

MEDICIÓN DIGITAL DE LA POTENCIA ACTIVA PARA UN SISTEMA DE  
CALENTAMIENTO ELÉCTRICO MONOFÁSICO

FEDERICO MANUEL FERRADA BAUTISTA

MAYRA DEL PILAR SILVA PEÑALOZA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAÑICAS, ESCUELA DE INGENIERÍAS  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2.005

MEDICIÓN DIGITAL DE LA POTENCIA ACTIVA PARA UN SISTEMA DE  
CALENTAMIENTO ELÉCTRICO MONOFÁSICO

FEDERICO MANUEL FERRADA BAUTISTA  
MAYRA DEL PILAR SILVA PEÑALOZA

Tesis de grado

Director

PhD. RODRIGO CORREA

Codirector

MSc. JAIME BARRERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAÑICAS, ESCUELA DE INGENIERÍAS  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2.005

*Agradezco a Dios por no dejarme desfallecer en los momentos difíciles y darme valor para seguir adelante y culminar este trabajo.*

*A mi Padre José Silva por su ayuda incondicional y por siempre estar ahí confortándome y tendiéndome la mano cada vez que lo he necesitado.*

*Mayra del Pilar Silva P.*

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	5
1.1 CONCEPTOS GENERALES ACERCA DE POTENCIA Y ENERGÍA	5
1.1.1 Potencia instantánea	5
1.1.2 Potencia activa	6
1.1.3 Potencia reactiva	7
1.1.4 Potencia aparente	8
1.1.5. Factor de potencia	9
1.1.6. Definición de energía eléctrica	9
1.2 CONCEPTOS GENERALES ACERCA DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA	10
1.2.1. Medición de tensión y de corriente	10
1.2.1.1. Transductores de tensión	11
1.2.1.2. Transductores de corriente	11
1.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA	13
2. CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DIGITAL DE POTENCIA Y ENERGÍA	16
2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO	16
2.1.1. Sensado de la señal	17
2.1.1.1. Sensado de la señal de corriente	20
2.1.1.2. Sensado de la señal de tensión	21
2.1.2. Filtrado de la señal	22
2.1.3. Proceso de medición de la potencia activa y la energía en el medidor digital de potencia (M.D.P.E.)	23
2.1.3.1. Cálculo de la potencia activa en el CI ADE7756	23
2.1.3.2. Cálculo de la energía en el CI ADE7756	24
2.1.4. Almacenamiento de datos	25
2.1.5. Interfaz con el usuario	27
2.1.5.1. Visualización de datos del medidor digital de potencia	28
2.1.5.2. Administración del medidor digital de potencia	29
2.1.5.3. Interfaz serial externa para la comunicación con un PC	31

2.1.6. Fuente de suministro de potencia del equipo PT5062 series	32
2.2. MANEJO DE LAS COMPONENTES INTERNAS DEL MDPE	33
2.3. LISTADO DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DIGITAL DE POTENCIA	34
3. OPERACIÓN DEL MEDIDOR DIGITAL DE POTENCIA (MDPE)	38
3.1 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN DENTRO DEL EQUIPO	38
3.1.1. Transmisión y recepción de datos del ADE7756	38
3.1.1.1. Interfaz serial del ADE7756	39
3.1.2. Registros del CI ADE7756	41
3.1.3. Monitorización del suministro de potencia	45
3.2. MODOS DE OPERACIÓN DEL MEDIDOR DIGITAL DE POTENCIA (MDPE)	45
3.2.1. Modo inicio	46
3.2.2. Modo de operación normal	47
3.2.3. Modo de calibración	47
3.2.4. Modo apagado	49
3.2.5. Modo de control de suministro de potencia	49
3.3. PROGRAMA DEL MEDIDOR DIGITAL DE POTENCIA (MDPE)	50
3.3.1. Rutina general	50
3.3.2. Rutina del menú	52
3.3.2.1. Rutina del manejo del registro de estado de las interrupciones	59
4. METODOLOGÍA DE VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MDPE	62
4.1. MANEJO DE LA TARJETA DE EVALUACIÓN PARA CI ADE7753/56/59	62
4.1.1. Descripción general	62
4.1.2. Conexión de la tarjeta de evaluación	63
4.1.3. Programa de evaluación del ade7756	64
4.2. PRUEBAS DEL SENSOR DE CORRIENTE CS25-NPA	66
4.3. PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL MDPE	67
4.3.1. Calibrando la frecuencia a CF	69
4.4. PRUEBAS REALIZADAS EN LOS LABORATORIOS DE LA UIS	

PARA LA TARJETA “EVALADE7756/53/59” Y EL “ MDPE”	72
4.4.1. Pruebas de tiempo corto del MDPE y la tarjeta EVAL ADE7756	73
4.4.1.1. Consideraciones de los resultados obtenidos en las pruebas cortas	76
4.4.2. Pruebas de tiempo largo del MDPE y la tarjeta EVAL ADE7756	79
4.4.2.1 Consideraciones de los resultados obtenidos en las pruebas largas	81
4.4.3. Pruebas de variación del factor de potencia	85
4.5. PRUEBAS AL MDPE EN EL LABORATORIO DE CONTADORES DE ENERGÍA DE LA ESSA	86
4.5.1. Revisión de las condiciones de ensayo	86
4.5.2. Prueba de verificación de la constante	87
4.5.3. Prueba en vacío	88
4.5.4. Prueba de arranque	88
4.5.5. Prueba de precisión	89
4.5.6. Prueba con $f_p=0,5$ inductivo	90
4.5.7. Observaciones de los resultados obtenidos en las pruebas en el laboratorio de la ESSA	90
5. LOGROS	91
6. CONCLUSIONES	92
7. SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES	97
8. BIBLIOGRAFÍA	100
9. ANEXO GUÍA DE MANEJO DEL M.D.P.E.	102

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Factor de potencia	9
Figura 2. Resistencia shunt	12
Figura 3. Sensor basado en la bobina de rogowski	12
Figura 4. Etapas de construcción del equipo	17
Figura 5. CI ADE7756	19
Figura 6. Conexión eléctrica del sensor de corriente	20
Figura 7. Red de atenuación	21
Figura 8. Proceso para el cálculo de la potencia instantánea dentro del CI ADE7756	24
Figura 9. Acumulación en el tiempo de la señal de potencia activa	25
Figura 10. Conexión de microcontrolador con la memoria EEPROM	26
Figura 11. Conexión del microcontrolador con el LCD	29
Figura 12. Diseño del teclado	30
Figura 13. Circuito conversor de niveles	31
Figura 14. CI PT5062	32
Figura 15. Circuito del medidor digital de potencia (MDPE)	37
Figura 16. Comunicación del CI ADE7756	38
Figura 17. Designaciones de <i>bits</i> para el registro de comunicaciones	39
Figura 18. Operación de escritura en el puerto serial del ADE7756	40
Figura 19. Diagrama de tiempo de lectura de la interfaz serial	41
Figura 20. Registros de STATUS e IRQEN del CI ADE7756	43
Figura 21. Supervisor de potencia	45
Figura 22. Esquema funcional del medidor digital de potencia	46
Figura 23. Diagrama de bloques de la rutina general	51
Figura 24. Rutina general del manejo del menú	53
Figura 24 a. Rutina de revisión de registros: General	54
Figura 24 b. Rutina de revisión de registros: Registro modo	55
Figura 24 c. Rutina de revisión de registros: Registro IRQEN	56

Figura 24 d. Rutina de revisión de registros	57
Figura 25. Rutina de historial	58
Figura 26. Rutina de monitoreo para interrupciones.	60
Figura 27. Conexión de la tarjeta de evaluación del ADE7756	64
Figura 28. Pruebas de la tarjeta de evaluación para el CI ADE7756 en los laboratorios de la UIS	65
Figura 29. Comportamiento del sensor de corriente	67
Figura 30. Calibración del MDPE	71
Figura 31. Conexión del MDPE y la tarjeta Eval ADE7756	72
Figura 32. Curvas de %error del MDPE y EVAL-ADE7756 para una prueba repetida de T=1h	77
Figura 33. Valor teórico & Valor experimental de la energía (kWh)	83
Figura 34. Curvas de %E del MDPE en tiempo largo	84
Figura 35. Variación del porcentaje de error del MDPE	85
Figura 36. Patrón de medida TPZ-303	86
Figura 37. Resultado de la prueba en vacío del MDPE	88

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Mapa de la memoria de la EEPROM	27
Tabla 2. Comportamiento del sensor de corriente	66
Tabla 3. E= 0,055 kWh	73
Tabla 4. E= 0,275 kWh	74
Tabla 5. E= 0,55 kWh	74
Tabla 6. E= 0,11 kWh	75
Tabla 7. E= 0,66 kWh	75
Tabla 8. E= 1.1 kWh	76
Tabla 9. I= 500 mA V= 110 V	79
Tabla 10. I= 2.5 A V= 110V	79
Tabla 11. I= 5 A V= 110 V	80
Tabla 12. I= 500 mA V= 220 V	80
Tabla 13. I= 3 A V= 220 V	80
Tabla 14. I= 5 A V= 220 V	80
Tabla 15. Coeficiente de correlación entre $V_t$ y $V_e$ (I=500mA y V=110V)	81
Tabla 16. Coeficiente de correlación entre $V_t$ y $V_e$ (I=2,5A y V=110V)	82
Tabla 17. Coeficiente de correlación entre $V_t$ y $V_e$ (I=5A y V=220V)	82
Tabla 18. Ensayos para fp menores que 1 inductivos	85
Tabla 19. Prueba de verificación de la precisión del MDPE	89

## MEDICIÓN DIGITAL DE LA POTENCIA ACTIVA PARA UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO MONOFÁSICO<sup>5</sup>

Autores: FERRADA BAUTISTA Federico Manuel  
y SILVA PEÑALOZA Mayra del Pilar\*\*

Palabras claves:

- Medición
- Digital
- Potencia
- Energía
- Activa

En este trabajo se construyó un medidor digital de potencia y energía activa monofásico (MDPE). Está compuesto de un CI ADE7756 para hacer el cálculo de la potencia, un puerto serie RS-232 para la comunicación con el PC, un microcontrolador MC68HC908GP32 para el manejo de periféricos y el control de todas las funciones del equipo, una memoria EEPROM 24LC04 para almacenar el valor en kWh de la energía y los valores de los registros del ADE7756 ajustados en el proceso de calibración, un teclado para el manejo del equipo y un módulo LCD para visualizar los resultados. El equipo posee cuatro modos de operación que son: normal, donde muestra el valor en kWh, frecuencia de la línea, temperatura, tiempo y un pulsador equivalente al conteo de energía consumida por la carga; calibración donde se hayan los valores de los registros del ADE7756 para la conversión de frecuencia a energía; registros, donde se tiene acceso a los registros del ADE7756, permitiendo ser modificados aquellos que sean de lectura y escritura e historial para mostrar el número de veces que ha ocurrido una interrupción ya sea por caída del nivel de tensión por debajo del umbral o por corte total de la tensión de línea. Para la verificación de la clase del medidor se realizaron ensayos frente a un patrón del 0.001% de error, estableciendo que el MDPE posee un error menor al 1% para cargas con  $f_p=1$ , una buena correlación entre el valor teórico y el experimental y una alta precisión. En conclusión este equipo es capaz de hacer mediciones reales de tensión y de corriente hasta de 240 V y 6 A dentro de los límites de error establecidos, es de fácil manejo y puede acceder a los registros del ADE7756 con los cuales se disminuye el error del mismo.

---

<sup>5</sup> Trabajo de grado

\*\* Facultad de ciencias físicas y mecánicas, escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, director PhD. Carlos Rodrigo Correa Cely

# DIGITAL MEASUREMENT OF ACTIVE POWER FOR A WARMING SINGLEPHASE ELECTRIC SYSTEM\*

By FERRADA BAUTISTA, Federico Manuel  
& SILVA PEÑALOZA, Mayra del Pilar\*\*

## KEYWORDS:

- Measurement
- Digital
- Power
- Energy
- Active

In this Project we built a digital instrument of power and single phase active energy (MDPE). It's formed by an ADE7756 IC to calculate power, a RS-232 serial port to establish communication with a PC, a MC68HC908GP32 microcontroller to handle peripherals and you control all functions, a 24LC04 EEPROM memory to store the values in kWh and the register values from ADE7756 adjusted in the calibrating process, a keyboard to manage the equipment and LCD module to display results. The equipment has four (4) operation modes: "normal" which one display values in kWh, line frequency, temperature, time and a pulser equivalent to the counted energy consumed by the load; "calibrating" where the values of registers of ADE7756 are found, to convert frequency to energy; "registers", where user can access to ADE7756 registers , letting them to modify those which are to reading and writing; and "historial" to show the how many times an interruption has occurred due to sag level below the umbral or total out in the line. For verification of measurer class some tests were made in front of a 0,001% error pattern, establishing that MDPE has an error less than 1% to loads wit  $fp=1$ , a good correlation between theoretical and experimental values and high precision. To conclude, this equipment is able to make measurement of voltage and current until 240V and 6 A between established limits of error, easy to manage and can access to ADE7756 registers which can reduce its error.

---

\* Tesis de Grado

\*\* Facultad de ciencias fisicomecánicas, escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones; director PhD. Carlos Rodrigo Correa Cely.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente el sector de los servicios públicos se ha fascinado con la lectura automática, por ejemplo, prepago con tarjetas inteligentes y facturación multitarifa. Las ventajas que ofrece la medición electrónica en cuanto a calidad de la información y precisión de la medición son indudablemente superiores a la del diseño tradicional del medidor de disco.

Los medidores electrónicos de energía han superado a los medidores electromecánicos en términos de funcionalidad y utilidad, pero los costos y confiabilidad han sido cuestionados en diferentes partes del mundo. Existen compañías que proporcionan circuitos integrados a grandes escalas y por ende ofrecen menores costos y una alta confiabilidad. Una de ellas es *Analog Devices, Inc.*, que reconoce las limitaciones de costos de los medidores monofásicos de energía y ha identificado una oportunidad para ayudar a que los fabricantes de estos dispositivos, alcancen sus metas en cuanto a costos y alivien sus preocupaciones por la confiabilidad con el fin de diseñar un equipo capaz de superar a sus oponentes, los medidores electromecánicos.

Los medidores electrónicos viables están basados en DSPs programables o en DSPs de función fija. Hoy en día se encuentran productos basados en DSP (*Digital Signal Processing o procesamiento digital de señales*), que permiten digitalizar las señales de corriente y tensión por medio de ADCs (*analog-to-digital converters o convertidores analógico-a-digital*), para posteriormente realizar los cálculos. El procesamiento de las señales digitales permite un cálculo estable y exacto superando las variaciones de tiempo y de medio ambiente.

Un microprocesador de bajo ancho de banda complementa un DSP de función fija para operar el sistema de comunicaciones y pantalla (*display*) electrónica. El microprocesador permite a los usuarios seleccionar el nivel de servicio que deseen

y/o la empresa de servicios públicos puede configurar remotamente cada medidor. Al quitarle la gran carga computacional, la potencia y el costo del aparato pueden ser reducidos considerablemente.

Los productos normalizados basados en DSPs de función fija usan ADCs integrados que digitalizan las ondas de tensión y corriente a la más alta resolución a un costo muy bajo. Los DSPs programables que intentan integrar la conversión analógico-a-digital fallan en la habilidad de efectuar continuamente sobre muestreo a las señales analógicas.

Los DSPs programables tienen un error inherente porque están limitados por un procesamiento discreto en el tiempo, por lo tanto la potencia consumida durante los intervalos de los cálculos no es registrada.

El costo de los DSPs programables es más alto y no se tienen en cuenta debido a que estos implican más programación y circuitos adicionales que no se están utilizando. La simpleza de un DSP de función fija ofrece un bajo costo ya que un microcontrolador programable de 4 bits siempre será menos costoso que un DSP programable de 16-bits.

Como ya se mencionó anteriormente *Analog Devices, Inc.* sacó al mercado una familia de DSPs de función fija que ofrece una gran gama de variaciones de configuraciones de sistemas en el mundo entero, donde se pueden escoger los componentes dependiendo del medidor que se desee construir.

El primero en la familia es el ADE7750, que está diseñado para controlar en forma directa un contador con motor de paso electrónico (*stepper motor*), brindando una manera práctica para construir un medidor de energía de estado sólido económico. Si hay una falla en el fluido de energía, simplemente deja de girar. Existen otras opciones como pantallas (*displays*) de diodos emisores de luz (*LEDs*) o pantallas de cristal líquido (*LCDs*) que requieren controladores (*drivers*) de segmentos encendidos y métodos para almacenar las lecturas durante las pérdidas de fluido eléctrico.

Los últimos dispositivos que se han desarrollado poseen una interfaz de puerto serie que permite las comunicaciones bidireccionales con microprocesadores.

Dentro de estos integrados se pueden encontrar dos convertidores digital-a-frecuencia, uno que produce una salida de baja frecuencia y el otro con una salida de alta frecuencia. En ambos casos, la frecuencia del pulso de la salida de los convertidores digital-a-frecuencia varía con el valor de la potencia real medida en el tiempo. Aún más, circuitos integrados de la familia ADE775X ofrecen un rango de frecuencias de salida, seleccionables por el diseñador, para ajustarse a la mayoría de los medidores.

El equipo construido en éste trabajo de grado permite medir potencia monofásica activa con un error máximo de 1%, utilizando el circuito integrado ADE7756, que cuenta con recursos internos para el muestreo de las señales de tensión y corriente, filtrado, compensación de errores, etc., manejado todo a través del microcontrolador MC68HC908GP32 de **Motorola**, que supervisa la medición de potencia y energía, y controla los periféricos utilizados para visualizar (Módulo LCD), comunicar al equipo con un PC (RS-232), recuperar datos guardados (Memoria EEPROM) y manejar las funciones que tiene el equipo (Teclado), además de otros procesos adicionales que se describen más adelante. La programación del equipo, se concibió no sólo para medir energía activa y mostrar algunos parámetros como frecuencia de línea y tiempo de prueba, sino también para acceder a todos los registros internos que posee el ADE7756, que incorpora en una misma pastilla, dos convertidores A/D sigma delta de segundo orden, una referencia de tensión, un sensor de temperatura y todos los circuitos de procesamiento de señales requeridos para efectuar mediciones reales de energía y potencia activa.

En el transcurso de este texto se explicarán las bases teóricas para el entendimiento de los parámetros medidos por el dispositivo, las etapas que se tomaron en cuenta para su construcción por medio de la descripción de las principales componentes que posee, sus modos de operación y la descripción de su programación. Por último se presenta el resultado de las pruebas realizadas que determinan su precisión, contrastando los resultados medidos frente al sistema de desarrollo para circuitos integrados **ADE7753 / 56 / 59** de **Analog Devices**, adquirida por el grupo **CEMOS** y

adicionalmente, la realización de las pruebas en el laboratorio de contadores de la ESSA, que cuenta con un equipo de alta precisión (del orden del 0.001%), que permitió determinar las ventajas y desventajas frente a los equipos que actualmente se consiguen en el mercado.

Se espera que este trabajo de grado sea un punto de partida para aquellos que deseen continuar investigando sobre el tema de la medición digital de parámetros eléctricos.

## 1. MARCO TEÓRICO

Para entender lo que el medidor digital de potencia (MDPE) realiza, es necesario contar con algunas nociones teóricas que ofrezcan bases para el entendimiento del funcionamiento del mismo. Por lo tanto se consideró importante incluir en este trabajo de grado los conceptos de potencia y energía así como muchos otros aspectos tales como el factor de potencia y las variaciones que se tienen de acuerdo a las características de la carga que se encuentra conectada en el dispositivo. Además ya que el presente trabajo es de desarrollo tecnológico, es necesario incluir conceptos relacionados con instrumentos de medición de energía digitalmente, por lo tanto, en este capítulo también se incluye la definición de los medidores de tensión y de corriente, indispensable para entender el funcionamiento del sensor efecto *Hall* y de la red atenuadora, utilizados para la medición de la corriente y la tensión en el equipo, cuyas características se explican detalladamente en el capítulo 2. También se tratarán varias clases de sensores de corriente, mostrando sus ventajas y desventajas y realizando una comparación entre cada uno de ellos.

Por último se dará una breve explicación acerca de las nuevas tecnologías que han salido recientemente al mercado para la medición digital de potencia y energía, destacando sus beneficios y haciendo una comparación frente a sus opuestos, los medidores electromecánicos.

### 1.1. CONCEPTOS GENERALES ACERCA DE POTENCIA Y ENERGÍA

#### 1.1.1. Potencia instantánea

En [electricidad](#), y para [corriente continua](#) (CC), la potencia eléctrica instantánea desarrollada por un dispositivo de dos terminales, es el producto de la [diferencia de potencial](#) entre los terminales y la [corriente](#) que pasa a través del dispositivo. La

potencia instantánea o tasa instantánea de flujo de energía  $p(t)$ , se define como el producto de la tensión instantánea  $v(t)$  y la corriente instantánea  $i(t)$ . Esto es:

**Ecuación 1.**

$$p(t) = v(t) * i(t)$$

Donde  $i$  es el valor instantáneo o la corriente promedio y  $v$  es el valor instantáneo o la tensión promedio. Si  $i$  está en amperes y  $v$  en volts  $p$  estará en *watts*.

**1.1.2. Potencia activa**

En un circuito monofásico de corriente alterna (CA), la potencia en *watts* que absorbe la carga en cualquier instante es el producto de la caída de tensión instantánea en *volts* a través de la carga y la corriente instantánea en amperes dentro de la carga. Si designamos los terminales de la carga como a y n y expresamos el voltaje como:  $v_{an} = V_{máx} \cos(\omega t)$  y la corriente como:  $i_{an} = I_{máx} \cos(\omega t - \theta)$ , la potencia instantánea será:

**Ecuación 2.**

$$p = v_{an} i_{an} = V_{máx} I_{máx} \cos(\omega t) \cos(\omega t - \varphi)^6$$

Siendo  $\varphi$  el ángulo de desfase entre la corriente y la tensión. Usando identidades trigonométricas la ecuación 2 queda:

**Ecuación 3.**

$$p = \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} \cos \varphi (1 + \cos 2\omega t) + \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} \operatorname{sen} \varphi * \operatorname{sen} 2\omega t$$

---

<sup>6</sup> Las ecuaciones 2 y 3 fueron tomadas del libro “Análisis de sistemas eléctricos de potencia”, de W. Stevenson, capítulo 2.

$\frac{V_{\max} I_{\max}}{2}$ , puede reemplazarse por el producto de los valores eficaces de tensión y corriente.

#### Ecuación 4.

$$p = V_{RMS} I_{RMS} \cos \varphi (1 + \cos 2\omega t) + V_{RMS} I_{RMS} \operatorname{sen} \varphi * \operatorname{sen} 2\omega t \quad ^7$$

De ésta ecuación, el primer término, siempre es positivo y tiene un valor promedio de:

#### Ecuación 5.

$$P = \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} \cos \varphi \quad \text{ó} \quad P = V_{RMS} I_{RMS} \cos \varphi$$

$P$  es la potencia activa, y su unidad es el *watt*, y es equivalente a la potencia consumida por la resistencia. En términos matemáticos corresponde al valor medio de la potencia instantánea.

#### 1.1.3. Potencia reactiva

Partiendo de la ecuación 4, el segundo término, es alternativamente positivo o negativo y tiene un valor promedio de cero. Esta componente de la potencia instantánea se denomina potencia instantánea reactiva y expresa el flujo de energía desde la carga y hacia la carga alternadamente.

La expresión de potencia reactiva esta dada por la ecuación 6:

#### Ecuación 6.

$$Q = \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} \operatorname{sen} \varphi \quad \text{ó} \quad Q = V_{RMS} I_{RMS} \operatorname{sen} \varphi$$

---

<sup>7</sup> Ecuaciones 4, 5 y 6 fueron tomadas del libro “Análisis de sistemas eléctricos de potencia”, de W. Stevenson, capítulo 2.

Esta potencia tiene un valor medio nulo, por lo tanto no produce trabajo útil, por lo que se dice que es una potencia *devatada* (no produce *watts* activos) y se mide en *watts* reactivos (VAR).

En la industria eléctrica se procura que en todas las instalaciones el  $\cos \varphi$  sea máximo, con lo cual el  $\sin \varphi$  será mínimo y por tanto la potencia reactiva o no útil será también mínima.

La potencia reactiva sirve para magnetizar los materiales, por lo tanto no puede ser relacionada con la conversión de energía en trabajo.

Es importante anotar que la expresión para la potencia reactiva tiene su origen en la corriente reactiva, la cual se caracteriza por estar involucrada con el cambio de fase introducido por la carga en la corriente.

#### **1.1.4. Potencia aparente**

Cuando no se incluye el término  $\cos\varphi$  el producto de  $V_{RMS} * I_{RMS}$  debido a que la corriente y la tensión están desfasadas entre si, se tiene lo que se denomina *potencia aparente ó teórica*, expresada en *voltamperes* (VA).

La potencia aparente (S) se define como el producto del valor eficaz de la onda de tensión y el valor eficaz de la onda de corriente. Además, indica el dimensionamiento que debe tener un sistema y por ser sólo un valor, no define la dirección del flujo de energía. La expresión que corresponde a esta potencia se muestra en la ecuación 7.

#### **Ecuación 7.**

$$S = V_{RMS} * I_{RMS}^8$$

---

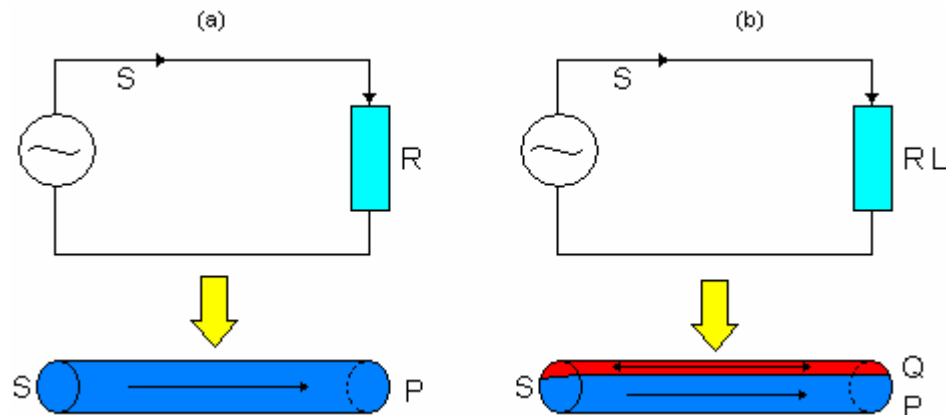
<sup>8</sup> Tomada del libro “Análisis de sistemas eléctricos de potencia”, de W. Stevenson, capítulo 2.

La potencia aparente corresponde a la máxima potencia que se puede convertir en activa (trabajo).

### 1.1.5. Factor de potencia

El factor de potencia es definido como la eficiencia del transporte de energía.

**Figura 1. Factor de potencia**



**Fuente: Autores.**

En una carga resistiva, el factor de potencia (FP) sería igual a 1, ya que el conductor utiliza el 100 % para el transporte de energía (ver figura 1 (a)). Pero en una carga inductiva o capacitiva, el FP sería menor de 1 ya que sólo un porcentaje del conductor se utiliza para el transporte de energía y el resto sería para el flujo de energía desde la carga y hacia la carga alternadamente (ver figura 1 (b)).

A partir de la figura 1, el factor de potencia se puede definir como la razón entre la potencia activa ( $P$ ) y la potencia aparente ( $S$ ).<sup>9</sup>

### 1.1.6. Definición de energía eléctrica

La energía es uno de los conceptos más importantes en el estudio de las máquinas eléctricas y se define como la capacidad de realizar un trabajo, ya que ésta se

<sup>9</sup> Para mayor información ver IEEE 1459 2.000

presenta en la naturaleza en diferentes formas. El objetivo de las máquinas eléctricas consiste en convertir la energía de una forma en otra.

La cantidad de energía o de trabajo útil que proporciona la corriente eléctrica si se entrega un *watt* por cada segundo, es equivalente a un *joule*, aunque para fines comerciales se suele medir en unidades de *kWh*.

## **1.2. CONCEPTOS GENERALES ACERCA DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA**

Se denomina sistema de medida a la combinación de dos o más elementos, subconjuntos y partes necesarias para realizar una o varias funciones, donde el resultado de la medida debe ser independiente del observador (objetiva), basada en el resultado de la experimentación (empírica) y de tal forma que exista una correspondencia entre las relaciones numéricas y las relaciones de propiedades del equipo.

### **1.2.1 Medición de tensión y de corriente**

Para entender el procedimiento utilizado para medir la corriente y la tensión se debe entender y conocer el significado de los términos transductor y sensor. Se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta, por lo tanto este es un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro. Un sensor es un dispositivo que a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida. Aunque sensor y transductor se emplean como sinónimos, el término sensor sugiere un tratado de la señal más extenso en cuanto a conocimientos físicos del tratamiento de la misma.

