin magnitud o signo.

S = decodificado por el método de complemento a dos.

S* = decodificado por el método de magnitud de signo de la señal.

Tabla. 9. Resumen de los registros del ADE7763 por direcciones.

Dirección	Nombre	E L	No de Bits	lo	T I P O	Descripción
0x01	WAVEFORM	L	24	0	S	Registro de forma de onda. Este registro de sólo lectura contiene los datos de forma de onda muestreada del canal 1, canal 2, o de la señal de potencia activa. La fuente de datos y la longitud del registro de forma de onda son seleccionadas por los bits 14 y 13 en el registro modo (MODE).
0x02	AENERGY	L	24	0	S	Registro de energía activa. La potencia activa es acumulada (integrada) sobre un tiempo en

						estos 24 bits, registro de sólo lectura – ver la sección de cálculo de energía.
0x03	RAENERGY	L	24	0	S	Es lo mismo que el registro de energía activa, excepto que el registro es reseteado a cero seguido de la operación de lectura.
0x04	LAENERGY	L	24	0	S	Registro de acumulación de energía activa de ciclos de línea. La potencia activa instantánea es acumulada en este registro de sólo lectura sobre el número de medios de ciclos de línea LINECYC.
0x05	VAENERGY	L	24	0	U	Registro de energía aparente. La potencia aparente es acumulada sobre el tiempo en este registro de sólo lectura.
0x06	RVAENERGY	L	24	0	U	Igual que en el registro VAENERGY, excepto que el registro es reseteado a cero seguido de una operación de lectura.
0x07	LVAENERGY	L	24	0	U	Registro de acumulación de energía aparente de la línea. La potencia real instantánea es acumulada en este registro de sólo lectura sobre el número de la mitad de ciclo de línea LINECYC.
0x08	Reservado					
0x09	MODE	L E	16	000C	U	Registro modo. Este es un registro de 16 bits en donde la mayor parte de la funcionalidad del ADE7763 es accedida. La rata muestreado de señal, habilitador del filtro, y los modos de calibración son seleccionados escribiendo en este registro. Los contenidos pueden ser leídos en cualquier

						momento – ver la sección de registro modo (MODE).
0x0A	IRQEN	L E	16	40	U	Registro habilitador de interrupciones. Las interrupciones del ADE7763 pueden ser desactivadas en cualquier momento poniendo el correspondiente BIT en cero lógico en este registro de 16 bits. El registro estado continua detectando un evento de interrupción incluso si está inhabilitado; sin embargo, la salida IRQ no está activada – ver la sección de interrupciones.
0x0B	STATUS	L	16	0	U	Registro de estados de interrupción. Este es un registro de 16 bits de sólo lectura que contiene información respecto al origen de la interrupción del ADE7763 – ver la sección de interrupciones.
0x0C	RSTATUS	L	16	0	U	Igual que en el registro de estados de interrupciones, excepto que el contenido del registro es reseteado a 0 (todas las banderas clareadas) después de la operación de lectura.
0x0D	CH1OS	L E	8	0	S`	Ajuste del offset o compensación del canal 1. El bit 6 no es usado. Escribiendo en los bits del 0 al 5 permite compensaciones sobre el canal 1 para ser removido el offset – ver las secciones de entradas análogas y registro CH1OS. Escribiendo un 1 lógico en el BIT más significativo de este registro se habilita el integrador

						digital en el canal 1; Escribiendo un 0 lógico deshabilita el integrador. El valor por defecto de este bit es 0.
0x0E	CH2OS	L E	8	0	S'	Ajuste de compensación del canal 2. Bits 6 y 7 no son usados. Escribiendo en los bits del 0 al 5 en este registro permite compensar sobre el canal 2 el offset – ver la sección de entradas análogas. Note que el registro CH2OS es invertido. Para aplicar una compensación positiva, un número negativo es escrito en este registro.
0x0F	GAIN	L E	8	0	U	Ajuste de ganancia del PGA. Este registro de 8 BIT es usado para ajustar la selección de ganancia para el PGA en el cana 1 y 2 – ver la sección de entradas análogas.
0x10	PHCAL	L E	6	0D	S	Registro de calibración de fase. La relación de fase entre el canal 1 y 2 puede ser ajustada escribiendo en este registro de 6 Bits. El contenido legitimo de este registro complemento a dos esta entre 0x1D a 0x21. A una frecuencia de línea de 60Hz, este rango de -2.06° a $+0.7^{\circ}$ - ver la sección de compensación de fase.
0x11	APOS	L E	16	0	S	Corrección de compensación (offset) de potencia activa. Este registro de 16 bits permite una pequeña compensación en el cálculo de potencia activa para ser removida – ver la sección de cálculo de potencia activa.
0x12		L	12	0	S	Ajuste de ganancia de

	WGAIN	E				potencia. Este registro de 12 bits. Calibra el cálculo de potencia activa escribiendo en este registro. El rango de calibración es $\pm 50\%$ del total nominal de la potencia activa. La resolución del ajuste de ganancia es de 0.0244%/LSB – ver la sección de calibración de medición de energía.
0x13	WDIV	L E	8	0	U	Registro divisor de energía activa. El registro de energía activa interno esta dividido por el valor de este registro antes de ser guardado en el registro AENERGY.
0x14	CFNUM	L E	12	3F	U	Registro numerador del divisor de frecuencia CF. Ajusta la salida de frecuencia sobre el contacto CF escribiendo en este registro de 12 bits de lectura/escritura – ver la sección de conversión de energía a frecuencia (CEF).
0x15	CFDEN	L E	12	3F	U	Registro denominador del divisor de frecuencia CF. Ajusta la salida de frecuencia sobre el contacto CF escribiendo en este registro de 12 bits de lectura/escritura – ver la sección de conversión de energía a frecuencia.
0x16	IRMS	L	24	0	U	Valor RMS del canal 1 (canal de corriente).
0x17	VRMS	L	24	0	U	Valor RMS del canal 2 (canal de voltaje).
0x18	IRMSOS	L E	12	0	S	Registro de corrección de la compensación (offset) del RMS del canal 1.
0x19	VRMSOS	L E	12	0	S	Registro de corrección de la compensación (offset) del RMS del canal 2.

0x1A	VAGAIN	L E	12	0	S	Registro de ganancia aparente. Calibra el cálculo de potencia aparente escribiéndola en este registro.
0x1B	VADIV	L E	8	0	U	Registro divisor de energía aparente. El registro de energía aparente interno es dividido por el valor de este registro antes de ser almacenado en el registro VAENERGY.
0x1C	LINECYC	L E	16	FFFF	U	Registro de los ciclos de línea en modo de acumulación de energía de ciclo de línea. Este registro de 16 bits es usado durante el modo de acumulación de energía de ciclo de línea para poner el número de medios ciclos de línea para la acumulación de energía – Ver la sección de modo de acumulación de energía de ciclo de línea.
0x1D	ZXTOUT	L E	12	FFF	U	Tiempo muerto de cruce por cero. Si no hay un cruce por cero detectado en el canal 2 dentro de un tiempo específico en este registro de 12 bits, la interrupción requerida en la línea (IRQ) se activaría – ver la sección de detección de cruce por cero.
0x1E	SAGCYC	L E	8	FF	U	Registro de la caída del ciclo de línea. Este registro de 8 bits especifica el número de ciclos de la línea consecutivos abajo de SAGVL que es requerido sobre el canal 2 antes que la salida SAG este activa – ver la sección de detección de la caída de voltaje en la línea.
0x1F	SAGLVL	L	8	0	U	Caída del nivel de voltaje. El valor de 8 bits de este registro

		E				determina en qué nivel de señal sobre el canal 2 el contacto SAG se coloca activo. La señal debe permanecer en bajo por el número de ciclos especificado en el registro SAGCYC antes que el contacto SAG este activo – ver la sección de detección de caída de voltaje de línea.
0x20	IPKLVL	L E	8	FF	U	Umbral de nivel máximo del canal 1 (canal de corriente). Este registro fija el nivel de detección máxima en curso. Si la entrada del canal 1 supera este nivel, el indicador de PKI en el registro de estado es puesto en alto.
0x21	VPKLVL	L E	8	FF	U	Umbral de nivel máximo de amplitud en el canal 2 (canal de voltaje). Este registro fija el nivel de voltaje de detección máximo. Si el canal 2 de entrada supera este nivel, el indicador de PKV en el registro de estado es puesto en alto.
0x22	IPEAK	L	24	0	U	Registro de máxima amplitud del canal 1. El máxima valor de entrada de corriente, desde la última lectura del registro es almaceno en este registro.
0x23	RSTIPEAK	L	24			Igual que en el registro de máxima amplitud del canal 1, excepto que el contenido del registro es reseteado a cero después de ser leído.
0x24	VPEAK	L	24	0	U	Registro de máxima de amplitud del canal 2. El valor máximo de entrada del canal de voltaje, desde la última lectura del registro es guardado en el registro.

0x25	RSTVPEAK	L	24	0	U	Registro máxima amplitud del canal 2. Excepto que el contenido del registro es reseteado o puesto a cero después de una lectura.
0x26	TEMP	L	8	0	S	Registro de temperatura. Este es un registro de 8 bits que contiene el resultado de la más reciente conversión de temperatura – ver la sección medición de temperatura.
0x27	PERIOD	L	16	0	U	Periodo de la entrada del canal 2 (canal del voltaje) estimado por el proceso de cruce por cero. El bit más significado de este registro es siempre cero.
0x28						Reservado
0x3C						Reservado
0x3D	TMODE	L	8	_	U	Registro modo de prueba.
0x3E	CHKSUM	L	6	0	U	Registro de chequeo rápido. Este registro de 6 bits, de sólo lectura es igual al resumen de todos aquellos registros anteriormente leídos – ver sección de operación de lectura serial.
0x3F	DIEREV	L	8	-	U	Registro de revisión de terminación. Este registro de 8 bits de sólo lectura contiene el número de revisión del silicio.

4.9.25 Descripción de los registros

Toda la funcionalidad del ADE7763 es introducida por los registros del ADE7763. Cada registro es accedido escribiendo primero el registro de comunicación y luego el registro de transferencia de datos. Una descripción completa del protocolo de la interfaz serial está dado en la sección de interfaz serial.

- *Registro de comunicación:* El registro de comunicación es un registro de 8 bits, de sólo escritura que controla la transferencia de datos seriales entre el ADE7763 y el anfitrión que procesa. Todas las operaciones de transferencia de datos deben empezar con una escritura del registro de comunicación. Los datos escritos al registro de comunicación determina si la próxima operación es una lectura o una escritura y que registro está siendo accedido. La Tabla 10 da una idea general de las designaciones de cada bit para el registro de comunicación.

Tabla. 10. Registro de comunicación.

DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Lectura / Escritura	0	A5	A4	A3	A2	A1	A0

Localidad del BIT	Nominación del BIT	Descripción
0 a 5	A0 a A5	Los 6 BIT menos significativos del registro de comunicación especifica el registro para la operación de transferencia de datos.
6	Reservado	Este BIT no se usa y debe permanecer en bajo
7	Lectura / Escritura	Cuando este bit está en alto, la operación de transferencia de datos inmediatamente siguiente a la escritura del registro de comunicación es interpretada como una escritura de un registro con dirección A5:A0 en el ADE7763. Cuando este bit esta en 0 lógico, la operación de transferencia de datos inmediatamente siguiente es la escritura al registro de comunicación indicando que es una operación de lectura.

- *Registro Modo (0x09):* La funcionalidad del ADE7763 es configurado escribiendo en el registro modo. La tabla 11 describe la funcionalidad de cada bit en el registro.

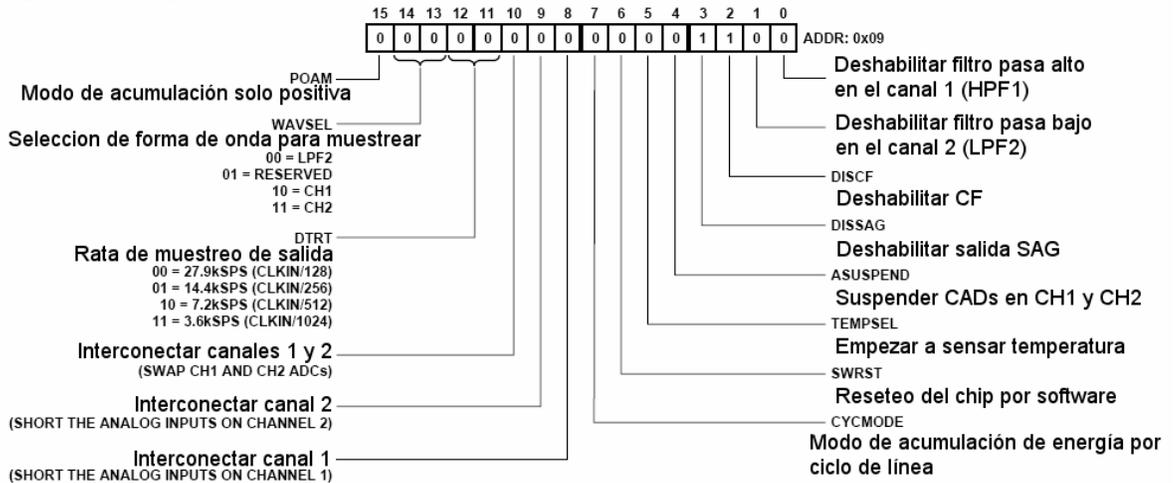
Tabla. 11. Descripción de cada bit del registro modo.

Localidad del BIT	Nomenclatura del BIT	Valor por defecto	Descripción
0	DISHPF	0	HPF (filtro pasa alto) En el canal 1 es deshabilitado cuando se activa este BIT.
1	DISLPF2	0	LPF (filtro pasa bajo) después de multiplicar (LPF2) se deshabilita cuando este bit esta activo.
2	DISCF	1	Salida de frecuencia CF es deshabilitada cuando este bit esta activo.
3	DISSAG	1	La detección de caída de voltaje en la línea es deshabilitada cuando este bit esta activado.
4	ASUSPEND	0	Poniendo este bit en uno lógico, ambos convertidores analógico-digitales pueden ser apagados. Durante la operación normal, este bit debe se mantenido en 0 lógico. Toda funcionalidad digital puede ser apagada suspendiendo la señal de reloj en el contacto de CLKIN.
5	TEMPSEL	0	Empieza la conversión de temperatura cuando este bit es puesto en 1. Este bit es automáticamente reseteado a 0 después de la conversión de temperatura.
6	SWRST	0	Reseteado del software del chip. Una transferencia de datos no debe tener lugar en el ADE7763 para al menos 18 μ s después de un reseteado del software.
7	CYCMODE	0	Poner este bit en 1 lógico pone el integrado en modo de acumulación de energía en ciclo de línea.
8	DISCH1	0	Las entradas ADC 1 (canal 1) son inmediatamente cortocircuitadas juntas.
9	DISCH2	0	Las entradas del CAD 2 (canal 2) son inmediatamente cortocircuitadas juntas.
10	SWAP	0	Poniendo este bit en 1 lógico, las entradas análogas V2p y V2N son conectadas al CAD 1 y las entradas análogas V1P y V1N son conectadas a CAD 2.

12, 11	DTRT1,0	00	Use este bit para seleccionar el registro de forma de onda a la frecuencia actual.															
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>DTRT1</th> <th>DTRT0</th> <th>Frecuencia actual</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>27.9 KSPS (CLKIN/128)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>14 KSPS (CLKIN/256)</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>7 KSPS (CLKIN/512)</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>3.5 KSPS (CLKIN/1024)</td> </tr> </tbody> </table>	DTRT1	DTRT0	Frecuencia actual	0	0	27.9 KSPS (CLKIN/128)	0	1	14 KSPS (CLKIN/256)	1	0	7 KSPS (CLKIN/512)	1	1	3.5 KSPS (CLKIN/1024)
DTRT1	DTRT0	Frecuencia actual																
0	0	27.9 KSPS (CLKIN/128)																
0	1	14 KSPS (CLKIN/256)																
1	0	7 KSPS (CLKIN/512)																
1	1	3.5 KSPS (CLKIN/1024)																
14, 13	WAVSEL1,0	00	Usar estos bits para seleccionar el origen de los datos muestreados para el registro de forma de onda.															
15	POAM	0	Escribiendo 1 lógico en este bit permite solo la acumulación de potencia positiva. El valor por defecto de estos bits es 0.															

El resumen de la tabla 11 se encuentra en la figura 49.

Figura. 49. Registro Modo.



- *Registro de estados de interrupción (0x0B); Registro de reseteado de interrupciones de estado (0x0C); Registro Habilitador de interrupciones (0x0A):* El registro estado es usado por el microcontrolador para determinar

la fuente de una solicitud de interrupción (IRQ). Cuando un evento de interrupción ocurre, el indicador correspondiente en el registro de estado de interrupción es puesto en un 1 lógico. Si el bit habilitador para la bandera es un 1 lógico en el registro habilitador de interrupciones, la salida lógica IRQ estará activa en bajo. Cuando los servicios del microcontrolador atienden la interrupción, debe llevar una lectura primero del registro de estado de interrupción para determinar la fuente de la interrupción. En la tabla 12 se muestra todas las interrupciones de este registro.

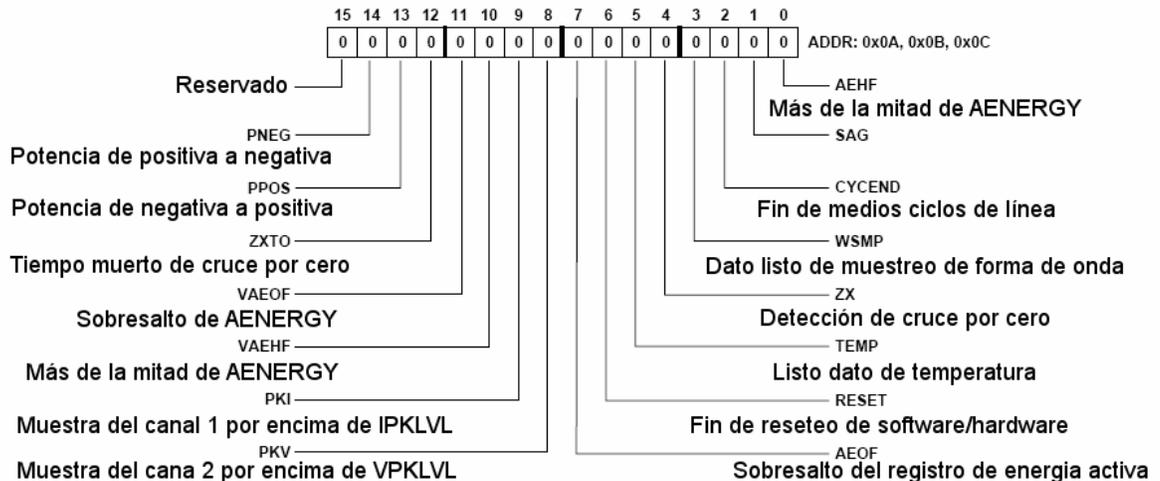
Tabla. 12. Bits del registro STATUS.

Localidad del BIT	Bandera de interrupción	Descripción.
0	AEHF	Indica que una interrupción ha ocurrido porque el registro de energía activa, es más de la mitad del máximo permitido por el registro AENERGY.
1	SAG	Indica que una interrupción fue causada por la caída de voltaje en la línea.
2	CYCEND	Indica el final de acumulación de energía sobre la integral numérica de la mitad de los ciclos, así definido por el contenido del registro LINECYC – ver la sección de modo de acumulación de energía de ciclo de línea.
3	WSMP	Indica que nuevos datos están presentes en el registro de forma de onda.
4	ZX	El estado de este BIT muestra el estado de la salida lógica ZX – ver la sección de detección de cruce por cero.
5	TEMP	Indica que un resultado de conversión de temperatura está disponible en el registro de temperatura.
6	RESET	Indica el final de un reseteo por software y el reseteo por hardware. El correspondiente bit habilitador no tiene función en el registro habilitador de interrupciones. Por tanto este bit se establece al final de un reseteo, pero no puede estar habilitado para causar una interrupción.
7	AEOF	Indica que el registro de energía activa ha rebosado.
8	PKV	Indica que la forma de onda muestreada del canal 2 ha excedido el valor VPKLVL.

9	PKI	Indica que la forma de onda muestreada del canal 1 ha excedido el valor de IPKLVL.
10	VAEHF	Indica que una interrupción ha ocurrido porque el registro de energía aparente, VAENERGY, está más de la capacidad máxima.
11	VAEOF	Indica que el registro de energía aparente ha sobrepasado.
12	ZXTO	Indica que una interrupción fue causada por la falta de cruce por cero en la línea de voltaje para un número específico de ciclos de la línea – ver la sección de tiempo muerto de cruce por cero.
13	PPOS	Indica que la potencia ha ido de negativa a positiva.
14	PNEG	Indica que la potencia ha ido de positiva a negativa.
15	RESERVED	Reservado

En la figura 50 se resume el contenido de la tabla 12.

Figura. 50. Registro Estados de interrupción / habilitador de interrupciones.



- *Registro CH1OS (0x0D)*: El registro CH1OS es un registro de 8 bits, habilitado para Lectura / Escritura. El bit más significativo de este registro es usado para habilitar y deshabilitar el integrador digital en el canal 1, y los

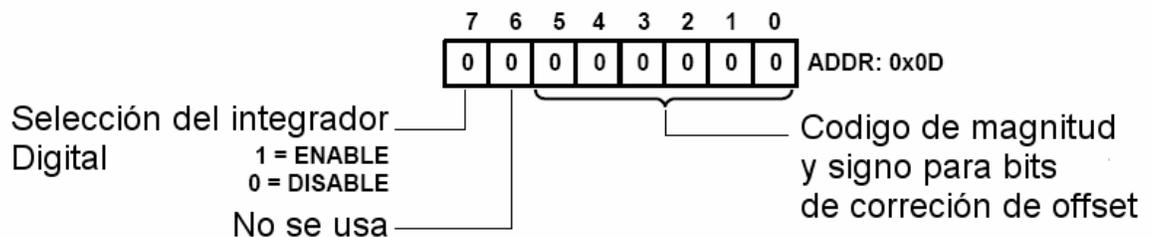
bits de 0 a 5 indica la cantidad de corrección de compensación en el canal 1. La tabla 13 suministra las funciones de los registros.

Tabla. 13. Registro CH1OS.

Localidad del BIT	Nomenclatura del BIT	Descripción
0 a 5	OFFSET	Los 6 bits menos significativos del registro de CH1OS controlan la cantidad de corrección de compensación componente continua en el CAD del canal 1. La corrección de compensación del 6 bit es señal y magnitud cifradas. Los bits 0 a 4 muestran la magnitud de la corrección de compensación. El 5 bit indica la señal de la corrección de compensación. Un 0 lógico en el quinto bit quiere decir que la rectificación de compensación es positiva, y uno 1 indica que la rectificación de compensación es negativa.
6	No usado	Este BIT no es usado.
7	Integrador	Este BIT es usado para activar el integrador digital del canal 1. El integrador digital es activado por medio de este bit. Este bit es puesto en 0 lógico por defecto.