En la medición de corriente y tensión los transductores tienen muchas aplicaciones, ya que ofrecen rangos mucho más amplios, sin perder linealidad ni confiabilidad, ya sea en la parte baja de la escala por su sensibilidad o en los rangos más altos por su seguridad (robustez). Por lo tanto, en el diseño y construcción del medidor digital de potencia y energía (MDPE), su utilización será de mucha utilidad ya que por sus excelentes características, resultan indispensables para hacer las mediciones de

corriente y tensión, necesarias para realizar los cálculos que determinen la potencia consumida por la carga. A continuación se describe cada uno de ellos y se muestran las diferentes clases que existen en la actualidad.

### **1.2.1.1 Transductores de tensión<sup>10</sup>**

Para obtener una tensión proporcional a la que está aplicada sobre la carga, se puede emplear un divisor resistivo o un transformador reductor que permite a su vez ofrecer un aislamiento galvánico respecto de la red.

### **1.2.1.2 Transductores de corriente**

Cuando se desea medir la corriente por la carga, la cuestión se complica ya que los rangos de este parámetro son más amplios que los de la tensión y la forma de onda sinusoidal suele sufrir deformaciones al estar afectadas por elementos reactivos y resistivos. Estos transductores se pueden separar en dos grandes grupos que son:

- **Sensores no lineales de corriente**

#### Transformador de corriente

Los transformadores de corriente se utilizan para tomar muestras de corriente de la línea y cambiarla a un nivel seguro y medible, para las gamas normalizadas de instrumentos, aparatos de medida u otros dispositivos de medida y control.

Emplea el mismo principio que el transformador de tensión, con una relación de transformación conveniente para lograr una corriente secundaria de valor reducido. Posee mayor sensibilidad que el transformador ideal (TI) lineal y consume poca potencia. Sin embargo el material ferroso del núcleo provoca un comportamiento no lineal entre el campo magnético (B) y la excitación, pudiendo incluso llegar a la saturación de aquel y la pérdida de su sensibilidad.

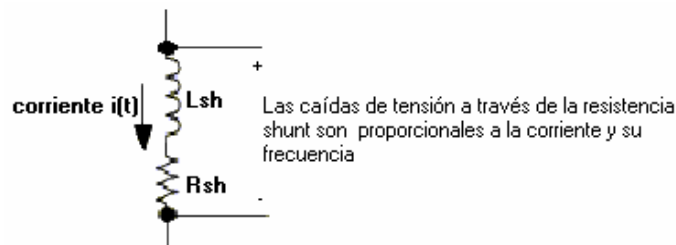
---

<sup>10</sup> Refiérase a [www.analogdevices.com](http://www.analogdevices.com)

- **Sensores lineales de corriente**

a) Resistencia “shunt”: Es una resistencia de alambre que posee un coeficiente muy bajo de temperatura y que se coloca en serie con la carga, permitiendo obtener una tensión entre sus bornes proporcional a la corriente que pasa por la misma. Si bien existe una inductancia parásita en esta resistencia que sólo es considerable para mediciones cuando la frecuencia es relativamente alta. Aunque la resistencia *shunt* es el modelo más económico para sensar corriente, se debe tener en cuenta que a valores elevados de ésta, las pérdidas por calor pueden ser considerables (ver figura 2).

**Figura 2. Resistencia “shunt”**

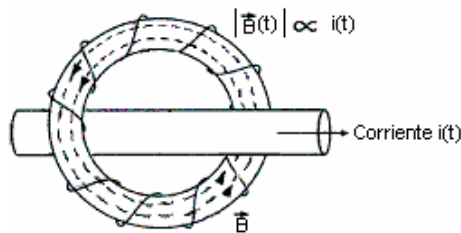


**Fuente: Autores.**

b) Sensor de efecto Hall: Existen dos tipos de sensores *Hall*, el de anillo abierto (*open loop*) y el anillo cerrado (*closed loop*). El segundo ofrece mejor precisión y rangos dinámicos más altos, pero su costo es mayor. En general tienen muy buena respuesta en frecuencia y pueden medir corrientes elevadas.

c) Bobina de Rogowski : Es un inductor con núcleo de aire de tipo toroidal ubicado perpendicularmente alrededor de un conductor con la corriente a medir, cuyo campo magnético circular atraviesa todas las espiras, induciendo una tensión proporcional a la inductancia mutua y a la de la derivada de la corriente primaria, como se muestra en la figura 3.

**Figura 3. Sensor basado en la bobina de Rogowski**



**Fuente: Hoja de datos, modificada por los autores.**

### 1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA

Los sistemas de medida pueden ser: clase 0,2, 0,5, 1 y 2 según el porcentaje de error máximo de medición.

El comportamiento de los sistemas de medida viene condicionado por ciertas características que influyen en la magnitud medida a lo largo del tiempo. Estas características se clasifican en dos grandes grupos que son:

- **Características estáticas:** Sucede que en la mayoría de los sistemas de medida el parámetro de interés varía tan lentamente que es necesario determinar las características estáticas del equipo, entre ellas se destacan las siguientes:

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

$$\text{Error Relativo}\% = \frac{\text{Valorteórico} - \text{Valos experimental}}{\text{Valorteórico}} * 100$$

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

- c) **Resolución:** Esta sucede cuando se comparan diferentes tipos de medidores que miden un mismo parámetro con el fin de determinar que tan preciso puede ser un equipo frente a otro con características similares. Para expresar la precisión de un equipo se debe dar con valores enteros. Por

ejemplo un equipo que mida temperatura la expresión correcta es  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y no  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

- d) Sensibilidad:** Es la pendiente de la curva de calibración que puede ser o no constante a lo largo de la escala de medida.
  
- e) Linealidad:** La linealidad expresa el grado de coincidencia entre la curva de calibración y una línea recta determinada, que puede ser independiente, ajustada a cero, lineal terminal, lineal a través de los extremos o lineal teórica. Resulta ser que la linealidad expresa hasta qué punto es constante la sensibilidad de un equipo, si la sensibilidad es constante entonces la salida debe multiplicarse por un factor para conocer el valor de entrada, aunque esto puede traducirse como una inexactitud del equipo. Los principales factores que influyen en la linealidad son la resolución que el incremento mínimo de la entrada para el que se obtiene un cambio en la salida, el umbral sucede cuando ese incremento en la entrada mencionado anteriormente se produce a partir de cero y la histéresis que es la diferencia en la salida para una misma entrada.
  
- f) Repetibilidad:** Asociada con la fidelidad es cuando las medidas se realizan en un intervalo de tiempo corto y el valor absoluto de la diferencia entre dos resultados da la probabilidad de ocurrencia de que este vuelva a suceder en otra medición. Ejemplo un equipo que por medio de la repetibilidad se halló su fidelidad estimada en un 99%.
  
- g) Reproducibilidad:** También se refiere al grado de coincidencia entre distintas lecturas individuales cuando se determina el mismo parámetro mediante un mismo método de medición pero con un conjunto de medidas a largo plazo y con personas y aparatos distintos realizando la misma prueba.
  
- h) Inestabilidad:** Cuando hay una variación de la salida a lo largo del tiempo significando que el equipo tiene problema con las derivas que pueden ser de escala o de cero, la del factor de escala es cuando existe una variación de la

sensibilidad en el equipo y la de cero es la variación de la salida con la entrada nula.

- **Características dinámicas:** La presencia de inercias (masas, inductancias, etc), capacidades (eléctricas, térmicas, fluidas, etc) y, en general, de elementos que almacenan energía hacen que la respuesta de un sistema de medida sea distinta cuando se está variando la señal de entrada. En estas características prima la velocidad de respuesta con que el sistema responde a cualquier cambio, en cuanto a la medida de la magnitud esto no influye mucho pero si el equipo hace parte de un sistema de control, este retardo puede dar lugar a un error en la medición.
- **Errores sistemáticos:** La calibración estática de un medidor permite detectar y corregir los denominados errores sistemáticos que suceden cuando en el curso de varias medidas de una magnitud de un determinado valor hechas bajo las mismas condiciones permanece constante en el valor absoluto y signo. Dado que el tiempo es una condición de medida estas deben hacerse a un intervalo corto. Esta clase de error no sólo se debe al equipo que está bajo prueba sino también al método utilizado, el operario y toda una serie de circunstancias climáticas, mecánicas, eléctricas que influyen en el resultado del parámetro medido.
- **Errores aleatorios:** Son aquellos que permanecen una vez eliminadas las causas de los errores sistemáticos y se manifiestan cuando se mide repetidamente la misma magnitud con el mismo equipo y el mismo método. Estos errores también se denominan accidentales o fortuitos, dando a entender que pueden ser inevitables. Con la presencia de este tipo de error después de realizar una o varias medidas de una magnitud determinada, hace que se tenga una incertidumbre sobre el verdadero valor de la misma. Cuanto mayor sea esta incertidumbre, menos repetible es ésta medida y si además hay errores sistemáticos, el resultado final diferirá del correcto y la medida será inexacta.

## **2. CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DIGITAL DE POTENCIA Y ENERGÍA**

En este capítulo se explican las fases o etapas que se tuvieron en cuenta para la construcción del medidor digital de potencia (MDPE) así como la descripción de las componentes principales utilizadas en el diseño mostrando la función que cumplen cada una de ellas dentro del mismo.

Al finalizar este capítulo, se muestra el circuito general del equipo construido, junto con la lista de todos los elementos utilizados.

### **2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO**

Con el fin de describir el proceso realizado para la medición de potencia digitalmente, se han considerado las siguientes fases o etapas que describen el *hardware* del medidor:

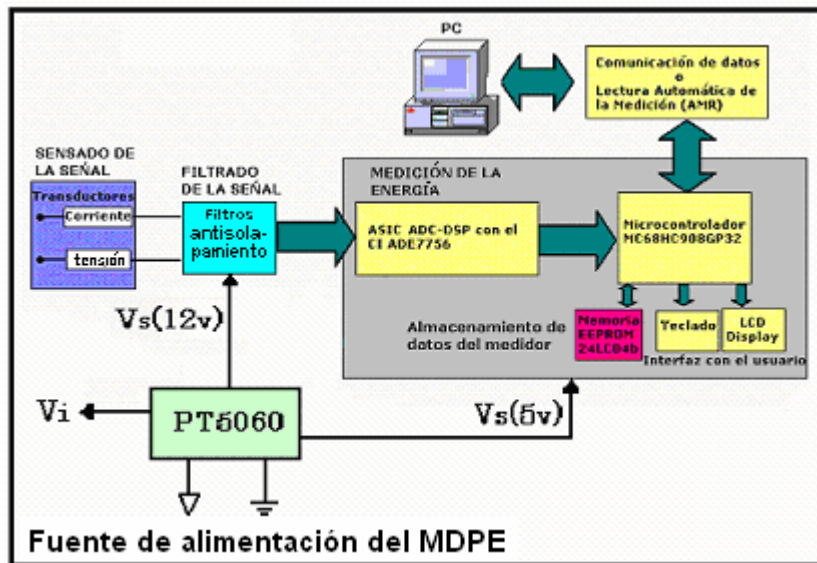
- Sensado, filtrado y procesamiento de las señales digitales para la medición de energía mediante el uso del CI ADE7756
- El manejo de periféricos y la lectura de los registros del circuito integrado mencionado anteriormente mediante el uso de un microcontrolador.
- La visualización de resultados con un módulo LCD.
- El manejo de un menú con un teclado horizontal de cuatro teclas.
- La comunicación con un PC por medio del puerto serie.
- La fuente para el suministro de potencia.

La figura 4 representa cada una de ellas, las cuales son descritas a continuación.

Cabe destacar que la construcción del equipo se basa en la nota de aplicación AN-564 de la firma *Analog Devices*, aunque adaptándola según los requerimientos de este trabajo de grado, teniendo en cuenta factores como la facilidad de conseguir

los componentes en nuestro medio y la reducción de costos sin sacrificar la calidad del equipo en cuanto a la confiabilidad de sus resultados y buscando ofrecer mejoras al diseño original.

**Figura 4. Etapas de la construcción del equipo**



*Fuente: Autores*

### 2.1.1. Sensado de la señal

Para la medición de potencia y energía se utilizó el circuito integrado ADE7756 de la firma *Analog Devices*, que tiene un error máximo del 0,1% sobre un rango dinámico de 1000 a 1. Realiza mediciones de potencia con alta exactitud, debido a que procesa las señales para efectuar mediciones reales de energía y potencia activa por medio de un registro de muestras de formas de onda y un registro de energía activa, que sostienen por al menos cinco segundos la potencia acumulada a carga completa. Para el cálculo de la potencia y la energía, este integrado tiene dos canales de entrada, uno de tensión y el otro de corriente (El canal 1 es de corriente y el canal 2 de tensión), que son de tensión diferencial con niveles de señal máximo  $\pm 1V$ . Cada uno de los canales tiene un PGA (*Programmable Gain Amplifier* ó *amplificador de ganancia programable*) que permite ajustar ganancias de 1, 2, 4, 8 o

16. El canal 1 (el de corriente) tiene rango de entrada programable, el cual puede ser ajustado a 0,25 V, 0,5 V o 1 V.

La entrada de corriente debe ser obtenida de un transductor de corriente con un nivel de señal máximo de entrada de  $\pm 1$  V, aunque internamente se encuentra un circuito de protección ESD que soporta sobre tensiones de  $\pm 6$  V sin riesgo de daño permanente.

Cabe destacar que adicionalmente al cálculo de la energía, este integrado ofrece una amplia gama de características, tales como el manejo de 18 registros utilizados para su programación (6 de sólo lectura y 12 de lectura y escritura), cuyos contenidos pueden ser actualizados o leídos a través de cuatro líneas de señal asociadas a la interfaz serial utilizada para la transmisión de datos entre el integrado y el microcontrolador. La interfaz serial SPI (*Serial Peripheral Interfase*) del chip está conformada por las siguientes señales<sup>11</sup>:

- CS Entrada activa en bajo que activa el bus del ADE7756.
- SCLK Entrada de reloj, ya que la interfaz es serial síncrona.
- DOUT Salida de datos
- DIN Entrada de datos

Adicionalmente posee: Ancho de banda nominal de 14kHz, variación típica en la frecuencia de salida del orden de 0,2%. Entradas analógicas de alta impedancia (390 k $\Omega$  mínima), capaces de aceptar señales hasta de 1V. Opera con frecuencias de reloj desde 1MHz hasta 10MHz. El valor nominal es de 3,579545MHz. Entradas y salidas lógicas compatibles con TTL y CMOS. Rango de temperaturas de desde -40°C hasta +85°C. Cada canal analógico de entrada posee un PGA con cuatro selecciones de ganancia posibles: 1, 2, 4 ó 16 programables por el usuario en un registro 12 bits llamado GAIN.

Este integrado posee una salida lógica de calibración de frecuencia “CF” que permite dar la información de la potencia activa y fue usada para propósitos de

---

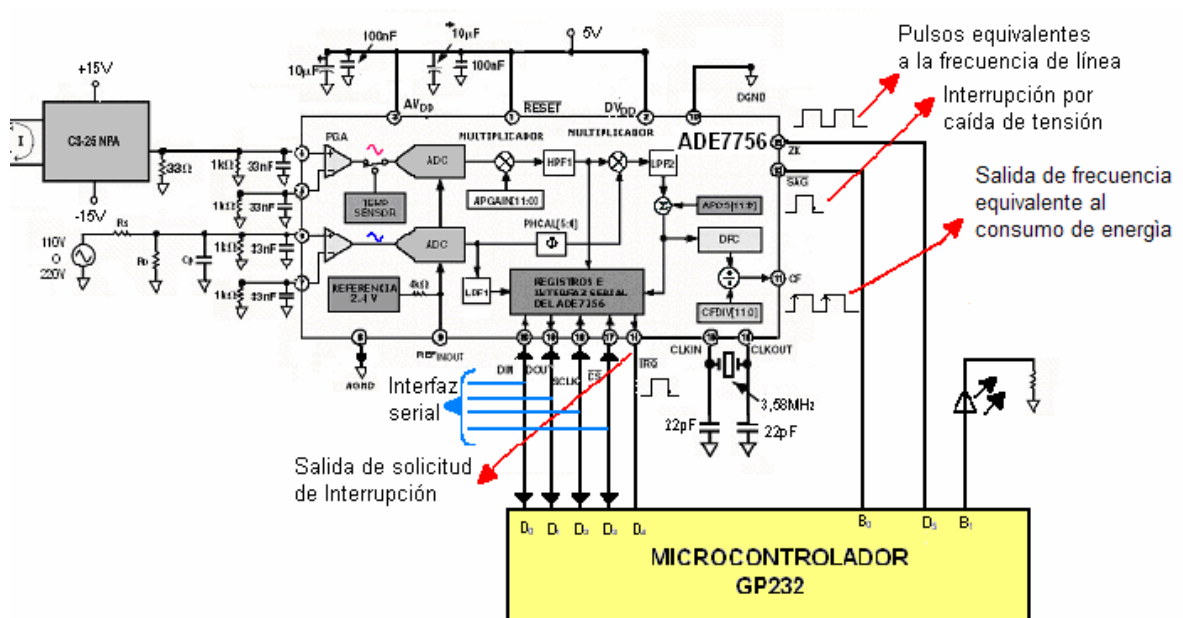
<sup>11</sup> Para mayor información acerca del manejo de la interfaz serial, remítase a la hoja de datos del CI ADE 7756, sección interfaz serial.

calibración del equipo ajustando la frecuencia de salida máxima por medio de un registro interno del integrado llamado **CFDIV** (ver anexo A). sección de conversión de energía a frecuencia.

Además en este integrado existen dos salidas que definen las interrupciones que pueden suceder para la medición de potencia en el equipo que son la salida de cruce por cero "**ZX**" que conmuta el nivel alto y bajo al cruce por cero de la señal diferencial en el canal de tensión y la salida "**SAG**" que determina la duración de la interrupción de acuerdo al conteo del número de ciclos en que esta se presente y al valor de tensión comparado con el nivel de tensión previamente determinado (Ver anexo A, sección de detección de cruce por cero y detección de SAGS en la tensión de línea).

Para el manejo de estas interrupciones, se tiene en el integrado la salida programable "**IRQ**" (ver sección de interrupciones en el anexo A). Los pines de éste integrado se muestran en la figura 5.

**Figura 5. CI ADE7756**

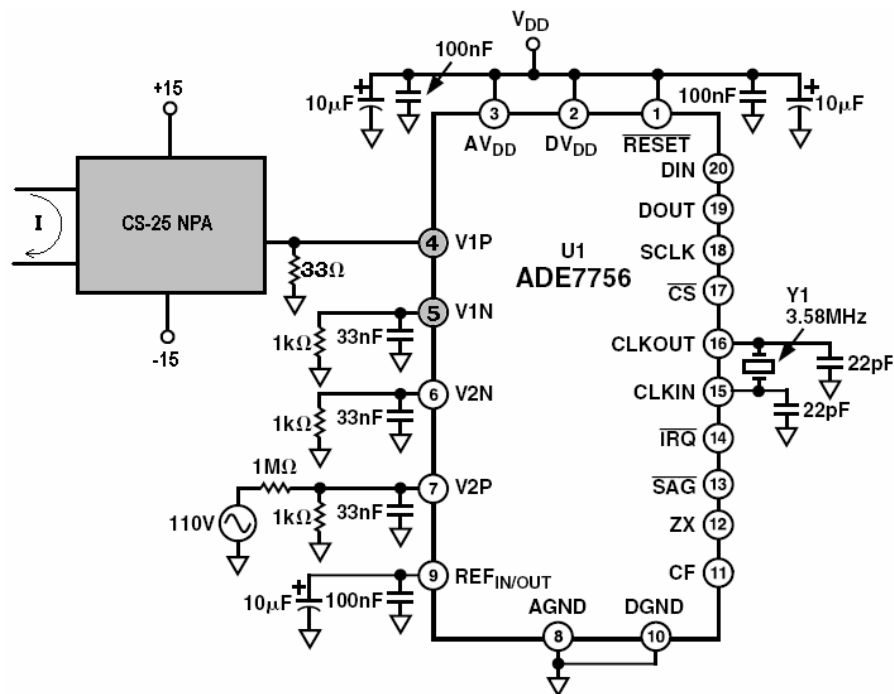


**Fuente: Hoja de datos ADE7756, modificada por los autores.**

**2.1.1.1. Sensado de la señal de corriente:** La primera red permite que la corriente sea convertida a un valor de tensión a través del sensor de efecto Hall **CS-25 NPA**<sup>12</sup>, que posee excelentes características de linealidad en el rango de medición manejado en este trabajo de grado (del orden de 5mA hasta 3A). Este sensor puede operar en rangos programables entre 0 y 25 A, pero para efectos de este proyecto, se seleccionó un rango entre 0 y 6A.

Este sensor conserva su linealidad (con un error máximo del 0,2%) en todo su rango de operación y cuenta con un desplazamiento de corriente casi nulo (del orden de 0,15 mA). Requiere de una fuente dual para su operación (entre  $\pm 12V$  y  $\pm 18V$ ), la cual se describirá mas adelante en este capítulo. En la figura 6 se muestra su conexión al canal de corriente ( $V_1P$ ) del ADE7756.

**Figura 6. Conexión eléctrica del sensor de corriente**



**Fuente: Hoja de datos ADE7756, modificada por los autores.**

<sup>12</sup> Su hoja de datos se encuentra en [www.westnet/~escor](http://www.westnet/~escor).

**2.1.1.2. Sensado de la señal de tensión:** Por medio de un divisor de tensión se inyecta al segundo canal de conversión A/D la señal de tensión. Para el cálculo de las resistencias que componen este divisor, se debe tener en cuenta que la entrada diferencial máxima de los canales de conversión del ADE7756 es de  $\pm 1V$ ; por esto la hoja de datos del ADE 5576 recomienda usar resistencias de alta precisión (1%). Para una tensión de operación máxima de 240 volts, se obtienen los siguientes valores para  $R_s$  y  $R_p$ :

Tomando:  $R_p = 909\Omega$

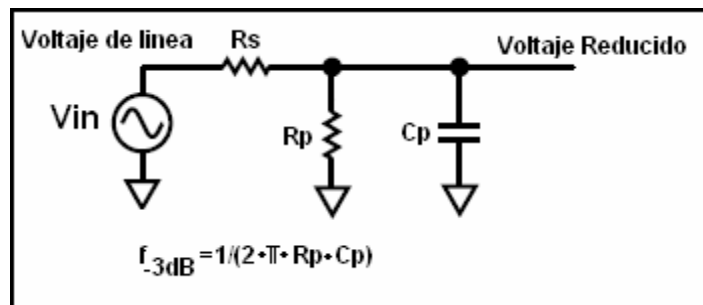
$$R_{S_{MIN}} = R_p(240 - 1) = 217,251k\Omega$$

Si se elige:  $R_s = 240k\Omega$

Se tiene:  $V_{in} = 905,57mV$

La topología de la red es tal, que la igualdad de fase entre los canales de tensión y corriente se conserva. (Ver figura 6). La frecuencia de  $-3$  dB de esta red es determinada por  $R_p$  y  $C_p$  esto se debe a que la resistencia en serie  $R_s$  es mucho más grande que la resistencia en paralelo  $R_p$  (Ver figura 7).

**Figura 7. Red de atenuación**



**Fuente: Hoja de datos ADE7756, modificada por los autores.**

Se debe tener en cuenta que la mayoría de los transductores de corriente tienen un cambio de fase entre  $0,1^\circ$  y  $1^\circ$  a 50Hz/60Hz; este cambio de fase o error de fase pueden llevar a errores de medida de energía significativos, sobre todo cuando el factor de potencia es bajo. Sin embargo este error de fase puede corregirse escribiendo al registro de “Calibración de Fase” (PHCAL) en el ADE7756, este registro de 6 bits introduce un retraso de tiempo máximo en el canal de tensión de  $\pm 143\mu\text{s}$  con un CLKIN de 3,579545MHz, por consiguiente cada LSB es equivalente a  $4,47\mu\text{s}$  o en grados a  $360^\circ \times 4,47\mu\text{s} \times 60$  (frecuencia de la línea) =  $0,096552^\circ$ , equivalentes en todo su rango a un adelanto o atraso de 3 grados (en redes de 60Hz). Sin embargo es mejor usar el registro PHCAL sólo para correcciones de fase pequeñas, es decir,  $<0,5^\circ$ , si se requieren correcciones más grandes, pueden hacerse usando un componente pasivo externo; por ejemplo las resistencias en el filtro de anti-solapamiento pueden modificarse para cambiar la frecuencia de esquina del filtro para introducir más o menos retraso.

### **2.1.2. Filtrado de la señal**

Existe una posible fuente de error que aparece en las entradas de corriente y de tensión del equipo, producida por el llamado “solapamiento”, que es un efecto que aparece en todos los sistemas de muestreo. Para solucionar este problema se recomienda el uso de filtros pasa-bajo (*low-pass*) en las entradas analógicas del integrado.

El filtro pasa bajo (LPF) utilizado en el diseño es un filtro analógico RC de  $R = 1 \text{ k}\Omega$  y  $C = 33 \text{ nF}$ , con una frecuencia de esquina de 10 kHz que produce una atenuación de aproximadamente 40 dB a 894 kHz.

Se debe tener en cuenta que el error de las frecuencias por debajo de -3 dB en el LPF, se verá directamente reflejado en la componente fundamental de frecuencia; por lo tanto las componentes utilizadas deberán tener una tolerancia apta para reducir los errores que puedan presentarse. Por ejemplo, un cambio de fase de  $0,2^\circ$  puede causar errores en la medición de 0,6% a factor de potencia bajo.

Este diseño usa resistencias de 1% tolerancia y condensadores de 10% tolerancia para los filtros anti-solapamiento con el fin de reducir los posibles problemas debido a la desigualdad de fases.

### 2.1.3 Proceso de medición de la potencia activa y la energía en el medidor digital de potencia (MDPE)

#### 2.1.3.1 Cálculo de la potencia activa en el ADE7756

Como ya se explicó en el capítulo 1, la potencia eléctrica está definida como la proporción de flujo de energía desde la fuente hasta la carga y se da por el producto de las “formas de onda” de la tensión y la corriente. El CI ADE7756 calcula la potencia media sobre un número entero de ciclos de línea (n) como muestra la

expresión: 
$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t) dt = VI$$
 donde, T es el período de ciclo de línea, y P

llamada potencia activa o real. Note que la potencia activa es igual a la componente **D.C.** de la señal de potencia instantánea  $p(t)$ , es decir,  $V \cdot I$ . El CI ADE7756 multiplica las señales de corriente y tensión para obtener la señal de potencia instantánea  $p(t)$ .

En resumen, la potencia activa se obtiene filtrando la señal de potencia instantánea con un filtro pasa bajo; el ADE7756 multiplica las señales de corriente y tensión y acumula los resultados en el registro AENERGY<sup>13</sup>. La figura 8 muestra la cadena del procesamiento de señales para el cálculo de potencia activa dentro del ADE7756.

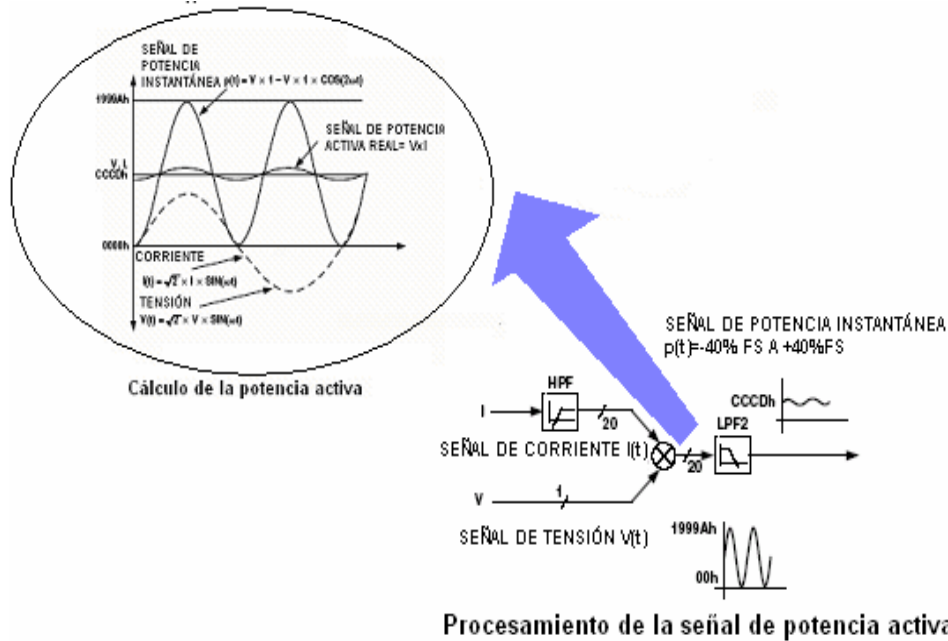
La potencia está definida como la proporción de flujo de energía y se expresa matemáticamente como  $P = \frac{dE}{dt}$ , donde P es Potencia y E es Energía.

Recíprocamente, la energía se da como la integral de la potencia  $E = \int P dt$

---

<sup>13</sup> Para más explicación del registro AENERGY consulte la hoja de datos del CI ADE7756 de Analog Devices.

**Figura 8. Proceso para el cálculo de la potencia instantánea dentro del CI ADE7756**



**Fuente: Hoja de datos ADE7756, modificada por los autores.**

### 2.1.3.2 Cálculo de la energía en el CI ADE7756

El ADE7756 logra la integración de la señal de potencia activa acumulando continuamente la señal de potencia en el registro de energía activa de 40 bits (AENERGY). Esta acumulación o suma es equivalente a la integración en el tiempo como se muestra en la ecuación 8.

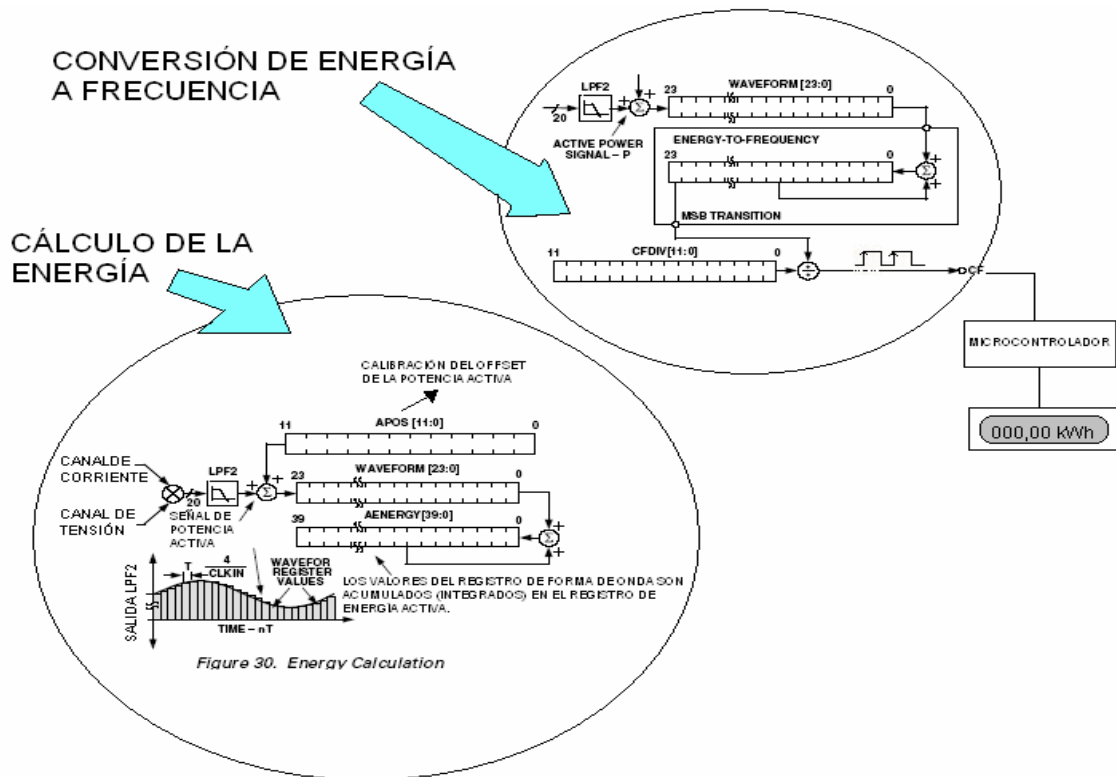
**Ecuación 8.**

$$E = \int p(t) dt = \text{Lim} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} [p(nT)](T) \right\}$$

Donde,  $n$  es el número de muestras y  $T$  es el período de muestreo para el registro de acumulación en el ADE7756 que es de  $1,1 \mu s$  ( $4/CLKIN$ ). Esta integración elimina cualquier componente sinusoidal que pueda estar en la señal de potencia activa. La figura 9 representa la manera como se realiza la integración o

acumulación, donde la señal de potencia se agrega al registro AENERGY del CI ADE7756, sumando los valores con su respectivo signo. Esto quiere decir, que los valores negativos se restarán de este registro.

**Figura 9. Acumulación en el tiempo de la señal de potencia activa**



**Fuente: Hoja de datos ADE7756, modificada por los autores.**

#### 2.1.4. Almacenamiento de datos

Para el almacenamiento de datos del medidor se usó la memoria EEPROM 24LC04B, cuya función es guardar el valor de energía, y los registros del ADE7756 que determinan su modo de operación. Como se mencionó en la sección 2.1 el operario dispone de un teclado y una pantalla para visualizar o editar los registros del integrado, realizar ajustes de ganancia, cambiar el nivel de entrada del canal de corriente, ajustar la salida de frecuencia y activar o desactivar algunas funciones del integrado. Cada vez que se realizan cambios en los registros, éstos son guardados en la memoria EEPROM, para evitar su pérdida cuando el equipo es desenergizado.

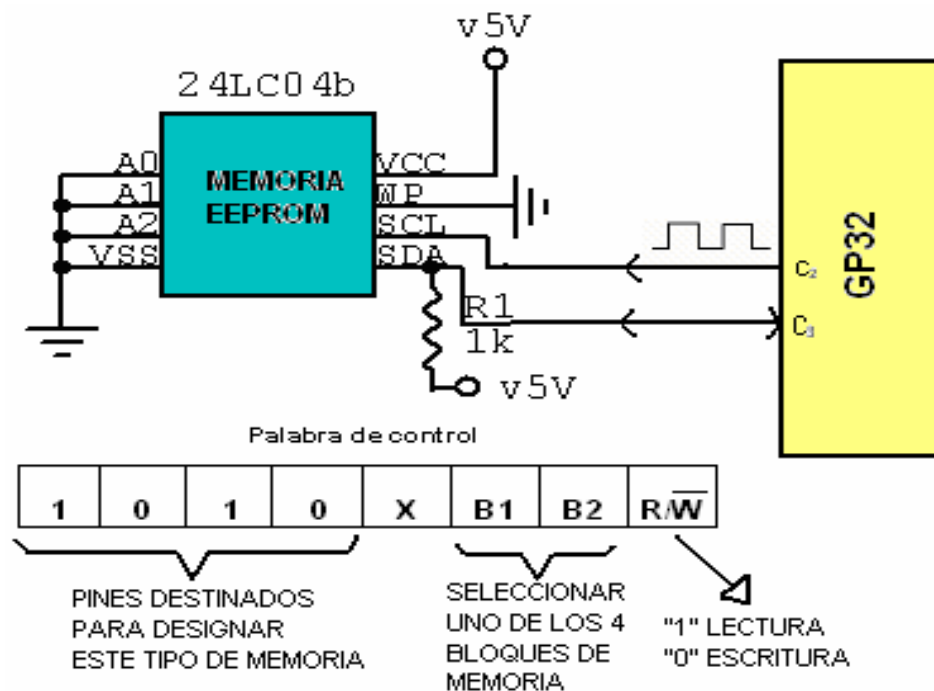
El equipo podrá recuperar todos los datos medidos en el momento en que se energice después de un corte de energía ya que se estos serán guardados en la memoria EEPROM hasta que se requiera cambiar la configuración del sistema.

La memoria EEPROM 24LC04B tiene una tensión de operación entre 2,5 V y 5 V y opera en modo esclavo, es decir, requiere de un dispositivo maestro que genere la señal de reloj y que ponga las condiciones de inicio y salida, características propias de un bus  $I^2C$ , para poder enviar y recibir datos.

La figura 10 muestra la conexión del microcontrolador con los 2 hilos del bus  $I^2C$  de la memoria EEPROM. Se usan los bits 2 y 3 del puerto C.

La energía calculada por el medidor es guardada en el siguiente formato ASCII "EEE,eeee", es decir, 3 valores enteros, la coma decimal y 4 decimales para un total de 8 bytes. Este valor de energía será guardado en las primeras 8 posiciones de memoria de la EEPROM.

**Figura 10. Conexión del Microcontrolador con la Memoria EEPROM**



**Fuente: Autores.**

**Tabla 1. Mapa de la memoria de la EEPROM**

DIRECCIÓN	REGISTRO	DIRECCIÓN	REGISTRO
00h	ENERGÍA2	4Fh	CH1OS
01h	ENERGÍA1	50h	CH2OS
02h	ENERGÍA0	51h	GAIN
03h	,	52h	APGAIN
04h	Energía3	53h	APGAIN
05h	Energía2	54h	PHCAL
06h	Energía1	55h	APOS
07h	Energía0	56h	APOS
4Bh	MODE	57h	ZXTOUT
4Ch	MODE	58h	ZXTOUT
4Dh	CFDIV	59h	SAGCYC
4Eh	CFDIV	5Ah	IRQEN
----	----	5Bh	SAGLVL

Los registros del ADE se guardaron en la EEPROM en la misma dirección que ocupan en la RAM del microcontrolador; por ejemplo, el registro IRQEN ocupa la dirección 5Ah de la RAM del microcontrolador y por lo tanto en la memoria EEPROM también ocupará la dirección 5Ah. En la tabla 1 se muestran los registros que se encuentran en cada una de las direcciones de la EEPROM, teniendo en cuenta que los registros repetidos son de tamaño palabra, es decir, de 2 bytes.

### **2.1.5. Interfaz con el usuario**

La interfaz con el usuario permite configurar el medidor y acceder a los registros del ADE7756; está compuesta de tres dispositivos, uno de entrada (teclado para el manejo de un menú); uno de salida (pantalla de cristal líquido LCD para visualizar los resultados) y otro de entrada y salida (puerto serie RS-232) para la comunicación con un PC.

### **2.1.5.1. Visualización de datos del medidor digital de potencia**

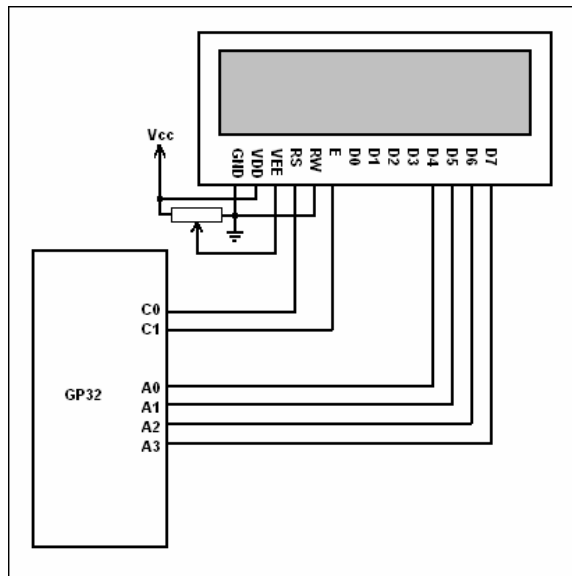
Un medidor de energía de estado sólido requiere algún tipo de visualización. Por esta razón en el diseño del equipo, se empleó una pantalla de cristal líquido que se une con el CI ADE7756 mediante un microcontrolador, con el fin de visualizar los resultados de la medición de energía en kWh (Kilovatios hora), así como también, revisar el contenido del menú para el manejo del equipo y el estado de los registros del CI ADE7756.

Las ventajas del uso de una pantalla de cristal líquido para la visualización son:

1. Bajo consumo de corriente.
2. Fácil conexión a los microprocesadores y microcontroladores.
3. Facilidad de manejo. A diferencia de los visualizadores de siete segmentos, no requiere de multiplexación para visualizar varios caracteres.
4. Buena capacidad de visualización. Muestra caracteres alfanuméricos y en código ASCII, lo que permite una óptima presentación y funcionalidad.

El tipo de módulo que se emplea en el diseño del medidor electrónico de energía es el de  $2 \times 16$ ; el cual, además de las ventajas mencionadas, tiene bajo costo, se consigue fácilmente en el mercado y su tamaño es suficiente para las aplicaciones del sistema. Para ahorrar líneas de I/O del microcontrolador se optó por realizar su control con la interfaz de 4 bits y se empleó únicamente el modo escritura. La figura 11 muestra las señales del microcontrolador usadas para manejar el LCD.

**Figura 11. Conexión del Microcontrolador con el LCD**



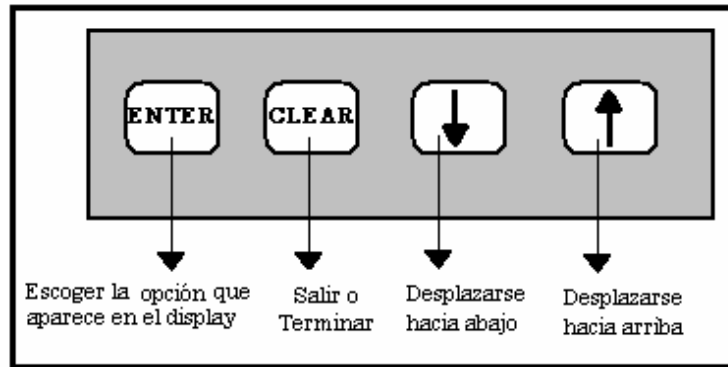
*Fuente: Autores.*

#### **2.1.5.2. Administración del medidor digital de potencia**

Esta administración se hará por medio de un teclado horizontal compuesto de 4 teclas, el cual le permitirá al usuario manipular un menú que tendrá como opciones la configuración del modo de operación del equipo, la verificación del estado de los registros del ADE7756, inicializar la calibración para realizar las pruebas pertinentes, manejar las interrupciones que desee el operador o usuario y revisar un historial que muestra las veces que han ocurrido las interrupciones que se encuentran habilitadas.

Para que el usuario tenga acceso a las instrucciones del medidor y así pueda manejar las diferentes opciones que se tienen, se utilizará un teclado simple de una fila hecho específicamente para esta aplicación, el cual tendrá 4 (cuatro) teclas para el manejo del menú que contiene las opciones para la revisión y manejo del medidor digital de potencia (MDPE). En la figura 12 se observa el diseño del teclado utilizado.

**Figura 12. Diseño del teclado**



**Fuente: Autores.**

Este teclado permite acceder pulsando la tecla “ENTER” al menú con las cuatro opciones posibles que maneja el equipo (Operación normal, calibración, registros e historial); igualmente si se desea salir de este menú se pulsa la tecla “CLEAR” para volver a mostrar en la pantalla el valor medido de energía en kWh, para desplazarse dentro del menú se cuenta con las teclas de flecha hacia arriba y hacia abajo. Las siguientes son las opciones principales que maneja el teclado:

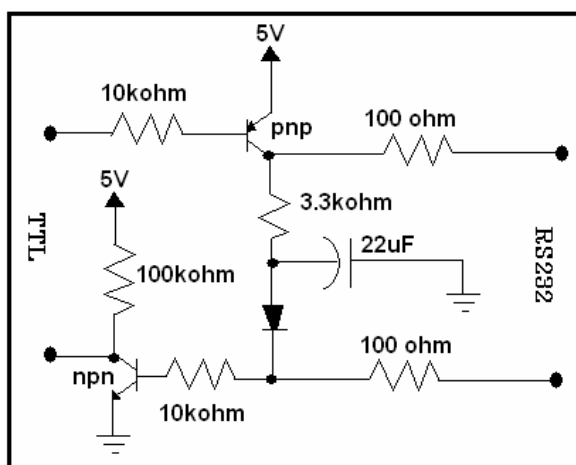
- a) Calibración (CAL):** Pulsando la tecla “ENTER” en esta opción, se ingresa al modo de operación del equipo. En este modo, pone al ADE7756 en modo calibración, en el cual se realiza el cálculo de energía durante un número entero de ciclos determinado por el registro SAGCYC. Dicho valor de energía permite la calibración de la salida de frecuencia (CF), la cual debe ser ajustada a la constante de operación del equipo (en este caso se ha elegido 30 000 imp/kWh). En los capítulos 3 y 4 se describirá en detalle el proceso, junto con las ecuaciones para el ajuste de los registros del integrado.
- b) Registros (REG):** Seleccionando registros de la misma forma que el anterior se podrá observar en que estado se encuentran todos los registros del CI ADE7756, teniendo la posibilidad de editar cualquiera de ellos cuando se trate de registros de lectura y escritura.

- c) **Historial (HIS):** Al escoger historial se podrá revisar la cantidad de ocurrencia de cada una de las interrupciones habilitadas en el registro IRQEN.
- d) **Operación normal (OPE):** Dentro del menú, se tendrá una opción para que el medidor vuelva a su estado normal y continúe mostrando en la pantalla el valor medido en Kwh , la frecuencia de la línea y el tiempo de medición.

### 2.1.5.3. Interfaz serial externa para la comunicación con un PC

Aunque la transferencia/control se realiza a través del serial SPI del CI ADE7756, el MDPE, cuenta con un puerto serial externo que provee al usuario un método adicional para comunicar al medidor a través de un bus de comunicación separado con un PC. Para este fin se utilizó el RS-232C con un conector tipo DB-9, que funciona con señales digitales, de +12V (0 lógico) y -12V (1 lógico), para la entrada y salida de datos y a la inversa en las señales de control. El estado de reposo en la entrada y salida de datos es de -12V.

**Figura 13. Circuito conversor de niveles**



**Fuente: Autores.**

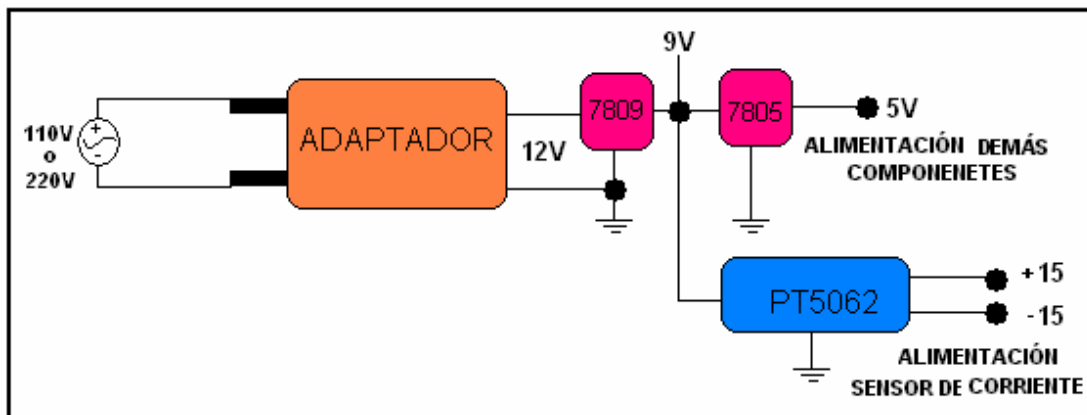
Para el manejo del puerto serial se utilizó un circuito conversor de niveles, basado en transistores, diodos, y elementos pasivos; se eligió por su sencillez, tamaño más reducido (ocupa menos espacio en la tarjeta que el integrado utilizado para este fin)

y lo más importante, su costo es mucho menor y funciona igual de bien al integrado max-232, propuesto en la nota de aplicación de *Analog Devices*. En la figura 13 se muestra su diseño.

### 2.1.6. Fuente de suministro de potencia del equipo

El suministro de potencia del MDPE será obtenido por un adaptador de a.c a d.c con una entrada máxima de 240V a.c y una salida de 12 V d.c junto a él, se encuentra dos reguladores de tensión; el 7809 que alimenta a un regulador elevador (PT5062 series<sup>10</sup>), que genera una salida dual ajustable de  $\pm 12$  V y  $\pm 15$  V, para el suministro de potencia del sensor de corriente que requiere  $\pm 15$ V y el 7805 para el suministro de potencia de las demás componentes del equipo. En la figura 14 se muestra la conexión de la fuente del equipo.

Figura 14. CI PT5062



*Fuente:Autores.*

Adicionalmente se utiliza un adaptador de tensión comercial que se puede conectar tanto para un valor de tensión de línea de 110 V como para 240 V. Para propósitos de protección de las corrientes parásitas que se encuentran en las entradas de los integrados utilizados en la construcción del equipo, se aislarán las tierras de la parte analógica y de la parte digital por medio de una ferrita sugerida en la nota de aplicación AN564 de *Analog Devices*.

<sup>10</sup> Para mayor información acerca de este integrado refiérase a Texas Instruments PT5060 series

## 2.2. MANEJO DE LAS COMPONENTES INTERNAS DEL MDPE.

En este trabajo de grado, se utilizó el Microcontrolador MC68HC908GP32<sup>11</sup>, este microcontrolador posee un conjunto de instrucciones (90 en total), que permiten realizar operaciones de multiplicación y divisiones incluyendo las tradicionales, necesarias para los propósitos del programa del medidor digital de potencia y energía (MDPE), entre otras funciones se encuentran: una unidad central de proceso (CPU), una memoria RAM, memoria ROM y los circuitos de entrada / salida necesarios para la comunicación entre los otros integrados que contiene el equipo así como para la conexión con un PC útil para la calibración del equipo.

Este microcontrolador se concibió como un dispositivo programable que puede ejecutar un sinnúmero de tareas y procesos; con circuitos lógicos, manejo de periféricos, temporizadores y estructuras de computadoras, todo programable y alojado en un solo integrado, que supervisará y controlará todo el funcionamiento del medidor digital de potencia (MDPE) de la siguiente manera:

- El puerto A está totalmente ocupado controlando el *bus* de datos del LCD y el teclado. Se usó el *nibble* bajo de este puerto como entrada para las 4 teclas, y el *nibble* alto como salida para el *bus* de la pantalla.
- Del puerto B se usan 3 *bits* y los 5 restantes quedan libres. Se empleó el *bit* 0 como entrada de la señal de SAG, y los *bits* 1 y 2 como salidas para controlar 9 LEDs.
- El puerto C también está totalmente ocupado. Los *bits* 0 y 1 controlan las señales RS y E de la pantalla respectivamente, los *bits* 2 y 3 se conectan a las señales SDA y SCL de la memoria EEPROM y el *bit* 4 maneja la señal de *reset* del ADE7756.
- El puerto D al igual que el anterior está totalmente ocupado para el manejo de las cuatro líneas del puerto serial del CI ADE7756 y las salidas de frecuencia y

---

<sup>11</sup> En el capítulo 3 se describe la programación de este. Si se desea mayor información de este integrado diríjase a la hoja de datos en [MOTOROLA.COM/SEMICONDUCTORS](http://MOTOROLA.COM/SEMICONDUCTORS).

cruce por cero del mismo integrado. Los *bits* 0, 1, 2 y 3 controlan las señales DOUT, DIN, SCLK y CS de la interfaz serial del ADE, el *bit* 3 está conectado a la salida de frecuencia CS y el *bit* 4 a la salida de cruce por cero.

- Por último el puerto E se usa como puerto serie del medidor y permite transmitir y recibir datos entre el MDPE y el PC.

### 2.3. LISTADO DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DIGITAL DE POTENCIA

Este listado contempla todas las componentes utilizadas para la construcción del equipo (MDPE). Cabe destacar que aunque los componentes en las entradas analógicas se pueden modificar, no se recomienda ya que estas han sido previamente sugeridas por los fabricantes del CI ADE7756 para garantizar el buen funcionamiento de los convertores sigma-delta

En la figura 15 se muestra la estructura básica del medidor digital de potencia y energía.

#### Lista de materiales del diseño

- **RESISTENCIAS**

Item	Cantidad	Valor( $\Omega$ )	Nombre o Tipo	Denominación en el diagrama
40	1	10	AXIAL0.3	A33
19	1	33	AXIAL0.5	A36
22	2	100	AXIAL0.3	A25,A26
12	3	1k	AXIAL0.3	A11,A13,A48
30	1	1k	AXIAL0.5	A15
31	1	1k	AXIAL0.4	A14
23	1	3.3k	AXIAL0.3	A24
13	6	10k	AXIAL0.3	A22,A28,A31,A34,A45,A66
16	1	12k	AXIAL0.3	A49
21	1	100k	AXIAL0.3	A27
17	1	220k	AXIAL0.5	A32
42	1	1M	SIP2	A3

- **CAPACITORES**

Item	Cantidad	Valor(F)	Nombre o Tipo	Denominación en el diagrama
33	2	22p	SIP2	A9,A10
37	2	27p	SIP2	A4,A5
15	4	103	RAD0.2	A41,A58,A61,A64
18	4	33n	RAD0.3	A37,A38,A39,A40
29	1	4,7u	SIP2	A16
3	8	10u	SIP2	A35,A50,A53,A54,A56 A57,A60,A63
20	1	22u	SIP2	A29
1	1	100u	SIP2	A59
41	1	220u	SIP2	A62
2	3	3000u	RB.3/.6	A51,A52,A55

- **DIODOS Y TRANSISTORES**

Item	Cantidad	Valor	Nombre o Tipo	Denominación en el diagrama
24	1	1N4148	AXIAL0.3	A23
25	1	2N2222	TO-126	A21
26	1	2N3906	TO-126	A19

- **CRISTALES**

Item	Cantidad	Valor	Nombre o Tipo	Denominación en el diagrama
34	1	3,57MHz	XTAL1	A8
38	1	10M	XTAL1	A2

- **BASES DE LOS INTEGRADOS**

Item	Cantidad	Valor	Nombre o Tipo	Denominación en el diagrama
32	1	24LC04	DIP8	A12
36	1	ADE7756	DIP20	A6
39	1	GP32	DIP40	A1
28	1	Sensor de corriente	CS25-NPA	A20

- **CONECTORES**

Item	Cantidad	Valor	Nombre o Tipo	Denominación en el diagrama
4	1		SIP4	A44
9	2		SIP6	A47,A71
10	2	Teclado	SIP5	A30,A72
35	1	LCD	LCD2x16	A7
27	1	DB9	DB9RA/M	A18

- **REGULADORES DE TENSIÓN**

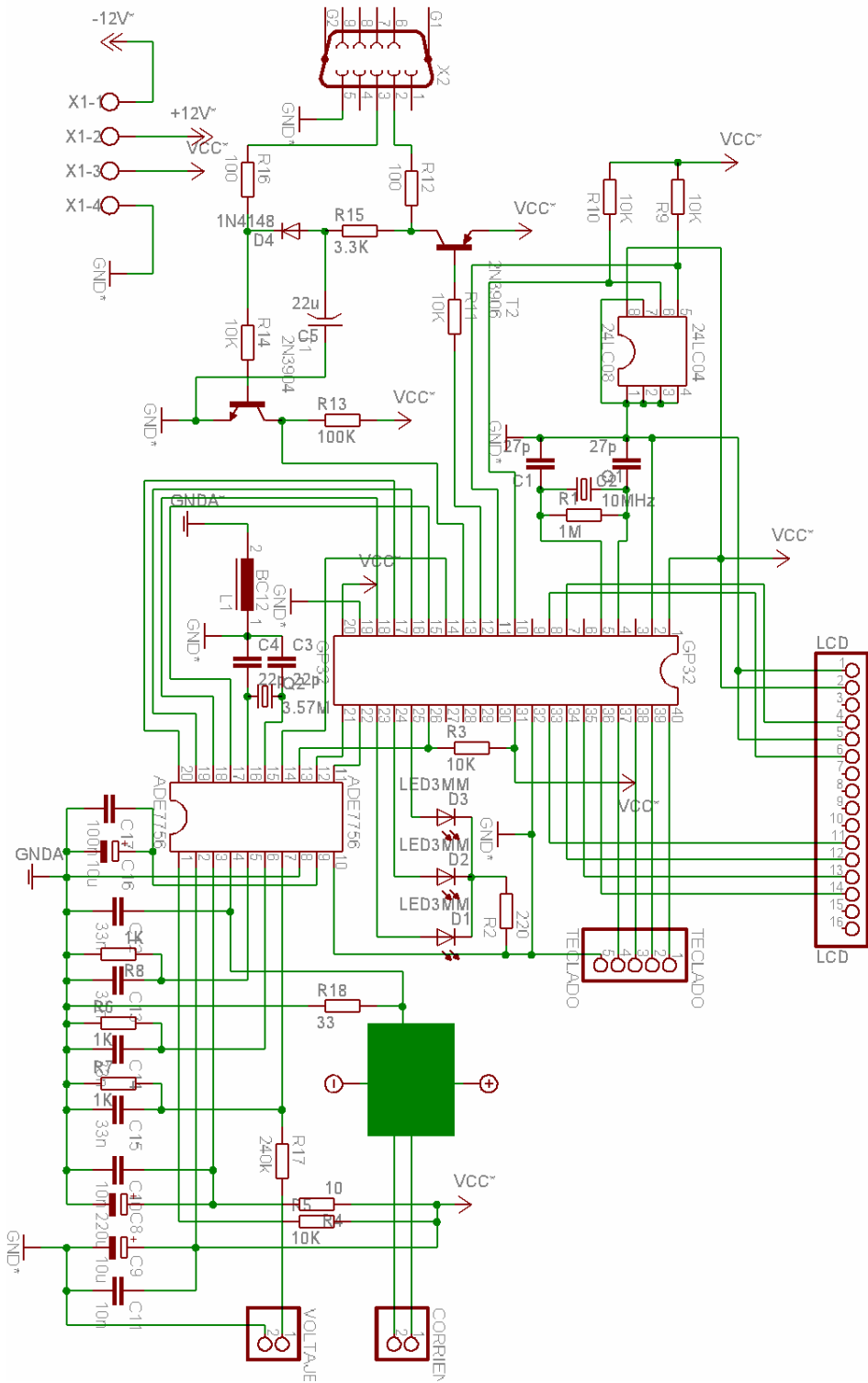
Item	Cantidad	Valor	Nombre o Tipo	Denominación en el diagrama
5	1	7805	TO-220	A43
6	1	7812	TO-220	A42

- **INTEGRADOS Y VARIOS**

Item	Cantidad	Valor	Nombre	Denominación en el diagrama
7	1		bridge1A	A74
8	1	PT5062	PT5062	A46
11	4	pulsador		A67,A68,A69,A73
14	1	ferrite	AXIAL0.5	A65
43	1	fusible		A17
	1	Puerto serie RS-232	DB9	Z1
	1	ADE7756	CI	Z2
	1	MODULO LCD	2X16	Z3
	1	EEPROM	24LC04	Z4
	1	MCU	GP32	Z5

**Número total de componentes: 73**

**Figura 15. Circuito del medidor digital de potencia (MDPE)**



**Fuente: Autores.**

### 3. OPERACIÓN DEL MEDIDOR DIGITAL DE POTENCIA (MDPE)

Este capítulo pretende dar al lector una noción general acerca de la forma como opera el medidor digital de potencia (MDPE), describiendo el protocolo de transmisión de datos entre el CI ADE7756 y el microcontrolador escogido, con el fin de entender cada uno de los procedimientos utilizados para programar el equipo. En este proceso se expondrá como se puede acceder al CI ADE7756 y a toda su funcionalidad, describiendo sus registros y definiendo la operación de lectura y escritura de los mismos; seguidamente se explicarán los diferentes modos de operación del equipo y lo que se realiza en cada uno de ellos.