En la figura 51 se resume el contenido de la tabla 13.

Figura. 51. Registro de compensación del canal 1.



4.9.26 Calibrando el medidor de energía

El ADE7763 provee compensación de ganancia y offset para la calibración de energía activa y aparente. Su compensación de fase corrige el error de fase en la

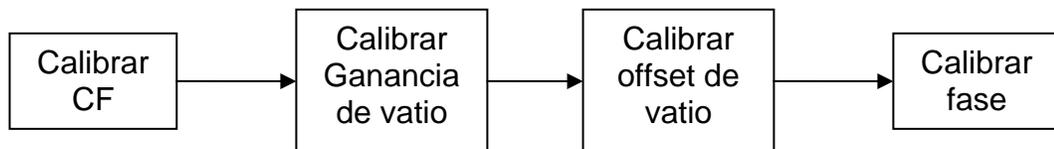
energía aparente y activa. Un medidor de referencia o una fuente exacta puede ser usado para calibrar el ADE7763.

Teniendo en cuenta que no se tiene un medidor de referencia, sólo se estudiará la calibración del medidor utilizando una fuente exacta.

El ADE7763 provee un modo de acumulación de ciclo de línea para la calibración usando una fuente exacta. En este método, la rata de acumulación de energía activa es ajustada para producir una frecuencia CF deseada. Los beneficios de usar este modelo es que el efecto de ruido de onda sobre la energía activa es eliminado. Hasta 65,535 medios ciclos de línea pueden ser acumulados, Por lo tanto arrojando un valor de energía estable del que se determina el promedio. El tiempo de acumulación es calculado del periodo de ciclo de línea, medido por el registro periodo, y el número de la mitad de ciclos de línea en la acumulación, arreglado por el registro LINECYC.

La figura 52 indica el proceso de calibración para la proporción de energía activa del ADE7763.

Figura. 52. Calibración de energía activa.



- *Diseñando las ecuaciones*

El ADE7763 contiene un registro que es proporcional a la energía total acumulada. Además, el ADE7763 tiene un contacto de salida con la frecuencia proporcional a la potencia. Esta sección describe las ecuaciones necesarias para calibrar el medidor. Estas ecuaciones establecen los coeficientes que hallan las proporciones de los registros en el ADE7763.

- *Calibrando CF*

El primer paso para calibrar la ganancia es definir el voltaje de la línea, la corriente base, y la máxima corriente para el medidor. Una constante medición, como 3200 imp/KWh ó 3.2imp/Wh, tiene que ser determinada para CF.

El valor esperado Cf en Hz es

$$CF_{esperado}(Hz) = \frac{\text{constante_del_medidor}(imp/Wh) \times \text{carga}(W)}{3600s/h} \times \cos(\varphi)$$

Donde:

Φ = es el ángulo entre la señal de corriente y voltaje

Cos (Φ) = es el factor de potencia de la señal.

La proporción del bit menos significativo del registro de energía activa con un pulso de CF es ajustado usando los registros CFNUM, CFDEN, y WDIV.

$$CF_{esperado} = \frac{LAENERGY}{Tiempo_acumulado(s)} \times WDIV \times \frac{(CFNUM + 1)}{(CFDEN + 1)}$$

- *Calibrando ganancia de vatio*

La relación entre vatio-hora acumulado y la cantidad leída desde AENERGY puede ser determinado de la cantidad de energía activa acumulada sobre un tiempo con una carga dada.

$$Wh/LSB = \frac{Carga(w) \times Tiempo_acumulado(s)}{(LAENERGY) \times (3600s/h)}$$

Donde el tiempo de acumulación puede ser determinado del valor de periodo de la línea y el número de la mitad de ciclos de línea fijos en el registro LINECYC.

$$Tiempo_acumulado(s) = \frac{(LINECYCib) \times (periodo_linea(s))}{2}$$

El periodo de la línea puede ser determinado desde el registro periodo:

$$Periodo_linea(s) = PERIOD \times \frac{8}{CLKIN}$$

La proporción de AENERGY Wh/LSB también puede ser expresada en términos de una constante medida.

$$Wh / LSB = \frac{\frac{(CFNUM + 1)}{(CFDEN + 1)} \times WDIV}{constantes_del_medidor(imp / Wh)}$$

En un medidor diseñado, WDIV, CFNUM, y CFDEN deberían ser mantenidos constantemente en todo los medidores para asegurar que la constante Wh/LSB está mantenida. Dejar el registro WDIV en su valor por defecto de 0 asegura resolución máxima. El registro WDIV no es incluido en la cadena de señal CF así que no afecta la salida de pulso de frecuencia.

El registro WGAIN es usado para calibrar cada medidor finalmente. Calibrando el registro WGAIN cambia tanto CF como AENERGY para una condición de carga en particular.

$$AENERGYesperado = (AENERGYno\ min\ al) \times \left(1 + \frac{WGAIN}{2^{12}}\right)$$

$$CFesperado(Hz) = (CFno\ min\ al) \times \frac{(CFNUM + 1)}{(CFDEN + 1)} \times \left(1 + \frac{WGAIN}{2^{12}}\right)$$

- *Offset de Vatio o compensación de vatio*

La calibración de la compensación (offset) permite rendimiento sobresaliente sobre un rango dinámico amplio, por ejemplo, 1000:1. Para hacer esta calibración dos mediciones son necesarias a un factor de potencia unitario, uno en lb y la otra a la corriente más baja para ser corregida. Cualquier calibración de frecuencia o de acumulación de línea puede ser usada para determinar la compensación (offset) de energía. La calibración de ganancia debería realizarse antes de la calibración de la compensación (offset).

La calibración de la compensación (offset) es llevada a cabo determinando el porcentaje de error de energía activa. Después de determinar el porcentaje de error de energía activa, calcule el valor para escribir al registro APOS para corregir la compensación (offset).

$$APOS = \frac{(AENERGY) \times (rata_de_error) \times 2^{35}}{CLKIN}$$

Los registros de AENERGY se actualizan a una tasa de CLKIN/4. El registro APOS de complemento a dos provee un ajuste bueno al cálculo de potencia activa. Esto representa una buena cantidad de compensación de potencia para ser ajustada cada CLKIN/4. Los 8 bits menos significativos del registro APOS son muy pequeños de forma que un bit menos significativo del registro APOS representa 1/256 del bit menos significativo del registro de energía activa. Por lo tanto, un bit del registro APOS representa $2^{(-33)}$ del registro de energía activa AENERGY [23:0].

- *Calibración de Fase*

El registro de PHCAL es suministrado para quitar los errores de fase pequeños. El ADE7763 compensa el error de fase insertando un pequeño tiempo de retraso o de adelanto sobre la entrada del canal de voltaje. Adelanto de fase hasta de 1.84° y de retraso de fase hasta 0.72° a 50 Hz puede ser corregido. El error es determinado por la medición de la energía activa a una corriente de base Ib y un factor de potencia , PF = 1 y PF = 0.5 inductivo.

Algunos transformadores de corriente pueden introducir grandes errores de fase que son más allá del rango del registro de calibración de fase. En este caso, una compensación de fase tosca tiene que ser hecha externamente con filtros análogos.

El error de fase puede ser obtenido desde cualquiera de las mediciones de CF o de LAENERGY.

$$Error = \frac{LAENERGY_{ib,fp=0.5} - LAENERGY_{ib_esperado} / 2}{LAENERGY_{ib_esperado} / 2}$$

Si la ganancia de vatio y la calibración de la compensación han sido llevadas a cabo, entonces debe haber 0% de error en CF con un factor de potencia igual a uno, y luego.

$$ERROR = \% ERROR_{CF(IB,fp=0.5)} / 100$$

El error de fase es:

$$Error_de_fase(^{\circ}) = -Arcsen\left(\frac{Error}{\sqrt{3}}\right)$$

La relación entre el error de fase y el registro de corrección de fase PHCAL es:

$$PHCAL = INT\left(\frac{error_de_fase(^{\circ}) \times PERIOD}{360^{\circ}}\right) + 0 \times 0D$$

La expresión para PHCAL puede ser simplificada usando la suposición que x es pequeña.

$$ARCSen(x) \approx x$$

El retraso introducido en el canal de voltaje por PHCAL es :

$$DELAY = (PHCAL - 0 \times 0D) \times \frac{8}{CLKIN}$$

El retraso asociado con el registro PHCAL es un tiempo de retraso si PHCAL - 0x0DH es positivo, pero representa un tiempo de adelanto si la cantidad es negativa. Allí no habrá un tiempo de retraso si PHCAL = 0x0D.

La corrección de fase es en la dirección opuesta del error de fase.

$$Corrección_fase(^{\circ}) = -(PHCAL - 0 \times 0D) \times \frac{360^{\circ}}{PERIOD}$$

4.10 MEMORIA EEPROM – 24LC512

La EEPROM es usada para almacenar todos los datos de energía calculada en lapsos de una hora. Las direcciones y sus contenidos son mostrados en la tabla 14.

Tabla. 14. Palabra de datos de energía calculada por hora.

Dirección	Nombre	Contenido del registro en bits
I _{an}	Byte A	(A ₁ A ₁ A ₁ A ₁ A ₂ A ₂ A ₂ A ₂)
I _{an+1}	Byte B	(H ₁ M ₁ M ₁ M ₁ M ₂ M ₂ M ₂ M ₂)
I _{an+2}	Byte C	(H ₂ H ₂ H ₂ H ₂ F ₂ F ₂ F ₂ F ₂)
I _{an+3}	Byte D	(A _m F ₁ F ₁ m ₁ m ₂ m ₂ m ₂ m ₂)
I _{an+4}	Byte E	(Energía1)
I _{an+5}	Byte F	(Energía2)

Donde:

A_1 = El número codificado en BCD de la primera cifra del año.

A_2 = El número codificado en BCD de la segunda cifra del año.

H_1 = El número codificado en BCD de la primera cifra de la hora.

H_2 = El número codificado en BCD de la segunda cifra de la hora

M_1 = El número codificado en BCD de la primera cifra de los minutos.

M_2 = El número codificado en BCD de la segunda cifra de la minutos.

F_1 = El número codificado en BCD de la primera cifra de la fecha.

F_2 = El número codificado en BCD de la segunda cifra de la fecha.

A_m =Indicador de si la hora es en Am o Pm.

Energía1= Byte más significativo de la energía calculada.

Energía2= Byte menos significativos de la energía calculada.

El SIMEM cada vez que haya transcurrido una hora de medición de energía en modo de operación normal del microcontrolador, este escribe en la EEPROM la energía acumulada, la hora y la fecha en una palabra de datos de 6 bytes, iniciando en la dirección I_{an} y terminando en la dirección I_{an+5} como lo muestra la tabla 14.

La EEPROM tiene capacidad para almacenar hasta 65535 (0xFFFF) bytes direccionados por dos bytes. Teniendo en cuenta que la palabra de la información es de 6 bytes en la EEPROM, entonces puedo almacenar hasta 10922 palabras. Si el SIMEM almacena cada palabra de información cada hora, entonces, el SIMEM puede calcular y almacenar datos de energía consumida en lapsos de una hora de por 10922 horas o aproximadamente por 455 días o un año y cuatro meses.

El SIMEM siempre va a almacenar la dirección de la EEPROM de la siguiente palabra a escribir en la EEPROM del microcontrolador. Una vez la EEPROM llegue a la máxima capacidad de almacenamiento de palabras, este escribe la las nuevas palabra de datos referente al cálculo de energía, primero en la primera palabra de datos que se halla escrito en la EEPROM con localidad I_0 , y luego en las otras de forma sucesiva manteniendo siempre 10922 palabras de datos.

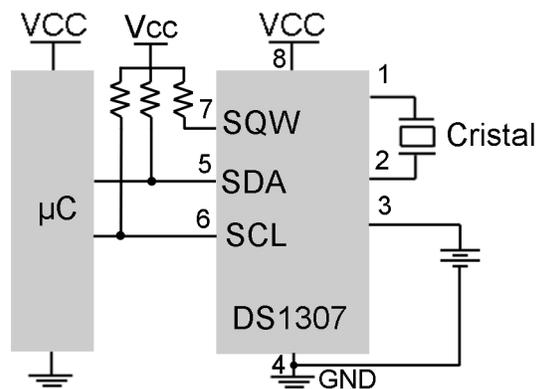
Los datos de la EEPROM pueden ser leídos cuando se está en el modo de operación de comunicación del microcontrolador. El usuario, a través del microcontrolador da la orden de inicio a la transmisión de datos de la EEPROM de forma ordenada para mostrarlos de forma establecida por el software al usuario. Una vez concluida esta operación la EEPROM es reiniciada para el almacenamiento de datos.

La palabra de datos esta compuesta por 6 bytes. Cada byte almacena información de tipo de energía calculada; de fecha, de hora de acuerdo a como esta organizada la información en los bits. Los bytes A, B, C, D almacena la información de datos de fecha y hora, de forma que los números son almacenados en BCD distribuidos en desorden en los bytes y la información de la hora de AM y PM dependen del estado de un bit. Para la información de cantidad de energía se, almacena de forma binaria en los bytes E y F donde el byte E es el más significativo.

4.11 RELOJ DE TIEMPO REAL DS1307

Un reloj de tiempo real hace parte también del SIMEM, conectado al microcontrolador por una interfaz I²C independiente a la de la EEPROM. Cumple con el propósito de generar para el sistema un registro del tiempo de forma exacta. La exactitud del reloj de tiempo real depende del valor del cristal y cómo está conectado al integrado. El DS1307 está conectado al microcontrolador según se observa en la figura 53.

Figura. 53. Circuito de operación del reloj de tiempo real DS1307.



Dentro del integrado DS1307 se encuentran 8 bytes para la generación y configuración de la hora y la fecha. Sabiendo esto el microcontrolador en el modo de configuración escribe en los registros la configuración de la hora que le entrega el usuario al sistema. El microcontrolador en modo de operación normal, continuamente lee los registros del DS1307 para actualizar en el SIMEM la hora y la fecha.

4.12 PUERTO RS232

Aunque la transferencia y control del medidor es logrado a través del puerto SPI y los puertos I²C, un conector serial permite conectarse a un puerto externo RS-232 opto acoplado localizado en la tarjeta de comunicación con el computador. Esto provee al usuario un método adicional de comunicación para el medidor a través de un bus de comunicación separado, permitiendo compartir con un computador información del sistema Integrado de medición que no puede ser observar en este.

Aprovechando que por este puerto se llevan las señales de transmisión y recepción de datos utilizando el estándar RS232, se saca provecho al puerto RS232 conectándose a los otros contactos de este puerto la salida CF del ADE7763, la fuente de alimentación de la tarjeta del medidor y la línea de distribución del energía.

4.13 CONECTORES DE LA LÍNEA DE MEDICIÓN

Los conectores de medición de energía, son unos conectores que tiene la tarjeta del medidor para realizarse conexiones entre la línea de distribución y los circuitos trazados para los canales 1 y 2, y los conectores a donde se conectan las cargas que se les quiere medir la energía.

Los conectores que se utilizan en una medición de energía dependen de la cantidad de corriente que pasará por el SIMEM. Cuando se quiere medir energía para una carga que consume corriente de hasta 10 amperios. Debe localizarse a aun costado de la tarjeta del medidor, un conector a la cual se le conecta la línea de distribución utilizando un cable de poder. Ya las cargas que se les quiere medir la energía deben ir conectadas a la toma corriente localizada en la parte frontal de la misma tarjeta. Los otros conectores que se encuentran en tarjeta del medidor corresponden a los de alta corriente. Soportan corrientes de hasta 25 amperios y son tres los conectores, uno para la entrada de corriente, otro para salida de este y el del neutro.

Cuando se quiera medir energía para cargas que consumen hasta 25 amperios, las conexiones que se realizan en la tarjeta del medidor son las siguientes: Conectar la fase de la línea de distribución al contacto marcado con la letra Lin (línea de entrada). También conectar las cargas a través de un conductor que va conectado al conector marcado con Lout (línea de salida). Como última conexión de este tipo debe conectarse el neutro a su respectivo conector para proporcionar una referencia al circuito.

En condiciones a la cuales se le quiera medir corrientes a un circuito ramal de una edificación, se debe utilizar los conectores de alta corriente.

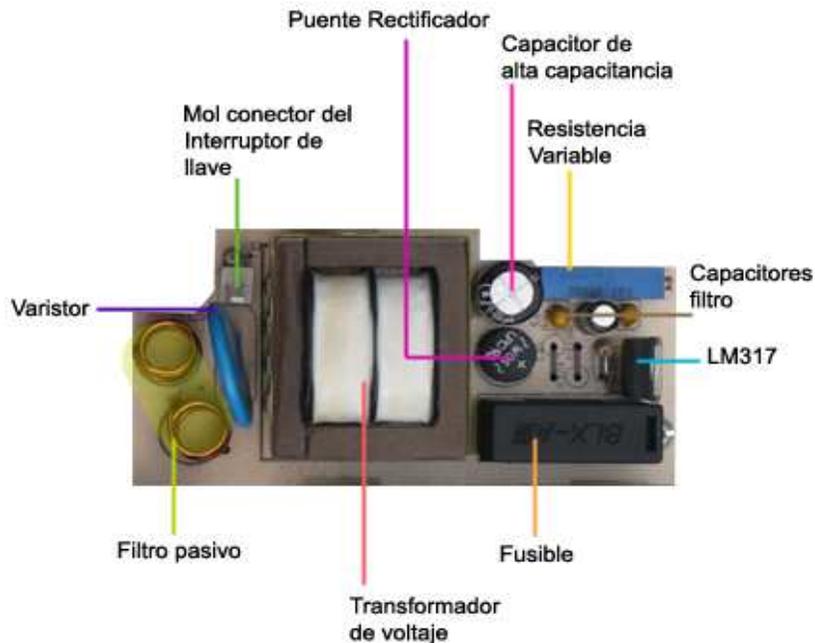
Para todas las conexiones de medición de energía que se quiere realizar debe tenerse la precaución de no sobrepasarse de la corriente máxima que puede medir cada conexión.

4.14 FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LA TARJETA DEL MEDIDOR

El diseño usado es el de una fuente de alimentación simple de bajo costo basado en un transformador de voltaje y un LM317. El transformador de voltaje permite un mejor aislamiento del sistema. El circuito integrado LM317 es un regulador de voltaje utilizado en una configuración de circuito que permite al usuario establecer el valor deseado de voltaje de salida de la fuente de alimentación.

La fuente de alimentación y el sistema de medición de energía están conectados en paralelo a la línea de distribución. Así se garantiza no medirse la energía que consume el SIMEM. La fuente de alimentación del medidor se muestra en la figura 54.

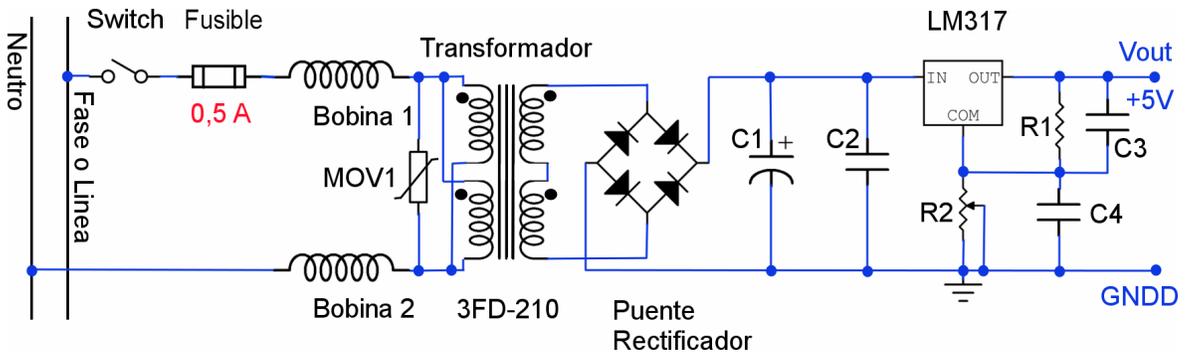
Figura. 54. Fuente de Alimentación de la tarjeta del medidor.



En la entrada de la fuente de la alimentación, la tensión de la línea es tomada por un filtro pasivo dotado por dos bobinas (bobinas 1 y 2 -ver figura 55). Estas bloquean el ruido de alta frecuencia que puede haber en la línea de distribución y que no debe introducirse al circuito de la tarjeta. Sobrepasado esto, la tensión de la línea debe pasar por un interruptor accionado por una llave, que conectado a la tarjeta por el conector Mol permite el paso de corriente para todo el trazado de circuito digital.

Para proteger la tarjeta del medidor de sobre picos de corriente y voltaje, la fuente de alimentación utiliza respectivamente el fusible y el varistor (MOV1). La protección del fusible es para valores de corriente mayores a 500 miliamperios. Para la protección de voltaje el varistor resiste voltajes superiores a 180 voltios RMS a 40 joules.

Figura. 55. Diagrama esquemático de la fuente de alimentación de la tarjeta del medidor.



El voltaje de salida de la fuente de alimentación de la tarjeta del medidor puede ser ajustado a través de la resistencia variable R2. Normalmente el voltaje de salida de la fuente de alimentación es ajustada en 5 voltios. Los capacitores de la fuente de alimentación fueron escogidos para tener la menor cantidad de ruido en el sistema y para asegurar que haya suficiente carga almacenada durante una caída de voltaje cuando el PIC entre en modo de apagado.

La fuente de Alimentación esta designada para operar a 120 voltios.