Al terminar este capítulo se describirá el programa del MDPE, por medio de los diferentes diagramas de flujo como son el de la rutina general, rutina para el manejo del menú principal y rutina para el manejo de los modos de operación del equipo.

#### 3.1. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN DENTRO DEL EQUIPO

##### 3.1.1. Transmisión y recepción de datos del ADE7756

Toda la funcionalidad del ADE7756 es accesible por algunos registros internos de este integrado. Los contenidos de estos registros pueden ser actualizados o leídos usando la interfaz serial incorporada. La figura 16 ilustra el procedimiento para acceder a los registros del CI ADE7756.

Figura 16. Comunicación del CI ADE7756

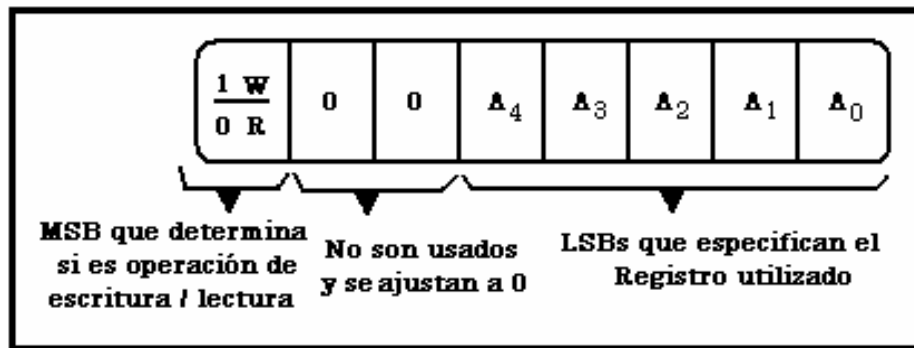


*Fuente: Autores.*

El registro de comunicaciones es un registro de 8-bits de sólo escritura, que controla la transferencia de los datos seriales entre el ADE7756 y el microcontrolador.

Todas las operaciones de transferencia de datos deben empezar con una escritura al registro de comunicaciones para determinar si la próxima operación es una lectura o una escritura y también para saber a qué registro está accediéndose. La figura 17, muestra las designaciones de bits para el registro de Comunicaciones.

**Figura 17. Designaciones de bits para el registro de comunicaciones**



*Fuente: Hoja de datos ADE7756, modificada por los autores.*

### 3.1.1.1. Interfaz serial del ADE7756

La interfaz serial del ADE7756 está compuesta de cuatro señales: /CS SCLK, DIN y DOUT. Todas las operaciones de transferencia de datos se sincronizan con la señal de reloj, con la entrada /CS se manejan múltiples dispositivos que comparten el bus serie seleccionando la manera como se va a trabajar el integrado; es decir, si se quieren introducir datos por la entrada lógica DIN al CI ADE7756 se hará en el borde descendiente del /CS y para adquirir datos del integrado con la salida lógica DOUT se hará en el borde creciente del /CS, adicionalmente en el borde descendiente de /CS también se reinicializa la interfaz serial para poner al ADE7756 nuevamente en el modo de comunicaciones.

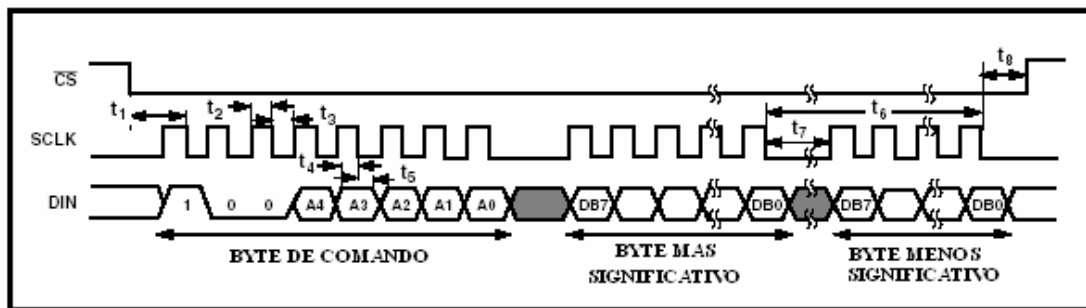
Es importante destacar que la entrada /CS debe manejarse con transferencia de datos enteros, es decir que una vez iniciada la transferencia se deberá mantener en

el nivel bajo hasta que pase el último *bit* menos significativo, solo ahí volverá a ponerse en nivel alto el /CS.

#### a). Operación de escritura serial

La secuencia de escritura serial sucede cuando el /CS esta en 0 y el MSB de este *byte* transferido es un 1, los LSBs restantes, contienen la dirección del registro a ser escrito, teniendo un tiempo finito para ser leído antes que pase a otro, aunque este puede empezar a transferirse mientras el *byte* anterior está en proceso, no debe terminar hasta por lo menos 4  $\mu$ s después del final del anterior. El ADE7756 comienza a cambiar los datos del registro en el siguiente borde descendiente del SCLK, los *bits* restantes del registro de datos se cambian en la siguiente caída del SCLK (ver figura 18).

Figura 18. Operación de escritura en el puerto serial del ADE7756



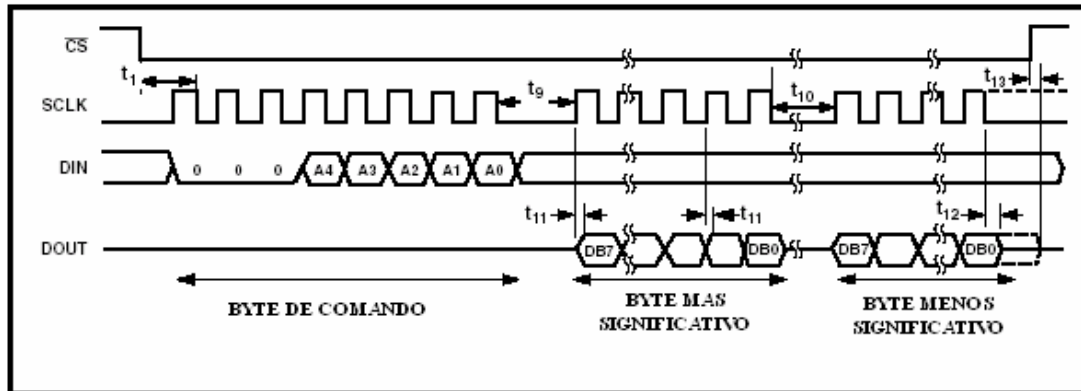
Fuente: Hoja de datos ADE7756, modificada por los autores.

#### b). Operación de lectura serial

Al igual que la operación de lectura, primero se entra al registro de comunicaciones donde la lectura del MSB del *byte* transferido es un 0 y los LSBs restantes contienen las direcciones del registro a ser leído, teniendo en cuenta que si anteriormente se ha realizado una operación de escritura, debe pasar por lo menos 4  $\mu$ s del final, de lo contrario, el último *byte* de la operación de escritura puede perderse.

En la figura 19 se muestran los tiempos para inicializar cualquiera de estas dos operaciones.

**Figura 19. Diagrama de tiempo de lectura de la interfaz serial**



*Fuente: Hoja de datos ADE7756, modificada por los autores.*

### 3.1.2. Registros del CI ADE7756

La operación del medidor digital de potencia (MDPE), depende en gran medida del manejo de los registros que contiene el CI ADE7756, ya que estos son los que determinan toda la funcionalidad del mismo entre las que se destacan, el ajuste de la relación de fase de las entradas de corriente y tensión, *offset* y ganancia de las mismas, así como activar o desactivar filtros internos, salida frecuencia, conversores A/D de dichas entradas, detección del SAG de línea, conversión de la temperatura y corto-circuitar las entradas de corriente y tensión entre otras. El microcontrolador accede a estos registros, leyendo o actualizando sus contenidos por medio de la interfaz serial explicada anteriormente. Como ya se dijo en el capítulo anterior, este integrado posee 18 registros de datos, 6 de sólo lectura y 12 de lectura y escritura, que pueden ser leídos o modificados mediante el puerto serial del mismo, explicado en el numeral anterior; en este trabajo de grado sólo se describen aquellos que fueron utilizados, entre los que se encuentran:

- **Registro AENERGY:** Se encuentra localizado en la dirección 02h, es un registro de sólo lectura de 40 *bits* que contiene el valor hexagesimal acumulativo de la potencia activa que se está midiendo, puede almacenar por un mínimo de

6 segundos el valor de la energía activa acumulada antes de que se llene. En el equipo, este registro se refresca o reinicia cada segundo con el fin de evitar cualquier pérdida de información en el caso de que se llene; también es utilizado para sacar muestras de energía que se utilizan en el proceso de calibración del equipo. La medición de potencia es la descrita en el capítulo 2.

- **Registros STATUS e IRQEN:** Se ubican en las direcciones 04h y 10h respectivamente, cada uno de ellos es de 8 *bits*, el primero (STATUS) es de sólo lectura y el segundo (IRQEN) es de lectura y escritura.

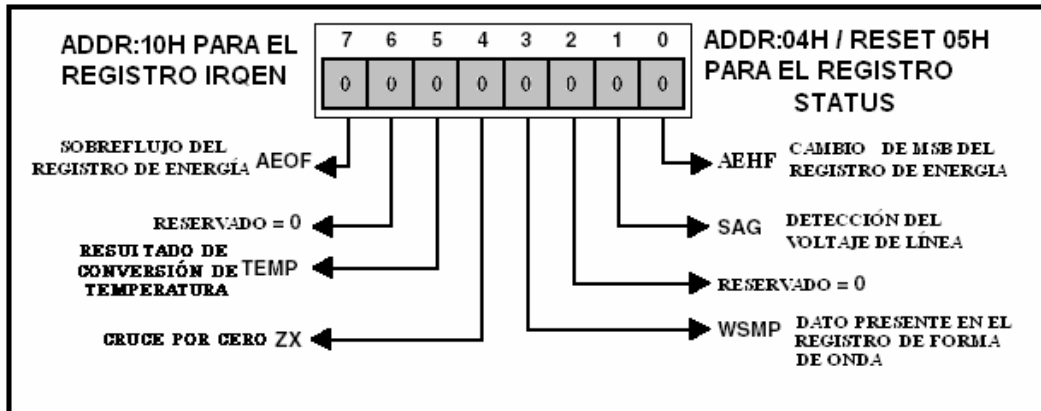
El registro STATUS permite determinar el estado de las interrupciones que contiene este integrado, con él se puede determinar la naturaleza de la interrupción que este ocurriendo, las interrupciones se manejan con este registro y el de habilitación de la interrupción (IRQEN), que puede desactivar cualquiera de las interrupciones que maneja este integrado ajustando a 0 la que se quiera modificar.

Cuando un evento de interrupción ocurre se pone en alto registro de estado y se activa el *pin* IRQ en bajo, indicándole al microcontrolador que ha ocurrido una interrupción y que esta se encuentra habilitada, con el fin de atenderla haciendo la correspondiente tarea según sea ella; en el equipo se manejan tres tipos de interrupciones que son: la caída de tensión de línea denominada SAG, la no ocurrencia de cruce por cero ZX y la ausencia de alimentación.

Para determinar la fuente de la interrupción, el microcontrolador, debe realizar una lectura del registro de estado con reinicialización (*reset*) (RSTATUS). Esto se logra llevando a cabo una lectura desde la dirección 05h del CI ADE7756. La salida IRQ irá a lógica alta en la terminación del comando de lectura del registro de estado de interrupción y no cambiara hasta que el evento de interrupción termine, con el fin de no omitir cualquier interrupción que se encuentre habilitada.

La figura 20, muestra las diferentes interrupciones que maneja el CI ADE7756 y su ubicación en el Registro de Estado de la interrupción, así como también el registro de habilitación (IRQEN) de las interrupciones que es de la misma forma.

**Figura 20. Registros de STATUS e IRQEN del CI ADE7756**



*Fuente: Hoja de datos ADE7756, modificada por los autores.*

- Registro de modo:** Es un registro de lectura y escritura que permite activar o desactivar varias funciones del ADE7756, se maneja con el microcontrolador, permitiendo verificar el estado del mismo y realizando cambios a las diferentes funciones que se encuentran dentro de él, desactivar filtros internos o los conversores A/D, funciones del integrado como son la salida de frecuencia CF, la detección del umbral de la tensión de línea SAG, reinicializar el programa del integrado, corto circuitar las entradas de los canales de corriente y tensión, seleccionar la rata de actualización del registro de forma de onda y de la fuente de muestreo de datos, entre otras que se describen en la hoja de datos del ADE7756.
- CFDIV:** Este es el registro divisor de frecuencia de 12 *bits* ubicado en la dirección 07h que puede ser de lectura y escritura, éste permite la conversión de energía mediante el conteo de pulsos que salen por el *pin* CF, obteniendo un equivalente acumulativo de la potencia activa para dar el resultado en kWh. Esto se hace mediante la generación de un pulso de salida cada vez que hay una transición del MSB del registro CFDIV que es proporcional a la potencia activa

que se está midiendo bajo condiciones de carga estable. Este registro fue utilizado para fines de calibración del medidor y para determinar el valor en kWh de la carga que esté conectada.

- **APGAIN:** Este es un registro de 12 *bits* de lectura y escritura ubicado en la dirección 0Bh; escribiendo a él se podrá calibrar el valor de la potencia activa medida, posee un rango de calibración de  $\pm 50\%$  de la potencia activa a escala completa nominal con una resolución del 0,0244% sobre el LSB. Para ajustar la ganancia del ADC se utiliza un multiplicador que permite disminuir el porcentaje de error del valor de potencia activa medido por el equipo escribiéndolo en el registro de APGAIN.
- **ZXOUT:** Este es un registro de 12 *bits* de lectura y escritura ubicado en la dirección 0Eh y determina si al cabo de un tiempo programado por el usuario se detecta un cruce por cero en la entrada de tensión del equipo, si esto no ocurre se activa la solicitud de interrupción por el *pin* IRQ. La detección de cruce es una señal externa útil en el proceso de calibración del equipo, además de que puede ser utilizada para comenzar la medición de la temperatura en el ADE7756.
- **SAGCYC Y SAGLVL:** Estos son dos registros de 8 *bits* ubicados en la direcciones 0fh y 11h respectivamente que pueden ser de lectura y escritura. El primero especifica el número de ciclos de línea del SAG en la señal de tensión del medidor, el otro determina el nivel de señal pico en el *pin* SAG de la entrada de tensión. Estos dos registros están íntimamente ligados, ya que si ocurre una caída de tensión o SAGLVL está debe durar mínimo los ciclos programados o SAGCYC determinados. Estos dos registros son útiles en el proceso de calibración, además de que cuando uno o los dos ocurren será detectada una interrupción en el equipo.

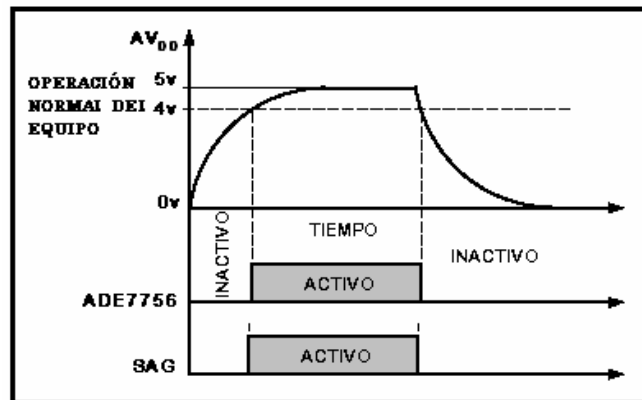
Otros registros del ADE7756 se encuentran especificados en la hoja de datos de este integrado.

### 3.1.3. Monitorización del suministro de Potencia

El equipo permite la monitorización continua del suministro de potencia analógica (AVDD), si este es menor de 4 V +/- 5%, el ADE7756 se inactiva, es decir, ninguna energía se acumulará y no se tendrá en cuenta las señales de entrada a los canales de corriente y tensión. Esto sirve para asegurar la correcta operación del dispositivo MDPE, en una falta de suministro. El ADE7756 contiene un supervisor del suministro de potencia con histéresis y filtrado incorporados, ofreciendo un alto grado de inmunidad a la falsa activación (disparo) debida a los suministros ruidosos.

En la figura 21 se muestra cómo el nivel de disparo es nominalmente ajustado a 4 V, la tolerancia en este nivel es aproximadamente +/-5%. El *pin* SAG sirve como supervisor del suministro de potencia con la ayuda del microcontrolador. Cuando el *pin* SAG se pone en lógica baja, el microcontrolador reinicializa el ADE7756 y guarda los datos hasta el momento en que el suministro de potencia sea tal que la onda a AVDD no exceda los 5 V +/- 5%.

Figura 21. Supervisor de potencia



Fuente: Hoja de datos ADE7756, modificada por los autores.

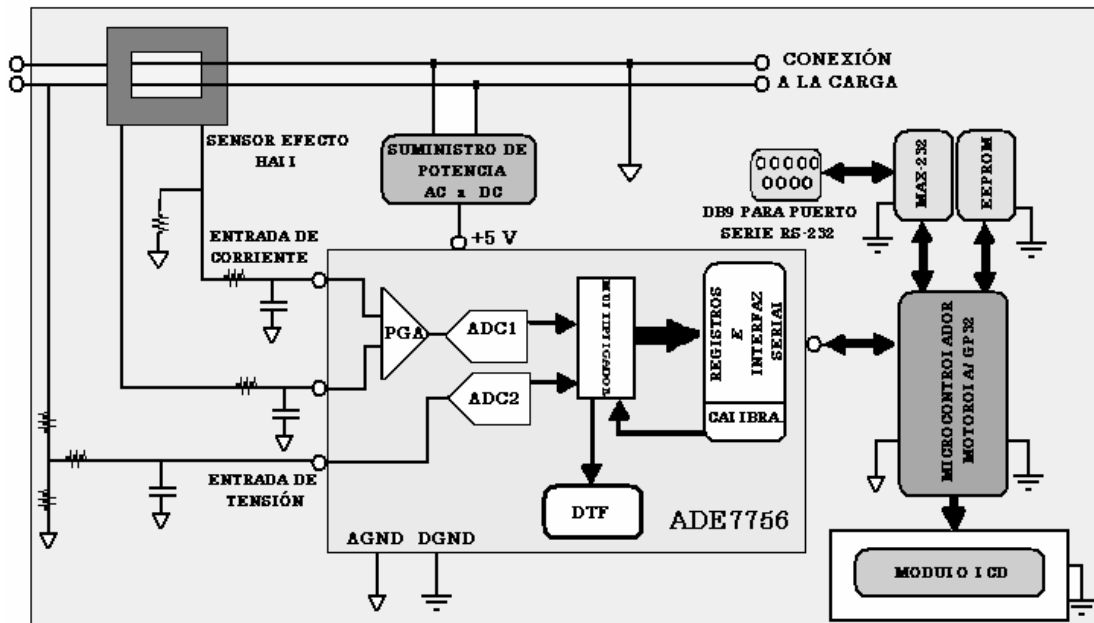
### 3.2. MODOS DE OPERACIÓN DEL MEDIDOR DIGITAL DE POTENCIA (MDPE)

En la figura 22 se representa el esquema funcional del equipo, partiendo desde la conexión de una carga a la línea monofásica de 110 V que pasa a través de un

sensor de corriente y una red reductora con el fin de disminuir la tensión a 1 V, que es el límite máximo del circuito integrado ADE7756 utilizado para realizar la medición de potencia. Con la interfaz serial que posee el CI ADE7756, se transmiten y reciben datos, entre él y el microcontrolador, que maneja otros periféricos como son el módulo LCD, la memoria EEPROM y el puerto serie RS-232, previamente explicados en el capítulo 2.

El equipo posee cinco (5) modos de operación que determinan su funcionamiento los cuales se describen a continuación.

**Figura 22. Esquema funcional del medidor digital de potencia**



*Fuente: Autores.*

### 3.2.1. Modo inicio

En el modo inicio se enciende el equipo y comienza la rutina de inicialización cargando los coeficientes de la EEPROM en los registros del ADE7756. Estos datos se transfieren a través del microcontrolador. Ver el mapa de la memoria EEPROM (Tabla 1, Capítulo 2) para las direcciones de varios registros.

Adicionalmente, se mide en el microcontrolador la energía previamente almacenada cuando se ha apagado el equipo que se encuentra en la EEPROM y es colocada en la RAM del microcontrolador. La culminación de esta rutina será cuando el sistema empieza a medir la potencia normalmente.

### **3.2.2. Modo de operación normal**

En este modo el microcontrolador lee continuamente la salida de frecuencia del ADE7756 (CF), y cuenta los pulsos de salida y actualiza el acumulado de energía en valores de kWh guardándolos en su RAM.

El microcontrolador monitoriza los *pines* IRQ y SAG con el fin de verificar si durante la operación normal, ocurren cambios en los niveles de tensión (SAG) o una interrupción por cualquier evento que encuentre habilitado, para ejecutar la rutina adecuada y así colocar al equipo en modo apagado.

### **3.2.3. Modo de calibración**

Para operar en este modo, el MPDE debe estar conectado al PC a través del puerto serie, se debe ejecutar el programa de calibración desarrollado en **Visual Basic** y se debe ingresar al modo calibración de la tarjeta por medio del menú principal. Cuando se calibra el ADE7756 el primer paso es calibrar la salida de frecuencia CF para ajustar la constante del medidor. Para calibrar dicha frecuencia, se debe conocer el valor de la energía activa medida en un número determinado de ciclos, para una carga de prueba definida. Una forma conveniente es poner al ADE7756 en modo calibración (encendiendo el *bit* 7 del registro MODE); en este modo, el registro ENERGY acumula energía durante un número entero de semiciclos dado por el registro SAGCYC. Debido a las pequeñas variaciones en la tensión y corriente de calibración, se debe calcular el promedio del registro ENERGY tomando varias medidas para ello. Una vez se conozca el valor de la energía activa, se hacen los siguientes cálculos para obtener los valores de los registros CFDIV y APGAIN que son los encargados de ajustar el valor de salida de frecuencia a la constante del medidor:

Con el valor promedio del registro ENERGY, se calcula el valor promedio del LPF2

### Ecuación 9

$$promedioLPF2 = \frac{ENERGY * 8 * f}{SAGCYC * CLKIN} \quad 12$$

Donde SAGCYC = 255 (escogiendo el máximo número de ciclos) y CLKIN = 3579545 (correspondiente a la frecuencia del cristal). Si se elige una constante de 30 000 imp/kWh (seleccionada de acuerdo a pruebas realizadas anteriormente para determinar un valor que cupiera dentro del registro CFDIV), con una carga de 1kW se debe obtener una frecuencia en CF:

### Ecuación 10

$$CF = \frac{30000imp / kWh}{60min * 60s} = \frac{30000}{3600} = 8,333Hz$$

Si se asume que el medidor se calibra con una tensión de 120V y 4A, con un FP= 1, la carga calculada es de 0,48kW. De manera que la frecuencia esperada para esta carga de calibración esta dada por:  $8,333333Hz * 0.48 = 4Hz$ .

Luego se calcula la frecuencia en CF cuando CFDIV y APGAIN son iguales a 0, mediante la fórmula:

### Ecuación 11

$$CF_0 = \frac{promedioLPF2 * CLKIN}{2^{25}}$$

Con este valor, y el valor de CF se calcula CFDIV:

### Ecuación 12

$$CFDIV = \frac{CF_0}{CF}$$

Debe notarse que CFDIV es un número entero y por lo tanto se introduce un error por la pérdida de decimales en la división. Dicho error se corrige con el registro APGAIN, el cual permite un ajuste fino de 0,0244%/LSB

---

<sup>12</sup> Las ecuaciones 9, 10, 11 y 12 son tomadas de la hoja de datos del ADE7756.

El programa de calibración del PC se encarga de tomar todas las muestras del registro ENERGY y luego promediarlas. Realiza todos los cálculos necesarios para obtener los valores de CFDIV y APGAIN, y finalmente carga dichos valores en los registros del ADE.

#### **3.2.4. Modo apagado**

Cuando el microcontrolador detecta una caída de tensión a través del *pin* SAG, se ejecuta la rutina de apagado. En este modo de operación la fuente de alimentación debe garantizar que se mantenga la tensión de salida durante el tiempo necesario para almacenar en la EEPROM el valor de energía acumulada en kWh.

Cuando se enciende nuevamente el equipo, se restauran los datos en los registros del ADE7756 junto con la energía acumulada, leída de los datos anteriores. Para finalizar este modo de operación, se cargan todos los coeficientes de calibración y se retorna al modo normal.

#### **3.2.5. Modo de control de suministro de potencia**

Una función en el ADE7756 permite al sistema monitorizar un SAG<sup>13</sup> en la tensión de línea, este modo tiene dos parámetros medidos que determinan su condición. El primer parámetro medido (SAGLVL), es un umbral que el voltaje de línea debe exceder cada ciclo, para asegurar que el medidor no tome lecturas si la tensión de línea es inferior a éste umbral. El segundo parámetro medido (SAGCYC), cuenta el número de medios ciclos para que la tensión de línea no exceda el umbral ajustado por el registro del SAGLVL. Si estas condiciones se reúnen, ocurrirá una interrupción, procurando que se guarde la energía acumulada durante este modo de operación y proporcionando que el suministro de 5 V (al sistema) no se pierda. En este modo el equipo garantiza que los resultados medidos antes del corte de energía no se pierdan y puedan recuperarse nuevamente cuando se energice.

---

<sup>13</sup> Para mayor información del SAG remítase a la hoja de datos del CI ADE7756 que se encuentra en el anexo A.

### 3.3. PROGRAMA DEL MEDIDOR DIGITAL DE POTENCIA (MDPE).

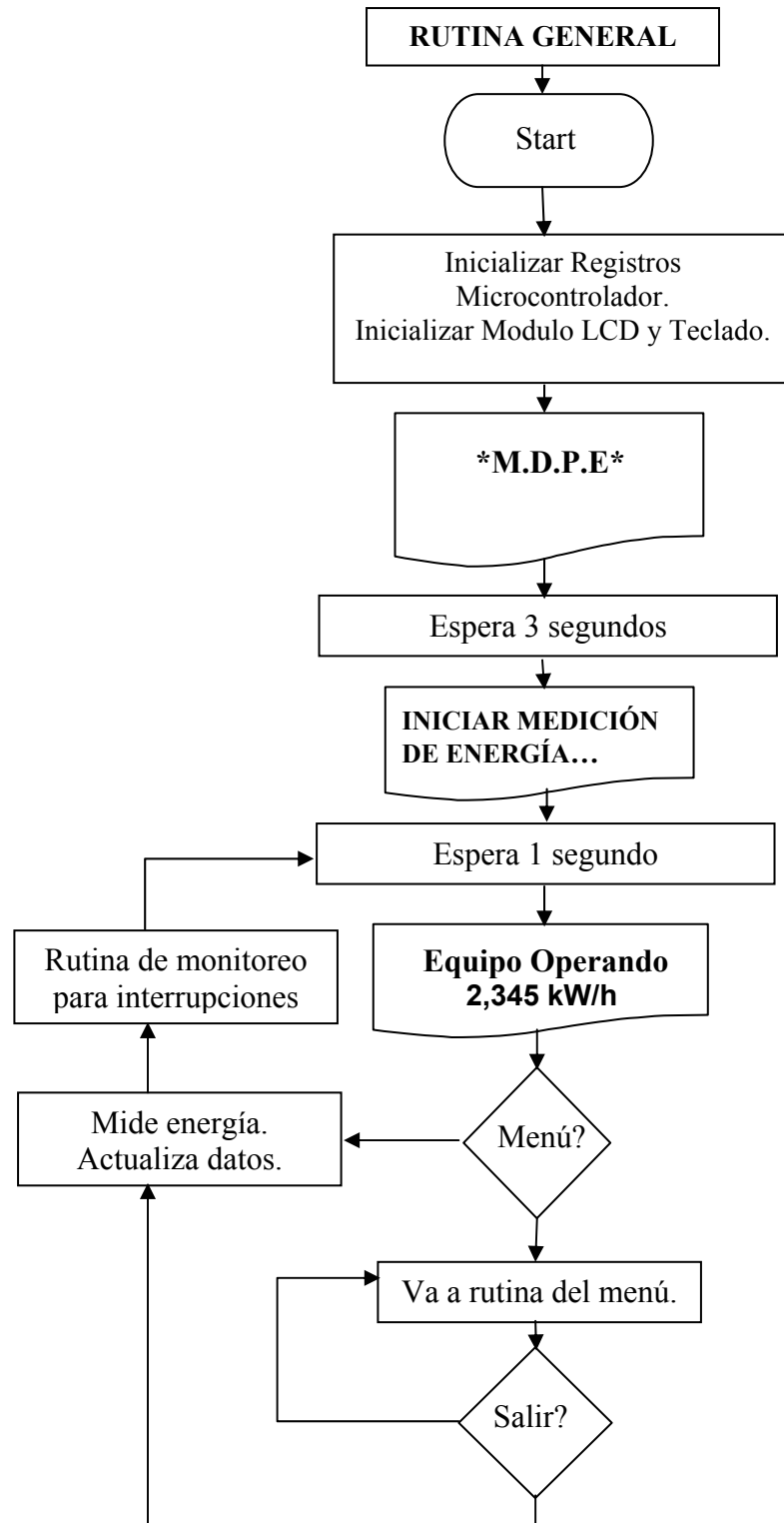
#### 3.3.1. Rutina general

Esta rutina contempla el diseño general del programa implementado en el medidor digital de potencia. El programa comienza con la inicialización de los registros del microcontrolador, que es el encargado del control del dispositivo. Su función es contar ciclos de la salida CF del ADE7756. Este dato se multiplica dentro del microcontrolador para ser convertidos a kWh, los resultados que se obtienen se envían al módulo LCD.