4.15 TARJETA DE INTERACCIÓN CON EL USUARIO

Localizada encima de la tarjeta del medidor, está es operada por el usuario y cumple con las siguientes funciones: Mostrar al usuario datos del SIMEM, y la de

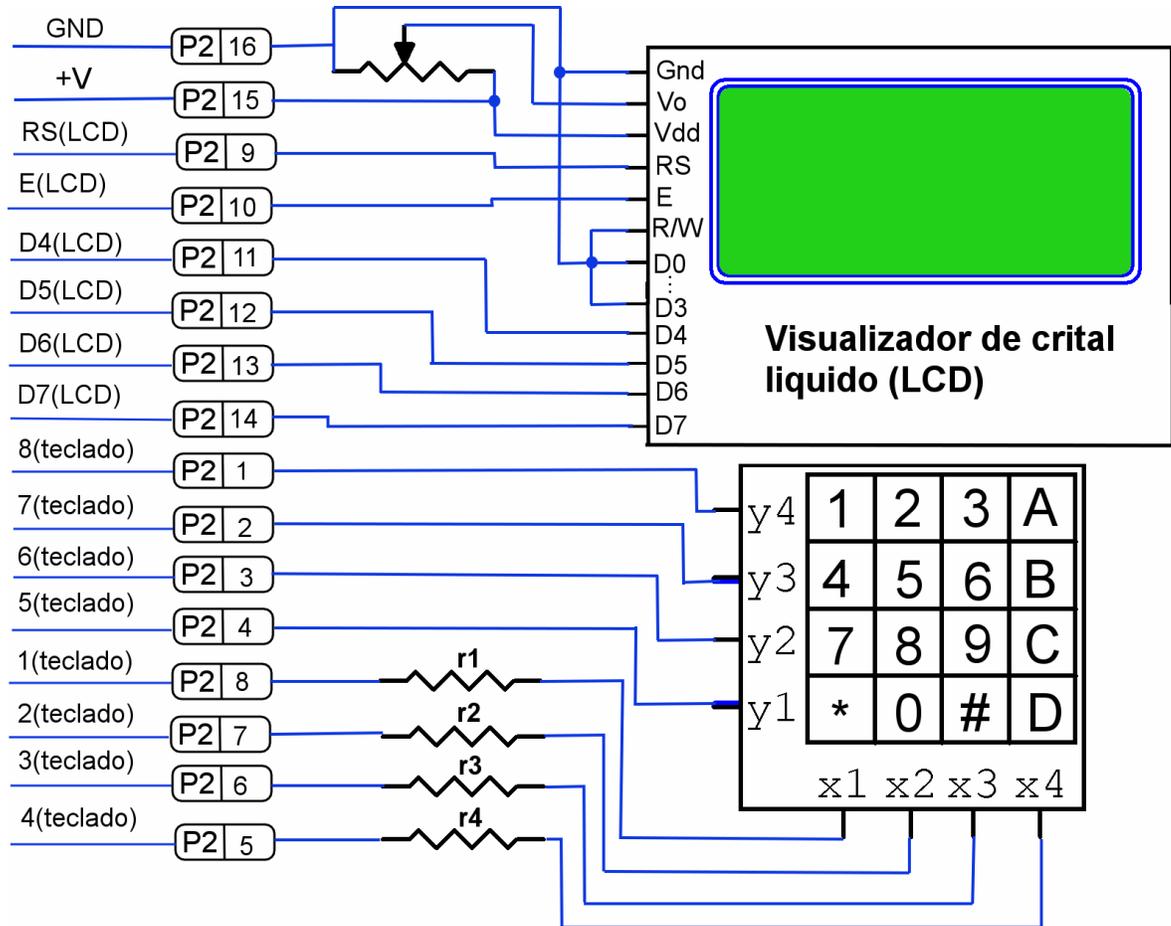
manejar al SIMEM por medio de su teclado matricial. La figura 56 muestra la tarjeta de interacción con el usuario.

Figura. 56. Tarjeta de interacción con el usuario.



La tarjeta de visualización del usuario permite al usuario interactuar directamente con SIMEM sin la necesidad de que se conecte el computador al sistema. Básicamente esta tarjeta la conforma el LCD, el teclado matricial, y una resistencia variable (ver figura 57). El LCD muestra al usuario mensajes que proyecta el sistema, el teclado toma información del usuario para llevarse al sistema. La resistencia variable configura la intensidad de los mensajes proyectados en el LCD.

Figura.57. Diagrama Esquemático de la tarjeta de interacción con el usuario



4.15.1 Visualizador LCD y Teclado matricial

El LCD visualiza 11 dígitos para el cálculo de energía en kilovatios hora y la hora y la fecha cuando el microcontrolador está en modo de operación normal. La visualización del registro y cálculo de energía inicia en cero, y termina en el valor máximo de 99999999,999 KWh. El registro de cálculo de energía en el LCD es llevado a cabo para por lo menos 2645 años de medición, para el cual el medidor está acumulando energía para un voltaje nominal de 120 voltios y una corriente máxima de medición del SIMEM.

El visualizador del LCD es controlado por el microcontrolador utilizando la configuración de cuatro hilos. Mostrando diferentes tipos de mensajes, que par el usuario determina la función que realiza el SIMEM. Además en el LCD puede

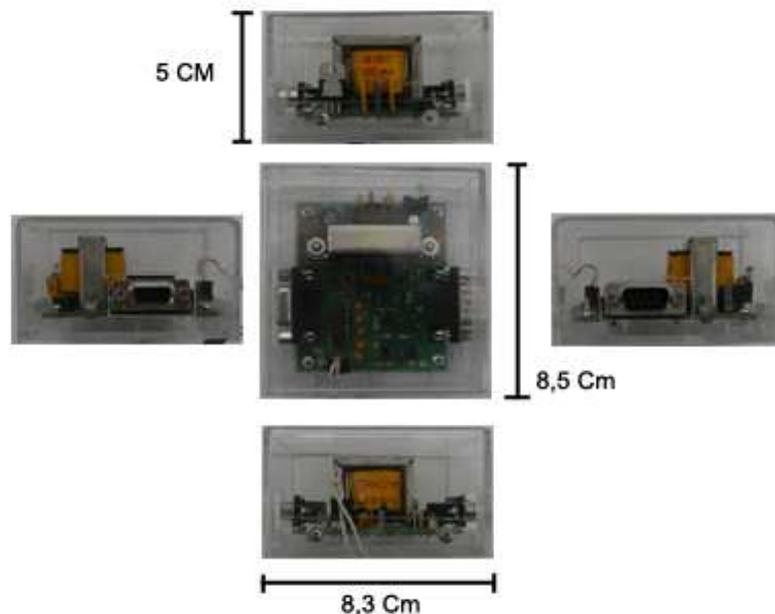
configurarse la intensidad en la pantalla de forma manual a través de una resistencia variable.

El teclado matricial permite ingresar datos al SIMEM que me permiten manejar el SIMEM a través de los menús desplegados en el LCD. El teclado matricial conectado directamente al microcontrolador de forma que este es el que hace el barrido de las teclas de este. Utilizando los dispositivos mencionados el SIMEM guía al usuario a la hora de configurar, manejar y comunicar datos del SIMEM.

4.16 DISPOSITIVO DE COMUNICACIÓN CON EL COMPUTADOR

El dispositivo de comunicación con el computador tiene a sus costados viendo desde arriba, dos conectores de puerto serial TP9, una hembra y otro macho (ver figura 58). Esto con el fin de no equivocarse en la conexiones de este dispositivo con el computador y con el dispositivo de monitoreo y calculo de energía.

Figura. 58. Dispositivo de comunicación con el computador.



También cabe destacar un orificio que se encuentra a un costado de este, observando el dispositivo también desde arriba. Por este orificio salen dos cables correspondientes a la salida de pulsos opto acoplada de CF del ADE7763.

Este dispositivo solo se conecta para cuando se quiera comunicar el computador con el dispositivo de monitoreo y cálculo de energía. Además no es necesario que este, esté conectado al dispositivo de monitoreo y calculo de energía, y mucho menos en el computador para la medición de energía del SIMEM. La salida de pulsos solo es necesaria conectarse para cuando se quiera realizar el proceso de calibración del SIMEM o para cuando se quiera tomar los registros de cálculo de energía por horas.

4.17 TARJETA DE COMUNICACIÓN DEL SIMEM

Esta tarjeta se encuentra en el dispositivo de comunicación con el computador. Es la encargada de realizar la comunicación entre un computador personal local y el dispositivo de monitoreo y calculo de energía, además de arrojar la señal de salida de pulsos del conversor de energía a frecuencia del ADE7763.

La tarjeta de comunicación está compuesta principalmente por un circuito de la fuente de alimentación, la salida del convertidor de frecuencia a energía del ADE7763, varios optocopladores y el circuito integrado MAX-232 (ver figura 58).

Una de las razones por la cuales la tarjeta de comunicación se encuentra conectada a la tarjeta del medidor, es porque la energía alterna de la línea distribución suple de energía a la fuente de alimentación de esta tarjeta que soporta varios optocopladores y al circuito integrado MAX-232.

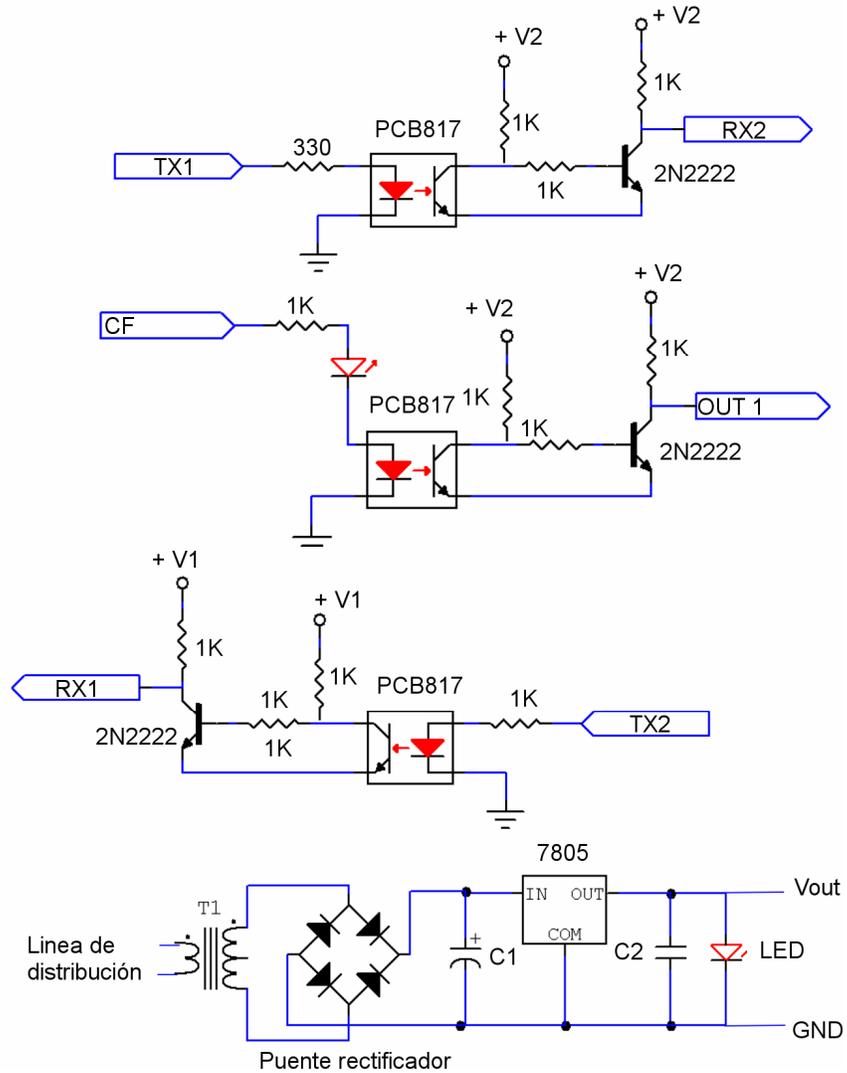
Las conexiones entre el microcontrolador y el MAX-232 utilizan opto acopladores para aislar las tierras de cada dispositivo. La tarjeta del medidor tiene como referencia la tierra análoga, o sea el neutro de la línea de distribución de acuerdo a la conexión de entrada para el canal 2. Por otra parte la referencia de la tarjeta de comunicación es la tierra del computador, que representa la conexión de puesta a tierra de una línea de distribución. Si se hiciera la conexión de las partes de forma directa. Seguramente se produciría un corto, daño el puerto RS232 del computador.

Finalmente la transmisión y recepción de datos en la tarjeta se realiza de forma asíncrona usando una estándar RS-232, con el fin de llevar datos hacia el computador como el consumo generado de energía en lapsos de una hora, así como poder leer y rescribir valores de registro del ADE7763.

La justificación de esta tarjeta se basa primero en que el sistema integrado de medición de energía no necesariamente necesita estar conectado a un computador personal todo el tiempo para calcular la energía. Segundo que la salida de frecuencia no tiene que estar siempre en funcionamiento a menos que

se este calibrando el S.I.M.E.M. Tercero ya que la referencia o tierra de un computador local no puede ser directamente conectado a la referencia de la tarjeta del medidor.

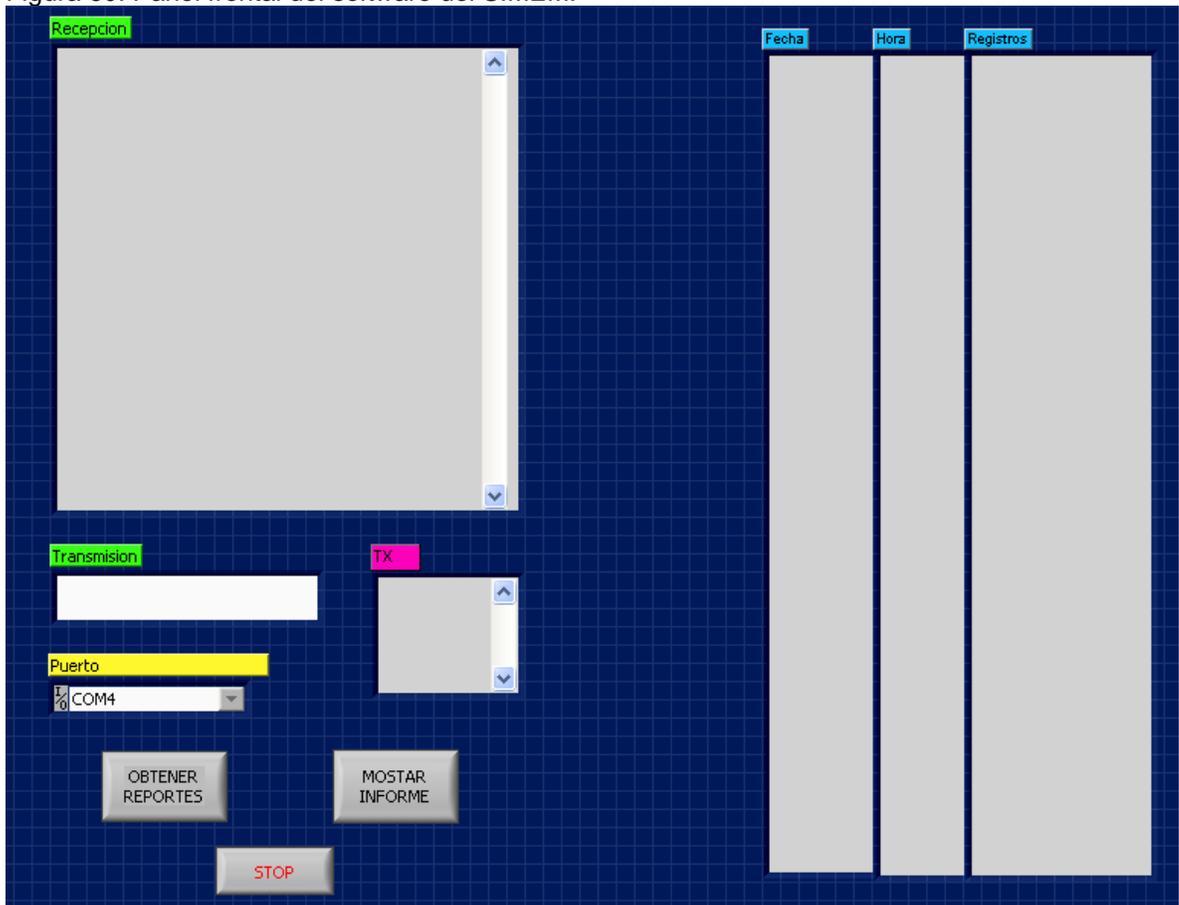
Figura 59. Diagrama esquemático de lar tarjeta de iteración con el usuario



5 SOFTWARE DEL SIMEM

El software que se desarrollo para el SIMEM, se elaboró en LABVIEW. Con las librerías en comunicaciones seriales, el software tiene funciones básicas como la de transmitir y recibir datos por el puerto serial, y la de obtener todo los datos de calculo de energía en lapsos de una hora. El panel frontal del programa es el que se muestra en la figura 60.

Figura 60. Panel frontal del software del SIMEM.



El software presenta al usuario las siguientes características: Que todos los datos ingresados por la ventana transmisión son enviados por la interfaz RS232 hacia el microcontrolador para dar ordenes al ADE7763 escribiendo en el registro de

comunicación. Para la ventana de recepción es lo contrario. Todos los datos enviados por el microcontrolador y que pertenecen a los valores de los registros del ADE deben aparecer en la ventana de recepción.

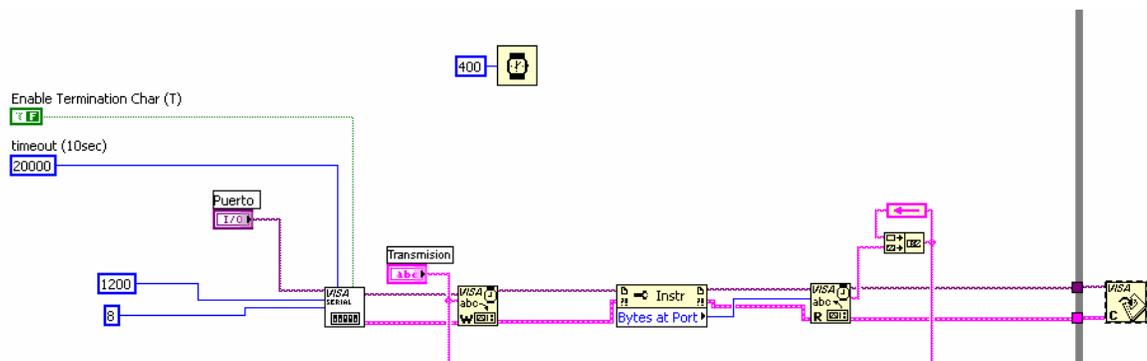
La cacilla de puerto, configura el puerto por donde se establecerá la comunicación entre el hardware y el software. Los botones obtener datos y mostrar informe sirven para la adquisición y visualización de datos de energía calculada en lapsos de una hora. El botón Stop es el botón de emergencia que detiene el software del SIMEM.

Las 3 cacillas que están a la derecha del panel frontal, muestra de manera ordenada en una tabla, los datos adquiridos de cálculos de energía por hora que se hicieron por parte del hardware del SIMEM.

El software se hizo para operarse de la siguiente manera. El software busca que el usuario a través de la ventana transmisión, escriba en el registro de comunicación del ADE, para esto el usuario debe escribir los 8 bits del registro de comunicación de la misma manera como si se estuvieran ingresando directamente al integrado (ver sección de escritura y lectura del ADE7763). Escrito el byte que se quiere ingresar al ADE, debe el usuario ingresar el siguiente símbolo (-), indicando al software el fin del byte. Cumplido con lo anterior presionando la tecla enter el computador envía el byte al microcontrolador y este le responde en la ventana superior (recepción), el resultado de la operación solicitada.

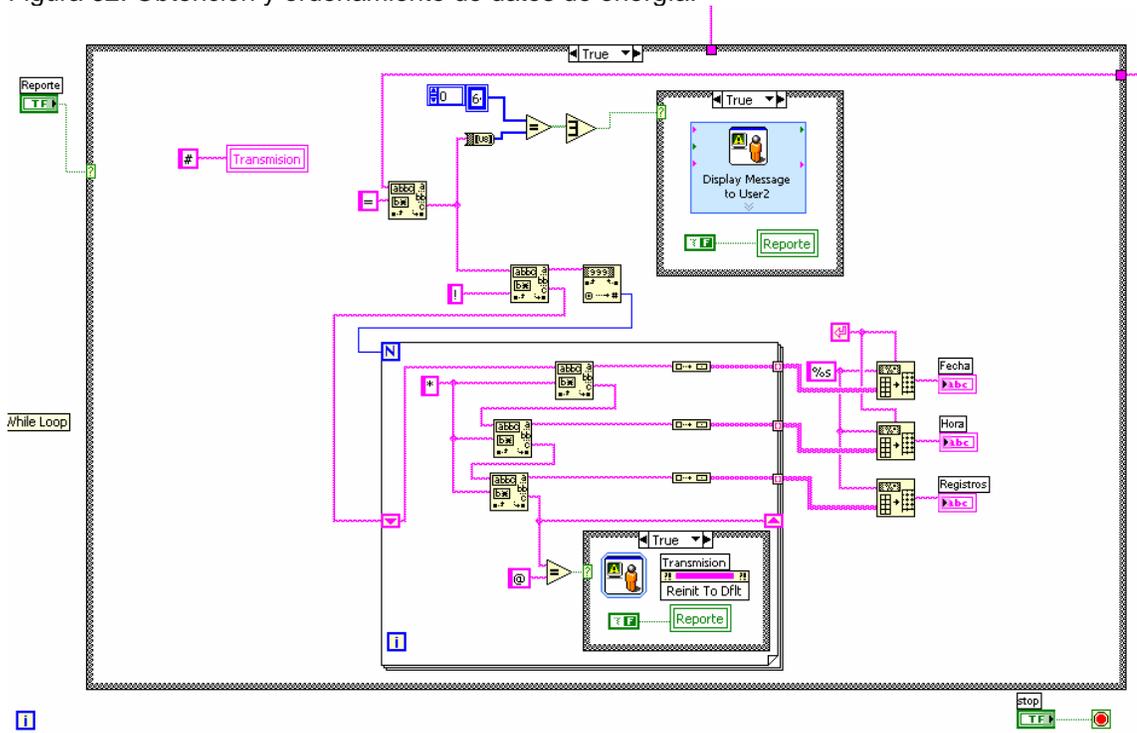
Otra función del software es la de obtener los datos de calculo de energía por horas, para esto el usuario debe presionar en el panel frontal el botón obtener datos. Hecho esto, y una vez que los datos ya fueron adquiridos, el software finalizada la operación desplegando un mensaje el cual indica que la operación ha terminado. Para visualizar de forma ordenada dichos datos el usuario debe presionar el botón mostrar informe para.

Figura. 61. Configuración y manejo del puerto serial en Labview.



En la figura 61 se observa como el software está configurado para que el manejo del puerto serial suceda en todo momento. A través de los módulos de visa de Labview se puede configurar los puertos serial del computador. También se puede concluir que el software solo sirve de intermediario entre el usuario y microcontrolador. Siendo el usuario y el programa del PIC los únicos que manipulan los datos que se observan en el panel frontal. El software resulta ser una herramienta interactiva para el usuario.

Figura 62. Obtención y ordenamiento de datos de energía.



En la figura 62 se observa una estructura la cual me permite tomar los datos que esta en el dispositivo de monitoreo y cálculo de energía, y llevarlos al software. Cuando se habilita esta estructura el símbolo # es enviado por el puerto RS232, hacia el microcontrolador, esto hace que el microcontrolador inicie el envío de datos, con la cantidad de datos de energía que tiene almacenado. Esto sucede para que el software establezca la cantidad de datos por ordenar en las tablas. En la figura 62 este número representará el valor N de la estructura for. Luego del que el microcontrolador envía el dato de la cantidad de datos a enviar, este comienza a enviar los datos de forma ordenada y separada por caracteres especiales cuya función es clasificar los datos en la estructura for para las tablas. Finalizado esto se despliega un mensaje que indica el fin de la operación. Ya presionando el botón mostrar informe lo que se está ordenando al software es que las tablas puede visualizarse en el panel frontal.

6 CALIBRACIÓN DEL SIMEM

La calibración del SIMEM consiste en la configuración de los índices de los registros de medición del ADE7763, y en hallar la proporción que existe entre el registro AENERGY y la cantidad de energía medida por él mismo. Este procedimiento es llevado a cabo por un usuario a través del microcontrolador y el software del computador. Una vez calibrado el SIMEM este no vuelve a ser calibrado a menos que se vuelva a programar en el microcontrolador.

Es imprescindible mencionar que la calibración del SIMEM debe realizarse utilizando como referencia una fuente de exacta que proporcione valores de corriente y voltaje invariables en el tiempo. Ya que no se tiene dicha fuente, se supone que la fuente exacta está dada por una línea de distribución de energía, y que sus valores de corriente y voltaje son invariables en el tiempo, medidos por aparatos de medición.

El SIMEM una vez se inicia por primera vez, el microcontrolador entra en modo de calibración, allí lo primero por lo que se atraviesa, es el ingreso de la contraseña, la configuración de la fecha y la hora, y finalmente la parte de calibración del SIMEM que es en definitiva la razón de esta sección. Es importante mencionar que el usuario es el que debe realizar los cálculos de los coeficientes y la proporción del registro de energía tal como se muestra durante esta sección.

En el proceso de calibración debe establecerse las siguientes condiciones básicas.

La primera radica en que el microcontrolador esté en modo de calibración, específicamente en la parte de calibración del SIMEM. Allí el funcionamiento del SIMEM corresponde a la descrita por el programa del microcontrolador – ver sección del programa del microcontrolador, modo de calibración.

La segunda establece que todas las conexiones entre los siguientes dispositivos deben estar hechas. La conexión del dispositivo de monitoreo y cálculo de energía con el dispositivo de comunicación con el computador, y la otra conexión es entre el computador y el dispositivo de comunicación con el computador. Las dos conexiones mencionadas se realizan a través de conectores TP9 con puertos RS-232. Es importante mencionar que de ninguna manera el dispositivo de monitoreo y cálculo de energía debe conectarse directamente al computador. Esto ocasionaría un daño grave al computador.

La tercera condición consiste en que habiendo hecho las dos condiciones anteriores, inicie la ejecución del programa del SIMEM en el computador utilizando LABVIEW. El programa del computador facilita al usuario un medio de interacción y de configuración del ADE7763 tal como se describió en la sección de software. En el programa del SIMEM del computador la consola de interacción con el usuario permite solo entonces transmitir y recibir datos por el puerto habilitado, mas no puede ejecutar la tarea de recepción de datos de energía calculada en lapsos de una hora, porque esta función aun no esta habilitada por el microcontrolador, recordando que hasta este momento se esta calibrando el SIMEM. Debe tenerse en cuenta que mientras se este ejecutando la calibración del SIMEM, el software del SIMEM indica una interrupción en la salida IRQ mostrando la letra I en la ventana indicadora de caracteres.

Tabla. 15. Configuración inicial de los registro del ADE7763.

Nombre del registro en el ADE7763	Dirección (HEX)	Valor del registro BIN
GAIN	0x0F	(0000 0000)
CH1OS	0x0E	(0000 0000)
CH2OS	0x0D	(0000 0000)
CFDEN	0x15	(xxxx 0000 - 0011 1111)
CFNUM	0x14	(xxxx 0000 - 0011 1111)
WDIV	0x13	(0000 0000)
LINECYC	0x1C	(1111 1111 - 1111 1111)
MODE	0x09	(0000 0000 - 1000 1000)
IRQEN	0x0A	(0000 0000 - 0000 0100)
PHCAL	0x10	(xx00 1101)
APOS	0x11	(0000 0000 - 0000 0000)
WGAIN	0x12	(xxxx 0000 - 0000 0000)
VGAIN	0x1A	(0000 0000)
VADIV	0x1B	(0000 0000)
IRMSOS	0x18	(0000 0000)
VRMSOS	0x19	(0000 0000)

Hasta ahora todo lo que se ha hecho es para la comunicación entre el usuario y el dispositivo de cálculo y monitoreo de energía. La cuarta y última condición corresponde a las conexiones referentes a la medición y calibración de energía. Una conexión es la de un medidor de frecuencia al dispositivo de comunicación con el computador en la salida CF (Ver tarjeta de interfaz con el computador), para ver la señal de salida de CF. En el SIMEM se utiliza para ver esta señal un FLUKE en modo de medición de frecuencias. Las otras conexiones se realizan al dispositivo de monitoreo y calculo de energía. Las conexiones son las siguientes:

La que va desde de la línea de distribución hacia el SIMEM, y de este hacia la carga, y la de los dispositivos de medida a comparar. La conexión de la línea de distribución se realiza a través de un cable de poder hasta el conector correspondiente en el dispositivo, la conexión de la carga es aquella que se extiende desde el dispositivo hasta una carga, y las conexiones de los dispositivos de medida se realizan entre la carga y el dispositivo de cálculo y monitoreo de energía. Los aparatos de medida miden los valores eficaces tanto de voltaje como de corriente de la línea que va hacia la carga.

Iniciando con el proceso de calibración, el usuario escribe y verifica los valores de los registros del ADE7763 mencionado en la tabla 15. La mayoría de estos valores son los mismos que los del ADE7763 tienen por defecto. Realizando este proceso se asegura la misma configuración de inicio para la calibración.

El procedimiento de calibración del SIMEM se realiza de acuerdo a los siguientes pasos y teniendo en cuenta la sección de calibración de un medidor. Durante esta sección los registros del ADE7763 son modificados de acuerdo a los cálculos para que la medición de energía sea lo más exacta posible.

6.1 CALIBRACIÓN DE CF

Para realizar el primer paso de la calibración, que es el calcular el denominador de la ecuación que describe el comportamiento de CF, debe definirse las siguientes condiciones.

Voltaje en la línea: $V_{\text{line}} = 108 \text{ VRMS}$.

Corriente de base: $I_b = 2.54 \text{ ARMS}$.

Corriente máxima del medidor (SIMEM): $I_{\text{max}} = 25 \text{ ARMS}$.

Donde el voltaje de la línea es el voltaje que está sobre la carga y que es suministrado por la línea de distribución. La corriente base es la corriente que va hacia la carga, la cual fue seleccionada de acuerdo a la corriente que consume la carga (resistencia térmica). La corriente máxima del medidor es la mayor corriente que puede medir el sensor de corriente y por ende el SIMEM.

El primer pasó de la calibración usando una fuente exacta es calcular el denominador y el numerador de CF, que por defecto son $\text{CFDEN} = 0x3F$ y $\text{CFNUM} = 0x3F$ cuando la corriente de base es aplicada –ver sección del convertidor de energía a frecuencia.

Como constante del medidor (Cm), tanto 3.200 imp/kWh o 3.2 imp/Wh puede usarse para calibrar CF.

La Constante del medidor Cm en segundos es:

$C_{ms}=3.2 \text{ imp/Wh } 1/3600\text{seg.}$

El valor entonces es

$C_{m\text{Segundos}}=8.88 \cdot 10^{-4} \text{ [Hz/W]}$

Según la ecuación (1) el CF esperado es 241.33 mHz:

$$CF_{IB(\text{esperado})} = (C_m) * (1 \text{ hora}/3600 \text{ seg}) * (I_b) * (V_{\text{line}}) \quad (1)$$

$$CF_{IB(\text{esperado})} = 8.88 \cdot 10^{-4} \text{ [Hz/V.A]} \times (2,54 \text{ A}) \times (108.6 \text{ V}) = 241.33 \text{ mHz}$$

Sabiendo que la salida máxima de frecuencia de la salida CF es 23 KHz para entradas de señales AC completas en las entradas análogas. Para la calibración ahora se calcula el CF nominal.

$$CF_{IB(\text{nominal})} = 23 \text{ kHz} * (1/2) * (1/2) * (I_b/I_{\text{max}})$$

$$CF_{IB(\text{nominal})} = 23\text{KHz} \times (1/4) \times (2,54/25) = 584,2\text{Hz}$$

Alternativamente utilizando el FLUKE como medidor de frecuencia de la salida CF en el laboratorio. La frecuencia de la salida de pulsos de CF se obtiene y es el CF nominal mostrado a continuación.

$$CF_{IB(\text{nominal})} = 564,6\text{Hz} \text{ Valor experimental medido en la salida CF.}$$

El CF nominal en una muestra determinada de medidores debe ser medido usando los valores por defecto de CFDEN, CFNUM, y WDIV para asegurar que el mejor CFDEN sea escogido para el diseño. El valor escogido de CF nominal es el tomado en el laboratorio debido a que muestra el valor real de la salida de pulso CF.

El valor calculado de CFDEN es entonces el valor entero de la proporción que existe entre el $CF_{IB(\text{nominal})}$ y el $CF_{IB(\text{esperado})}$ menos uno.

$$CFDEN = \text{ENT}(CF_{IB(\text{nominal})}/CF_{IB(\text{esperado})}) - 1$$

$$CFDEN = \text{ENT}(564,6 / 241.33 \times 10^{-3}) - 1 = (2345)_{\text{dec}} = (0000 \ 1001 - 0010 \ 1001)_{\text{bin}}$$

Los valores de CFDEN, CFNUM y WDIV deben cargarse dentro del ADE7763 como se muestran en la tabla 16 antes continuar con el siguiente paso de la calibración.

Tabla. 16. Valores de CFDEN, CFNUM y WIDV a introducir en el ADE7763.

Nombre	Dirección	Descripción	Valor del registro
CFDEN	15-(0001 0101)	Denominador CF	(0000 1001 – 1010 0001)
CFNUM	14-(0001 0100)	Numerador CF	(xxxx 0000 - 0000 0000)
WDIV	13-(0001 0011)	Divisor de energía	(0000 0000)

Ya modificado los registros, se vuelve a tomar el valor de $CF_{IB(nominal)}$ experimental para los valores de corriente de base y voltaje en la línea.

$$CF_{IB(nominal)} = 243,3 \text{ mHZ}$$

El registro WGAIN puede ser usado para finalmente calibrar la salida CF. Calibrando WGAIN, cambia tanto la salida de frecuencia CF como el registro AENERGY para condiciones de carga.

6.2 CALIBRACIÓN DE GANANCIA DE VATIO

La segunda parte del cálculo consiste en la calibración de la ganancia de vatio en el registro WGAIN. Como antes se menciono el CFDEN calculado debe ser escrito en el registro CFDEN antes de seguir con la calibración y cero debe ser escrito en el registro CFNUM. Igualmente debe habilitarse el modo de acumulación de energía por ciclos de línea en el registro MODE[CYCMODE] y la interrupción de está en el registro STATUS[CYCEND], no antes de escribir el número de medios ciclos de línea del registro LINECYC_{IB} para fijar el tiempo de acumulación en este modo. Los registros mencionados quedan establecidos igual que en la tabla 17.

Tabla. 17. Registros modificados para hallar la ganancia de vatio.

Nombre	Dirección	Descripción	Valor del registro
LINECYC	1C-(0001 1100)	# de medios ciclos	(0000 0111-1101 0000)
MODE	09-(0000 1001)	Modo	(0000 0000-1000 1000)
IRQEN	0A-(0000 1010)	Habilita interrupción	(0000 0000-0000 0100)

Donde valor del registro LINECYC es el número de medios ciclos que serán tenidos en cuenta para acumular energía en el modo de acumulación de ciclos. Su valor es 2000 medios ciclos.

Hallando el valor del registro WGAIN se calibra de ganancia de vatio para el cálculo de energía activa. Despejando la ecuación (sección de calibración del medidor) describe como hallar el valor de WGAIN, basado en la relación que existe entre los valores de $LAENERGY_{IB(esperado)}$ y $LAENERGY_{(B(nominal))}$.

$$WGAIN = ENT \left(\left(\frac{LAENERGY_{IB(esperado)}}{LAENERGY_{IB(nominal)}} - 1 \right) \times 2^{12} \right)$$

Entonces se debe calcular el valor de $LAENERGY_{IB(esperado)}$ y el de $LAENERGY_{IB(nominal)}$.

La forma de calcular $LAENERGY_{(esperado)}$ se obtiene a partir de la ecuación de $LANERGY_{esperado}$ en la sección de calibración del medidor.

$$LAENERGY_{IB(esperado)} = ENT \left(\frac{CF_{IB(esperado)} \times Tiempo_de_Acumulación(s)}{\frac{CFNUM + 1}{CFDEN + 1} \times WDIV} \right) \quad ()$$

Donde el tiempo de acumulación se reemplaza (ver sección de calibración del medidor) y se obtiene la siguiente la función.

$$LAENERGY_{IB(esperado)} = ENT \left(\frac{CF_{IB(esperado)} \times LINECYC_{IB} / 2 \times Periodo \times 8 / CLKIN}{\frac{CFNUM + 1}{CFDEN + 1} \times WDIV} \right) \quad ()$$

Para el cual $CF_{IB(esperado)}$ esta dado en Hertz, es calculado. El periodo de la línea es determinado por el registro periodo (PERIOD) y el valor de los registro CFNUM, CFDEN, WDIV y LINECYC ya fueron hallados.

El valor leído del registro periodo es $(7472)_{decimal}$ en el ADE7763. La frecuencia de línea es entonces calculada en la siguiente ecuación para determinar que se esta haciendo correctamente la medición del frecuencia de la línea.

$$Frecuencia_de_la_linea = \frac{60HZ \times 7472}{7457} = 60,12Hz$$

Retomando, los datos que se tienen hasta el momento y que se necesitan para hallar $LAENERGY_{IB(esperado)}$ son:

$CF_{IB(esperado)} = 0,24133$
 $CFNUM = 0$
 $CFDEN = 2345$
 $WDIV = 1$
 $PERIOD = 7472$
 $CLKIN = 3.579545 \times 10^6$
 $LINECYC = 2000$

Ya con estos datos, se calcula el valor de $LAENERGY_{IB(esperado)}$

$$LAENERGY_{IB(esperado)} = ENT \left(\frac{0.24133 \times 2000 / 2 \times 7472 \times 8 / 3579545}{\frac{0+1}{2345+1} \times 1} \right)$$

$$LAENERGY_{IB(esperado)} = 9454$$

Teniendo el valor de $LAENERGY_{IB(esperado)}$, se procede a obtener el valor de $LAENERGY_{IB(nominal)}$. Leyendo el registro de estado de interrupción con reseteo RSTATUS, se espere a que ocurra la interrupción de acumulación de ciclo de línea en la salida IRQ del ADE7763, mostrando con la letra I en la ventana de recepción de datos del software. Sucedido esto se lee el registro LAENERGY. El primer resultado de LAENERGY en el modo acumulación de ciclo de línea no podría usarse debido a que el tiempo de acumulación fijado por el registro LINECYC aun no ha sido tomado por el integrado, entonces este valor deberá ser descartado. Luego, se vuelve a leer de nuevo el registro RSTATUS, para esperar a que vuelva a ocurrir la interrupción de acumulación de ciclo de línea, sucedido esto se vuelve a leer el valor del registro LAENERGY para tenerse en cuenta en los cálculos de calibración ya que esta vez si se tuvo en cuenta por parte del integrado el valor de LINECYC. El valor de LAENERGY leído experimental es entonces $LAENERGY_{IB(nominal)}$ y es el LAENERGY leído con la prueba de corriente de base. El valor del registro LAENERGY es un valor en complemento a dos.

$$LAENERGY_{IB(nominal)} = (9514)_{\text{decimal}}$$

Este valor de $LAENERGY_{IB(nominal)}$ es comparado con el valor esperado de $LAENERGY_{IB(esperado)}$, para determinar el valor de WGAIN.

$$WGAIN = ENT \left(\left(\frac{9454}{9514} - 1 \right) \times 2^{12} \right)$$

$$WGAIN = -25$$

Hay que notar que WGAIN es un registro de complemento a dos en el ADE7763 con valor en binario igual a:

$$WGAIN = (1111\ 1111 - 1110\ 0111)$$

El calculo de la proporción de WH/LSB para el registro de energía activa AENERGY se obtiene de la ecuación (sección de calibración de un medidor) el valor es $1,33205456095481670929 \times 10^{-4}$.

$$Wh/LSB = \frac{1}{\frac{(2345+1)}{3,2}} = 1,33205456095481670929 \times 10^{-4}$$

Si a los registros del SIMEM se les modificaran por los valores hasta ahora hallados al ADE7763, La proporción de Wh/LSB con respecto al registro AENERGY me permite hallar lo valores de energía calculados por el este.

6.3 CALIBRACIÓN DE COMPENSACIÓN U OFFSET DE VATIO

La calibración de la compensación permite un rendimiento sobresaliente sobre un rango dinámico amplio. Para hacer esta calibración dos mediciones de modo de acumulación de energía por ciclo de línea son necesarias a un factor de potencia unitario, uno en una corriente de base IB y la otra a la corriente más baja $I_{(min)}$ para ser corregida. Los datos de los coeficientes de la calibración de FC y los de la calibración de ganancia son usados para determinar la compensación de la potencia. La calibración de ganancia debe realizarse antes de la calibración de compensación.

La calibración de la compensación es llevada a cabo determinando la proporción de error de energía activa. Después de determinar la proporción de error de energía activa, se calcule el valor a escribir al registro APOS para corregir el offset y así compensar el cálculo de energía.

$$APOS = - \frac{AENERGY_{rata_de_error} \times 2^{35}}{CLKIN}$$

Los registros de AENERGY se actualizan a una rata de CLKIN/4. El registro APOS de complemento a dos provee un ajuste bueno al cálculo de potencia activa. Esto representa una buena cantidad de compensación de potencia para ser ajustada cada CLKIN/4. Los 8 bits menos significativos del registro APOS son muy pequeños de forma que un bit menos significativo del registro APOS representa 1/256 del bit menos significativo del registro de energía activa. Por lo tanto, un bit menos significativo del registro APOS representa 2^{-33} del registro de energía activa AENERGY [23:0].

La tercera parte de la calibración consiste en cálculo de la compensación de potencia activa. Los datos que se tiene para este procedimiento los que se muestra en la tabla 18.

Tabla. 18. Datos para calibración de compensación.

nombre	siglas	valor	unidades
Constante del medidor	Cm	3,2	Imp/Wh
Voltaje de la línea	Vnominal	108,6	Vrms
Frecuencia de la línea	fl	60	Hz
Numerador de CF	CFNUM	0	-
Denominador de CF	CFDEN	2345	-
Corriente base	IB	2,54	Arms
Numero de medios ciclos de línea para IB	LINECYC _{IB}	2000	-
Lectura del registro periodo	PERIOD	7472	-
Frecuencia del reloj	CKLIN	3579545	Hz
LAENERGY basado en la corriente IB	LAENERGY _{IB(esperado)}	9454	-
Corriente Mínima	Imin	7,9	mArms

Antes de continuar con la calibración de compensación, sobre el ADE7763 debe hacerse una operación de escritura con el nuevo valor de WGAIN hallando en la calibración de ganancia, además del nuevo número que se escribe en LINECYC (0x1C) para una corriente mínima es de:

$$LINECYC_{(Imin)}=35700 = (1000\ 1011 - 0111\ 0100)_{bin}$$

La obtención del valor de LAENERGY_(Imin) para la corriente Imin, se realiza de la misma manera de cómo se obtuvo LAENERGY_{IB(nominal)} para una corriente de base en la sección de calibración de ganancia.

$$LAENERGY_{Imin(nominal)} = 627$$

El LAENERGY_{Imin(esperado)} a una corriente Imin es 524 como se muestra a continuación.

$$LAENERGY_{Imin(esperado)} = ENT \left(\frac{Imin}{Ib} \times LAENERGY_{IB(esperado)} \times \frac{LINECYC_{Imin}}{LINECYC_{IB}} \right)$$

$$LAENERGY_{Imin(esperado)} = ENT \left(\frac{7,9 \times 10^{-3}}{2,54} \times 9454 \times \frac{35700}{2000} \right)$$

$$LAENERGY_{I_{min}(esperado)} = 524$$

El hecho de LINECYC sea mayor para la corriente Imin, minimiza el efecto de error de cuantización sobre la calibración de compensación.

Utilizando los datos anteriores se calcula el error absoluto de LAENERGY.

$$LAENERGY(error_absoluto) = LAENERGY_{I_{min}(no\ min\ al)} - LAENERGY_{I_{min}(esperado)}$$

$$LAENERGY(error_absoluto) = 627 - 524 = 103$$

Después se calcula el error de proporción de AENERGY.

$$AENERGY(error_proporcional_LSB/s) = \frac{LAENERGY(error_absoluto)}{\frac{LINECYC_{I_{min}}}{2}} \times \frac{CLKIN}{8 \times PERIODO}$$

$$AENERGY(error_proporcional_LSB/s) = \frac{103}{35700} \times \frac{3579545}{8 \times 7472}$$

$$AENERGY(error_proporcional_LSB/s) = 0.3455413140898757$$

Finalmente se Calcula APOS para escribirlo en su registro en el ADE7763, para terminar la calibración de compensación u offset.

$$APOS = -\frac{AENERGY_error_proporcional \times 2^{35}}{CLKIN}$$

$$APOS = -\frac{0.3455413140898757 \times 2^{35}}{3579545} = -3317$$

$$APOS(0x11) = (1111\ 0011_0000\ 1011)$$

6.4 CALIBRACIÓN DE FASE

La calibración de fase es llevada a cabo hallando el valor del registro PHCAL. Este remueve pequeños errores de fase. El error es determinado al medir la energía activa para IB, en dos factores de potencia $FP = 1$ y $FP=0,5$ inductivo.

Para el SIMEM, que utiliza un sensor de corriente de efecto Hall de lazo cerrado, la respuesta del tiempo del sensor se asume cercana a cero. Por esto no se realiza para el SIMEM la calibración del SIMEM.