Dentro de esta rutina, el microcontrolador configura sus puertos periféricos, *timers*, interrupciones, contadores y puerto serie. Inmediatamente el microcontrolador envía al módulo LCD un mensaje: “**MDPE**”; espera 3 segundos e imprime otro mensaje “**INICIAR MEDICIÓN DE ENERGÍA...**”, indicando que el registro de energía del CI ADE7756 está activado, vuelve y espera 1 segundo y muestra el consumo de energía de la carga a la cual ha sido conectado. El resultado se actualiza cada vez que se detectan los pulsos correspondientes a 0,1 Wh, o sea cada 3 pulsos, ya que el equipo ha sido calibrado para 30 000 imp/kWh, con el fin de obtener un valor de energía con tres enteros y cuatro decimales. En el capítulo 4 se describe el proceso de calibración del equipo.

En la rutina general se encuentra la rutina de menú, que maneja los modos de operación descritos anteriormente, además muestra el estado de los registros del CI ADE7756 y permite cambiar la configuración del equipo así como habilitar o deshabilitar las interrupciones (ver numeral de descripción de los registros del ADE7756). Además se podrá manejar un historial de ocurrencia de las interrupciones que se encuentren habilitadas y entrar al modo de calibración para la realización de pruebas donde se verificará la fiabilidad del equipo. Al salir de cualquier subrutina dentro de la rutina general, el equipo continuará mostrando el consumo de energía de la carga en valores de kWh. En la figura 23 se muestra el diagrama de bloques que describe la rutina general de la programación del medidor digital de potencia.

Figura 23. Diagrama de bloques de la rutina general



Fuente: Autores.

### 3.3.2. Rutina del menú.

Esta rutina maneja cuatro (4) opciones posibles que permiten acceder a algunos de los modos de operación del equipo; en la figura 24 se muestra el diagrama bloques general utilizado para el manejo de la rutina menú.

El sistema entra al programa que maneja el menú y permite seleccionar una de las siguientes opciones que se describen a continuación:

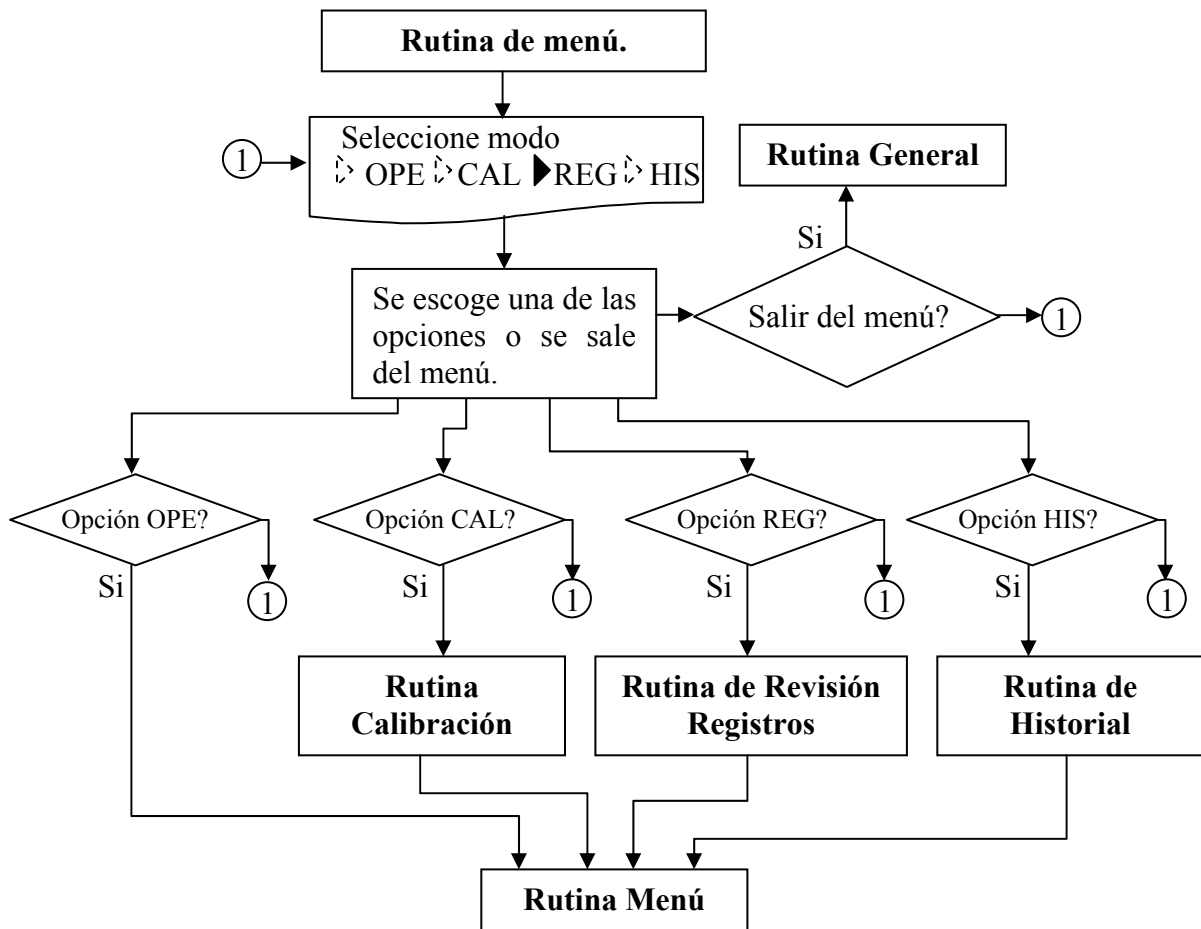
- a) Si se selecciona el modo de operación normal el equipo vuelve a su estado original, mostrando el resultado de la medición de energía en el módulo LCD (ver figura 24).
- b) Si se escoge el modo de calibración, el equipo inmediatamente dejará de medir la energía y se dispondrá a habilitar el puerto serie para la conexión con el PC donde se harán los cálculos respectivos en el proceso de calibración para posteriormente ser introducidos nuevamente en el medidor<sup>14</sup> (ver figura 24).
- c) En la opción Registro, el equipo muestra el estado de los registros del CI ADE7756 (ver figura 24) y permite editar cualquier registro del ADE7756 si este es de lectura y de escritura, permitiendo al operador, habilitar o deshabilitar varias de las funciones del ADE7756. Si el operador selecciona una de estos dos, entrará a la rutina respectiva que la maneja. En las figuras 24a, 24b, 24c y 24d, se describe detalladamente el procedimiento para el ingreso de los registros del ADE7756).
- d) Si se escoge la opción historial, el operador puede revisar el número de ocurrencia de las interrupciones que se encuentren habilitadas en la rutina de monitorización de interrupciones. En esta opción, aparece el listado de las interrupciones dichas anteriormente con su respectiva cantidad de ocurrencia. En la figura 25 se encuentra el diagrama de bloques que representa el manejo del historial de interrupciones dentro el programa.

---

<sup>14</sup> El proceso de calibración se explica detalladamente en el capítulo 4 de este texto.

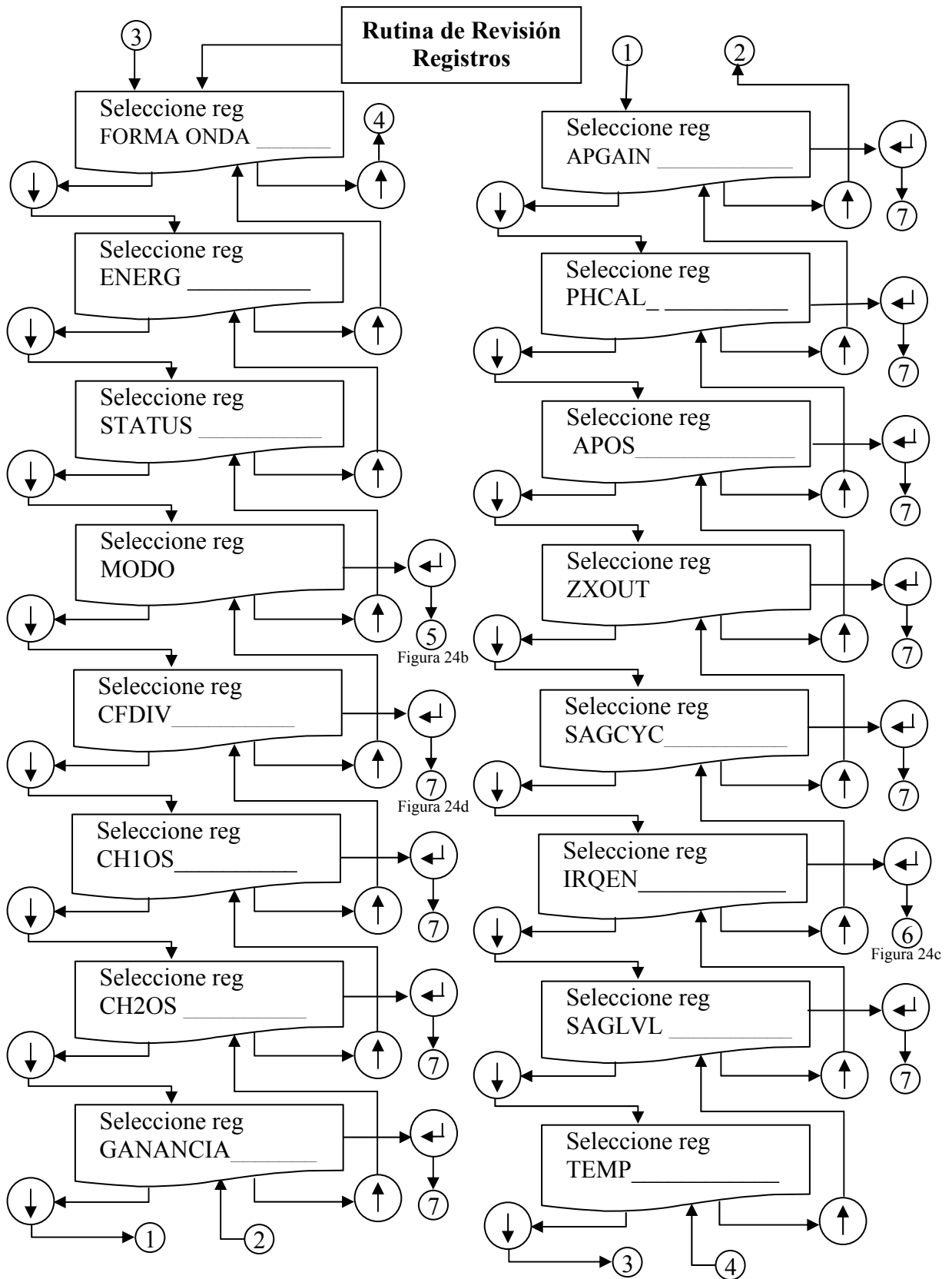
Para salir de la Rutina de menú se pulsará la tecla “Clear” y el equipo volverá al menú, pulsando *clear* nuevamente, se retornará al modo de operación normal

**Figura 24. Rutina general del manejo del menú**



**Fuente: Autores.**

Figura 24a. Rutina de revisión de registros: General



**Figura 24b. Rutina de revisión de registros: Registro modo**

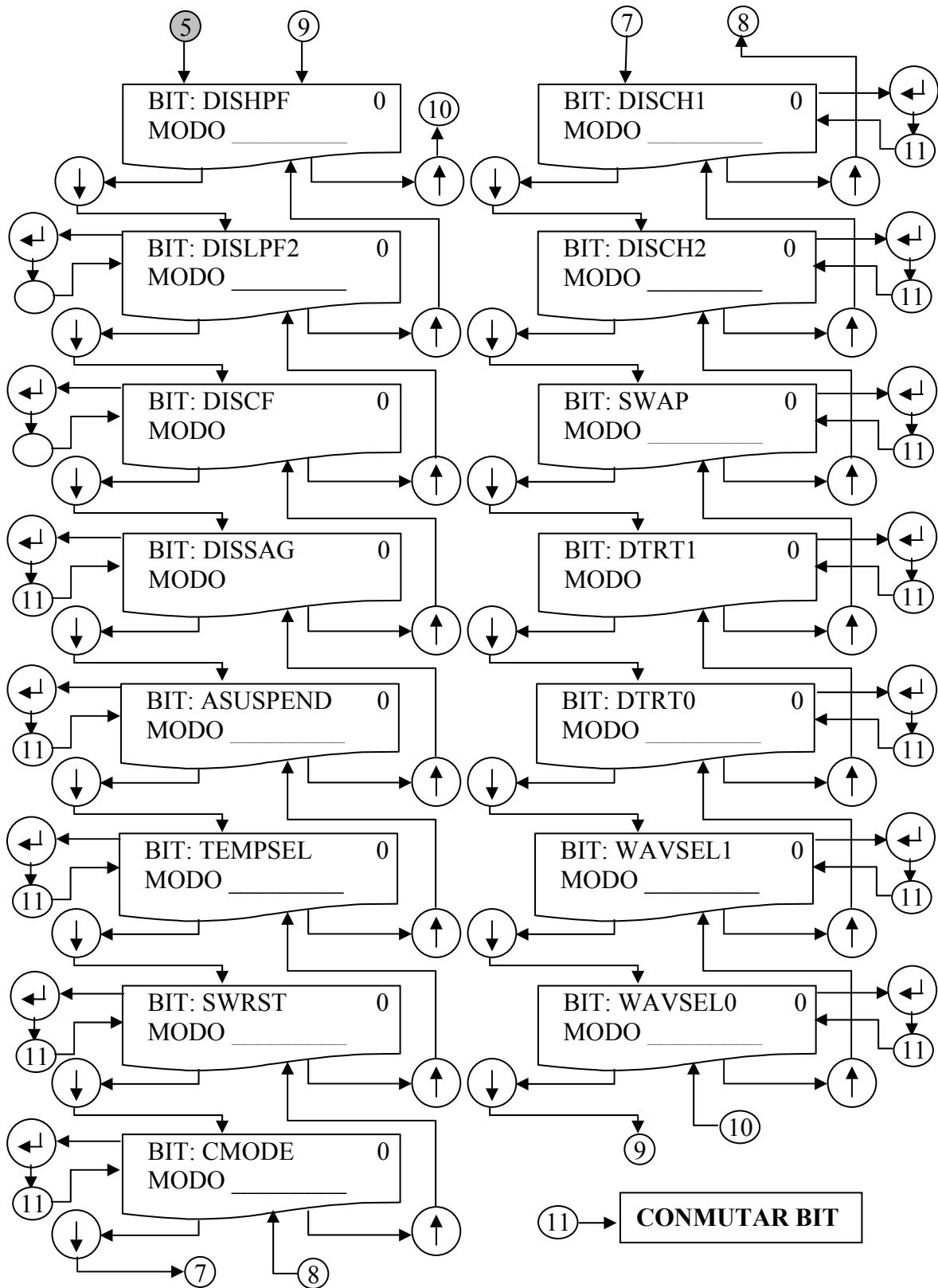
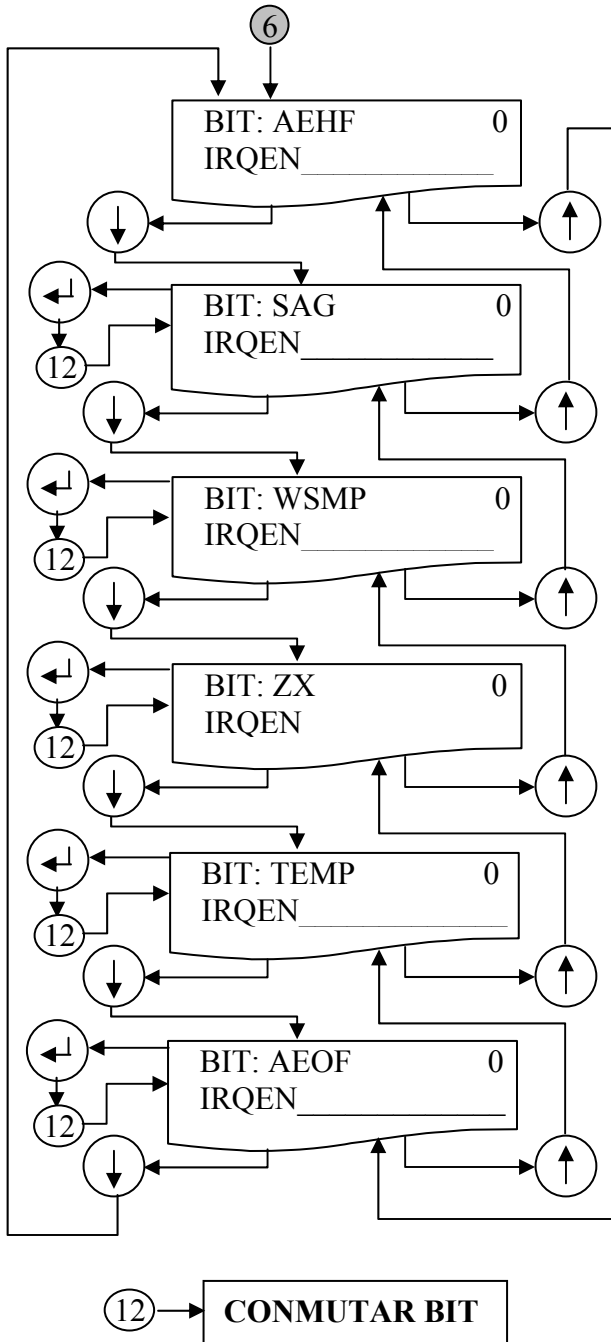


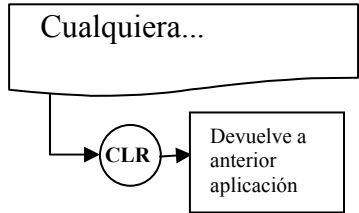
Figura 24c. Rutina de revisión de registros: Registro IRQEN



**Consideraciones Generales sobre la figura 20:**

- ⬇ = *Opción:* Si se oprime tecla “Flecha abajo” del medidor digital.
- ⬆ = *Opción:* Si se oprime tecla “Flecha arriba” del medidor digital.
- ⬅ = *Opción:* Si se oprime tecla “Enter” del medidor digital.

**Nota:** Aunque se omitió en todos los diagramas por consideraciones de espacio, la opción CLEAR está también habilitada. Si en vez de “Flecha arriba”, “Flecha abajo” o “Enter” se oprime “Clear”, se cierra la aplicación actual y se devuelve a la anterior.



Fuente: Autores.

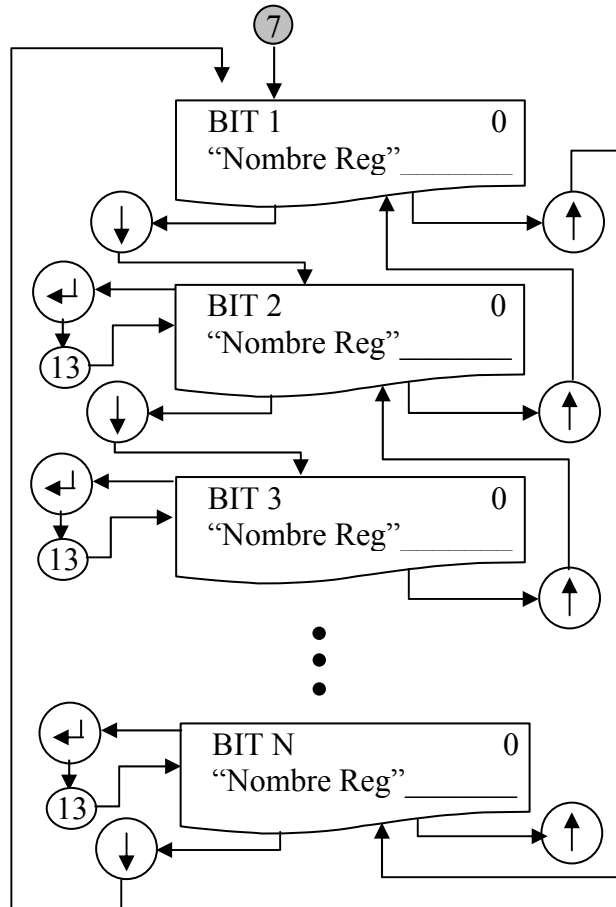
**Figura 24d. Rutina de revisión de registros**

**Consideraciones generales  
sobre la figura 24 (cont)**

En la figura 24a, los registros que son también de escritura, tienen habilitada la opción “ENTER”, para poder configurar sus bits.

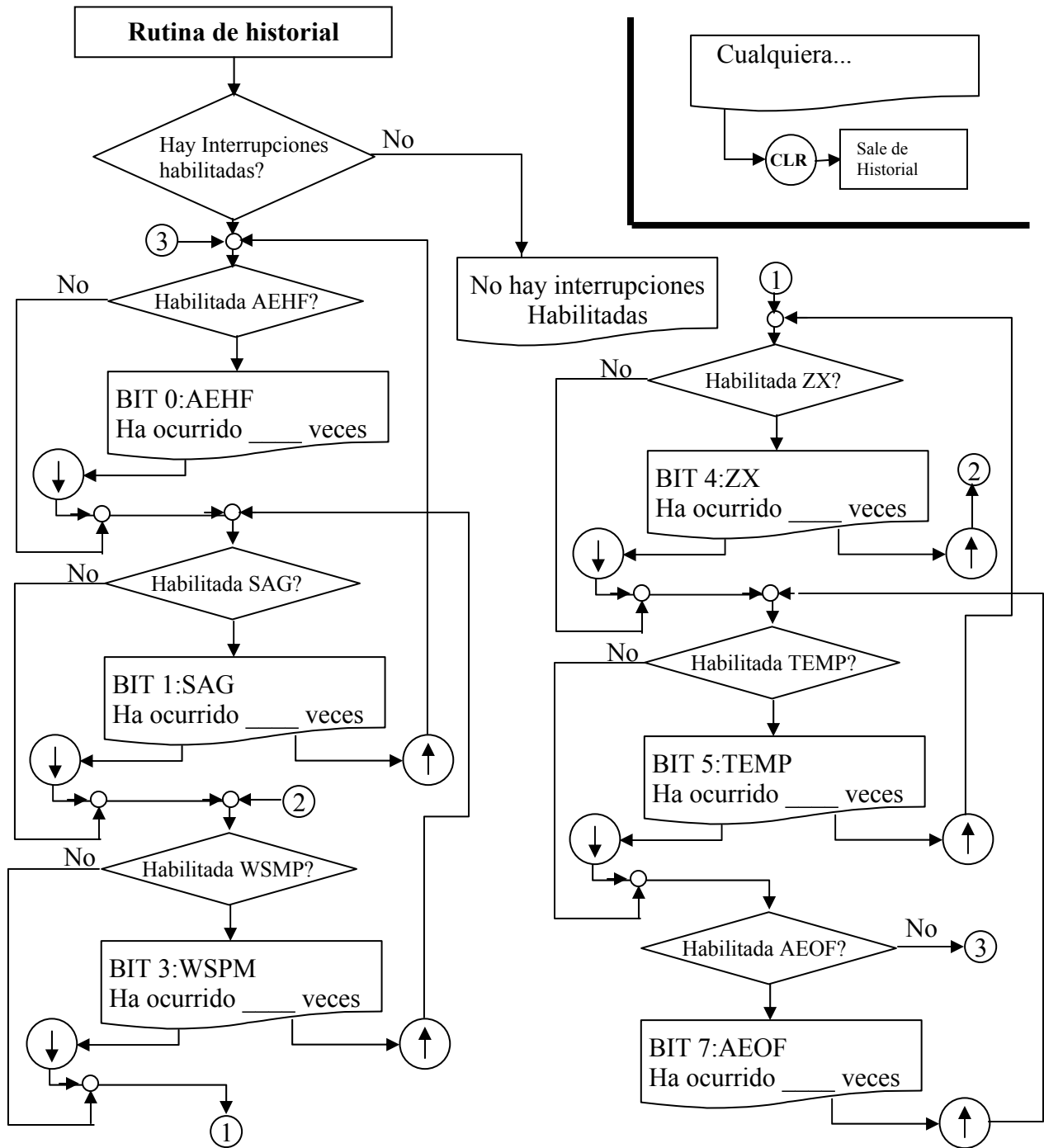
En el caso de oprimir ENTER, en la figura 24b y 24c, se muestra el diagrama de flujo de dos de los registros más importantes de configurar: el registro MODO y el registro IRQEN. Para los otros registros, el comportamiento es similar al de estas figuras, solo que con el nombre de los bits propios de cada uno.

⑬ → **CONMUTAR BIT**



**Fuente: Autores.**

Figura 25. Rutina de Historial



Fuente: Autores.

### **3.3.2.1. Rutina del manejo del registro de estado de las interrupciones.**

Esta rutina continuamente revisa por interrupción el estado del registro de estado de las interrupciones, con el fin de que el microcontrolador avise al equipo que un evento de interrupción ha ocurrido y realice la tarea que se le ha asignado para el manejo de esta, teniendo en cuenta sólo aquellas que previamente hayan sido habilitadas por el operador e incrementar un contador para el manejo del historial de ocurrencia de las mismas que se encuentra en el menú. En la figura 26 se muestra el diagrama de flujo de esta rutina. El programa permite mostrar en el módulo LCD las seis interrupciones posibles que pueden ocurrir y a su vez tendrá la posibilidad de habilitar o deshabilitar las que se consideren importantes de acuerdo a la aplicación que se esté realizando con el equipo.

Teniendo en cuenta lo anterior, el programa empezará a preguntar si la interrupción se ha solicitado, si es no, pasa a la siguiente y hace el mismo tratamiento que la anterior; si la respuesta es afirmativa procede a preguntar si esta interrupción ha ocurrido, en el caso de que así sea, procederá a realizar la tarea correspondiente de acuerdo a la interrupción que se halla presentado; por el contrario, si la respuesta es no, continuará con la siguiente interrupción y realizará el mismo procedimiento.