7 ANALISIS DE RESULTADOS

- De la investigación sobre transductores de corriente. Teóricamente la bobina de Rogowski es la mejor opción de sensor de corriente para ser usado en la construcción del sistema integrado de medición de energía, ofreciendo las mejores características y teniendo en cuenta que los productos ADE poseen un integrador digital internamente, de forma que la bobina puede ir directamente acoplada al circuito integrado encargado de medición de energía. Este tipo de sensor puede convertirse en la tecnología elegida para las próximas generaciones de medidores de energía.
- En el hardware del SIMEM, más exactamente en la tarjeta del medidor, el circuito trazado para la red del canal 1 obtiene para la entrada del canal 1 del ADE, una señal que representa proporcionalmente la corriente que pasa por la línea. En esto punto se comprobó la efectividad del filtro Antialias, al observarse que la señal muestreada sin el filtro presenta el ruido ocasionado por el muestreo, mientras para cuando se utiliza el filtro la señal no presenta lo mismo. La señal en este punto demuestra también que los dispositivos de aislamiento como lo son: la bobina de núcleo de ferrita y el puerto RS232 opto acoplado, son poco efectivos en aislamiento de ruido entre los planos de tierra digital y analógica. Caso que se comprobó por la presencia de ruido para cuando se realizan las conexiones pertinentes a la comunicación entre el dispositivo de monitoreo y cálculo de energía (DMCE), y el computador. Pese al uso del filtro Antialias, este no bloquea todo el ruido que se presenta en la entrada del canal 1 en la entrada del ADE, y que proviene de el plano digital. Solo este ruido logra ser eliminado en su mayor parte gracias a los filtros internos del ADE, y que se logra comprobar gracias a las pruebas que se hicieron entre el CSNX25 y el ADE como se mostró en la grafica 22. Al final la señal aquí es casi exacta a la corriente de línea, afectada por un poco por el ruido que alcanza a pasar a la hora de hacer medición, sobre todo en niveles bajos de corriente de línea.
- Se pudo comprobar en las pruebas del sensor de corriente, que el CSNX-25 es un sensor de corriente exacto y lineal en la medición que realiza.
- En la calibración del SIMEM se pudo establecer que la medición no se hace de forma exacta, debido a que no se cumple con todas condiciones

- exigidas para hacer la calibración. Por ejemplo la falta de una fuente exacta para la calibración de energía. Sin una fuente de exacta para la calibración, el voltaje de línea puede variar, introduciendo errores en pequeños en la medición.
- Es inevitable la presencia de ruido en el SIMEM, sin importar que se tenga optóacoplado el computador. Como consecuencia de esta el sistema presenta inconvenientes ruidos en las señales análogas, atrasos del reloj de tiempo real, y desconfiguración del LCD.

8 CONCLUSIONES

- Se logro la construcción de un sistema integrado de medición de energía monofásica de uso residencial segunda versión del prototipo (C.E.E.R.) para llevar un registro de energía consumida en lapsos de tiempo de una hora así como durante el tiempo que este funcione y poder compartirlas con un PC.
- Con el SIMEM se alcanzó el manejo de funciones de un medidor electrónico normal, más aquellas funciones dadas como la comunicación con un computador y el almacenamiento del registro de consumo de energía en intervalos de tiempo.
- Se estudio los integrados de integrados de medición de energía de la familia ADE, perteneciente a la firma Analog Devices., que tiene como propósito común medir energía.
- Se comprobó que el ADE7763 es más que un integrado de medición de energía sino que también permite el monitoreo de potencia activa, calculo de valores corriente eficaces, así como otras funciones que hace de este integrado la solución perfecta a cualquier problema de medición de energía en una línea de distribución monofásica .
- Se realizó un estudio sobre transductores de corriente.
- Se desarrollo un software que permite al usuario interactuar con el SIMEM, de forma que este pueda compartir datos no perceptibles por un usuario a través del hardware del SIMEM.
- Se diseñó y construcción del sistema de monitoreo de energía, basado en el circuito integrado de medición de energía ADE7763, controlado por un microcontrolador, con el propósito de obtener datos de energía activa.

BIBLIOGRAFÍA

CONTRERAS, Ricardo; GARCIA, Juan y RAMIREZ, Carlos. Diseño de un Contador Electrónico de Energía para consumo Residencial (C.E.E.R), Universidad Pontificia Bolivariana, 2003 Pág. 129.

P3 International Corporation. Technical support [online]. Manual de operaciones del medidor de kilovatios P4400. [online]. Pág. 1.

<http://www.p3international.com/manuals/p4400_manual.pdf>

P3 International Corporation. Presentación comercial del medidor P4400. [online]. Pág. 1.

< <http://www.p3international.com/brochures/P4400.pdf> >

KOON, William. Current sensing for energy metering. [online] USA: Analog Devices, Inc. Pág. 9.

<http://www.analog.com/UploadedFiles/Technical_Articles/16174506155607IIC_Paper.pdf>

Jordí Mayné. Sensores, acondicionadores y procesadores de señal. Ingeniero de aplicaciones. SILICA.

<www.jcee.upc.es/JCEE2002/MAYNEPONENCIA.pdf>

Hoja Característica. Sensor de corriente magneto resistivo CSNX 25. 2003.

[online]. www.honeywell.com/sensing <

www.honeywell.hu/sensing/catalogues/CSN%20Series%20Magneto-resistive%20Closed%20Loop.pdf>

English, Stephen; Smith, Dave. A power meter reference design based on the ADE7756. [online] Nota de aplicación AN-564. [cited 10 april 10, 2001]. Disponible en:

http://www.analog.com/Analog_Root/static/pdf/library/applicationNotes/an564.pdf#xml=http://search.analog.com/search/pdfPainter.aspx?url=http://www.analog.com/

Analog_Root/static/pdf/library/applicationNotes/an564.pdf&fterm=an-564&fterm=an-564&la=en

ENGLISH, STEPHEN; SMITH, DAVE. A power meter reference design based on the ADE7756. [online] Nota de aplicación AN-564. [cited 10 april 10, 2001].

Disponible en:

<http://www.analog.com/Analog_Root/static/pdf/library/applicationNotes/an564.pdf#xml=http://search.analog.com/search/pdfPainter.aspx?url=http://www.analog.com/Analog_Root/static/pdf/library/applicationNotes/an564.pdf&fterm=an-564&fterm=an-564&la=en>

KAPLAN, RACHEL. Frequently asked Questions (FAQs), Analog Devices Energy (ADE) products. [online]. Nota de aplicación AN-639. [2003]. Disponible en:

<http://www.analog.com/UploadedFiles/Application_Notes/60202270563648643326429202575AN639_0.pdf>

**MANUAL DE USUARIO DEL PROYECTO DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE
UN SISTEMA INTEGRADO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA MONOFÁSICA DE
USO RESIDENCIAL (S. I. M. E. M.) VERSIÓN 2.**

AUTOR

GUILLERMO ENRIQUE HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

Proyecto de grado para optar por título de
Ingeniero Electrónico

DIRECTORA

CLAUDIA L. RUEDA GUZMAN
Ing. Electrónico Msc. Informática

**UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN, ESCUELA DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TRATAMIENTO DE SEÑALES,
MICROELECTRÓNICA Y SIMULACIÓN BIEMIC
BUCARAMANGA
2008**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. QUE ES EL SIMEM	4
2. COMPONENTES DEL SIMEM	5
2.1. DISPOSITIVO DE MONITOREO Y CALCULO DE ENERGÍA	5
2.2. DISPOSITIVO DE INTERESE CON EL ORDENADOR	7
2.3. CABLE DE PODER	8
2.4. CABLE DE INTERFASE DE RS232	8
3. CONEXIÓN DEL SIMEM	9
4. SOFTWARE DEL SIMEM	10
5. CALIBRACIÓN DEL SIMEM	16
5.1. CALIBRACIÓN DE CF	17
5.2. CALIBRACIÓN DE GANANCIA DE VATIO	17
5.3. CALIBRACIÓN DE COMPENSACIÓN U OFFSET DE VATIO	19
5.4. CALIBRACIÓN DE FASE	20

INTRODUCCIÓN

El Sistema de Medición de Energía Monofásica (S.I.M.E.M) es un dispositivo de monitoreo y medición de energía. Este sistema mide continuamente y en lapsos de una hora la energía eléctrica consumida por una carga en una línea de distribución eléctrica monofásica de dos cables. El sistema puede conectarse en cualquier instante aun ordenador para interactuar con un software, que proporciona al usuario la posibilidad controlarlo, calibrarlo y de obtener más datos no perceptibles desde el dispositivo directamente.

Este manual describe del SIMEM como debe operarse para medir energía, como calibrarse, como configurarlo, de que maneras debe conectarse y el manejo del software.

Un software permite a un usuario, compartir y controlar todo lo de medición y monitoreo de energía.

1. QUE ES EL S.I.M.E.M.

Es el resultado de la realización de diseño y construcción de un proyecto de un sistema integrado de medición de energía monofásica, que tiene como objetivo principal el mejoramiento de las características técnicas de los sistemas electrónicos de medición de energía desarrollados anteriormente en la Universidad Pontificia Bolivariana como lo es el de un contador electrónico de energía para uso residencial (C.E.E.R.).

Específicamente el SIMEM es un conjunto de elementos que permite en una línea de distribución de energía eléctrica generar una medida de energía consumida en vatios hora. Conformado por un dispositivo de monitoreo y calculo de energía, un dispositivo de conexión con el ordenador y el software correspondiente.

A través del sistema de medición de energía se obtendrá la acumulación de energía consumida continuamente. Se podrá configurar tanto la hora como la fecha, y Llevar al dispositivo a comunicarse con un ordenador.

Finalmente a través del software se podrá configurar cosas del sistema de medición pertenecientes a medición de energía y la obtención de los datos de energía consumida en lapsos de una hora.

2. COMPONENTES DEL SIMEM Y SU DESCRIPCIÓN

Una vez mencionado cada componente, se da una breve descripción del mismo.

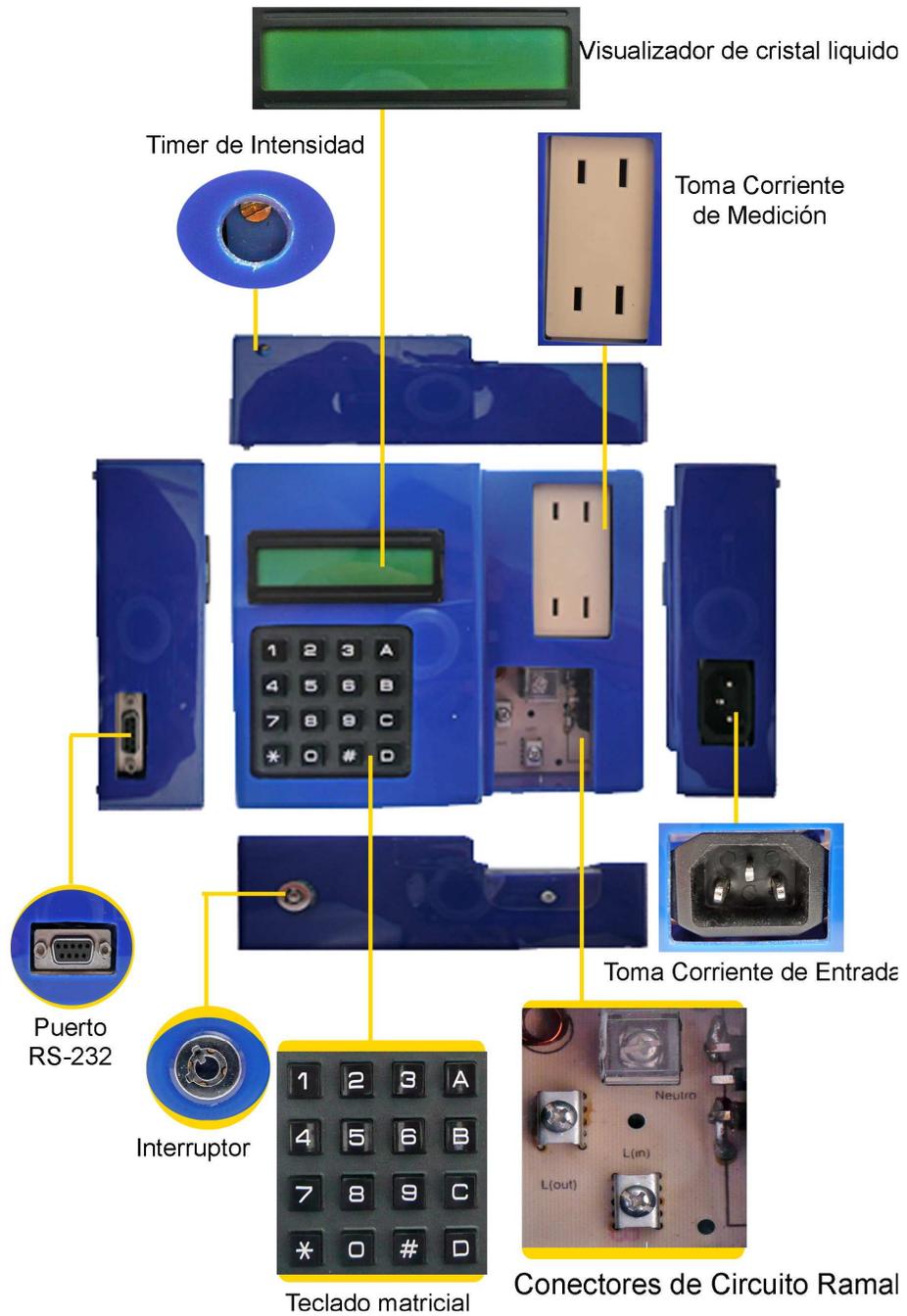
DISPOSITIVO DE MONITOREO Y CÁLCULO DE ENERGÍA

El frente terminado del dispositivo de monitoreo y cálculo de energía (DMCE) se muestra en la figura 1. Está comprendido por la salida de la línea de distribución de energía de baja corriente (Toma corriente), el visualizador de cristal líquido (LCD), el teclado matricial, y bajo una tapa transparente, los conectores de entrada y salida de alta corriente en una línea de distribución, así como el conector del neutro del mismo.

Al costado derecho del dispositivo (viéndolo de frente), se encuentra un conector de entrada de voltaje, al cual se le conecta un cable de poder para corrientes relativamente bajas. Al costado opuesto, se encuentra un puerto RS232 (hembra) que va conectado al dispositivo de comunicación con el ordenador, que al mismo tiempo va conectado al ordenador. En la parte lateral inferior se encuentra un interruptor accionado por una llave, que permite apagar o encender el SIMEM por él usuario. Finalmente en el costado superior del dispositivo de monitoreo y cálculo de energía tiene un pequeño orificio por el cual, introduciendo un destornillador de pala, permite graduar la intensidad del LCD.

El DMCE visualiza normalmente a través del LCD 11 dígitos del cálculo de energía en kilovatios hora, además de la hora y la fecha. La visualización del registro y cálculo de energía inicia en cero, y termina en el valor máximo de 99999999,999 KWh. El registro de cálculo de energía en el LCD es llevado a cabo para por lo menos 2645 años de medición, para el cual el medidor está acumulando energía para un voltaje nominal de 120 voltios y una corriente máxima de medición del SIMEM de 25 amperios.

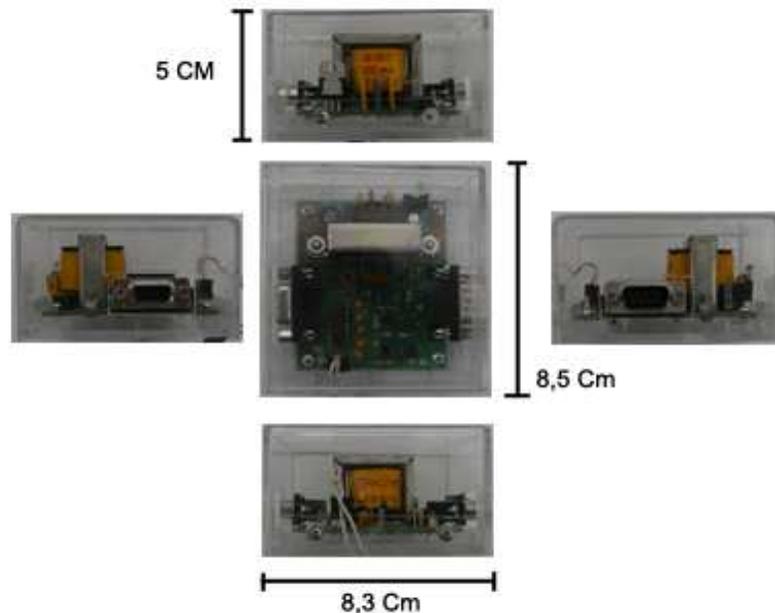
Figura. 1. Dispositivo de monitoreo y cálculo de energía.



DISPOSITIVO DE INTERFASE CON EL ORDENADOR

El dispositivo de comunicación con el computador tiene a sus costados viendo desde arriba, dos conectores de puerto serial TP9, una hembra y otro macho (ver figura 2). Esto con el fin de no equivocarse en la conexiones de este dispositivo con el ordenador y con el dispositivo de monitoreo y calculo de energía.

Figura. 2. Dispositivo de comunicación con el ordenador.



También cabe destacar un orificio que se encuentra a un costado de este, por donde salen dos cables correspondientes a la salida de pulsos opto acoplada de la salida CF del ADE7763.

Este dispositivo solo se conecta para cuando se quiera comunicar el ordenador con el dispositivo de monitoreo y calculo de energía. Además no es necesario que este, este conectado al dispositivo de monitoreo y calculo de energía, y mucho menos en el computador para la medición de energía del SIMEM. La salida de pulsos solo es necesaria conectarse para cuando se quiera realizar el proceso de calibración del SIMEM o para cuando se quiera tomar los registros de cálculo de energía por horas.

CABLE DE PODER

El cable de poder se utiliza para conectarse el SIMEM a una línea de distribución de energía eléctrica en una edificación.

Figura. 3. Cable de poder.



Figura. 4. Cable de puerto RS232.



CABLE DE INTERFASE RS-232

Este cable es necesario para cuando se quiere comunicarse el ordenador y el DMCE. Para esto dos cables de este tipo son necesarios. El primero conecta el ordenador y el dispositivo de comunicación con el ordenador, por el cual van solo datos de la comunicación. El segundo cable conecta el dispositivo de comunicación con el DMCE, por donde van no solo los datos de la comunicación sino que también la fuente de alimentación del DMCE y la línea de distribución. (En la figura 4 se enseña este cable)

En la conexión de cable RS232 a cualquiera de los dispositivos del sistema debe tenerse en cuenta que el DMCE no debe estar conectado a la línea de distribución.

3. CONEXIÓN DEL SIMEM

En la DMCE existe unos conectores de medición de energía, bajo la tapa transparente de acrílico estos conectan entre si, la línea de distribución, la carga a medir y los circuitos para la medición.

La forma en que se conecta al SIMEM en una medición de energía depende de la cantidad de corriente que pasará por el. Cuando se quiere medir energía para una carga que consume corriente de hasta 10 amperios. Debe localizarse a un costado de la tarjeta del medidor, un conector a la cual se le conecta la línea de distribución utilizando un cable de poder. Ya las cargas que se les quiere medir la energía deben ir conectadas a la toma corriente localizado en la parte frontal de la tarjeta del medidor. Esta configuración se utiliza cuando se quiere medir en sitios energía en sitios puntuales dentro de edificación, como por ejemplo cuanto consume un electrodoméstico.

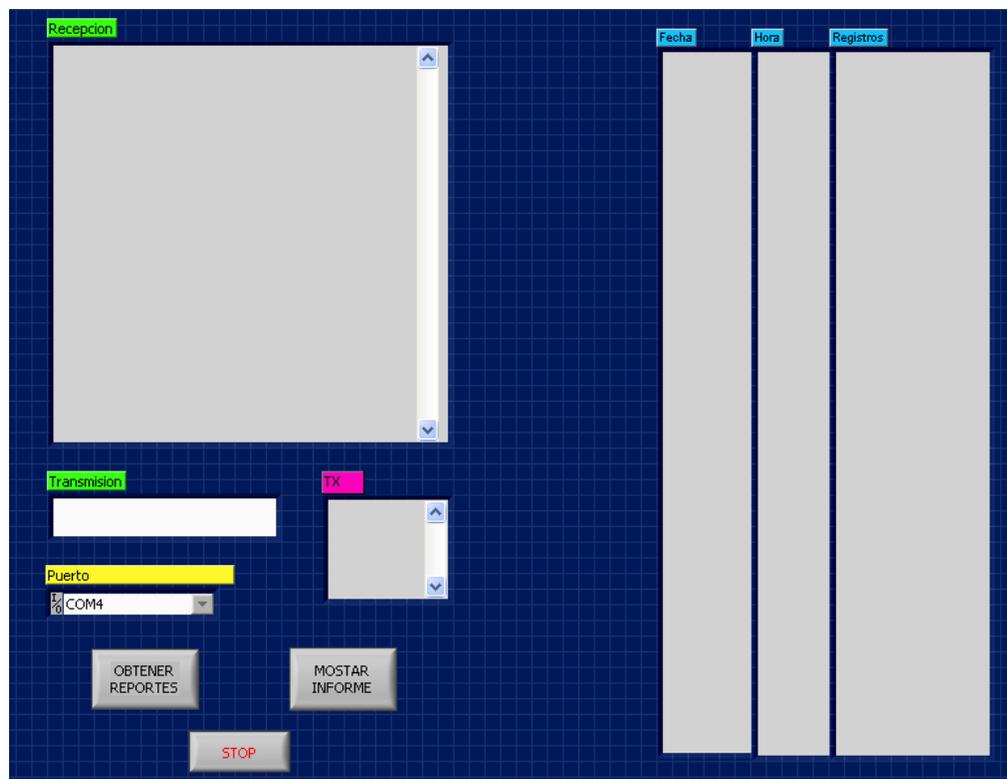
La otra forma de conexión del SIMEM es para cuando a través de este pasará hasta 25 amperios. El DMECE debe conectarse de la siguiente manera: Conectar la fase de la línea de distribución al contacto marcado con la letra Lin (línea de entrada). También conectar las cargas a través de un conductor que va conectado al conector marcado con Lout (línea de salida). Como última conexión de este tipo debe conectarse el neutro a su respectivo conector para proporcionar una referencia al circuito. Esta forma de conectar al SIMEM sucede para cuando se quiere medir corrientes a un circuito ramal de una edificación. Debe tenerse en cuenta en utilizar los conectores de alta corriente.

Para todas las conexiones de medición de energía que se quiere realizar, debe tenerse la precaución de no sobrepasarse de la corriente máxima que puede medir cada conexión.

4. SOFTWARE DEL SIMEM

El software que se desarrollo para el SIMEM, se elaboro en LABVIEW. Con las librerías en comunicaciones seriales, el software tiene funciones básicas como la de transmitir y recibir datos por el puerto serial, y la de obtener todo los datos de calculo de energía en lapsos de una hora. El panel frontal del programa es el que se muestra en la figura 5.

Figura 5. Panel frontal del software del SIMEM.



El software presenta al usuario las siguientes características: Todos los datos ingresados por la ventana transmisión son enviados por la interfase RS232 hacia el microcontrolador y este a su vez hacia el ADE7763, escribiendo en sus registros. Para la ventana de recepción sucede lo contrario, todos los datos enviados corresponden a valores de los registros del ADE enviados por el microcontrolador.