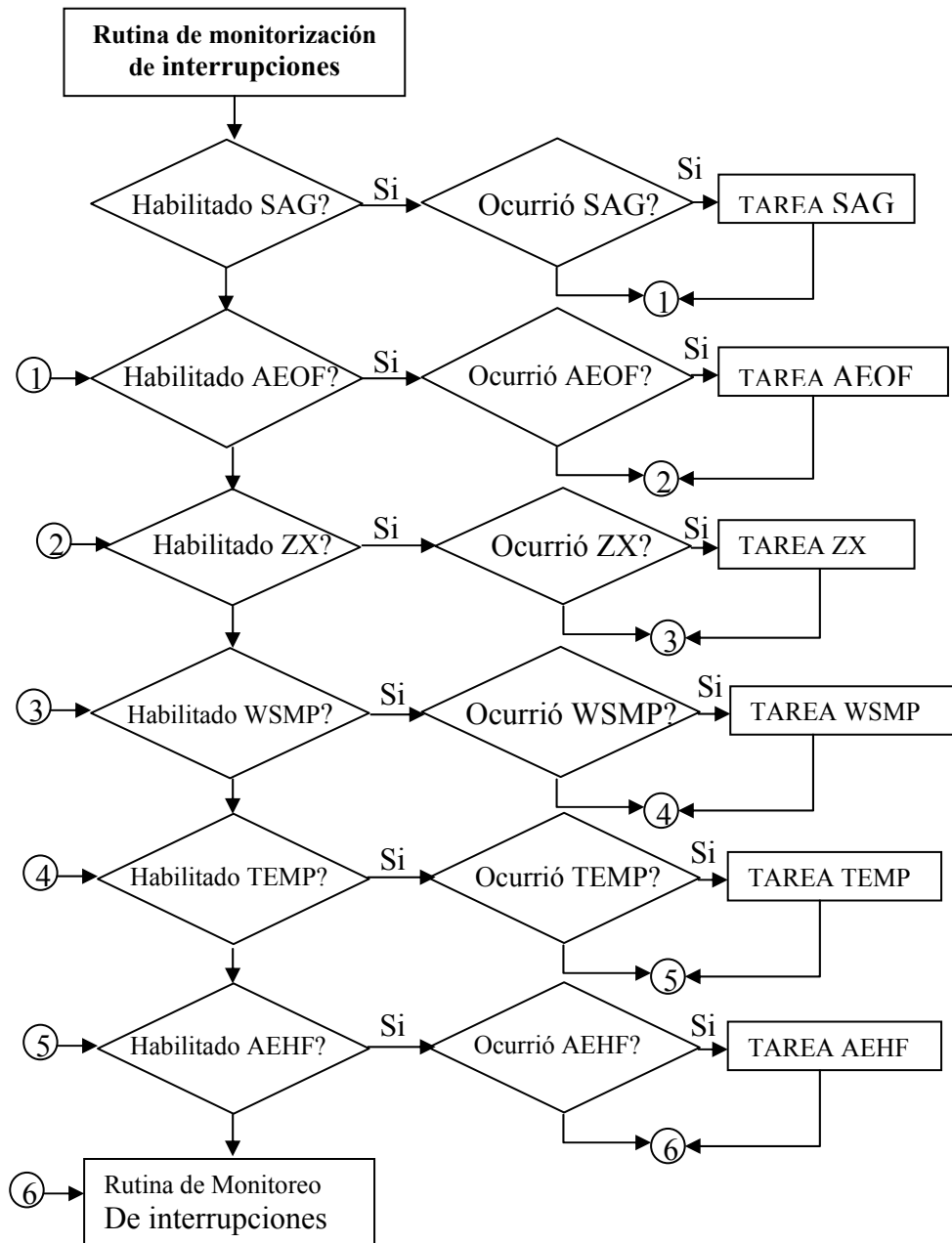
Cuando el programa haya terminado de revisar todas las interrupciones, volverá a realizar el mismo procedimiento sucesivamente. Cada una de las tareas que se realizan de acuerdo a la interrupción ocurrida, se describen a continuación.

- **Tarea SAG**

La interrupción SAG es la que determina si ha ocurrido una caída de tensión por debajo del umbral previamente establecido, cuando esta ocurre, el programa no medirá los valores de energía que hayan sucedido posteriormente a la caída del nivel de tensión, ya que estos son considerados erróneos para los procesos de cálculo de la energía. Durante esta interrupción se guardan los resultados medidos hasta el momento en que ocurrió la interrupción, con el fin de que puedan ser

recuperados cuando esta haya pasado. Adicionalmente, el programa permitirá monitorear el suministro de potencia del equipo, impidiendo que caiga del umbral establecido y así proteger de daños al equipo.

**Figura 26. Rutina de monitoreo para interrupciones.**



**Fuente: Autores.**

- **Tarea ZX**

En esta tarea se determina el tiempo de ocurrencia en que la señal está pasando por cero ya sea lógica alta, cruce por cero positivo o lógica baja, cruce por cero negativo. Si la señal se demora más del tiempo determinado en pasar por el origen, entonces activa el *bit* DISSAG en el modo de registro en lógica 0, activando el *pin* SAG y avisando que no se ha detectado el cruce por cero para realizar el mismo procedimiento utilizado cuando ocurre la interrupción SAG.

- **Tarea TEMP**

La medición de temperatura, se hace ajustando el *bit* 5 del CI ADE7756 en el registro Modo a lógico 1, para comenzar la medición en el próximo cruce por cero detectado en el canal 2, y comenzar a sensar la temperatura en el canal 1 conectándola al ADC1 para digitalizarla; el código resultante se procesa y se pone en el registro de Temperatura (TEMP) aproximadamente 26  $\mu$ s después (24 ciclos de CLKIN). Aunque ésta tarea se realiza no se muestra en la pantalla ya que se consideró mas necesario ocupar ese espacio en el módulo para mostrar el tiempo de medición de la energía, útil para las pruebas realizadas al equipo.

Cabe destacar que se pueden habilitar otras tareas como es la forma de onda y el sobre flujo en el registro AENERGY entre otras, que no han sido consideradas en este trabajo de grado pero que pueden ser estudiadas en trabajos posteriores donde se requieran otras aplicaciones.

#### **4. METODOLOGÍA PARA LA VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MDPE**

En este capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos en las pruebas que se le realizaron en los laboratorios de la UIS al “sistema de desarrollo para el CI ADE7756” revisando sus características de funcionamiento y comparándolas con las del MDPE construido en este trabajo de grado, con el fin de determinar su reproducibilidad, repetibilidad y en parte la exactitud y linealidad, ya que se desconoce el grado de incertidumbre de los equipos utilizados en el laboratorio con los cuales se hicieron las pruebas. Como respaldo a los resultados obtenidos y para fines de tener un porcentaje de error valedero se hicieron las pruebas en el laboratorio de contadores de energía de la ESSA con un patrón de medida del 0,001 de exactitud llamado TPZ-03 que permitió determinar la clase del medidor de energía construido de acuerdo a la norma NTC.

Inicialmente se dará una breve explicación del manejo de la tarjeta de evaluación del CI ADE7756, para posteriormente pasar al proceso de calibración del MDPE y finalmente mostrar las pruebas que se le hicieron a estos dos dispositivos.

##### **4.5. MANEJO DE LA TARJETA DE EVALUACIÓN PARA CI ADE7753/56/59**

###### **4.5.1. Descripción general**

La tarjeta EVAL-ADE7756EB permite evaluar al CI ADE7756 en valores de watt-hora por medio de un programa desarrollado en el entorno de *Windows*, proporcionado junto con ella. Con el uso de transductores apropiados en el canal de corriente (por ejemplo, *shunt*, CT, o sensores de corriente, etc.) y junto con una red de divisor de resistencia incorporada en ella, se conectó a un equipo de generación de corriente y tensión, con el fin de probarla variando estos dos parámetros y observando su comportamiento en el resultado de medición de energía, para ser comparada frente al MDPE.

#### 4.5.2. Conexión de la tarjeta de evaluación

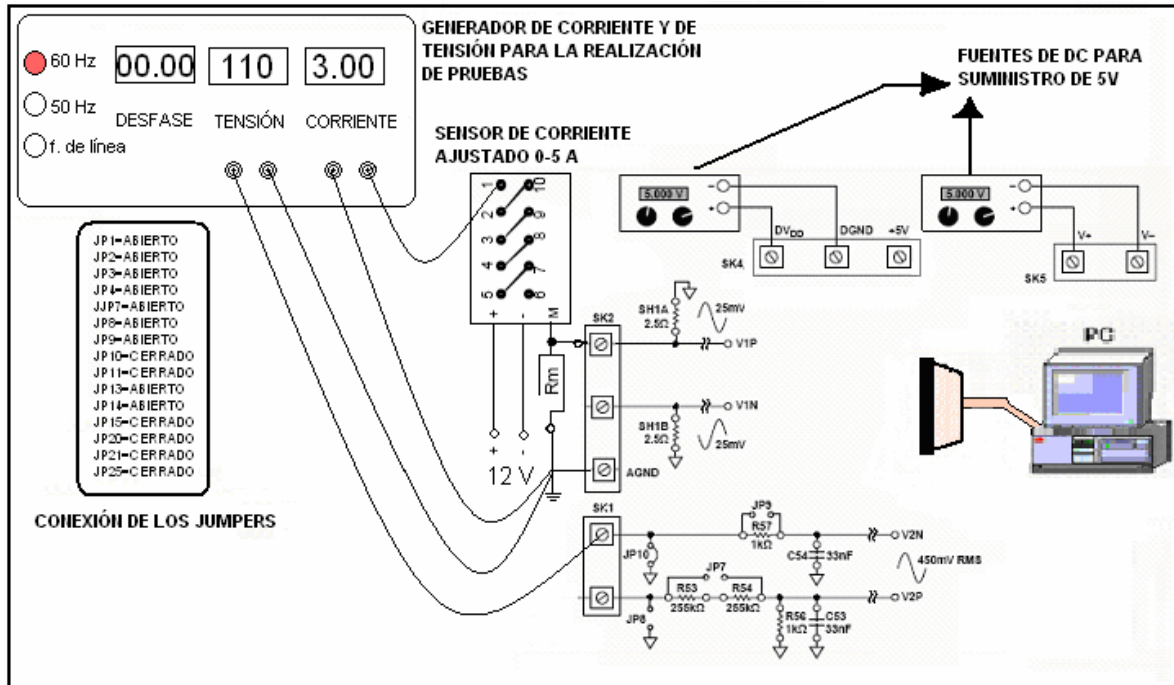
Se conectan las señales de tensión y corriente respectivamente en las terminales de los bornes SK1 y SK2 en las salidas de corriente y tensión del generador mencionado anteriormente. La entrada SK2 es un bloque de conexión de tres-vías que le permite al sistema de desarrollo poder ser conectado a diferentes transductores de corriente; en este trabajo de grado se realizaron las pruebas con el sensor de corriente de efecto *hall* con excelentes características de linealidad en el rango de operación fijado en este proyecto.

Cuando se conecta el sensor de corriente se debe deshabilitar la entrada para la resistencia *shunt* cerrando los *jumpers* JP15/JP25 y quitando C11/C21, y habilitar los filtros anti-solapamiento abriendo los *jumpers* JP1/JP3. En la entrada de tensión no hay mayor inconveniente ya que esta puede ser directamente conectada a la tensión de línea no superior a 220 V que es el valor límite para la red atenuadora para que el ADE7756 no se dañe. Adicionalmente se deben llevar a un nivel de referencia las entradas V1N y V2N.

Otras consideraciones sugeridas por el fabricante son: Dejar abierto el *jumper* JP7 para asegurar que la red de atenuación no se desvíe con el uso de dos fuentes de alimentación y abrir el JP14 para asegurar que no haya ninguna conexión eléctrica entre el circuito de prueba de tensión alta y el PC, las fuentes utilizadas para la alimentación de este sistema de desarrollo deberán tener salidas de tensión flotantes. La figura 27 muestra la conexión típica para la tarjeta de evaluación del ADE7756 de un medidor de kWh para un sistema de distribución monofásico.

La tarjeta de evaluación se conecta al puerto paralelo del PC usando el cable proporcionado. La longitud del cable no debe exceder los 6 pies (2 metros) o la comunicación serie entre el PC y la tarjeta de evaluación puede volverse imprevisible y propensa a errores. Cuando la tarjeta de evaluación se ha energizado y conectado al PC, el programa empezará automáticamente en el modo de medidor de energía.

Figura 27. Conexión de la tarjeta de evaluación del ADE7756



Fuente: Autores.

#### 4.1.3. Programa de evaluación del ADE7756

Después de la instalación del programa, se debe reiniciar el computador para poder acceder al programa, al estar en él, se busca ADE7756, entrando a una ventana llamada "ADE7756EVAL"; en la pantalla aparecen dos opciones principales para escoger el modo de operación del sistema de desarrollo que son **menú** y **calibración**, dependiendo cual se haya escogido el sistema se dispondrá a funcionar en las siguientes opciones:

- **Calibración de la tarjeta de evaluación:** Para calibrar el medidor de energía, la tensión de línea, la corriente de prueba, la frecuencia de línea y la constante de medición se copian en el programa en las casillas respectivas. En las pruebas hechas se varió la tensión desde 80V hasta 220V y la corriente desde 500 mA hasta 5A, trabajando siempre con una frecuencia de línea de 60Hz y la constante de medición igual a 3200 imp/kWh. Con los parámetros incorporados, se pulsa donde dice "calibration", así el programa automáticamente calibrará la

tarjeta para los valores incorporados. Lo anterior quiere decir que cada vez que se requiera cambiar el valor de alguno de los parámetros dichos anteriormente, se deberá volver a calibrar la tarjeta, ya que si se comienza a medir la energía y alguno o todos los parámetros con los cuales se calibró están distintos, el porcentaje de error se eleva en las pruebas. Se debe tener en cuenta que la rutina de calibración no elimina automáticamente los errores de fase asociados con el transductor que se ha conectado. Éstos deben eliminarse primero usando el registro PHCAL del ADE7756. Los cálculos de potencia instantánea, tensión y corriente RMS también están disponibles en esta ventana. Ellos son procesados usando la rutina de formas de onda con el número de muestras definida en este modo, adicionalmente se podrá ajustar el valor de los registros CFDIV y APGAIN del ADE7756 en la calibración.

- **Medición de energía:** El programa empieza automáticamente a medir energía; en este modo la tarjeta de evaluación puede usarse como un medidor de energía totalmente funcional, cuando la tensión de línea apropiada, la corriente de prueba, frecuencia, y constante de medición hayan sido fijadas, con la rutina de calibración se puede eliminar cualquier error asociado con los transductores. También se debe ajustar el rango de la señal de entrada y ganancia para los PGAs en los canales de corriente y tensión para asegurar que el rango de la señal de salida del sensor de corriente sea igual en las dos entradas analógicas. Luego de haber realizado los ajustes necesarios para prevenir cualquier fuente de error adicional se pulsa en “quit to menú” para salir de este y comenzar a medir energía.

**Figura 28. Pruebas de la tarjeta de evaluación para el CI ADE7756 en los laboratorios de la UIS**



En las figuras 28 a y b se muestran fotos tomadas a las conexiones de la tarjeta de evaluación y al funcionamiento del programa.

Si se quiere una ayuda adicional para el manejo del programa de la tarjeta de evaluación, este ofrece una opción *Help*, que abre una ventana donde se describe en cuadro de texto la opción que se ha seleccionado.

- **Recomendaciones**

La sección analógica del sistema de desarrollo es sensible al ruido de la conexión al nivel de referencia, por lo tanto, los usuarios deben seleccionar con cautela el *setup* de la tarjeta de evaluación para obtener una mejor operación de la misma.

#### **4.2 PRUEBAS DEL SENSOR DE CORRIENTE CS25-NPA**

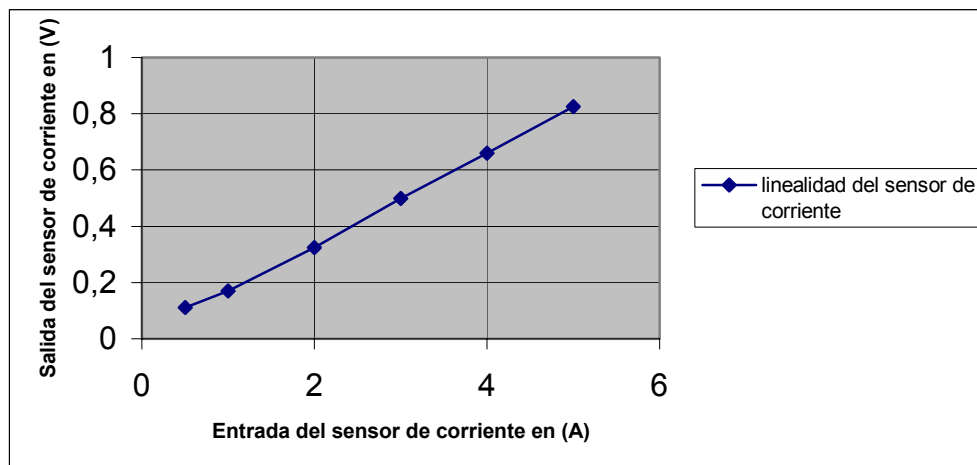
Adicionalmente al proceso de calibración del MDPE también se determinó la linealidad del sensor de corriente utilizado en el rango de operación fijado en este trabajo de grado, ya que este factor influye en gran medida en el porcentaje de error del equipo.

**Tabla 2. Comportamiento del sensor de corriente**

<b>Entrada de corriente I (A)</b>	<b>Salida de tensión (V)</b>
0,5	0,110
1	0,170
2	0,324
3	0,498
4	0,660
5	0,825

Teniendo en cuenta que este sensor puede ser ajustado a varias escalas hasta un valor máximo de 25 A nominales, se dejó fijo para medir una corriente máxima de 6 A. En la tabla 2 se presentan los valores que se obtuvieron en el laboratorio para un rango de 0 A a 6 A, usando un voltímetro con clase de 0,5, con el fin de observar su comportamiento para determinar su linealidad.

**Figura 29. Comportamiento del sensor de corriente**



**Fuente: Autores.**

En la figura 29 se puede apreciar que el sensor de corriente tiene un comportamiento bastante lineal en el rango de operación establecido, siendo un transductor muy confiable para la realizar la medición de energía ya que ofrece un valor muy exacto sobre la corriente que se está midiendo, tal y como se especifica en su hoja de datos que se encuentra en el Anexo D.

### **4.3 PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL MDPE**

Como se explicó en el capítulo 3, el proceso de calibración va acompañado por un programa realizado en Visual Basic para determinar el valor de los registros del ADE7756 utilizados en este proceso. El desarrollo de este programa al igual que otros cálculos necesarios para la calibración del medidor se describen a continuación.

Una manera conveniente de realizar la calibración del medidor es mediante una frecuencia de salida proporcional a la energía o potencia activa bajo condiciones de carga estable.

La conversión de energía-a-frecuencia se realiza en la acumulación de la señal de potencia activa en un registro de 24-bits. La frecuencia de salida en el pin CF del ADE7756 se determina colocando inicialmente los registros CFDIV = 000h y APGAIN = 000h de este integrado.

La ecuación 13 da una expresión para la frecuencia de salida a CF con el registro de CFDIV = 0.

**Ecuación 13.**

$$CF(\text{Hz}) = \frac{\text{Average LPF2 Output} \times \text{CLKIN}}{2^{25}} \quad 27$$

Esta frecuencia de salida es fácilmente escalada por el registro de división de la frecuencia de calibración (CFDIV [11:0]). Este registro de escalamiento de frecuencia es de 12-bits y escala la frecuencia de salida por 1 a  $2^{12}$ . La frecuencia de salida se da por la ecuación 14.

**Ecuación 14.**

$$\text{Frecuencia} = \frac{\text{Frecuencia}(\text{CDIV} = 0)}{\text{CFDIV} + 1}$$

Además con la ayuda del registro de detección de cruce por cero de este integrado, la calibración de energía puede simplificarse ya que el tiempo de calibración del medidor se reduce significativamente. Para usar el detector de cruce por cero el ADE7756 se coloca en el modo de calibración para ajustar el bit 7 (CMODE) en el registro de modo, en este modo el ADE7756 acumula la señal de potencia activa en el registro de energía activa para un número entero de medios ciclos de línea que se encuentran especificados en el registro de SAGCYC, por lo tanto la energía es calculada con mayor exactitud y en un tiempo más corto ya que el periodo de

---

<sup>27</sup> Las ecuaciones 13, 14 y 15 son tomadas de la hoja de datos del ADE7756.

integración puede acortarse. Como la componente sinusoidal se integra sobre un número entero de ciclos de línea, su valor siempre es cero. Por consiguiente:

**Ecuación 15.**

$$E(t) = \int_0^{nT} v(t)i(t) dt$$

Sabido esto, el primer paso en el proceso de calibración es determinar la constante de medición requerida que en nuestro caso es **30 000 imp/kWh**, con el fin de determinar la frecuencia de salida en CF. La frecuencia de línea es fijada a 60 Hz, el número de medios-ciclos de integración es especificado, el tiempo de integración total se da como:

**Ecuación 16.**

$$\frac{1}{2 \times 60 \text{Hz}} \times \text{número de medios ciclos}^{28}$$

**4.3.1 Calibrando la frecuencia a CF**

Una vez se tienen las señales de corriente y tensión se determina el valor de la potencia activa consumida cuyos valores son:

$$V_{in} = 110 V_{RMS} \quad ; \quad V_{ADE \text{ CANAL } 1} = 0,8 V_{RMS} \quad ; \quad V_{ADE \text{ CANAL } 2} = 0,8 V_{RMS}$$

$$I_{PRUEBA} = 4A \quad (I_{MAX} = 5 A) \quad ; \quad P_{PRUEBA} = 0,44 \text{ kW} \quad ; \quad \text{constante} = 30 \text{ 000 imp/kWh}$$

$$CFDIV = 0 \quad ; \quad SAGCYC = FF$$

Junto con los valores del registro AENERGY del ADFE7756 se tiene la ganancia del filtro LPF2 dada por la siguiente expresión:

**Ecuación 17.**

$$A_{V_{LPF2}} = \frac{\text{Energía} * 8 * \text{frecuenciadelínea}(fl)}{SAGCYC * \text{FrecuenciadeOscilación}(fos)}$$

---

<sup>28</sup> Las ecuaciones 16 y 17 son tomadas de la hoja de datos del ADE7756

$SAGCYC = 3Fh \rightarrow Energía = 0196000000 \rightarrow Av_{LPF2} = 60893$   
 $SAGCYC = 1Fh \rightarrow Energía = 0348000000 \rightarrow Av_{LPF2} = 60960$   
 $SAGCYC = 0Fh \rightarrow Energía = 06AC000000 \rightarrow Av_{LPF2} = 60993$   
 $SAGCYC = FFh \rightarrow Energía = 1B01000000 \rightarrow Av_{LPF2} = 60990$   
 $PROMEDIO = 60959 = Av_{LPF2}$

Teniendo en cuenta el valor promedio de  $Av_{LPF2}$  se realiza el cálculo para hallar CF dado por la siguiente expresión:

**Ecuación 18.**

$$CF = \frac{Av_{LPF2} * CLKIN}{2^{25}}$$

$$CF = 6503 \quad 29$$

Con la ecuación 14 se obtiene el valor de la frecuencia de calibración.

**Ecuación 19.**

$$CF_{TEÓRICA} = \frac{Frec(CFDIV = 0)}{CFDIV + 1} = 3.6657 \text{ Hz}$$

Despejando  $CFDIV = 1773d = 6EDh$

Por lo tanto la frecuencia real o teórica es 3,6666 **Hz** y la que se obtuvo experimentalmente fue 3,6657 **Hz**; obteniendo un error en la medida dado por la siguiente ecuación:

**Ecuación 20.**

$$CF_{deseada} - F_{salida} * / F_{salida} * 100 = 0,256\% = Error\%$$

Esto quiere decir que el registro APGAIN, que es el que reduce el error de la medición deberá ser ajustado a 1.

Una forma fácil y precisa de calibrar es mediante el *pin* CF del ADE7756, la única condición es que se debe conocer la frecuencia de línea exacta, aunque si esto no

---

<sup>29</sup> Las ecuaciones 18, 19 y 20 son tomadas de la hoja de datos del ADE7756

es posible, podría medirse usando la salida ZX de este mismo integrado como se dijo anteriormente.

Todo este proceso para el cálculo del valor en los registros CFDIV y APGAIN se hacen mediante un programa que se tienen en Visual Basic al que se puede acceder a través del puerto serie del equipo.

**Figura 30. Calibración del MDPE**



(a)

(b)

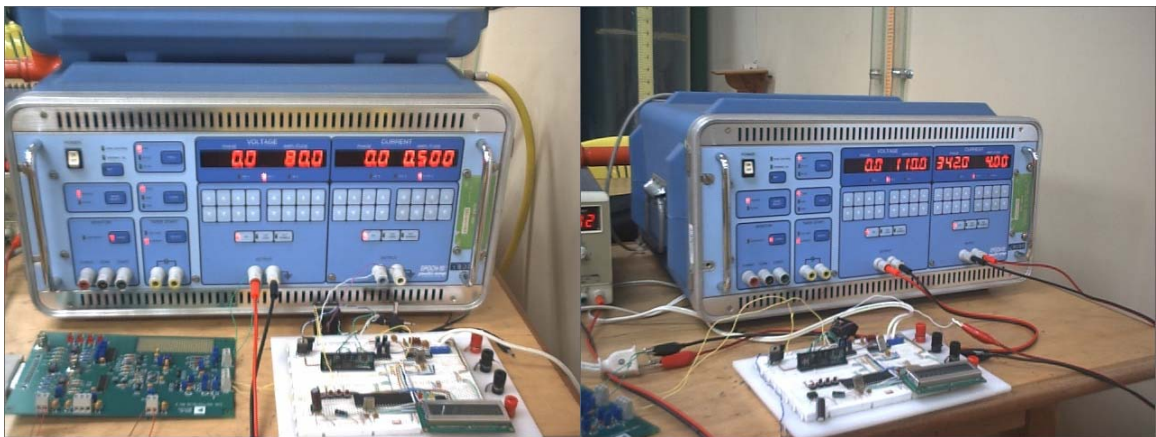
Como se muestra en la figura 30, para calibrar el MDPE se le introduce al programa el valor de potencia en **kW** consumida por la carga escogida, luego se pulsa la tecla “**enter**” en el equipo y cualquier tecla en el PC o en este caso la calculadora, el programa toma los valores medidos en el registro AENERGY del ADE7756, los promedia y con las ecuaciones descritas anteriormente calcula el valor que debe tener los registros CFDIV y APGAIN de este integrado. Pulsando nuevamente cualquier tecla en el PC, el programa muestra los valores que deben ser incorporados a estos registros.

#### 4.4. PRUEBAS REALIZADAS EN LOS LABORATORIOS DE LA UIS PARA LA TARJETA “EVALADE7756/53/59” Y EL “ MDPE”

Para revisar el funcionamiento del equipo; se realizaron unas pruebas preliminares que sirven en gran medida para revisar ciertas propiedades como son su exactitud, repetibilidad, reproducibilidad, linealidad entre otras; fundamentales para determinar la confiabilidad del resultado del equipo. Adicionalmente se realizaron pruebas al sistema de desarrollo para el CI ADE7756 con el fin de ofrecer una comparación entre el medidor digital de energía construido en este trabajo de grado frente a otro de su misma línea que se consigue en el comercio.

Cabe destacar que estas pruebas no son definitivas, ya que no se tiene un patrón de medida lo suficientemente exacto según lo indica la norma, para un medidor clase 1 que debe tener un patrón de medida por lo menos 1000 veces mas exacto, es decir del 0,001% de error, para asegurar que las pruebas que se le realicen, lo especifiquen dentro de la clase establecida. Sin embargo estas pruebas son un punto de partida para revisar los diferentes modo de operación del equipo, como por ejemplo si está recuperando los datos después de un corte de energía, si esta revisando y atendiendo las interrupciones así como guardando su grado de ocurrencia en el historial, si accede a los registros del CI ADE7756 y permite cambiar los que son de escritura o simplemente revisar que el contador de energía esté dando datos conformes a la carga conectada.

**Figura 31. Conexión del MDPE y la tarjeta Eval ADE7756**



En la figura 31 se muestran las conexiones para la realización de las pruebas del medidor de energía y de la tarjeta de evaluación del ADE7756, utilizando un generador de corriente y tensión para simular varias cargas.

#### 4.4.1. Pruebas de tiempo corto del MDPE y la tarjeta EVAL ADE7756

Inicialmente se realizaron varias pruebas para un tiempo de 1 hora, variando corriente y tensión pero manteniéndolas en fase, es decir considerando que son cargas netamente resistivas o con un  $fp=1$ . Con estos resultados se puede determinar la exactitud, precisión, repetibilidad del equipo para una carga resistiva.

En las tablas 3 a la 8 se muestran los datos obtenidos según la carga conectada realizando 5 pruebas en cada una y variándola desde un valor pequeño de corriente hasta un valor máximo ajustado en el sensor, esto se hizo para valores de tensión de 110 V y 220 V como se especifica en cada tabla, que contiene los valores experimentales y el error relativo tanto de la tarjeta Eval Ade7756 como del MDPE.