La cacilla de puerto, configura el puerto por donde se establecerá la comunicación entre el hardware y el software. Los botones obtener datos y mostrar informe sirven para la adquisición y visualización de datos de energía calculada en lapsos de una hora. El botón Stop es el botón de emergencia que detiene el software del SIMEM.

El software busca que el usuario a través de la ventana transmisión, escriba en el registro de comunicación del ADE, para esto el usuario debe escribir los 8 bits del registro de comunicación de la misma manera como si se estuvieran ingresando directamente al integrado (ver hoja característica del ADE7763). Escrito el byte que se quiere ingresar al ADE, debe el usuario ingresar el siguiente símbolo (-), indicando al software el fin del byte. Cumplido con lo anterior presionando la tecla enter el computador envía el byte al microcontrolador y este le responde en la ventana superior (recepción), el resultado de la operación solicitada.

Otra función del software es la de obtener los datos de calculo de energía por horas, para esto el usuario debe presionar en el panel frontal el botón obtener datos. Hecho esto, y una vez que los datos ya fueron adquiridos, el software finalizada la operación desplegando un mensaje el cual indica que la operación ha terminado. Para visualizar de forma ordenada dichos datos el usuario debe presionar el botón mostrar informe para.

En la tabla 1 se enseña los registros del ADE7763 y una breve descripción de ellos. Esto para que el usuario sepa como configurar o calibrar el SIMEM. En la tabla uno el dato dirección corresponde a la dirección del registro en el registro de comunicación del ADE7763. La nomenclatura "L" o "E" corresponde a si el registro puede ser leído, escrito o ambas operaciones. El no de bits corresponde al número de bits del registro. También "lo" corresponde a los valores por defecto de los registros del integrado ADE7763. Finalmente el tipo muestra como cada registro esta codificado, S es complemento a dos, U significa sin signo y S* implica que tiene magnitud de signo.

Tabla. 1. Resumen de los registros del ADE7763 por direcciones

Dirección	Nombre	E L	No de Bits	lo	T i p o	Descripción
0x01	WAVEFORM	L	24	0	S	Registro de forma de onda. Este registro de solo lectura contiene los datos de forma de onda muestreada del canal 1, canal 2, o de la señal de potencia activa. La fuente de datos y la longitud del registro de forma de onda son seleccionadas por los bits 14 y 13 en el registro modo (MODE).
0x02	AENERGY	L	24	0	S	Registro de energía activa. La potencia activa es acumulada (integrada) sobre un tiempo en estos 24 bits, registro de solo lectura – ver la sección de cálculo de energía.
0x03	RAENERGY	L	24	0	S	Es lo mismo que el registro de energía activa, excepto que el registro es reseteado a cero seguido de la operación de lectura.
0x04	LAENERGY	L	24	0	S	Registro de acumulación de energía activa de ciclos de línea. La potencia activa instantánea es acumulada en este registro de solo lectura sobre el número de medios de ciclos de línea LINECYC.
0x05	VAENERGY	L	24	0	U	Registro de energía aparente. La potencia aparente es acumulada sobre el tiempo en este registro de solo lectura.
0x06	RVAENERGY	L	24	0	U	Igual que en el registro VAENERGY, excepto que el registro es reseteado a cero seguido de una operación de lectura.
0x07	LVAENERGY	L	24	0	U	Registro de acumulación de energía aparente de la línea. La potencia real instantánea es acumulada en este registro de sólo lectura sobre el número de la mitad de ciclo de línea LINECYC.
0x08	Reservado					
0x09	MODE	L E	16	00 0C	U	Registro modo. Este es un registro de 16 bits en donde la mayor parte de la funcionalidad del ADE7763 es accedida. La rata muestreado de señal, habilitador del filtro, y los modos de calibración son seleccionados escribiendo en este registro. Los contenidos pueden ser leídos en cualquier momento – ver la sección de registro modo (MODE).
0x0A	IRQEN	L E	16	40	U	Registro habilitador de interrupciones. Las interrupciones del ADE7763 pueden ser desactivadas en cualquier momento poniendo el correspondiente BIT en cero lógico en este registro de 16 bits. El registro estado continua detectando un evento de interrupción incluso si está inhabilitado; sin embargo, la salida IRQ no está activada – ver la sección de interrupciones.
0x0B	STATUS	L	16	0	U	Registro de estados de interrupción. Este es un registro de 16 bits de sólo lectura que contiene información respecto al origen de la interrupción del

						ADE7763 – ver la sección de interrupciones.
0x0C	RSTATUS	L	16	0	U	Igual que en el registro de estados de interrupciones, excepto que el contenido del registro es reseteado a 0 (todas las banderas clareadas) después de la operación de lectura.
0x0D	CH1OS	L E	8	0	S ,	Ajuste del offset o compensación del canal 1. El bit 6 no es usado. Escribiendo en los bits del 0 al 5 permite compensaciones sobre el canal 1 para ser removido el offset – ver las secciones de entradas análogas y registro CH1OS. Escribiendo un 1 lógico en el BIT más significativo de este registro se habilita el integrador digital en el canal 1; Escribiendo un 0 lógico deshabilita el integrador. El valor por defecto de este bit es 0.
0x0E	CH2OS	L E	8	0	S ,	Ajuste de compensación del canal 2. Bits 6 y 7 no son usados. Escribiendo en los bits del 0 al 5 en este registro permite compensar sobre el canal 2 el offset – ver la sección de entradas análogas. Note que el registro CH2OS es invertido. Para aplicar una compensación positiva, un número negativo es escrito en este registro.
0x0F	GAIN	L E	8	0	U	Ajuste de ganancia del PGA. Este registro de 8 BIT es usado para ajustar la selección de ganancia para el PGA en el cana 1 y 2 – ver la sección de entradas análogas.
0x10	PHCAL	L E	6	0D	S	Registro de calibración de fase. La relación de fase entre el canal 1 y 2 puede ser ajustada escribiendo en este registro de 6 Bits. El contenido legitimo de este registro complemento a dos esta entre 0x1D a 0x21. A una frecuencia de línea de 60Hz, este rango de -2.06° a $+0.7^\circ$ - ver la sección de compensación de fase.
0x11	APOS	L E	16	0	S	Corrección de compensación (offset) de potencia activa. Este registro de 16 bits permite una pequeña compensación en el cálculo de potencia activa para ser removida – ver la sección de cálculo de potencia activa.
0x12	WGAIN	L E	12	0	S	Ajuste de ganancia de potencia. Este registro de 12 bits. Calibra el cálculo de potencia activa escribiendo en este registro. El rango de calibración es $\pm 50\%$ del total nominal de la potencia activa. La resolución del ajuste de ganancia es de 0.0244%/LSB – ver la sección de calibración de medición de energía.
0x13	WDIV	L E	8	0	U	Registro divisor de energía activa. El registro de energía activa interno esta dividido por el valor de este registro antes de ser guardado en el registro AENERGY.
0x14	CFNUM	L E	12	3F	U	Registro numerador del divisor de frecuencia CF. Ajusta la salida de frecuencia sobre el contacto CF escribiendo en este registro de 12 bits de lectura/escritura – ver la sección de conversión de energía a frecuencia (CEF).
0x15		L E	12	3F	U	Registro denominador del divisor de frecuencia CF. Ajusta la salida de frecuencia sobre el contacto CF escribiendo en este registro de 12 bits de

	CFDEN					lectura/escritura – ver la sección de conversión de energía a frecuencia.
0x16	IRMS	L	24	0	U	Valor RMS del canal 1 (canal de corriente).
0x17	VRMS	L	24	0	U	Valor RMS del canal 2 (canal de voltaje).
0x18	IRMSOS	L E	12	0	S	Registro de corrección de la compensación (offset) del RMS del canal 1.
0x19	VRMSOS	L E	12	0	S	Registro de corrección de la compensación (offset) del RMS del canal 2.
0x1A	VAGAIN	L E	12	0	S	Registro de ganancia aparente. Calibra el cálculo de potencia aparente escribiéndola en este registro.
0x1B	VADIV	L E	8	0	U	Registro divisor de energía aparente. El registro de energía aparente interno es dividido por el valor de este registro antes de ser almacenado en el registro VAENERGY.
0x1C	LINECYC	L E	16	FF FF	U	Registro de los ciclos de línea en modo de acumulación de energía de ciclo de línea. Este registro de 16 bits es usado durante el modo de acumulación de energía de ciclo de línea para poner el número de medios ciclos de línea para la acumulación de energía – Ver la sección de modo de acumulación de energía de ciclo de línea.
0x1D	ZXTOUT	L E	12	FF F	U	Tiempo muerto de cruce por cero. Si no hay un cruce por cero detectado en el canal 2 dentro de un tiempo específico en este registro de 12 bits, la interrupción requerida en la línea (IRQ) se activaría – ver la sección de detección de cruce por cero.
0x1E	SAGCYC	L E	8	FF	U	Registro de la caída del ciclo de línea. Este registro de 8 bits especifica el número de ciclos de la línea consecutivos abajo de SAGVL que es requerido sobre el canal 2 antes que la salida SAG este activa – ver la sección de detección de la caída de voltaje en la línea.
0x1F	SAGLVL	L E	8	0	U	Caída del nivel de voltaje. El valor de 8 bits de este registro determina en qué nivel de señal sobre el canal 2 el contacto SAG se coloca activo. La señal debe permanecer en bajo por el número de ciclos especificado en el registro SAGCYC antes que el contacto SAG este activo – ver la sección de detección de caída de voltaje de línea.
0x20	IPKLVL	L E	8	FF	U	Umbral de nivel máximo del canal 1 (canal de corriente). Este registro fija el nivel de detección máxima en curso. Si la entrada del canal 1 supera este nivel, el indicador de PKI en el registro de estado es puesto en alto.
0x21	VPKLVL	L E	8	FF	U	Umbral de nivel máximo de amplitud en el canal 2 (canal de voltaje). Este registro fija el nivel de voltaje de detección máximo. Si el canal 2 de entrada supera este nivel, el indicador de PKV en el registro de estado es puesto en alto.
0x22	IPEAK	L	24	0	U	Registro de máxima amplitud del canal 1. El máxima valor de entrada de corriente, desde la última lectura

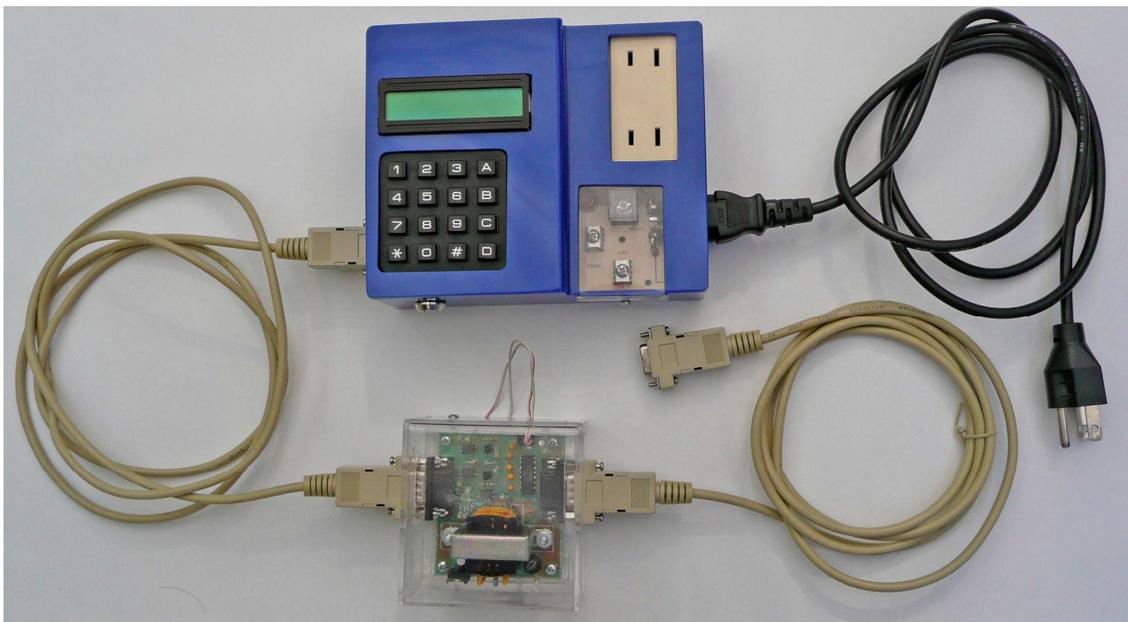
						del registro es almacenado en este registro.
0x23	RSTIPEAK	L	24			Igual que en el registro de máxima amplitud del canal 1, excepto que el contenido del registro es reseteado a cero después de ser leído.
0x24	VPEAK	L	24	0	U	Registro de máxima de amplitud del canal 2. El valor máximo de entrada del canal de voltaje, desde la última lectura del registro es guardado en el registro.
0x25	RSTVPEAK	L	24	0	U	Registro máxima amplitud del canal 2. Excepto que el contenido del registro es reseteado o puesto a cero después de una lectura.
0x26	TEMP	L	8	0	S	Registro de temperatura. Este es un registro de 8 bits que contiene el resultado de la más reciente conversión de temperatura – ver la sección medición de temperatura.
0x27	PERIOD	L	16	0	U	Periodo de la entrada del canal 2 (canal del voltaje) estimado por el proceso de cruce por cero. El bit más significado de este registro es siempre cero.
0x28						Reservado
0x3C						Reservado
0x3D	TMODE	L E	8	-	U	Registro modo de prueba.
0x3E	CHKSUM	L	6	0	U	Registro de chequeo rápido. Este registro de 6 bits, de sólo lectura es igual al resumen de todos aquellos registros anteriormente leídos – ver sección de operación de lectura serial.
0x3F	DIEREV	L	8	-	U	Registro de revisión de terminación. Este registro de 8 bits de sólo lectura contiene el número de revisión del silicio.

5. CALIBRACIÓN DEL SIMEM

A través del ADE7763 se realiza en el SIMEM el proceso de calibración que permite calibrar la potencia activa en su ganancia y en el Offset. Además de la corrección de fase entre los dos canales, asegurando alta precisión en la medición.

Antes de iniciar la calibración debe conectarse el SIMEM de la misma forma como se muestra la figura. 6. Además debe conectarse a la toma corriente una carga, la cual se le medirá por otros dispositivos el voltaje y la corriente de esta.

Figura. 6. Conexión para la calibración.



La calibración del SIMEM consiste en la configuración de los índices de los registros de medición del ADE7763, y en hallar la proporción que existe entre el registro de energía activa del ADE y la cantidad de energía medida por él mismo. Este procedimiento es llevado a cabo por un usuario a través del microcontrolador y el software del ordenador.

Es imprescindible mencionar que la calibración del SIMEM debe realizarse utilizando como referencia una fuente de exacta que proporcione valores de corriente y voltaje invariables en el tiempo.

Iniciando el usuario debe asegurarse que los valores de los registros del ADE7763 mencionados por defectos sean los correspondientes.

5.1 CALIBRACIÓN DE CF

En este paso se calcula el denominador de la ecuación que describe el comportamiento de salida CF. Para esto debe definirse las siguientes condiciones: Voltaje en la línea, corriente de base y la Corriente máxima del medidor (SIMEM).

Donde el voltaje de la línea es el voltaje que está sobre la carga y que es suministrado por la línea de distribución. La corriente base es la corriente que va hacia la carga, la cual fue seleccionada de acuerdo a la corriente que consume la carga. La corriente máxima del medidor es de 25 amperios.

Teniendo como constante del medidor (Cm), igual a 3.200 imp/kWh o 3.2 imp/Wh puede calcularse CF esperado por la siguiente ecuación.

$$CF_{IB(\text{esperado})} = (Cm) * (1 \text{ hora}/3600 \text{ seg}) * (Ib) * (V_{\text{line}}) \quad (1)$$

Alternativamente utilizando un medidor de frecuencia. La frecuencia de salida de CF debe medirse, obteniendo CF nominal.

El valor calculado de CFDEN es entonces el valor entero de la proporción que existe entre el $CF_{IB(\text{nominal})}$ y el $CF_{IB(\text{esperado})}$ menos uno.

$$CFDEN = ENT(CF_{IB(\text{nominal})} / CF_{IB(\text{esperado})}) - 1$$

5.2 CALIBRACIÓN DE GANANCIA DE VATIO

La segunda parte del cálculo consiste en la calibración de la ganancia de vatio en el registro WGAIN. Como antes se menciona el CFDEN calculado debe ser escrito en el registro CFDEN antes de seguir con la calibración y cero debe ser escrito en el registro CFNUM. Igualmente debe habilitarse el modo de acumulación de energía por ciclos de línea en el registro MODE[CYCMODE] y la interrupción de está en el registro STATUS[CYCEND], no antes de escribir el número de medios ciclos de línea del registro LINECYC_{IB} para fijar el tiempo de acumulación en este modo (refiérase a la hoja técnica del ADE7763).

Donde valor del registro LINECYC es el número de medios ciclos que serán tenidos en cuenta para acumular energía en el modo de acumulación de ciclos

Hallando el valor del registro WGAIN se calibra de ganancia de vatio para el cálculo de energía activa.

$$WGAIN = ENT \left(\left(\frac{LAENERGY_{IB(esperado)}}{LAENERGY_{IB(no\ min\ al)}} - 1 \right) \times 2^{12} \right)$$

Según la ecuación anterior debe entonces hallarse los valores de $LAENERGY_{IB(esperado)}$ y el de $LAENERGY_{IB(nominal)}$.

Donde $LAENERGY_{(esperado)}$ es igual a:

$$LAENERGY_{IB(esperado)} = ENT \left(\frac{CF_{IB(esperado)} \times \text{Tiempo_de_Acumulación}(s)}{\frac{CFNUM + 1}{CFDEN + 1} \times WDIV} \right)$$

Donde el tiempo de acumulación se reemplaza y se obtiene la siguiente la función.

$$LAENERGY_{IB(esperado)} = ENT \left(\frac{CF_{IB(esperado)} \times LINECYC_{IB} / 2 \times \text{Periodo} \times 8 / CLKIN}{\frac{CFNUM + 1}{CFDEN + 1} \times WDIV} \right)$$

Para el cual $CF_{IB(esperado)}$ esta dado en Hertz y es calculado. El periodo de la línea es determinado por el registro periodo (PERIOD) y el valor de los registro CFNUM, CFDEN, WDIV y LINECYC están dados.

Teniendo el valor de $LAENERGY_{IB(esperado)}$, se procede a obtener el valor de $LAENERGY_{IB(nominal)}$. Leyendo el registro de estado de interrupción con reseteo RSTATUS, se espere a que ocurra la interrupción de acumulación de ciclo de línea en la salida IRQ del ADE7763, mostrando con la letra I en la ventana de recepción de datos del software. Sucedido esto se lee el registro LAENERGY. El primer resultado de LAENERGY en el modo acumulación de ciclo de línea no podría usarse debido a que el tiempo de acumulación fijado por el registro LINECYC aun no ha sido tomado por el integrado, entonces este valor deberá ser descartado. Luego, se vuelve a leer de nuevo el registro RSTATUS, para esperar a que vuelva a ocurrir la interrupción de acumulación de ciclo de línea, sucedido esto se vuelve a leer el valor del registro LAENERGY para tenerse en cuenta en los cálculos de calibración ya que esta vez si se tuvo en cuenta por parte del integrado el valor de LINECYC. El valor de LAENERGY leído experimental es entonces $LAENERGY_{IB(nominal)}$ y es el LAENERGY leído con la prueba de corriente de base. El valor del registro LAENERGY es un valor en complemento a dos.

Ahora debe hallarse la proporción de Wh/LSB para el registro de energía activa AENERGY.

$$\text{Wh/LSB} = \frac{\frac{(CFNUM + 1)}{(CFDEN + 1)} \times WDIV}{\text{MeterConstant}(\text{imp/Wh})}$$

Con la proporción de Wh/LSB para al registro de energía activa, el microcontrolador puede hallar lo valores energía que le suministre el ADE en vatios-hora.

5.3 CALIBRACIÓN DE COMPENSACIÓN U OFFSET DE VATIO

La calibración de la compensación permite un rendimiento sobresaliente sobre un rango dinámico amplio. Para hacer esta calibración dos mediciones de modo de acumulación de energía por ciclo de línea son necesarias a un factor de potencia unitario, uno en una corriente de base IB y la otra a la corriente más baja $I_{(\min)}$ para ser corregida. Los datos de los coeficientes de la calibración de CF y los de la calibración de ganancia son usados para determinar la compensación de la potencia. La calibración de ganancia debe realizarse antes de la calibración de compensación.

La calibración de la compensación es llevada a cabo determinando la proporción de error de energía activa. Después de determinar la proporción de error de energía activa, se calcule el valor a escribir al registro APOS para corregir el offset y así compensar el cálculo de energía.

$$APOS = -\frac{AENERGY_{\text{rata_de_error}} \times 2^{35}}{CLKIN}$$

La tercera parte de la calibración consiste en cálculo de la compensación de potencia activa.

Antes de continuar con la calibración de compensación, sobre el ADE7763 debe hacerse una operación de escritura con el nuevo valor de WGAIN hallando en la calibración de ganancia.

La obtención del valor de $LAENERGY_{(I_{min})}$ para la corriente I_{min} , se realiza de la misma manera de cómo se obtuvo $LAENERGY_{IB(nominal)}$ para una corriente de base en la sección de calibración de ganancia.

El $LAENERGY_{I_{min}(esperado)}$ es calculada según la siguiente ecuación:

$$LAENERGY_{I_{min}(esperado)} = ENT \left(\frac{I_{min}}{I_b} \times LAENERGY_{IB(esperado)} \times \frac{LINECYC_{I_{min}}}{LINECYC_{IB}} \right)$$

Utilizando los datos anteriores se calcula el error absoluto de $LAENERGY$.

$$LAENERGY(error_absoluto) = LAENERGY_{I_{min}(nominal)} - LAENERGY_{I_{min}(esperado)}$$

Después se calcula el error de proporción de $AENERGY$.

$$AENERGY(error_proporcional_LSB/s) = \frac{LAENERGY(error_absoluto)}{\frac{LINECYC_{I_{min}}}{2}} \times \frac{CLKIN}{8 \times PERIODO}$$

Finalmente se Calcula $APOS$ para escribirlo en su registro en el ADE7763, para terminar la calibración de compensación u offset.

5.4 CALIBRACIÓN DE FASE

La calibración de fase es llevada a cabo hallando el valor del registro $PHCAL$. Este remueve pequeños errores de fase. El error es determinado al medir la energía activa para IB , en dos factores de potencia $FP = 1$ y $FP=0,5$ inductivo.

Para el $SIMEM$, que utiliza un sensor de corriente de efecto Hall de lazo cerrado, la respuesta del tiempo del sensor se asume cercana a cero. Por esto no se realiza para el $SIMEM$ la calibración del $SIMEM$.