- Para  $i= 550 \text{ mA}$   $v= 100 \text{ V}$   $P= 55 \text{ W}$  y  $E= 0,055 \text{ kWh}$

**Tabla 3. E= 0,055 kWh**

PRUEBA	Resultado MDPE	Resultado EvalADE	%e (MDPE)	%e Eval ADE)
1	0,0547	0,058	0,545	5,4545
2	0,0547	0,058	0,545	5,4545
3	0,0546	0,057	0,727	3,636
4	0,0546	0,057	0,727	3,636
5	0,0546	0,057	0,727	3,636
<b>PROMEDIO</b>	0,05464	0,0574	0,6542	4.3634
<b>DESVIACIÓN</b>	0,00054772	0,00054772		
<b>DISPERSIÓN</b>	0,00100242	0,00954220		

- Para  $i = 2,5A$   $v = 110 V$   $P = 275 W$  y  $E = 0,275 kWh$

**Tabla 4. E= 0,275 kWh**

PRUEBA	Resultado MDPE	Resultado EvalADE	%e (MDPE)	%e (Eval ADE)
1	0,2733	0,280	0,6181	1,818
2	0,2733	0,281	0,6181	2,181
3	0,2732	0,282	0,6545	2,545
4	0,2733	0,281	0,6181	2,181
5	0,2734	0,283	0,5818	2,909
<b>PROMEDIO</b>	0,2733	0,2812	0,61812	2,3268
<b>DESVIACIÓN</b>	0,000070710	0,001140180		
<b>DISPERSIÓN</b>	0,000258729	0,004051800		

- Para  $i = 5A$   $v = 110 V$   $P = 550 W$  y  $E = 0,55 kWh$

**Tabla 5. E= 0,55 kWh**

PRUEBA	Resultado MDPE	Resultado EvalADE	%e (MDPE)	%e (Eval ADE)
1	0,5464	0,567	0,6363	3,09
2	0,5464	0,566	0,6545	2,909
3	0,5466	0,568	0,6181	3,273
4	0,5465	0,567	0,6363	3,09
5	0,5466	0,568	0,6181	3,273
<b>PROMEDIO</b>	0,5465	0,5672	0,6065	3,127
<b>DESVIACIÓN</b>	0,000100000	0,000836660		
<b>DISPERSIÓN</b>	0,000182983	0,001475070		

- Para  $i = 500 mA$   $v = 220 V$   $P = 110 W$  y  $E = 0,11 kWh$

**Tabla 6. E= 0,11 kWh**

PRUEBA	Resultado MDPE	Resultado EvalADE	%e (MDPE)	%e (Eval ADE)
1	0,1092	0,113	0,7272	2,727
2	0,1093	0,114	0,63636	3,636
3	0,1093	0,114	0,6363	3,636
4	0,1092	0,113	0,7272	2,727
5	0,1094	0,114	0,5454	3,6363
<b>PROMEDIO</b>	0.10928	0.1136	0.6545	3.2729
<b>DESVIACIÓN</b>	0,000836660	0,000547720		
<b>DISPERSIÓN</b>	0,000765611	0,004821500		

- Para  $i = 3.0 \text{ mA}$   $v = 220 \text{ V}$   $P = 660 \text{ W}$  y  $E = 0,66 \text{ kWh}$

**Tabla 7. E= 0,66 kWh**

PRUEBA	Resultado MDPE	Resultado EvalADE	%e (MDPE)	%e (Eval ADE)
1	0,6560	0,681	0,6060	3,181
2	0,6561	0,678	0,6969	2,727
3	0,6561	0,677	0,6969	2,5727
4	0,6560	0,676	0,6060	2,4242
5	0,6560	0,677	0,6060	2,5757
<b>PROMEDIO</b>	0,65604	0,6776	0,64236	2,6961
<b>DESVIACIÓN</b>	0,000054772	0,00192354		
<b>DISPERSIÓN</b>	0,000083489	0,00283791		

- Para  $i = 5 \text{ A}$   $v = 220 \text{ V}$   $P = 1\,100 \text{ W}$  y  $E = 1,1 \text{ kWh}$

**Tabla 8. E= 1,1 kWh**

PRUEBA	Resultado MDPE	Resultado EvalADE	%e (MDPE)	%e (Eval ADE)
1	1,0928	1,125	0,6545	2,2727
2	1,0928	1,126	0,6545	2,3636
3	1,0927	1,127	0,6636	2,4545
4	1,0927	1,126	0,6636	2,3636
5	1,0928	1,128	0,6645	2,4545
<b>PROMEDIO</b>	1,09276	1,126	0,65814	2,38178
<b>DESVIACIÓN</b>	0,0000547723	0,0011401800		
<b>DISPERSIÓN</b>	0,0000501229	0,0010122300		

#### 4.4.1.1. Consideraciones de los resultados obtenidos en las pruebas cortas

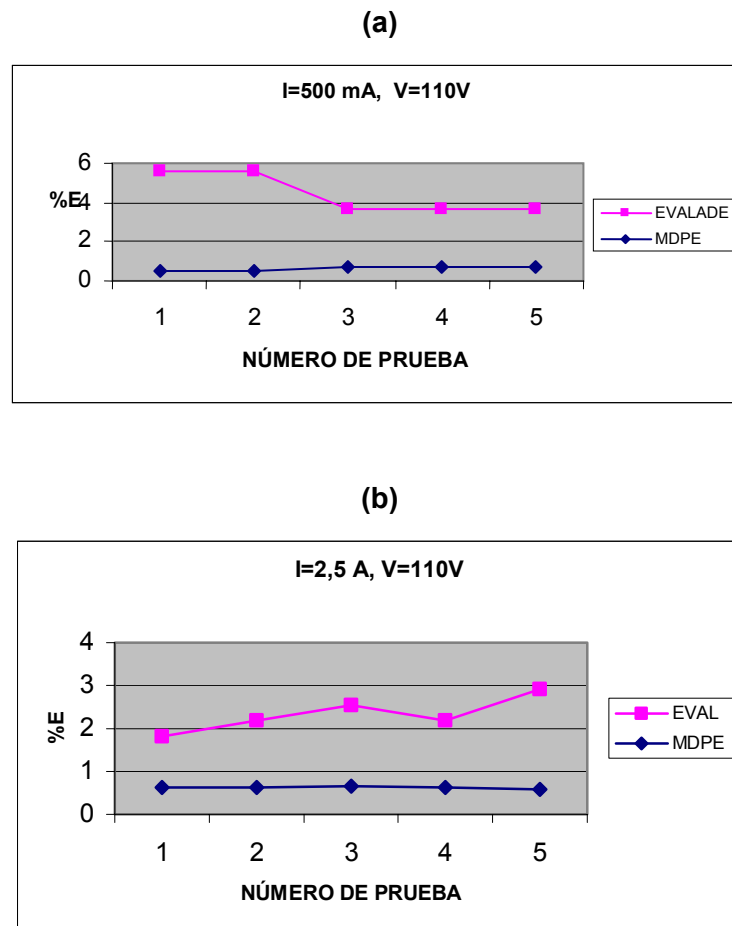
En las pruebas hechas en el laboratorio se pueden decir las siguientes consideraciones:

- Tanto la tarjeta de evaluación como el MDPE poseen una alta exactitud en los datos ya que conservan el porcentaje de error en todas las pruebas hechas con los siguientes valores:
  - Promedio del error de las pruebas del MDPE:  $\%e_{\text{MDPE}} = 0,63897\%$
  - Promedio del error de la tarjeta EvalADE7756:  $\%e_{\text{EVAL}} = 3,02799\%$
- Con lo anterior también se puede decir que el MDPE se acerca más al valor esperado según sea la carga, esto puede ser por varias razones como que los decimales considerados en el MDPE son cuatro mientras que el de la tarjeta de evaluación son sólo tres, aumentado así su porcentaje de error.
- Para cargas pequeñas el error de la tarjeta de evaluación se incrementa tal y como se muestra en la tabla 3, esto se debe a la razón anteriormente expuesta y también a que ésta es más sensible al ruido que el MDPE, sin embargo este error puede ser corregido cambiando la constante de calibración y ajustando los registros internos del ADE, que permiten mejorar las posibles causas de error

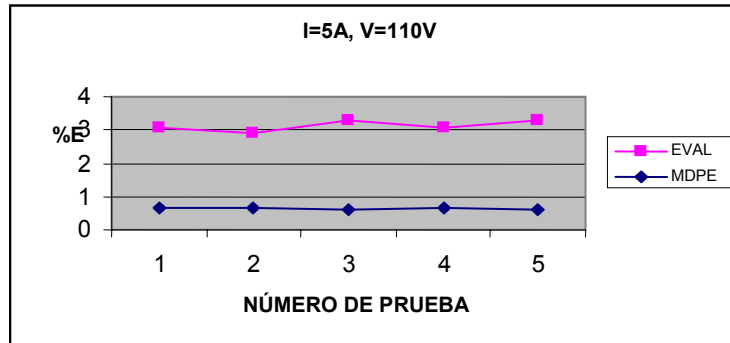
en las entradas de corriente y tensión, como por ejemplo corrección del *offset* o el ajuste de ganancia.

- A diferencia de lo anterior el MDPE conserva su linealidad para los diferentes valores de carga. En la figura 32 se muestra la comparación entre los errores del MDPE y del “sistema de desarrollo EVAL- ADE7756”.
- Por considerar cuatro decimales el MDPE está en la capacidad de medir hasta decenas de *Watts-hora*, siendo por esto un equipo útil para medir cargas con consumo bajo de energía.

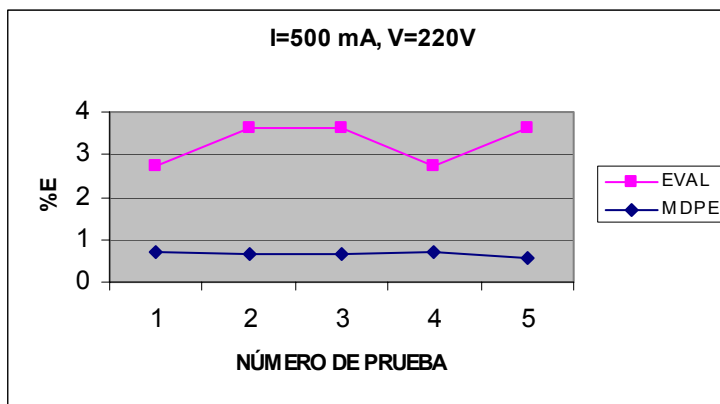
**Figura 32. Curvas de %error del MDPE y EVAL-ADE7756 para una prueba repetida de T=1h**



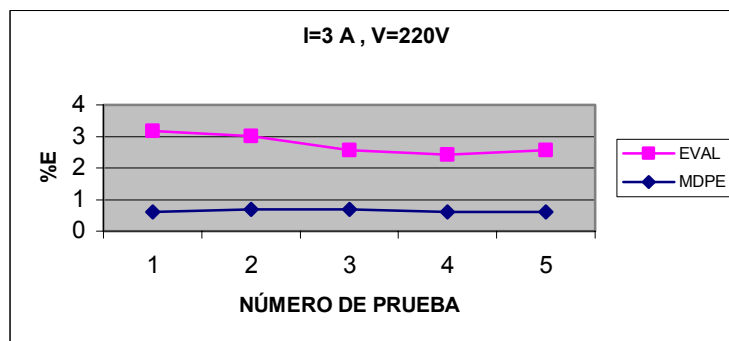
(c)



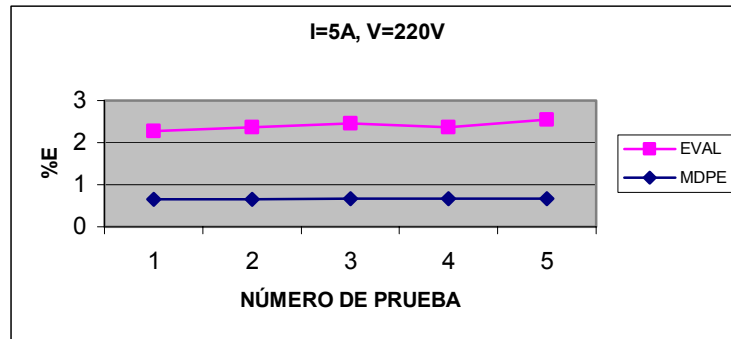
(d)



(e)



(f)



#### 4.4.2. Pruebas de tiempo largo del MDPE y la tarjeta EVAL ADE7756

En las siguientes pruebas se varió al igual que en las anteriores los valores de tensión y de corriente pero se consideró un tiempo de prueba de 6 horas tomando resultados cada hora para obtener los datos que se muestran en las tablas de la 9 a la 14.

Tabla 9. I= 500 mA V= 110 V

Tiempo (h)	Valor Teórico (kWh)	Res. MDPE (kWh)	Res.EvalADE (kWh)	%e (MDPE)	%e (Eval ADE)
2 h	0,11	0,1092	0,114	0,7273	3,6364
3 h	0,165	0,1638	0,172	0,7273	4,2424
4 h	0,22	0,2183	0,229	0,7727	4,0909
5 h	0,275	0,2729	0,286	0,7636	4,0000
6 h	0,33	0,3277	0,343	0,69697	3,9393

Tabla 10. I= 2,5 A V= 110V

Tiempo (h)	Valor Teórico (kWh)	Res. MDPE (kWh)	Res.EvalADE (kWh)	%e (MDPE)	%e (Eval ADE)
2 h	0,55	0,5464	0,5649	0,6545	2,709
3 h	0,825	0,8201	0,8474	0,6182	2,7152
4 h	1,1	1,0932	1,1315	0,6182	2,8636
5 h	0,375	1,3663	1,414	0,6327	2,8364
6 h	1,65	1,6396	1,695	0,6303	2,727

**Tabla 11. I= 5 A V= 110 V**

Tiempo (h)	Valor Teórico (kWh)	Res. MDPE (kWh)	Res.EvalADE (kWh)	%e (MDPE)	%e (Eval ADE)
2 h	1,1	1,0932	1,125	0,6182	2,2727
3 h	1,65	1,6379	1,688	0,7333	2,303
4 h	2,2	2,1865	2,253	0,6136	2,409
5 h	2,75	2,7331	2,822	0,6145	2,6182
6 h	3,3	3,2795	3,386	0,6212	2,6061

**Tabla 12. I= 500 mA V= 220 V**

Tiempo (h)	Valor Teórico (kWh)	Res. MDPE (kWh)	Res.EvalADE (kWh)	%e (MDPE)	%e (Eval ADE)
2 h	0,22	0,2186	0,225	0,6364	2,273
3 h	0,33	0,3279	0,337	0,6364	2,1212
4 h	0,44	0,4371	0,449	0,659	2,0455
5 h	0,55	0,5464	0,562	0,6545	2,182
6 h	0,66	0,6556	0,674	0,6667	2,1212

**Tabla 13. I= 3 A V= 220 V**

Tiempo (h)	Valor Teórico (kWh)	Res. MDPE (kWh)	Res.EvalADE (kWh)	%e (MDPE)	%e (Eval ADE)
2 h	1,32	1,3116	1,349	0,63636	2,1969
3 h	1,98	1,9675	2,025	0,63131	2,2727
4 h	2,64	2,6236	2,702	0,6212	2,3485
5 h	3,3	3,2791	3,375	0,6333	2,2727
6 h	3,96	3,9355	4,053	0,61869	2,3485

**Tabla 14. I= 5 A V= 220 V**

Tiempo (h)	Valor Teórico (kWh)	Res. MDPE (kWh)	Res.EvalADE (kWh)	%e (MDPE)	%e (Eval ADE)
2 h	2,2	2,1858	2,251	0,6454	2,3181
3 h	3,3	3,279	3,374	0,6364	2,2424
4 h	4,4	4,371	4,503	0,6591	2,341
5 h	5,5	5,4654	5,624	0,6291	2,2545
6 h	6,6	6,5585	6,745	0,6289	2,19697

#### 4.4.2.1. Consideraciones de los resultados obtenidos en las pruebas largas

- Al igual que en las pruebas cortas el promedio del error tanto para la tarjeta de evaluación como para el MDPE se conserva coincidiendo entre distintas lecturas individuales tal como se observa en las tablas de la 9 a la 14, determinando que tienen una alta reproducibilidad en las medidas dadas.
- En los tiempos largos también se observó una cierta variación en el error para cargas de consumo bajo correspondientes a la de los tiempos cortos.
- Para determinar el grado de correlación que existen entre los valores experimentales y los teóricos se tomó como referencia los datos de las tablas 9, 10 y 11 correspondientes a corrientes pequeñas, medias y máxima según el orden, con el fin de determinar la linealidad del MDPE. En las tablas 15,16 y 17 se muestran los resultados según las ecuaciones que definen la correlación con tiempos de 1 hora hasta 6 horas.

**Tabla 15. Coeficiente de correlación entre Vt y Ve (I=500mA y V=110V)**

Valor Teórico (kWh)	Resultado MDPE (kWh)	$vt = Vt - \bar{Vt}$	$ve = Ve - \bar{Ve}$	$vt^2$	$vt * ve$	$ve^2$
0,055	0,0547	-0,1375	-0,1364	0,003025	0,018755	0,01860496
0,11	0,1092	-0,0825	-0,0819	0,01	0,00675675	0,00670071
0,165	0,1638	-0,0275	-0,0273	0,027225	0,00075075	0,00074529
0,22	0,2185	0,0275	0,0274	0,0484	0,00075075	0,0007506
0,275	0,2729	0,0825	0,0816	0,075625	0,006732	0,00665856
0,33	0,3277	0,1375	0,1366	0,1089	0,01881665	0,01865956
$\sum_1^6 V.Teórico = 1,155$ $\bar{Vt} = 0,1925$	$\sum_1^6 V.Experi = 1,1466$ $\bar{Vex} = 0,1911$			$\sum_1^6 vt^2 = 0,05294$	$\sum vt * ve = 0,05253$	$\sum_1^6 ve^2 = 0,05213$

Con los datos anteriores se obtiene el coeficiente de correlación entre el valor teórico y experimental dado por la siguiente ecuación:

$$r1 = \frac{\sum_1^6 ve * vt}{\sqrt{\sum ve^2 * \sum vt^2}} = \frac{0.0525619}{\sqrt{(0.273175) * (0.05211984)}} = 0.999$$

**Tabla 16. Coeficiente de correlación entre Vt y Ve (I=2,5A y V=110V)**

Valor Teórico (kWh)	Resultado MDPE (kWh)	$vt = Vt - \bar{Vt}$	$ve = Ve - \bar{Ve}$	$vt^2$	$vt * ve$	$ve^2$
0,275	0,2732	-0,6875	-0,68326	0,47265625	0,46974125	0,4668442276
0,55	0,5464	-0,4125	-0,41006	0,17015625	0,16914975	0,1681492036
0,825	0,8201	-0,1375	-0,13636	0,01890625	0,0187495	0,0185940496
1,1	1,0932	0,1375	0,13674	0,01890625	0,01880175	0,0186978276
1,375	1,3663	0,4125	0,40984	0,17015625	0,169059	0,1679688256
1,65	1,6396	0,6875	0,68314	0,47265625	0,46965875	0,4666802596
$\sum_1^6 V.Teórico = 5.775$ $\bar{Vt} = 09625$	$\sum_1^6 V.exp = 5,7388$ $\bar{Ve} = 0,95646$			$\sum_1^6 vt^2 = 1,32344$	$\sum vt * ve = 1,31516$	$\sum_1^6 ve^2 = 1,306934$

Al igual que r1, se obtiene r2 y r3.

$$r2 = \frac{\sum_1^6 ve * vt}{\sqrt{\sum ve^2 * \sum vt^2}} = \frac{1,31516}{\sqrt{(1,32344) * (1,306934)}} = 0,999$$

**Tabla 17. Coeficiente de correlación entre Vt y Ve (I=5A y V=220V)**

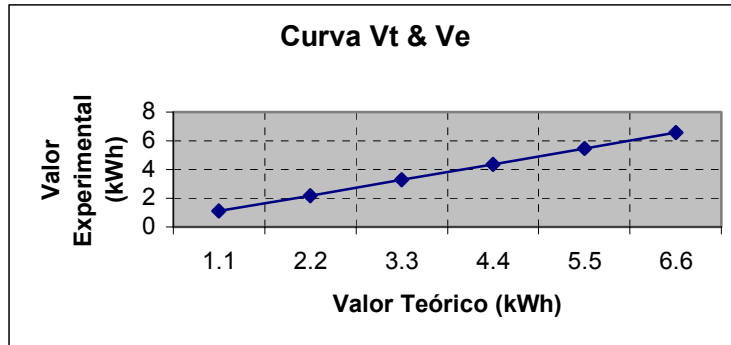
Valor Teórico (kWh)	Resultado MDPE (kWh)	$vt = Vt - \bar{Vt}$	$ve = Ve - \bar{Ve}$	$vt^2$	$vt * ve$	$ve^2$
1,1	1,0927	-2,75	-2,7327	7,5625	7,51493	7,46765
2,2	2,1858	-1,65	-1,6396	2,7225	2,70534	2,68829
3,3	3,2790	-0,55	-0,5464	0,3025	0,30052	0,29855
4,4	4,3710	0,55	0,5456	0,3025	0,30008	0,29768
5,5	5,4654	1,65	1,640	2,7225	2,706	2,6896
6,6	6,5585	2,75	2,7331	7,5625	7,51603	7,46984
$\sum_1^6 V.Teórico = 23,1$ $\bar{Vt} = 3,85$	$\sum_1^6 V.exp = 22,9524$ $\bar{Ve} = 3,8254$			$\sum_1^6 vt^2 = 21,2$	$\sum vt * ve = 21,04$	$\sum_1^6 ve^2 = 20,9$

$$r3 = \frac{\sum_1^6 ve * vt}{\sqrt{\sum ve^2 * \sum vt^2}} = \frac{21,04}{\sqrt{(21,2) * (20,9)}} = 0,999$$

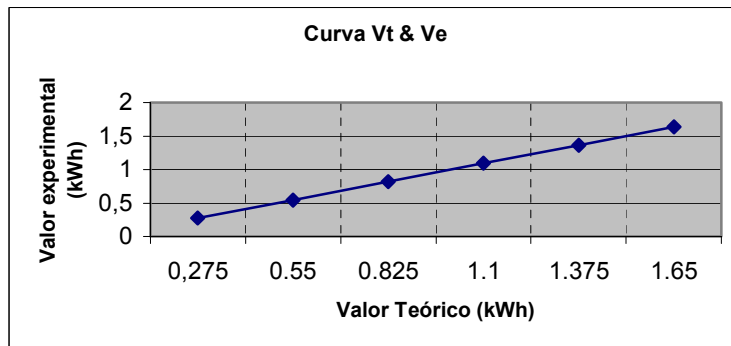
- Nótese que el coeficiente de correlación para los tres casos se acerca a 1, esto significa que existe correlación entre el valor teórico y el valor que experimentalmente se encontró.

**Figura 33. Valor Teórico & Valor experimental de la energía (kWh)**

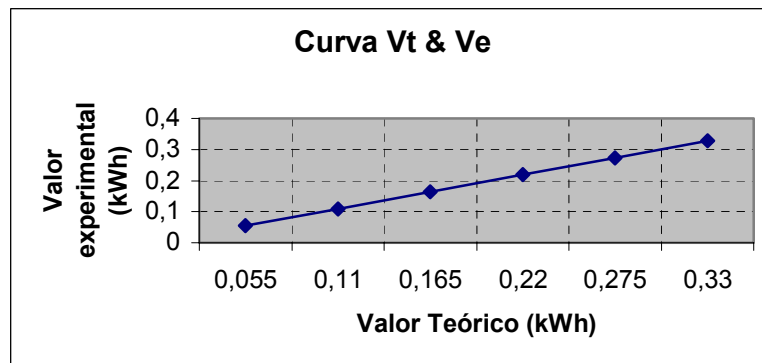
**(a) Para  $I=500 \text{ mA}$   $V=110\text{V}$  en  $t=6\text{h}$**



**(b) Para  $I=2,5 \text{ mA}$   $V=110\text{V}$  en  $t=6\text{h}$**



**(c) Para  $I=5\text{A}$   $V=220\text{V}$  en  $t=6\text{h}$**



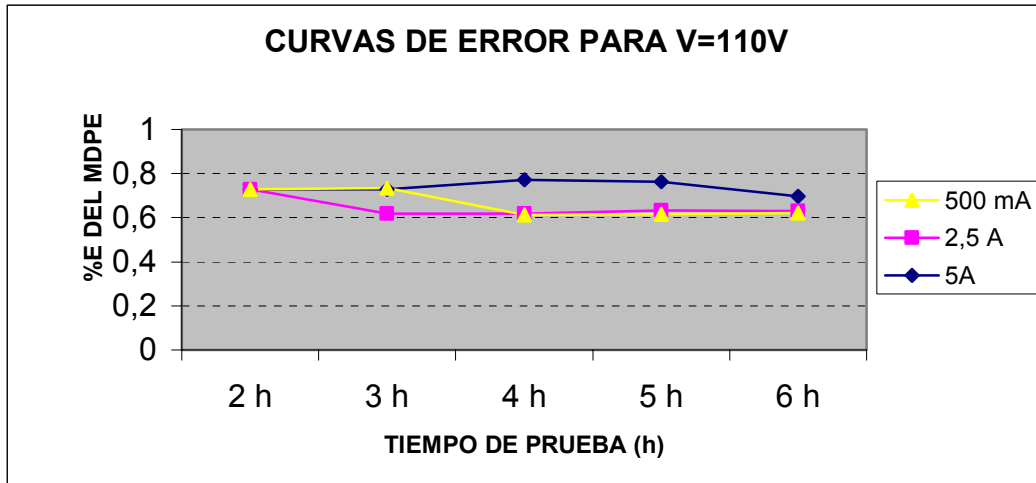
- Para determinar el grado de exactitud del MDPE se construyeron una familia de curvas del valor experimental en función del valor teórico definidas como curvas

de calibración, la discrepancia entre el valor teórico con el experimental determina el error en la medida (ver figura 33).

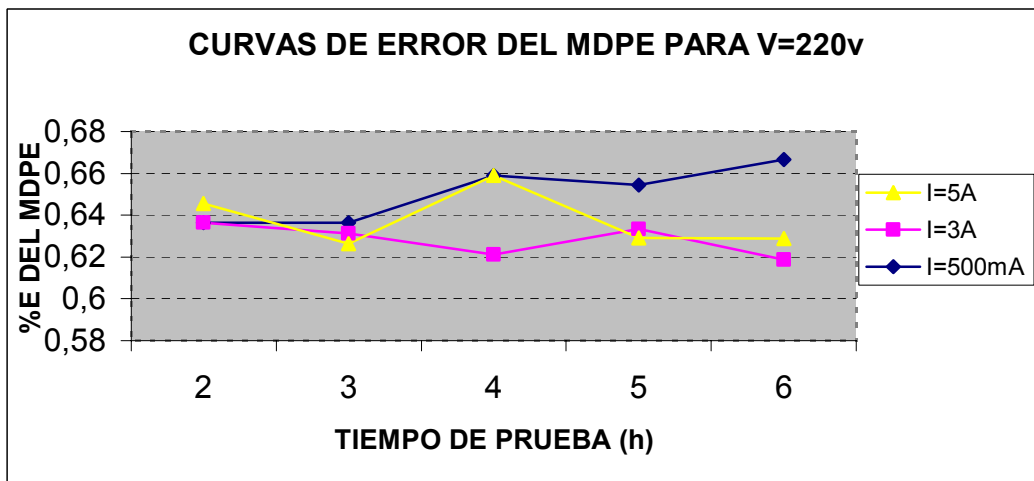
- En la figura 34 se muestra el comportamiento del MDPE para diferentes valores de corriente clasificado para valores de tensión de 110V y 220V. Como se observa en las gráficas el porcentaje de error en el tiempo se mantiene no superando un valor del 0,7%, cumpliendo con los objetivos propuestos que era diseñar medidor de energía clase 1.

**Figura 34. Curvas de %E del MDPE en tiempo largo**

(a)



(b)



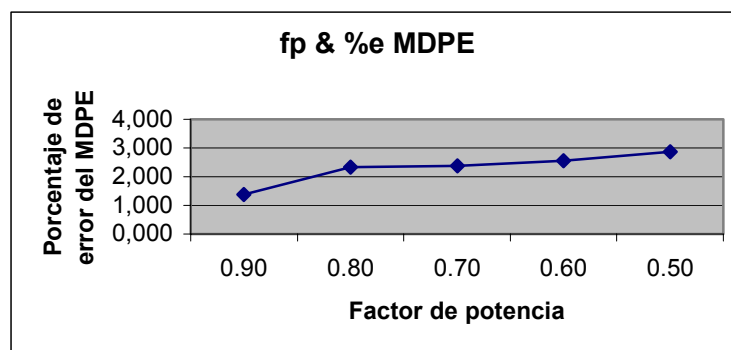
#### 4.4.3 Pruebas de variación del factor de potencia

En estas pruebas se realizaron mediciones para valores de factor de potencia inductivos, con corriente de 5A y tensión de 120V en tiempos de 30 minutos por cada prueba en la tabla 18 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 18. Ensayos para fp menores que 1 inductivos**

<b>Fp=cos <math>\varphi</math></b>	<b>E TEÓRICA (kWh)</b>	<b>E MDPE (kWh)</b>	<b>%e MDPE</b>
0.99	0.297	0.2950	0.673%
0.97	0.291	0.2889	0.722%
0.95	0.285	0.2829	0.737%
0.90	0.27	0.2663	1.370%
0.80	0.24	0.2444	2.333%
0.70	0.21	0.2050	2.381%
0.60	0.18	0.1754	2.555%
0.50	0.15	0.1457	2.866%

**Figura 35. Variación del porcentaje de error del MDPE**



En la figura 35 se puede apreciar que a medida que el factor de potencia disminuye el error en la medida de energía del equipo aumenta, manteniéndose en el rango de menor del 1% para factores de potencia mayores o iguales a 0,95.