Diseño y construcción de un sistema integrado de medición de energía monofásica (SIMEM) de uso residencial.

Guillermo Enrique Hernández González.
Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia.
memokike@hotmail.com

Resumen-Este proyecto tiene como finalidad diseñar y construir un sistema integrado de medición de energía monofásica de uso residencial basado en el circuito integrado ADE7763. El sistema de medición tiene parámetros inalterables para la medición de energía, uno de ellos es que debe medir con exactitud la energía consumida o acumulación de potencia activa en una línea secundaria monofásica de una red de distribución eléctrica.

Las características más sobresalientes del sistema son: Su reducido tamaño, alta exactitud, capacidad de registro, comunicación serial con un computador y su respectivo software. Este sistema tiene la versatilidad de acondicionarlo en cualquier lugar para que mida el consumo de energía en sitios puntales de una vivienda u oficina, por ejemplo cuánta energía se consume en el interior de una habitación o cuánto consume un aparato eléctrico.

Índice de términos- Medidor electrónico de energía, SIMEM, sensor magnético de corriente de Efecto Hall, línea de distribución, circuito integrado de medición de energía, Memoria EEPROM, Reloj de tiempo real, Dispositivo de monitoreo y cálculo de energía, dispositivo de comunicación con el PC.

1. INTRODUCCIÓN

Dado que en la actualidad la energía eléctrica es uno de los principales factores que rige la vida moderna y los sistemas de medición de energía juegan un papel importante en la relación económica. Es por ello, el desarrollo de medidores electrónicos de energía que superan en funcionamiento a los medidores electromecánicos en términos de funcionalidad y utilidad.

El trabajo presentado consiste en el diseño y construcción de un prototipo de un sistema de medición de energía eléctrica monofásica para uso interno residencial, segunda versión del prototipo (C.E.E.R.).

El alcance más notorio del sistema de medición consiste en que el procesamiento de señales se hace de forma digital desde un inicio. Garantizando en la medición de energía un

alto grado de exactitud del 1% con respecto a la medición deseada, para un rango de medición de corriente de 0 a 25 amperios y manteniendo la linealidad todo el tiempo. En las limitaciones del SIMEM se tiene es que solo mide energía para una línea de distribución bifilar entre una fase y un neutro, a una tensión de 110 voltios.

El método para implementación del sistema de medición de energía monofásico consta de varias etapas. La primera de ellas es la que consistió en el estudio del contador de energía residencial, para determinar el concepto de funcionamiento de estos dispositivos. La segunda etapa radicó en el estudio de circuitos integrados de medición de energía pertenecientes a la firma Analog Device, específicamente el integrado ADE7763. De igual forma se realizó una investigación sobre sensores de corriente compatible con el circuito integrado de medición de energía. La siguiente etapa es la de desarrollo y construcción del sistema monitoreo de energía. Como etapa final se realiza la calibración del dispositivo, desarrollo del software del computador y pruebas al prototipo.

El desarrollo de este prototipo significa el estudio de esta clase de dispositivos de acuerdo a la tecnología más reciente en este campo. Permitiendo esta aplicación mejorar en el área de investigación sobre medidores de corriente eléctrica.

2. DESCRIPCIÓN DEL SIMEM

Para entender lo que es el SIMEM debe pensarse que este lo conforman dos partes; una parte que es el hardware correspondiente a lo que son las tarjetas y sus elementos, específicamente aquellos como lo son: el circuito integrado de medición de energía (ADE7763), el sensor de corriente (CSNX25), el microcontrolador (PIC18F452), el reloj de tiempo real (DS13017), la memoria EEPROM (24LC512), el visualizador de cristal líquido (LCD), el teclado matricial, la interfase serial RS232; y por otra parte lo que es el software, que corresponde a un programa de ordenador desarrollado en LABVIEW, controlado por un usuario.

Generalizando el hardware tiene como propósito calcular energía, conectarse al ordenador y controlar de todo el sistema, sin importar que se este en comunicación con el

software. El software representa para el usuario a través de un PC la posibilidad de realizar en el SIMEM la configuración para la parte de medición de energía, además de obtener y visualizar datos que no se enseñan en la parte de hardware del sistema.

3. DISPOSITIVO DE MONITOREO Y CALCULO DE ENERGÍA

El frente terminado del dispositivo de monitoreo y cálculo de energía (DMCE) se muestra en la figura 1. Dentro del DMCE se puede localizar la tarjeta del medidor y la tarjeta de interacción con el usuario. La tarjeta del medidor es la parte más importante del SIMEM porque en ella se realiza todo lo referente a llevar el registro del tiempo, medición, monitoreo, cálculos y almacenamiento de energía. La tarjeta de interacción con el usuario muestra al usuario datos del SIMEM, permite a un usuario manejar al SIMEM por medio de su teclado matricial.



Figura. 1. Dispositivo de monitoreo y cálculo de energía.

El DMCE visualiza normalmente a través del LCD 11 dígitos del cálculo de energía en kilovatios hora, además de la hora y la fecha. La visualización del registro y cálculo de energía inicia en cero, y termina en el valor máximo de 99999999,999 KWh. El registro de cálculo de energía en el LCD es llevado a cabo para por lo menos 2645 años de medición, para el cual el medidor está acumulando energía para un voltaje nominal de 120 voltios y una corriente máxima de medición del SIMEM de 25 amperios.

El diagrama esquemático de la tarjeta del medidor se muestra en la figura 2. De este circuito se puede destacar la conexión entre los planos de tierras por la bobina de núcleo de ferrita. Esto con el fin de que el ruido generado por las señales digitales afecte lo menos posible las señales analógicas tomadas de los transductores de medición de la línea. También a través de las bobinas 1 y 2 se conecta la fuente de alimentación. A la línea de distribución, deteniendo el efecto de transitorios y ruido en el SIMEM.

3.1 MICROCONTROLADOR PIC18F452

El microcontrolador es el circuito integrado designado de controlar todas funciones del SIMEM, enviando datos al

LCD, leyendo caracteres del teclado matricial, almacenando y leyendo datos de información en las EEPROM's, intercambiando datos con el PC, manejando el reloj de tiempo real, y ejerciendo control de muchas más funciones que desempeña el SIMEM.

La memoria EEPROM interna del microcontrolador almacena parámetros del medidor. Algunos de estos datos son almacenados desde que se programa el microcontrolador, otros mientras se ejecuta el programa del PIC y otros distintos en el proceso de calibración del SIMEM.

Los datos de la memoria EEPROM del microcontrolador son utilizados por el SIMEM de acuerdo a la función de cada byte almacenado. Existe un byte de inicio que establece en el microcontrolador dos cosas: La primera, es determinar el modo de operación en que debe funcionar el microcontrolador cuando se enciende el SIMEM y la segunda establece cómo se almacenan los datos la memoria EEPROM externa cuando esta se llena. También hay bytes de contraseña, que como su nombre lo indica resulta ser la contraseña para calibrar, configurar y establecer comunicación en el SIMEM. Asimismo los bytes de los coeficientes de configuración del ADE7763 se almacenan en esta memoria. Una detallada descripción de la rutina de calibración es discutida en una sección luego para entender estos datos del ADE7763. Igualmente los bytes que corresponden al registro de cálculo de energía RAENERGY del ADE7763 son almacenados para el caso de caídas de voltaje. Otros bytes en la memoria EEPROM son los que representan la energía activa total medida por el SIMEM. Estos bytes se leen al encenderse el SIMEM y son actualizados durante una operación de cálculo de energía. Existen además bytes de la dirección de referencia de la memoria EEPROM externa. Por otra parte otros bytes llevan el conteo de tiempo en el SIMEM para el cálculo de energía cada hora. Por ultimo los bytes de datos de referencia de energía activa medida, se utilizan para el cálculo de energía consumida cada hora.

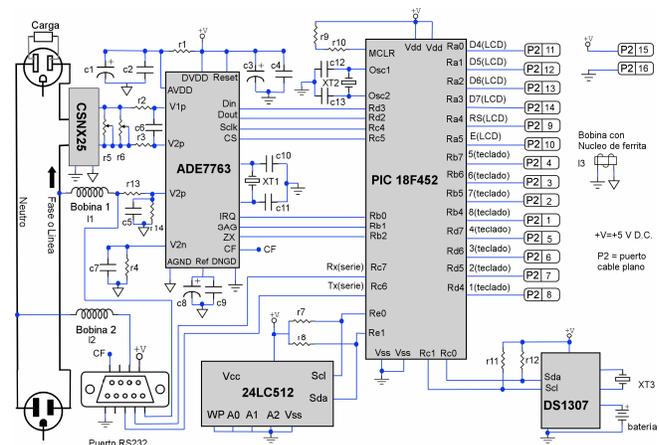


Figura 2. Diagrama esquemático de la tarjeta del medidor.

6.1.1 PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR

El programa del microcontrolador describe cómo el SIMEM es operado. La operación del microcontrolador puede explicarse en seis modos de trabajo. Los modos de trabajo del PIC no existen ni siquiera como subrutinas en el programa del PIC, pero están implícitamente en el programa del PIC de acuerdo a las funciones específicas que realiza el SIMEM. Los modos de operación son: modo de iniciación, modo normal, modo de calibración, modo de configuración, modo de comunicación, y modo de apagado o caída de voltaje. Los modos de operación están entre lazados como lo muestra la figura 3.

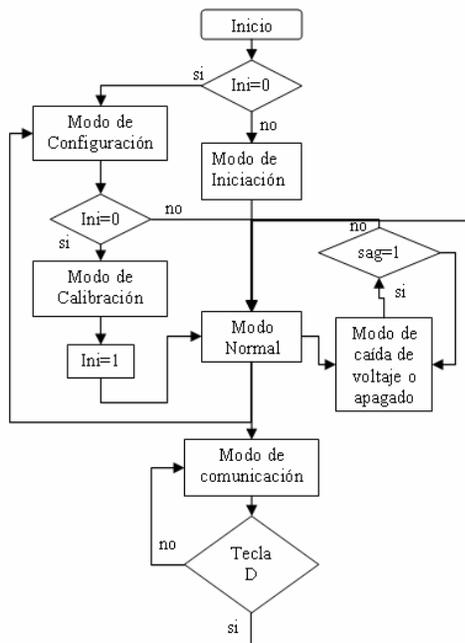


Figura. 3. Diagrama de flujo del programa del microcontrolador 18F452

Al encenderse el microcontrolador lo primero que realiza el programa es la configuración de varios registros como son los de propósito específico, los de los puertos y los de propósito general. Luego se verifica en una localidad de la memoria EEPROM interna del PIC, el dato que esta tenga para determinar el siguiente modo de operación. El valor del dato que posee esta localidad depende de que el SIMEM halla sido configurado y calibrado por primera vez. Si el dato es cero significa que el sistema es iniciado por primera vez y el microcontrolador entra al modo de configuración para luego ir al de calibración, de lo contrario si el dato es uno indica que ya el sistema fue configurado y calibrado anteriormente y que se va al modo de iniciación para después pasar al modo normal de operación.

- *Modo de Iniciación*

La rutina de iniciación consiste en que el microcontrolador lee datos alojados en su memoria EEPROM para luego

transferirlos hacia el ADE7763 y hacia unos registros de propósito general del mismo.

En el momento en que los datos de la EEPROM interna son leídos por el microcontrolador, los datos que van a los registros de propósito general como es el de la energía acumulada por el SIMEM, son llevados a un registro de 8 bytes de propósito general en el microcontrolador. Siendo estos la energía acumulada total medida por SIMEM desde su puesta en funcionamiento y son los utilizados para calcular energía y para mostrarla en el LCD. Otros datos es el de la energía salvada por una caída de voltaje. Como estos dicen, son datos que son almacenados en el modo de apagado o caída de voltaje y son el registro RAENERGY del ADE7763, estos son leídos para el calculo de energía y también se suman a los 8 bytes de acumulación de energía del SIMEM. Datos como los son la energía almacenada durante la última hora de medición, son utilizados como referencia para el cálculo de energía consumida durante una hora. Los demás datos leídos de la EEPROM interna del microcontrolador sirven a este como referencia en el manejo de tiempos, almacenamiento de energía y direccionamiento de la memoria EEPROM externa.

- *Modo normal*

En este modo el SIMEM mantiene actualizado en la pantalla LCD, la hora, la fecha, el año, y la cantidad de energía medida por el ADE7763, así como también está pendiente cuándo el usuario quiera cambiar de modo. Todas estas funciones del modo normal se efectúan gracias al microcontrolador que continuamente está pendiente del teclado matricial, del almacenamiento de energía consumida en una hora, y de las interrupciones ocasionadas por parte del temporizador cero y por el ADE7763.

El desbordamiento del temporizador cero es una de las interrupciones que ocurren en este modo y es aquella que sucede con mayor frecuencia cada 1,04 segundos. Proveniente internamente del microcontrolador, hace que este lea durante la interrupción, el reloj de tiempo real y refresque la hora en el LCD. Aprovechando que esta es una interrupción de tiempo, también en esta interrupción se lleva a cabo un conteo y control del tiempo en que se ha estado en modo de operación, de tal forma que transcurrida una hora en el que el microcontrolador entra y sale de esta interrupción, procede al cálculo y almacenamiento de energía consumida en dicha hora. Para este cálculo el microcontrolador lee primero el registro RAENERGY del ADE7763, luego lo multiplica por una constante y lo suma a la cantidad medida actualmente para después calcular el dato, restando la cantidad de energía actual medida con la ya almacenada una hora antes. Finalmente hallada la energía consumida, esta es guardada en la memoria EEPROM externa junto con la fecha y la hora que se hizo esta operación.

La medición total de energía es visualizada sobre el LCD en kilovatios hora y es actualizada de dos formas: La primera,

cuando se realiza el cálculo de energía consumida cada hora, y la segunda, cuando la energía medida en una hora es mayor a la máxima posible por el ADE7763. Para el segundo caso en que se actualiza la energía, el microcontrolador monitorea el contacto IRQ del ADE7763 durante el modo de operación normal. Ya que el consumo de energía también puede ser generado desde el registro AENERGY del ADE7763, AENERGY es un registro que multiplicado por una constante obtiene un valor de energía en kilo vatios hora. Al desbordarse el valor del registro AENERGY una interrupción en el contacto IRQ indica al microcontrolador que se aumentado la cantidad de energía total medida en valor, al equivalente del valor máximo del registro de AENERGY, multiplicado por la constante. Además del contacto IRQ, el contacto SAG del ADE7763 también es monitoreado por el microcontrolador. Cuando una caída de voltaje o un apagado son detectados por el ADE7763, el contacto SAG genera una interrupción en el microcontrolador que pone a este en modo de caída de voltaje o de apagado.

El teclado matricial es escaneado permanentemente por el microcontrolador para que en el momento en que un usuario oprima la tecla A se despliegue un menú en el LCD. Este permite al usuario la posibilidad de escoger uno de los dos modos, el de comunicación o el de configuración. Escogido uno de estas opciones el sistema solicita la clave para poder ingresar al modo. Dado el caso en que se oprime una tecla incorrecta, se digite mal la clave, o se demore más de 6 segundos en un menú. El sistema reinicia este modo de operación.

- *Modo de configuración*

En modo de configuración, el usuario puede configurar en el SIMEM la hora y la fecha del reloj de tiempo real. El microcontrolador a través del LCD muestra al usuario como realizarlo y el usuario por medio del teclado matricial lo configura. El microcontrolador teniendo los datos a configurar, modifica el integrado reloj de tiempo real para volver al modo de donde fue llamado. Para el caso en que el SIMEM es configurado por primera vez, el modo continuo a este es el modo de calibración.

- *Modo de calibración*

En modo de calibración, la tarjeta de comunicación debe estar conectada para que el SIMEM pueda comunicarse con el PC y para que se pueda mirarse la salida CF del ADE7763. El microcontrolador provee la comunicación entre el computador, el usuario y el ADE7763. Los coeficientes de la calibración son calculados por el usuario según la información que se muestra en el computador, y que son basados en el mediciones que se realizan con el ADE7763. (Ver la sección de calibración).

Durante la calibración, el usuario a través del PC sólo puede leer y escribir en los registros del ADE7763, simulando

escribir en el registro de comunicación del mismo. Un usuario puede acceder a la calibración del SIMEM desde el computador, utilizando el software correspondiente del SIMEM. El usuario debe comprobar inicialmente que la comunicación entre el computador y el sistema estén dados en este modo.

El usuario a través del software sólo puede enviar caracteres ASCII unos (1) y ceros (0) de forma que se estuvieran escribiendo en los bytes de los registros del ADE7763. Lo mismo sucede en la lectura de bytes mostrados del ADE desde el PC.

Sólo oprimiendo la tecla A en el teclado matricial se sale de este modo, pero no antes de la confirmación del contenido de los coeficientes. El microcontrolador muestra un resumen de todos coeficientes en el PC para su verificación. Concluida esta verificación por parte del usuario, este da la confirmación por el teclado matricial para que el microcontrolador guarde los coeficientes en la memoria EEPROM interna.

- *Modo de caída de voltaje o apagado*

El microcontrolador, a través de un puerto de entrada supervisa el contacto SAG del ADE7763 para la detección de la interrupción que conlleva a este modo de operación. Con base a lo que suceda en la línea de distribución el ADE7763 provee esta interrupción bajo las siguientes condiciones: Por apagado o falta de potencia en la línea; que sucede cuando la línea cae inesperadamente a una tensión de 0 voltios; por una caída de voltaje en la línea, que sucede al tiempo que el voltaje nominal de la línea cae por debajo de un umbral establecido.

Sin importar que condición de las anteriores ocurra, siempre un evento de este tipo inicia por la caída del voltaje de línea. Ocurrida la interrupción en el ADE7763 inicialmente el microcontrolador salvaguarda en su EEPROM interna los datos de prioridad, como los son el registro de almacenamiento de energía del ADE7763 así como los de operación del SIMEM. Luego verifica el origen de la interrupción al tratarse de una interrupción enmascarada. Terminado la verificación, el voltaje de la línea es monitoreado esperando que vuelva a subir los valores normales de tensión, siendo así el microcontrolador calcula la energía que almacenó durante la caída de tensión y lo suma al valor de energía total calculada, volviendo finalmente al modo de dónde fue llamado. De lo contrario, si la tensión va a cero el microcontrolador ya tendría los datos almacenados en memoria interna.

Al encenderse de nuevo la secuencia de iniciación restablece los datos de los registros del ADE7763 seguido de los datos almacenados en este modo. Todos los coeficientes son restablecidos volviendo al modo normal.

6.2 SENSOR DE CORRIENTE CSNX 25

El CSNX25 es un sensor de corriente de Efecto Hall de lazo cerrado. De acuerdo a la hoja característica el CSNX25 fue diseñado para medir una corriente máxima de 25 Amperios RMS. Para lograr esto el sensor en el SIMEM se configuró de la siguiente forma: Los contactos principales de entrada y salida de la línea están conectados en paralelos para lograr la máxima cantidad de corriente medida por el sensor y la salida del sensor de corriente está conectada en paralelo a una resistencia de carga.

6.3 CIRCUITO TRAZADO PARA EL CANAL 1

Por intermedio de este circuito el SIMEM representa la señal de corriente de la línea. La figura 2 muestra este circuito entre el ADE7763 y el CSNX25. Este circuito se puede dividir en dos etapas, la primera que consiste en la representación de la forma de onda de la señal de corriente y la otra etapa en un filtrado pasivo de la misma.

La medición de corriente en la línea se logra a través del transductor CSNX25, este sensor de corriente junto a las resistencias r_5 y r_6 en la entrada, representan proporcionalmente la forma de onda de la señal de corriente de la línea. Posteriormente la obtención de esta señal, esta es filtrada basado por un filtro pasa-bajo con frecuencia de corte de 4.8Khz. El filtro rechaza las frecuencias espejo que se generan por el muestreo de la señal por parte del ADE. Este filtro es llamado filtro Antialías, y busca que la señal del transductor no tenga ruido. Los elementos de este filtro son las resistencias r_2 y r_3 y la capacitancia c_6 .

6.4 CIRCUITO TRAZADO PARA EL CANAL 2

De la sección anterior, puede verse que el medidor simplemente atenuando el voltaje de la línea obtiene la señal del canal 2 en el ADE. El voltaje de la línea es simplemente atenuado por un divisor de tensión como se muestra en la siguiente figura 2. A la entrada del canal 2 para el ADE7763. La topología de la red se hace de esta forma para que no haya ningún tipo de desfase entre el canal 1 y 2.

Debido a que el SIMEM va a ser usado en una línea de distribución que tiene un voltaje nominal de 120 voltios, se escogieron valores de resistencias r_{13} y r_{14} de forma que permitan medir tensiones mayores a esta hasta de 174,919 voltios rms o 247.37 voltios pico. El condensador c_5 permite filtrar las señales de ruido que pueden presentar en la entrada del canal 2 en el ADE.

6.5 INTEGRADO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA DE UNA SOLA FASE, ADE7763

Lo que hace que el SIMEM sea un medidor de energía es el ADE7763. En los circuitos trazados de los canales 1 y 2 del SIMEM se obtienen las señales proporcionales de corriente y

voltaje de línea, para las entradas respectivas del canal 1 y 2 del ADE. Allí cada una de estas señales se muestrea para luego ser procesada dentro del integrado con el fin de generar el consumo de energía activa para una carga en una línea de distribución. Finalmente el ADE7763 proporciona al microcontrolador el registro de energía activa para calcularse en vatios-hora.

Además de los puertos de los canales 1 y 2. Existen puertos que muestran eventos en el ADE como lo son: la detección de cruce por cero en la línea, la localización de una caída de voltaje en su fuente de alimentación, la indicación de que halla ocurrido interrupciones dentro del integrado y una frecuencia de pulsos de salida que es proporcional a la potencia activa.

Entre los puertos del ADE7763, existe uno que provee una interfase serial (SPI) para leer y transmitir datos con el microcontrolador. Dichos datos corresponden a valores de registros que de acuerdo a su función proporciona al microcontrolador: primero valores, segundo interrupciones, y tercero modos de operación. Los valores que pueden obtenerse de estos registros son: El cálculo de energía activa, el cálculo de energía activa por medios ciclos de línea, la configuración del integrado (ver sección de calibración) y la medición de periodo. Las interrupciones del ADE son: La detección de caídas de voltaje, el desbordamiento del registro de acumulación de energía activa, el aumento del valor del registro de energía activa cuando este sea mas de la mitad, la detección de cruces por cero y el monitoreo de fuente de alimentación. Los modos de operación son: el modo de acumulación por medios ciclos de línea, modo normal de funcionamiento y el modo de acumulación de solo potencia positiva.

Normalmente el integrado está midiendo energía solo positiva, una vez este halla sido calibrado. Tomando la señales de los canales 1 y 2, el ADE calcula y contabiliza la energía en un registro de acumulación de energía activa. Para cuando el valor del registro sea mayor de la mitad o mayor de su capacidad, debe el ADE a través de la salida IRQ mostrar al microcontrolador la interrupción, iniciando con una interrupción enmascarada y con concluyendo con el origen de la interrupción. Una vez verificada la interrupción el microcontrolador calcula la energía activa consumida. Así mismo el valor del registro de energía reinicia su conteo desde el inicio en el momento en que este se desborde.

Igualmente mientras se lleva a cabo el cálculo de energía, el ADE monitorea la línea de distribución de tres maneras. Una que es para cuando no ocurre una detección de cruce por cero para un determinado tiempo, otra es para cuando ocurre una caída de voltaje por debajo de un umbral establecido y finalmente para cuando la fuente de alimentación para el trazado análogo del integrado es menos de 4 voltios. Todas estos acontecimientos son tomados de diferentes maneras por el ADE, pero son manejados de igual forma por el

microcontrolador al tomarse como una caída de voltaje en la línea de distribución. Esto garantiza el SIMEM, no perder ningún valor de registro de energía medida por si se apaga este.

6.6 MEMORIA EEPROM – 24LC512

La EEPROM es usada en el SIMEM para almacenar todos los datos de energía calculada en lapsos de una hora. Cada vez que transcurre una hora de medición de energía en modo de operación normal en el microcontrolador, este escribe en la EEPROM la energía acumulada, la hora y la fecha en una palabra de datos de 6 bytes, iniciando en la localidad I_{an} y terminando en la dirección I_{an+5} de la respectiva EEPROM. Cada palabra de datos esta organizada en los bytes de la siguiente forma. Los bytes tres primeros bytes almacenan la información de la fecha y la hora. Codificados en BCD y distribuidos en desorden en los bits. Para la información de cantidad de energía, el almacenamiento se realiza de forma binaria en los dos últimos bytes donde el primer de estos es el más significativo.

La EEPROM tiene capacidad para almacenar hasta 65535 bytes, direccionados por dos bytes. Teniendo en cuenta que la palabra de la información es de 6 bytes en la EEPROM, entonces puedo almacenar hasta 10922 palabras. Si el SIMEM almacena cada palabra de información cada hora, entonces, el SIMEM puede calcular y almacenar datos de energía consumida en lapsos de una hora de por 10922 horas o aproximadamente por 455 días o un año y cuatro meses.

Una vez la EEPROM llegue a la máxima capacidad de almacenamiento de palabras, la nueva palabra que se escribirá será en la localidad de la primera palabra de datos que se halla escrito en la EEPROM, y las otras siguientes se escribirán subsecuentemente en las direcciones siguientes de forma que siempre halla en la memoria 10922 palabras de datos.

Los datos de la EEPROM pueden ser leídos por el usuario cuando se está en modo de operación de comunicación del microcontrolador. Solo el usuario a través del software ordena al microcontrolador iniciar la transmisión de datos de la EEPROM hacia el software. Una vez concluida esta operación la EEPROM es reiniciada para el almacenamiento de datos y el usuario tiene de forma ordenada los datos de energía en el ordenador.

6.7 RELOJ DE TIEMPO REAL - DS1307

Un reloj de tiempo real hace parte también del SIMEM, conectado al microcontrolador por una interfase I^2C independiente a la de la EEPROM. Cumple con el propósito de generar para el sistema un registro del tiempo de forma exacta.

Dentro del integrado DS1307 se encuentran 8 bytes para la generación y configuración de la hora y la fecha. El microcontrolador en modo de operación normal, continuamente lee los registros del DS1307 para actualizar en el SIMEM la hora y la fecha.

6.8 PUERTO RS232

Aunque la transferencia y control del medidor es logrado a través del puerto SPI y los puertos I^2C , un conector serial permite conectarse a un puerto externo RS-232 opto acoplado localizado en el dispositivo de comunicación con el ordenador. Esto provee al usuario un método adicional de comunicación para el medidor a través de un bus de comunicación separado, permitiendo compartir con un ordenador información del sistema Integrado de medición que no puede ser observado en este.

Aprovechando que por este puerto se llevan las señales de transmisión y recepción de datos utilizando el estándar RS232, se saca provecho al puerto RS232 conectándose a los otros contactos de este puerto la salida CF del ADE7763, la fuente de alimentación de la tarjeta del medidor y la línea de distribución del energía.

6.9 FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LA TARJETA DEL MEDIDOR

El diseño usado es el de una fuente de alimentación simple de bajo costo basado en un transformador de voltaje y un LM317. El transformador de voltaje permite un mejor aislamiento del sistema. El circuito integrado LM317 es un regulador de voltaje utilizado en una configuración de circuito que permite al usuario establecer el valor deseado de voltaje de salida de la fuente de alimentación. Normalmente el voltaje de salida de la fuente de alimentación es ajustada en 5 voltios.

Un interruptor accionado por una llave conecta en la tarjeta, el paso de corriente para todo el trazado de circuito digital. Para proteger la tarjeta del medidor de sobre picos de corriente y voltaje, la fuente de alimentación utiliza respectivamente un fusible y un varistor. La protección del fusible es para valores de corriente mayores a 500 miliamperios. Para la protección de voltaje el varistor resiste voltajes superiores a 180 voltios RMS a 40 joules.

7 DISPOSITIVO DE COMUNICACIÓN CON EL ORDENADOR

Es el encargado de realizar la comunicación entre un computador personal local y el dispositivo de monitoreo y calculo de energía (DMCE), además de arrojar la señal de salida de pulsos del conversor de energía a frecuencia del ADE7763.

Este dispositivo tiene a sus costados, dos conectores de puerto serial TP9, una hembra y otro macho (ver figura 4). Esto con el fin de no equivocarse entre las conexiones de este dispositivo con el ordenador y el dispositivo de monitoreo y calculo de energía. También tiene un orificio que se encuentra a un costado de este, por el cual salen dos cables correspondientes a la salida de pulsos opto acoplada de CF del ADE7763.



Figura. 4. Dispositivo de comunicación con el ordenador.

Este dispositivo solo es necesario conectarse para cuando se quiera realizar el proceso de calibración del SIMEM o para cuando se quiera tomar los registros de cálculo de energía por horas. También debe tenerse en cuenta que este no necesariamente debe estar conectado para la medición de energía por parte del DMCE.

La tarjeta de comunicación esta compuesta principalmente por un circuito de fuente de alimentación, la salida del convertidor de frecuencia a energía del ADE7763, varios optocopladores y el circuito integrado MAX-232.

La tarjeta del medidor al tener como referencia de tierra el neutro la línea de distribución (ver figura 2), y la tarjeta de comunicación la referencia de tierra es la misma del ordenador, puede presentarse entre las dos la conexión de la dos tierras, un corto circuito y consecuentemente un daño en el puerto RS232 del ordenador. Es por esto que las conexiones entre el microcontrolador y el MAX-232 utilizan opto acopladores para aislar las tierras de cada tarjeta y en si de cada dispositivo.

La justificación de esta tarjeta se basa primero en que el sistema integrado de medición de energía no necesariamente necesita estar conectado a un computador personal todo el tiempo para calcular la energía. Segundo que la salida de frecuencia no tiene que estar siempre en funcionamiento a menos que se este calibrando el SIMEM Tercero, Es que la referencia de un computador local no puede ser directamente conectado a la referencia de la tarjeta del medidor.

8 CONEXIÓN DEL SIMEM

El SIMEM puede conectarse de dos formas para medir energía. Una desde una toma corriente y la otra desde un circuito ramal de una edificación. Cada forma de conexión entre el medidor y una línea de distribución, depende de la cantidad de corriente que se quiera medir por el SIMEM.

Para todas las conexiones de medición de energía que se quiere realiza un debe tenerse la precaución de no sobrepasarse de la corriente máxima que puede medir cada conexión.

9 SOFTWARE DEL SIMEM

El software que se desarrollo para el SIMEM, se elaboro en LABVIEW. Con las librerías en comunicaciones seriales, el software tiene funciones básicas como la de transmitir y recibir datos por el puerto serial, y la de obtener todo los datos de calculo de energía en lapsos de una hora. El panel frontal del programa es el que se muestra en la figura 5.

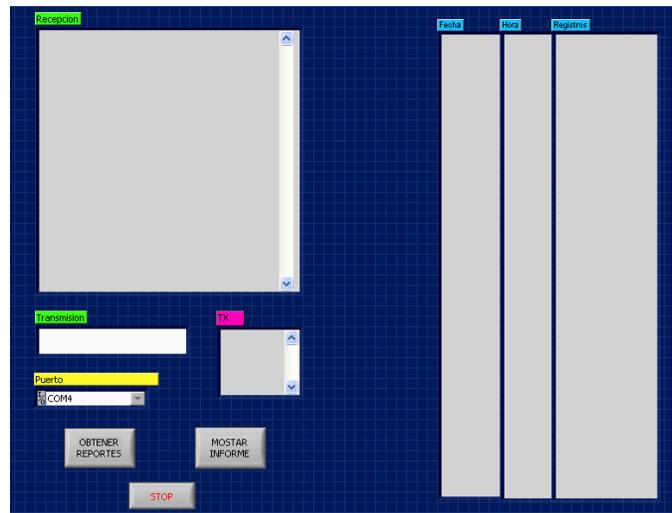


Figura 5. Panel frontal del software del SIMEM.

El software presenta al usuario las siguientes características: Todos los datos ingresados por la ventana transmisión son enviados por la interfase RS232 hacia el microcontrolador y este a su vez hacia el ADE7763, escribiendo en sus registros. Para la ventana de recepción sucede lo contrario, todos los datos enviados corresponden a valores de los registros del ADE enviados por el microcontrolador.

La cacilla de puerto, configura el puerto por donde se establecerá la comunicación entre el hardware y el software. Los botones obtener datos y mostrar informe sirven para la adquisición y visualización de datos de energía calculada en lapsos de una hora. El botón Stop es el botón de emergencia que detiene el software del SIMEM.

El software busca que el usuario a través de la ventana transmisión, escriba en el registro de comunicación del ADE, para esto el usuario debe escribir los 8 bits del registro de comunicación de la misma manera como si se estuvieran ingresando directamente al integrado (ver hoja característica del ADE7763). Escrito el byte que se quiere ingresar al ADE, debe el usuario ingresar el siguiente símbolo (-), indicando al software el fin del byte. Cumplido con lo anterior presionando la tecla enter el computador envía el byte al microcontrolador y este le responde en la ventana superior (recepción), el resultado de la operación solicitada.

Otra función del software es la de obtener los datos de calculo de energía por horas, para esto el usuario debe presionar en el panel frontal el botón obtener datos. Hecho esto, y una vez que los datos ya fueron adquiridos, el software finalizada la operación desplegando un mensaje el cual indica que la operación ha terminado. Para visualizar de forma ordenada dichos datos el usuario debe presionar el botón mostrar informe para.

10 CALIBRACIÓN DEL SIMEM

A través del ADE7763 se realiza en el SIMEM el proceso de calibración que permite calibrar la potencia activa en su ganancia y en el Offset. Además de la corrección de fase entre los dos canales, asegurando alta precisión en la medición.

La calibración del SIMEM consiste en la configuración de los índices de los registros de medición del ADE7763, y en hallar la proporción que existe entre el registro de energía activa del ADE y la cantidad de energía medida por él mismo. Este procedimiento es llevado a cabo por un usuario a través del microcontrolador y el software del ordenador.

Es imprescindible mencionar que la calibración del SIMEM debe realizarse utilizando como referencia una fuente de exacta que proporcione valores de corriente y voltaje invariables en el tiempo.

Iniciando el usuario debe asegurarse que los valores de los registros del ADE7763 mencionados por defectos sean los correspondientes.

10.1 CALIBRACIÓN DE CF

En este paso se calcula el denominador de la ecuación que describe el comportamiento de salida CF. Para esto debe definirse las siguientes condiciones: Voltaje en la línea, corriente de base y la Corriente máxima del medidor (SIMEM).

Donde el voltaje de la línea es el voltaje que está sobre la carga y que es suministrado por la línea de distribución. La corriente base es la corriente que va hacia la carga, la cual fue

seleccionada de acuerdo a la corriente que consume la carga. La corriente máxima del medidor es de 25 amperios.

Teniendo como constante del medidor (Cm), igual a 3.200 imp/kWh o 3.2 imp/Wh puede calcularse CF esperado por la siguiente ecuación.

$$CF_{IB(esperado)} = (Cm) * (1 \text{ hora}/3600 \text{ seg}) * (Ib) * (V_{\text{line}}) \quad (1)$$

Alternativamente utilizando un medidor de frecuencia. La frecuencia de salida de CF debe medirse, obteniendo CF nominal.

El valor calculado de CFDEN es entonces el valor entero de la proporción que existe entre el $CF_{IB(nominal)}$ y el $CF_{IB(esperado)}$ menos uno.

$$CFDEN = ENT(CF_{IB(nominal)} / CF_{IB(esperado)}) - 1$$

10.2 CALIBRACIÓN DE GANANCIA DE VATIO

La segunda parte del cálculo consiste en la calibración de la ganancia de vatio en el registro WGAIN. Como antes se menciona el CFDEN calculado debe ser escrito en el registro CFDEN antes de seguir con la calibración y cero debe ser escrito en el registro CFNUM. Igualmente debe habilitarse el modo de acumulación de energía por ciclos de línea en el registro MODE[CYCMODE] y la interrupción de está en el registro STATUS[CYCEND], no antes de escribir el número de medios ciclos de línea del registro LINECYC_{IB} para fijar el tiempo de acumulación en este modo (refiérase a la hoja técnica del ADE7763).

Donde valor del registro LINECYC es el número de medios ciclos que serán tenidos en cuenta para acumular energía en el modo de acumulación de ciclos

Hallando el valor del registro WGAIN se calibra de ganancia de vatio para el cálculo de energía activa.

$$WGAIN = ENT \left(\left(\frac{LAENERGY_{IB(esperado)}}{LAENERGY_{IB(no \text{ min } al)}} - 1 \right) \times 2^{12} \right)$$

Según la ecuación anterior debe entonces hallarse los valores de $LAENERGY_{IB(esperado)}$ y el $LAENERGY_{IB(nominal)}$.

Donde $LAENERGY_{(esperado)}$ es igual a:

$$LAENERGY_{IB(esperado)} = ENT \left(\frac{CF_{IB(esperado)} \times \text{Tiempo_de_Acumulación}(s)}{\frac{CFNUM + 1}{CFDEN + 1} \times WDIV} \right)$$

Donde el tiempo de acumulación se reemplaza y se obtiene la siguiente la función.

$$LAENERGY_{IB(esperado)} = ENT \left(\frac{CF_{IB(esperado)} \times LINECYC_{IB} / 2 \times Periodo \times 8 / CLKIN}{\frac{CFNUM + 1}{CFDEN + 1} \times WDIV} \right)$$

Para el cual $CF_{IB(esperado)}$ esta dado en Hertz y es calculado. El periodo de la línea es determinado por el registro periodo (PERIOD) y el valor de los registro CFNUM, CFDEN, WDIV y LINECYC están dados.

Teniendo el valor de $LAENERGY_{IB(esperado)}$, se procede a obtener el valor de $LAENERGY_{IB(nominal)}$. Leyendo el registro de estado de interrupción con reseteo RSTATUS, se espere a que ocurra la interrupción de acumulación de ciclo de línea en la salida IRQ del ADE7763, mostrando con la letra I en la ventana de recepción de datos del software. Sucedido esto se lee el registro LAENERGY. El primer resultado de LAENERGY en el modo acumulación de ciclo de línea no podría usarse debido a que el tiempo de acumulación fijado por el registro LINECYC aun no ha sido tomado por el integrado, entonces este valor deberá ser descartado. Luego, se vuelve a leer de nuevo el registro RSTATUS, para esperar a que vuelva a ocurrir la interrupción de acumulación de ciclo de línea, sucedido esto se vuelve a leer el valor del registro LAENERGY para tenerse en cuenta en los cálculos de calibración ya que esta vez si se tuvo en cuenta por parte del integrado el valor de LINECYC. El valor de LAENERGY leído experimental es entonces $LAENERGY_{IB(nominal)}$ y es el LAENERGY leído con la prueba de corriente de base. El valor del registro LAENERGY es un valor en complemento a dos.

Ahora debe hallarse la proporción de Wh/LSB para el registro de energía activa AENERGY.

$$Wh/LSB = \frac{\frac{(CFNUM + 1) \times WDIV}{(CFDEN + 1)}}{MeterConstant(imp/Wh)}$$

Con la proporción de Wh/LSB para al registro de energía activa, el microcontrolador puede hallar lo valores energía que le suministre el ADE en vatios-hora.

10.3 CALIBRACIÓN DE COMPENSACIÓN U OFFSET DE VATIO

La calibración de la compensación permite un rendimiento sobresaliente sobre un rango dinámico amplio. Para hacer esta calibración dos mediciones de modo de acumulación de energía por ciclo de línea son necesarias a un factor de potencia unitario, uno en una corriente de base IB y la otra a la corriente más baja $I_{(min)}$ para ser corregida. Los datos de los coeficientes de la calibración de CF y los de la calibración de ganancia son usados para determinar la compensación de la potencia. La calibración de ganancia debe realizarse antes de la calibración de compensación.

La calibración de la compensación es llevada a cabo determinando la proporción de error de energía activa. Después de determinar la proporción de error de energía activa, se calcule el valor a escribir al registro APOS para corregir el offset y así compensar el cálculo de energía.

$$APOS = - \frac{AENERGY_{rata_de_error} \times 2^{35}}{CLKIN}$$

La tercera parte de la calibración consiste en cálculo de la compensación de potencia activa.

Antes de continuar con la calibración de compensación, sobre el ADE7763 debe hacerse una operación de escritura con el nuevo valor de WGAIN hallando en la calibración de ganancia.

La obtención del valor de $LAENERGY_{I(min)}$ para la corriente Imin, se realiza de la misma manera de cómo se obtuvo $LAENERGY_{IB(nominal)}$ para una corriente de base en la sección de calibración de ganancia.

El $LAENERGY_{I(min(esperado))}$ es calculada según la siguiente ecuación:

$$LAENERGY_{I(min(esperado))} = ENT \left(\frac{Imin}{Ib} \times LAENERGY_{IB(esperado)} \times \frac{LINECYC_{Imin}}{LINECYC_{IB}} \right)$$

Utilizando los datos anteriores se calcula el error absoluto de LAENERGY.

$$LAENERGY(error_absoluto) = LAENERGY_{Imin(nominal)} - LAENERGY_{Imin(esperado)}$$

Después se calcula el error de proporción de AENERGY.

$$AENERGY(error_proporcional_LSB/s) = \frac{LAENERGY(error_absoluto)}{LINECYC_{Imin}} \times \frac{CLKIN}{8 \times PERIODO}$$

Finalmente se Calcula APOS para escribirlo en su registro en el ADE7763, para terminar la calibración de compensación u offset.

10.4 CALIBRACIÓN DE FASE

La calibración de fase es llevada a cabo hallando el valor del registro PHCAL. Este remueve pequeños errores de fase. El error es determinado al medir la energía activa para IB, en dos factores de potencia FP = 1 y FP=0,5 inductivo.

Para el SIMEM, que utiliza un sensor de corriente de efecto Hall de lazo cerrado, la respuesta del tiempo del sensor se asume cercana a cero. Por esto no se realiza para el SIMEM la calibración del SIMEM.

11 CONCLUSIONES

- Se logro la construcción de un sistema integrado de medición de energía monofásica de uso residencial segunda versión del prototipo (C.E.E.R.) para llevar un registro de energía consumida en lapsos de tiempo de una hora así como durante el tiempo que este funcione y poder compartirlas con un PC.
- Con el SIMEM se alcanzo el manejo de funciones de un medidor electrónico normal, más aquellas funciones dadas como la comunicación con un ordenador y el almacenamiento del registro de consumo de energía en intervalos de tiempo.
- Se estudio los integrados de integrados de medición de energía de la familia ADE, perteneciente a la firma Analog Device., que tiene como propósito común medir energía.
- Se comprobó que el ADE7763 es más que un integrado de medición de energía sino que también permite el monitoreo de potencia activa, calculo de valores corriente eficaces, así como otras funciones que hace de este integrado la solución perfecta a cualquier problema de medición de energía en una línea de distribución monofásica .
- Se desarrollo un software que permite al usuario interactuar con el SIMEM, de forma que este pueda compartir datos no perceptibles por el usuario a través del hardware del SIMEM.
- Diseño y construcción del sistema de monitoreo de energía, basado en el circuito integrado de medición de energía ADE7763, controlado por un microcontrolador, con el propósito de obtener datos de energía activa.

12 BIBLIOGRAFÍA

- [1]CONTRERAS, Ricardo; GARCIA, Juan y RAMIREZ, Carlos. Diseño de un Contador Electrónico de Energía para consumo Residencial (C.E.E.R), Universidad Pontificia Bolivariana, 2003 Pág. 129.
- [2]P3 International Corporation. Technical support [online]. Manual de operaciones del medidor de kilovatios P4400. [online]. Pág. 1. <http://www.p3international.com/manuals/p4400_manual.pdf>
- [3]P3 International Corporation. Presentación comercial del medidor P4400. [online]. Pág. 1. < <http://www.p3international.com/brochures/P4400.pdf> >
- [4]KOON, William. Current sensing for energy metering. [online] USA: Analog Devices, Inc. <http://www.analog.com/UploadedFiles/Technical_Articles/16174506155607IIC_Paper.pdf>
- [5]Jordí Mayné. Sensores, acondicionadores y procesadores de señal. Ingeniero de aplicaciones. SILICA. <www.jcee.upc.es/JCEE2002/MAYNEPONENCIA.pdf>
- [6]Hoja Característica. Sensor de corriente magneto resistivo CSNX 25. 2003. [online]. www.honeywell.com/sensing < www.honeywell.hu/sensing/catalogues/CSN%20Series%20Magnetoresistive%20Closed%20Loop.pdf>
- [7] ENGLISH, STEPHEN; SMITH, DAVE. A power meter reference design based on the ADE7756. [online] Nota de aplicación AN-564. [cited 10 april 10, 2001]. Disponible en: <http://www.analog.com/Analog_Root/static/pdf/library/applicationNotes/an564.pdf#xml=http://search.analog.com/search/pdfPainter.aspx?url=http://www.analog.com/Analog_Root/static/pdf/library/applicationNotes/an564.pdf&fterm=an-564&fitem=an-564&la=en>
- [8] KAPLAN, RACHEL. Frequently asked Questions (FAQs), Analog Devices Energy (ADE) products. [online]. Nota de aplicación AN-639. [2003]. Disponible en: <http://www.analog.com/UploadedFiles/Application_Notes/60202270563648643326429202575AN639_0.pdf>