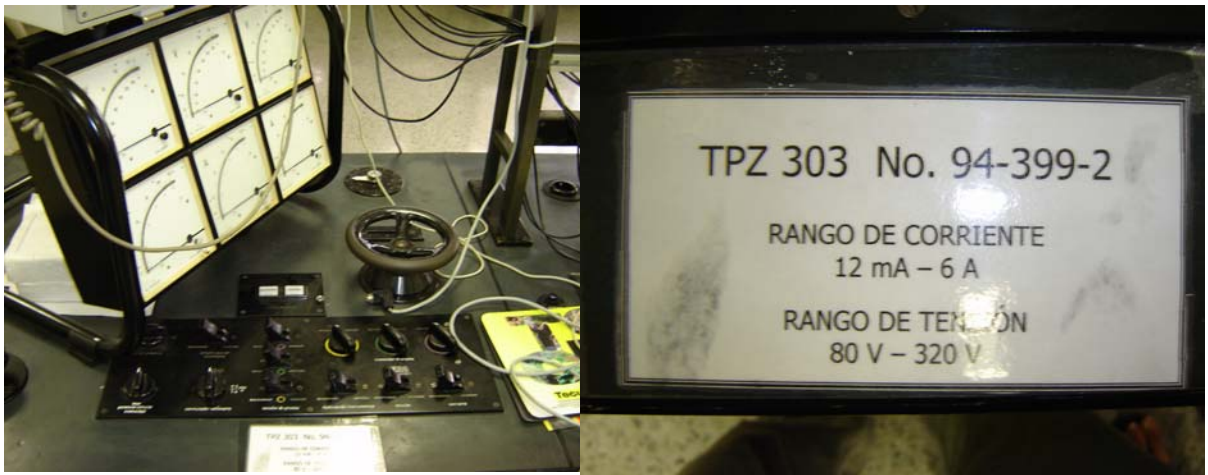
#### 4.5. PRUEBAS AL MDPE EN EL LABORATORIO DE CONTADORES DE ENERGÍA DE LA ESSA

Las pruebas que se le realizaron al medidor en el laboratorio de contadores de energía de la ESSA, han sido concebidas según la norma NTC 4856 que establece una rutina de ensayos que se requieren para verificar las condiciones iniciales que debe tener el medidor y la medición periódica en funcionamiento normal del equipo.

##### 4.5.1 Revisión de la condiciones de ensayo

Antes de comenzar las pruebas, se verifica la conexión de las entradas de corriente y tensión del equipo y se procede a conectarlo al patrón de medida utilizado que es el TPZ-303 que tiene una clase de 0,001 con el MDPE.

**Figura 36. Patrón de medida TPZ-303**



Cabe destacar que para realizar los ensayos de incertidumbre se debe tener un patrón de medida por lo menos tres veces más exacto que el medidor bajo prueba, por lo tanto, el patrón de medida utilizado en la electrificadora se adapta perfectamente a los requerimientos establecidos por la norma NTC 2423 para medidores estáticos clase 1.

En el TPZ-303 se registra el valor de la constante de medición que tiene el MDPE y por medio de un sensor óptico ésta es captada por el TPZ, con el fin de realizar el conteo de pulsos que determinan la medición de energía del MDPE y así comprobar que el medidor se adapta a las condiciones establecidas por la norma para clase 1. Igualmente se le ingresan los valores de corriente y tensión que se trabajaran en cada prueba.

Otra consideración que se tuvo en cuenta en la realización de las pruebas, fue la estabilidad térmica del equipo, para la clase del MDPE, se dejó conectado por un tiempo mínimo de 1 hora, con el fin de tener certeza de que el error y la incertidumbre estimados son correctos.

Las pruebas de incertidumbre, arranque, vacío y corriente máxima, se hacen con un factor de potencia de 1. Sólo la prueba con carga inductiva se hace con un factor de potencia de 0,5.

#### **4.5.2 Prueba de verificación de la constante**

En esta prueba se verifica que la relación entre la salida de pulsos del MDPE y la indicación del sensor óptico cumpla con lo especificado que son 30000 imp/kWh.

En esta prueba se establecen unos valores de corriente y tensión y se verifica si el error esta dentro del limite exigido que es inferior del 1%. Haciendo que  $i=2A$  y  $v = 120V$ , para un tiempo de 30 minutos la potencia según el patrón deberá ser de 0,12 kWh, obteniendo al cabo de este tiempo una medición de energía de 0,1197 kWh, produciendo un error de aproximadamente 0,3%.

Debido a que el conteo de pulsos se hace por medio de un sensor óptico, la constante de medición que se introdujo en el TPZ fue dividida por tres, ya que el pulsador del MDPE cambia cada tres pulsos medidos.

#### **4.5.3 Prueba en vacío**

En esta prueba al medidor no se le inyecta corriente sólo la tensión de línea de 120V; según la clase 1 del medidor este deberá estar conectado en vacío por un período de 60 minutos y no deberá emitir más de un pulso. Como se observa en la figura 37 pasado el tiempo de 1 hora el MDPE no ha emitido ningún pulso por lo tanto en vacío el medidor cumple con la norma para según su clase.

**Figura 37. Resultado de la prueba en vacío del MDPE**



#### **4.5.4 Prueba de arranque**

En esta prueba se revisa si el medidor marca por lo menos un pulso en el lapso de cinco minutos para un valor de corriente de 25 mA. En esta prueba el medidor

marcó dos pulsos según el valor de corriente en este tiempo; dando un error del 1%.

#### 4.5.5 Prueba de Exactitud

Habiendo estado el MDPE conectado con la tensión de referencia de 120 V en un período de 1 hora, se procede a realizar las pruebas para varios valores de corriente desde una corriente de  $0,05 I_n$ ,  $0,1 I_n$  hasta  $I_{max} = 6A$ ; los resultados obtenidos se muestran en la tabla 19.

**Tabla 19. Prueba de verificación de la precisión del MDPE**

Tiempo de prueba	Valor esperado según patrón (kWh)	Valor obtenido por el MDPE (kWh)	% E
4 horas	25 mA y 120V E=0,012	E=0,0119	0,83%
2 horas	500mA y 120V E=0,12	E=0,1192	0,67%
30 minutos	3A y 120V E= 0,18	E=0,1789	0,61%
15 minutos	5A y 120V E=0,15	E=0,1489	0,73%
15 minutos	6A y 120V E=0,18	E=0,1788	0,67%

Como se observa en la tabla, para corrientes bajas el tiempo de prueba fue más largo con el fin de estimar de una mejor forma el error ya que en un tiempo corto la energía medida era muy pequeña y la diferencia entre el MDPE y el TPZ no era notoria.

Todas las pruebas de verificación periódica del funcionamiento del medidor se hicieron revisando que se cumpliera con los límites expuestos en las tablas 2 y 3 de la norma NTC 4856, que es tener un porcentaje de error máximo del 1%.

#### **4.5.6 Prueba con $fp=0,5$ inductivo**

En esta prueba el MDPE presentó un error máximo del 3% para una corriente de 6A y una tensión de 120V. Aunque el error para valores de potencia bajos supera los límites exigidos por la norma según su clase, el equipo opera con errores inferiores al 1% cuando el  $fp$  se encuentre dentro del rango de 0,95 y 1.

#### **4.5.7 Observaciones de los resultados obtenidos en las pruebas en el laboratorio de la ESSA**

En general para las pruebas de exactitud, arranque, vacío, verificación de la constante corriente máxima; el MDPE tiene resultados conforme a un medidor clase 1, restaría revisar los resultados con un  $fp=0,5$  inductivo según lo estipula la norma y las pruebas de propiedades dieléctricas que no se realizaron por cuestiones de tiempo y de acceso restringido al laboratorio de la ESSA.

Se espera que un proyecto sea destinado a la mejora de este equipo y que se estudien con más detenimiento las propiedades dieléctricas y los ensayos con factores de potencia bajos.

## 5. LOGROS

En este trabajo se destacan los siguientes logros:

1. Se construyó un equipo de medición de potencia y energía con error menor al 1% para cargas con un factor de potencia entre 0,95 y 1.
2. Se hizo un programa de calibración externa que da los valores que deben ser ajustados a los registros de APGAIN y CFDIV del ADE7756 para ajustar el porcentaje de error, en caso que el equipo se descalibre.
3. Se logró verificar la clase 1 del medidor, por medio de las pruebas realizadas en el laboratorio de contadores de energía de la ESSA, realizando una comparación del resultado de energía medido frente a un patrón de medida con un grado de incertidumbre del 0,001% (TPZ-303).
4. Se logró explotar otros recursos del ADE7756, para mostrar otros parámetros a medir como frecuencia de línea y temperatura.
5. Se logró entregar un equipo de fácil operación, ya que tiene un teclado que permite entrar a sus diferentes modos de operación (Operación normal de medición de energía, calibración, manejo de interrupciones e historial de interrupciones), sin necesidad de conectarse a un PC.
6. Se entrega una programación abierta a todas las mejoras posibles, que permitan ampliar la funcionalidad del equipo, por medio de la explotación de los recursos internos del ADE7756 y del microcontrolador que aún faltan por revisar.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo de grado se realizó el montaje de un sistema digital para medición de potencia y energía activa monofásica, implementando el CI ADE7756, verificando sus alcances y prestaciones así como sus múltiples funciones y fácil programación. Durante su construcción, programación y pruebas se pudo concluir que:

- El correcto funcionamiento del equipo depende en gran medida de las componentes utilizadas. Por esta razón para impedir que el error en la medida fuera alto, se realizó un estudio para selección de los componentes enfocados a revisar aspectos como: su grado de tolerancia (resistencias y condensadores para la construcción de los filtros en las señales de entrada), capacidad de la memoria EEPROM, (de tal manera que tuviera la suficiente capacidad para los datos que iban a ser almacenados); microcontrolador (capaz de realizar varias operaciones y controlar varios periféricos), sensor de corriente (con buenas características de linealidad en el rango fijado en este trabajo de grado), visualizador de fácil adquisición y bajo costo (módulo LCD de 2x16), fuente de alimentación capaz de suministrar  $\pm 12$  V para la alimentación del sensor y 5V para los demás componentes (fuente PT5062). Esta selección hizo posible construir un equipo apto para cumplir con los objetivos fijados en este proyecto y capacitado para que pueda ser ampliado su rango de funcionalidad.
- Por la razón expuesta anteriormente, el MDPE está en la capacidad de medir hasta 220V y corrientes de 6A, superando uno de los objetivos, que era medir tensiones de 110V y corrientes de 3A monofásicas; aunque cabe destacar que el sensor de corriente escogido, está en la capacidad de medir hasta 25 A, no se ajustó a su máximo rango por considerar que pierde linealidad y exactitud en la salida.
- Aunque la finalidad de escoger el CI ADE7756 fue medir potencia y energía, también fueron explotadas otras funciones como por ejemplo: medición de

temperatura, frecuencia de línea y registrar el conteo de los diferentes tipos de interrupciones que este chip maneja.

- Se realizó la calibración del equipo por medio de la salida de pulsos CF que está directamente relacionada con el registro ENERGY del CI ya que este la genera teniendo en cuenta los valores de su registro de ENERGIA, es decir, cada vez que el registro ENERGY alcanza “cierto valor”, se genera un pulso. **Según su hoja de datos página 23:** “la conversión se realiza acumulando energía en un registro de 24 bits. Cada vez que el bit más significativo de ese registro cambia de 0 a 1, se genera un pulso”. Esta calibración resultó ser exacta y fácil de realizar; las pruebas realizadas al equipo tanto en la ESSA como en la UIS, demostraron la exactitud de dicha salida (CF).
- Relacionado con la calibración; junto al equipo se entrega un programa hecho en Visual Basic que realiza el cálculo de las ecuaciones descritas en los capítulos 3 y 4 utilizadas para la calibración y muestra los valores que deben ser ajustados en los registros internos del ADE7756 APGAIN y CFDIV, para que el equipo quede calibrado.
- El MDPE no sólo permite visualizar el consumo de energía, sino que también maneja cuatro modos de operación. El primero es el de operación normal, donde no sólo se visualiza la energía consumida por una carga, sino también la frecuencia de línea, el tiempo de medición de dicho valor y un pulsador que determina el consumo de energía útil para la realización de las pruebas al equipo. El segundo, es la opción de calibración donde el equipo se dispone a ser calibrado por el programa mencionado anteriormente mediante la conexión por el puerto serie con un PC. El tercero es el acceso a todos los registros del CI ADE7756 donde se tiene la opción de modificar aquellos que sean de lectura y escritura para fines de ajuste de ganancias de las señales de corriente, tensión y potencia, errores de fase, ajuste del *offset* de entrada, deshabilitación de filtros internos de este integrado, además de los conversores A/D y funciones específicas como el cruce por cero, el SAG de línea y el registro temperatura entre otras. Por último se encuentra el manejo del historial de interrupciones

donde se tienen en cuenta, todas las que el ADE7756 puede manejar, con la opción de habilitar las que se deseen estudiar. En este modo de operación existe un contador para cada una de ellas que se incrementa cuando esta ocurre pero sólo si esta se encuentra habilitada.

- En cuanto a forma y tamaño se notó que el MDPE es mucho más pequeño que los medidores electrónicos que se consiguen en el mercado y además hace viable que este pueda ser comercializado ya que el precio que sugerimos de acuerdo al costo de los materiales, montaje y el valor estimado de la programación del mismo suman \$ 800 000,00 m/cte; valor inferior al de los medidores que se consiguen actualmente en nuestro medio para uso residencial e industrial, que se encuentra dentro del rango de \$1 000 000,00 hasta \$3 500 000,00.
- Las pruebas realizadas en la UIS al MDPE y al sistema de desarrollo EvalADE7756, demostraron que el error máximo del equipo construido en este trabajo de grado es mucho menor. Esto puede deberse a factores como: la selección de la constante de calibración de Eval, la utilización de menos decimales en la medida de energía, mayor sensibilidad al ruido en corrientes pequeñas, además de no haber ensayado al 100% sus posibilidades, que definitivamente pueden disminuir el error presentado, pero éste no era el objetivo de este proyecto.
- Con el fin de ofrecer un resultado más objetivo para la verificación de la clase del medidor, se hicieron pruebas en vacío, arranque, de exactitud, comprobación de la constante en el laboratorio de contadores de energía de la ESSA, certificado por la superintendencia para la verificación de la clase de los medidores, mediante el uso de un patrón de medición (TPZ-303) con una clase de 0,001 donde se obtuvieron resultados satisfactorios ya que el error máximo se mantuvo dentro del rango establecido para medidores clase 1 que es menor al 1%.

- En las pruebas realizadas tanto en la ESSA como en la UIS se pudo comprobar que el equipo mide con un error menor al 1% para cargas con un factor de potencia entre 0,95 y 1. Con este error máximo se puede verificar que el MDPE está en el rango de medidores de energía clase 1, objetivo propuesto en este trabajo de grado. Cabe resaltar que el error para factor de potencia bajo (0,5), se elevó al 3% pero este puede ser mejorado por medio de un registro interno del ADE llamado PHCAL, que permite el ajuste de fase de la señal de potencia.
- En las pruebas realizadas al equipo, se observó que por medio de la manipulación de la constante de calibración, se puede reducir el error en la medida de energía.
- Es importante resaltar que el equipo EPOCH-10-E, utilizado para realizar las pruebas al MDPE en la UIS, tiene una clase similar al MDPE, ya que contrastando los resultados obtenidos con el equipo de la ESSA, éstos son similares como se observa en las tablas de resultados del capítulo 4.
- Con respecto al microcontrolador, se considera que se aprovechó al máximo, y que fue una buena elección, ya que se emplearon los siguientes módulos: El de las Interrupciones que son: Interrupción para manejo del teclado, interrupción por recepción de *bytes* en el puerto serie (para el programa de calibración), interrupción del *Timer 1* operando cada segundo (para mostrar el tiempo de prueba en pantalla), interrupción de captura de entrada (*Input Capture*) canal 0 del *Timer 1* para capturar la señal de cruce por cero ZX (para medir la frecuencia de línea), interrupción de captura de entrada (*Input Capture*) canal 1 del *Timer 1* para capturar la señal de salida de frecuencia CF (**PARA MEDIR LA ENERGIA**) e interrupción externa (para sensar las interrupciones del ADE, en especial la de **SAG**). Además del control de los siguientes periféricos: El *Timer 1*, *Input Capture* de los dos canales del *Timer 1*, Puerto Serie a 9600 bps, el módulo de teclado del puerto A, el módulo SPI para comunicación con el ADE, se usaron las resistencias de *pull-up* internas para el teclado y algunas señales digitales de entrada (ZX, CF).

- Con respecto a la memoria usada del microcontrolador fue la siguiente:  
**Memoria de programa** Se utilizó una capacidad de memoria de aprox. 4KB, es decir, el **12,5%** de la memoria disponible (32KB). Se tiene memoria de sobra para implementar mas funciones en el sistema.  
**Memoria de datos:** 75 bytes, es decir el **14,6%** de la RAM disponible en el GP32 (512 bytes). También queda espacio en la memoria RAM para nuevas funciones.
  
- Este trabajo es un aporte a nuestra formación profesional, ya que con él se reforzaron conocimientos acerca de la medición de potencia y energía y todo lo relacionado con mediciones eléctricas y el análisis de resultados. Además, se conocieron las normas que rigen actualmente para la construcción de medidores de estado sólido, así como el valor comercial y la tasa de utilización de este tipo de medidores y las diferentes clases (según el porcentaje de error) que se encuentran en el mercado.

## 7. SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES

Aunque las metas fijadas en este trabajo de grado fueran cumplidas se considera importante resaltar que este equipo está en la capacidad de ser mejorado o ampliado de acuerdo a su funcionalidad; por lo tanto aquí se enuncia lo que se considera más importante para ser estudiado:

- El CI ADE7756 ofrece dos posibilidades de calibración una que es el conteo de pulsos equivalentes al consumo de energía por una carga dada, tal y como se trabajó y el otro es el cálculo de potencia con el registro ENERGY, que no fue escogido por la dificultad de hacer operaciones complejas en lenguaje de programación en bajo nivel. Por lo tanto se sugiere revisar el cálculo de la constante en lenguajes de alto nivel como “C”, en el cual es posible realizar más operaciones y con un mayor grado de complejidad.
- El integrado ADE7756 ofrece la posibilidad de poder visualizar la forma de onda de las señales de corriente, tensión y potencia; en el lenguaje de programación en bajo nivel (ensamblador), puede ser relativamente difícil mostrar valores instantáneos de estas señales. Sin embargo esto se puede implementar usando tablas de datos para guardar los valores de dichas señales para que posteriormente puedan ser visualizadas.
- Se recomienda aumentar la frecuencia del cristal a la frecuencia máxima si es posible, la cual es de 32MHz, ya que el oscilador utilizado en el microcontrolador es relativamente lento (8MHz), haciendo imposible leer con el microcontrolador, los valores de registro forma de onda (que es de 20bits, o sea 3 bytes) con la frecuencia de muestreo del ADE7756 que es mas baja (3,5kSPS; kilomuestras por segundo).
- Cuando se hicieron pruebas en la electrificadora, se observó que siempre los conectores van por el lado de abajo, y no en el costado como se hizo. También se notó que el conector utilizado debe estar en la capacidad de poderse

conectar a cables con un calibre bastante grueso, por lo tanto se recomienda cambiar los utilizados por otros de mayor capacidad.

- Hay que tener en cuenta que el tipo de salida de pulsos requerido por el sistema de pruebas de la Electrificadora es un sensor óptico que determina el consumo de energía de acuerdo a la constante de calibración del equipo. Aunque el LED no funcionó, tal vez por el color, la intensidad o la longitud de onda de la señal que emite, si sirvió el indicador en el *display*, teniendo en cuenta que la pantalla debe tener bien ajustado el contraste y la intensidad para que el sensor óptico la pueda captar fácilmente.
- Se considera necesario realizar pruebas a la red atenuadora de tensión y al sensor de corriente en todo su rango de operación (0 a 25 A), con el fin de revisar su respuesta y el error que pueda estar introduciendo en la medida. También se cree importante revisar si el sensor de corriente genera desfases de corriente con la señal de tensión, ya que en la nota de aplicación AN-564 se menciona que algunos sensores pueden ocasionar pequeños errores de fase en las señales.
- Aunque se logró determinar que variando en unidades pequeñas la constante de calibración del equipo el error en la medida puede ser mejorado, se recomienda hacer más estudios para determinar el valor de la constante que mayor se ajuste.
- Las pruebas con cargas inductivas arrojaron valores con un error del 3% para  $f_p=0,5$ , este puede ser corregido con un registro interno del ADE7756 llamado PHCAL, que permite realizar una calibración en el  $\cos \varphi$  de la señal de potencia medida. También se recomienda realizar pruebas con cargas capacitivas.
- Dada la posibilidad de modificar los registros internos que determinan los modos y alcances de funcionamiento del MDPE, es factible medir otros parámetros aparte de la energía consumida por una carga, como pueden ser, el  $\cos \varphi$ , la

energía aparente, la energía reactiva y demanda máxima de la carga entre otras; teniendo en cuenta que el microcontrolador debe ser programado en un lenguaje de programación en alto nivel. En fin, las posibilidades de desarrollo futuro son amplias y dependerán de las necesidades o sugerencias que se presenten en la industria o de los proyectos de investigación y desarrollo que la universidad realice vía al estudio de esta clase de medidores.

- Mejorar la protección del equipo, sugiriendo cambiar la caja o mejorarla con el fin de realizarle pruebas que determinan las capacidades dieléctricas del MDPE.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

### 1. Bibliografía para el marco teórico

- **DONALD G FINK/ H. WAYNE BEATY.** Manual de Ingeniería Eléctrica. Décimo tercera edición. Editorial MC Graw Hill.
- **WILLIAM D. STEVENSON.** Análisis de sistemas eléctricos de potencia. Segunda edición. Editorial MC Graw Hill.
- **PETIT, JOHHAN FARITH. USTARIZ, ARMANDO JAIME.** Análisis general de armónicos: Revisión de las definiciones de Potencia. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1992.
- **MIGUEL COLOM BARCO.** Apuntes de Instrumentación Electrónica Formulas para transductores y errores en las medidas.
- **MARGA MARCOS** INTRODUCCIÓN A LA INSTRUMENTACIÓN. Ingeniería de Control II, ESI Bilbao, 2003

### 2. Bibliografía para la realización del diseño

- [www.analog.com](http://www.analog.com), *Data sheet ADE7756. Active energy meter IC with serial interface.*
- [www.analog.com](http://www.analog.com), *Data Sheet AN564, A Power Meter Reference Design Based on the ADE7756. Stephen English, Dave Smith.*
- [www.analog.com](http://www.analog.com), *EVAL-ADE7756EB, Evaluation Board Documentation ADE7756 Energy Metering IC.*
- [www.analog.com](http://www.analog.com), *RMS Calculation for Energy Meter Applications Using ADE7756. Etienne Moulin.*
- [http://motorola.com/microncontrolador MC68HC08GP32](http://motorola.com/microncontrolador_MC68HC08GP32), *MC68HC908GP32 - MC68HC08GP32 Technical Data.*

### 3. Bibliografía para la realización de pruebas

- NTC 4052: 2000, Medidores Estáticos de Energía Clase 1 y 2
- NTC 2205: 1992, Electrotecnia. Transformadores de corriente (IEG 185).

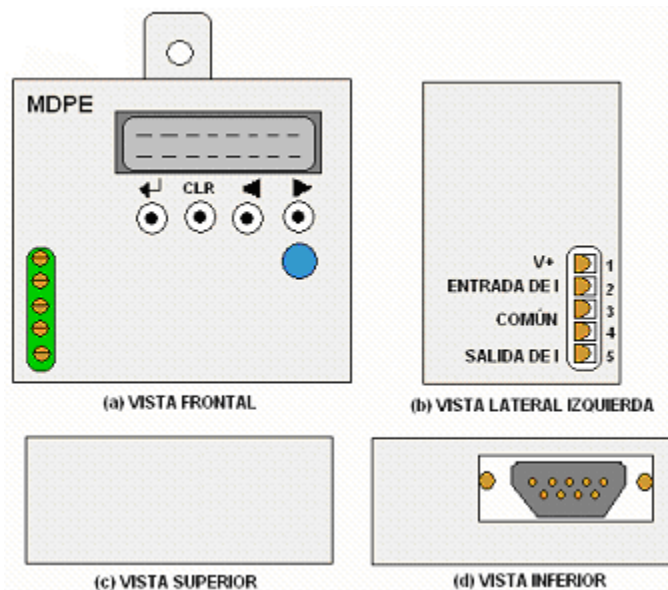
- NTC 2288: 1996, Electrotecnia. Medidores de energía activa de corriente alterna clases 0,5, clase 1.
- IEG 38: 1983, IEG Estándares de voltajes.
- IEG 736: 1982, Pruebas para equipos electrónicos para medición de energía.
- NTC 4856, Verificación inicial y periódica de medidores de energía.

## ANEXO. GUIA DE MANEJO DEL MDPE

### 1. Partes generales del MDPE

El MDPE se compone de una pantalla de cristal líquido para visualizar las mediciones y los diferentes modos de operación, previamente descritos en los capítulos 2, 3 y 4 de este libro; cuatro teclas que son *ENTER*, *CLEAR*, ← (flecha hacia la izquierda) y → (flecha hacia la derecha), utilizadas para desplazarse dentro del menú, que sirve para revisar los modos de operación y hacer cambios en los registros internos del ADE7756, un LED azul para visualizar el conteo de pulsos equivalentes al consumo de energía en kWh; una salida de puerto serie para ser conectado al PC en el proceso de calibración; posición y función de los conectores del MDPE y RESET para inicializar el software del MDPE sin necesidad de que este sea apagado. En la figura 1 se presentan las posiciones de los componentes descritos en la caja del MDPE.

Figura 1. Vistas del MDPE



### 2. Forma de conectar el MDPE

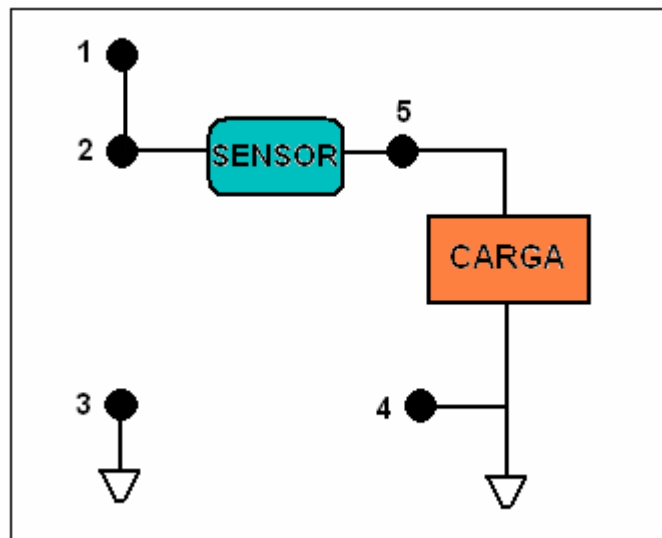
Para conectar las entradas de corriente y tensión, se debe tener en cuenta que el equipo fue concebido no sólo para conectarlo directamente a una carga para medir

la potencia consumida, sino también para realizar pruebas donde se le inyecte tensión y corriente por separado. A continuación se presentan los dos procedimientos.

### 2.1 Conexión directa a una carga

Para medir la energía de una carga se debe conectar en el equipo como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Conexión del MDPE con una carga

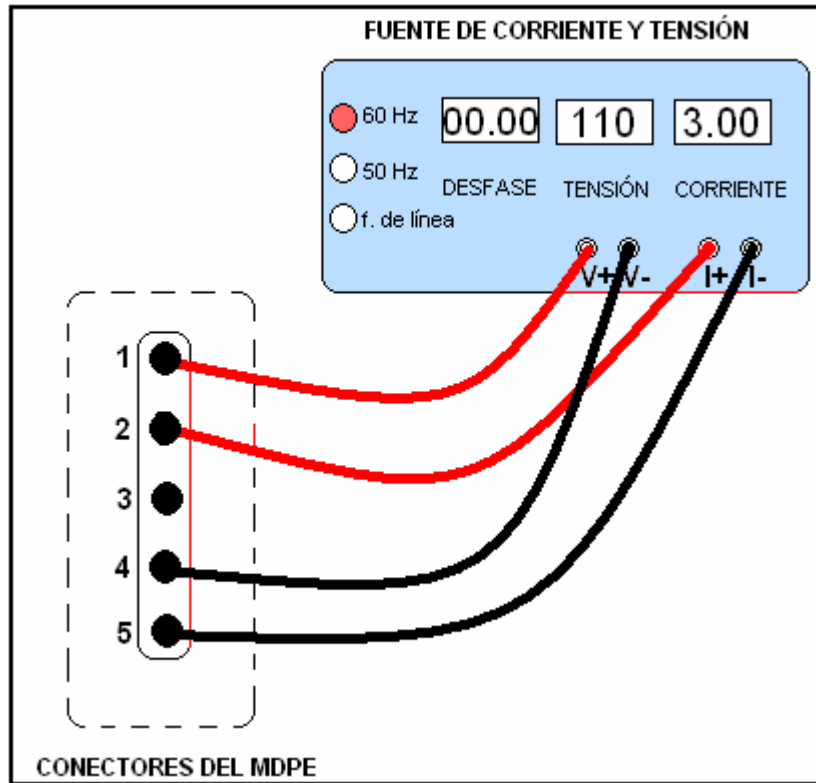


En la figura la carga va conectada entre los pines 5 y 4, el *pin* 3 es conectado a un nivel de referencia al igual que el 4 y los *pin*es 1 y 2 se dejan libres.

### 2.2 Conexión de corriente y tensión por separado

Para conectar las entradas de corriente y tensión por separado se debe conectar el *pin* 1 a la entrada positiva de tensión, el *pin* 2 a la entrada positiva de corriente, el *pin* 5 a la salida de corriente y pueden conectarse a un nivel de referencia cualquiera de los *pin*es 3 o 4 que son comunes. En la figura 3 se muestra la forma de conexión a una fuente de corriente y tensión.

**Figura 3. Conexión de corriente y tensión**

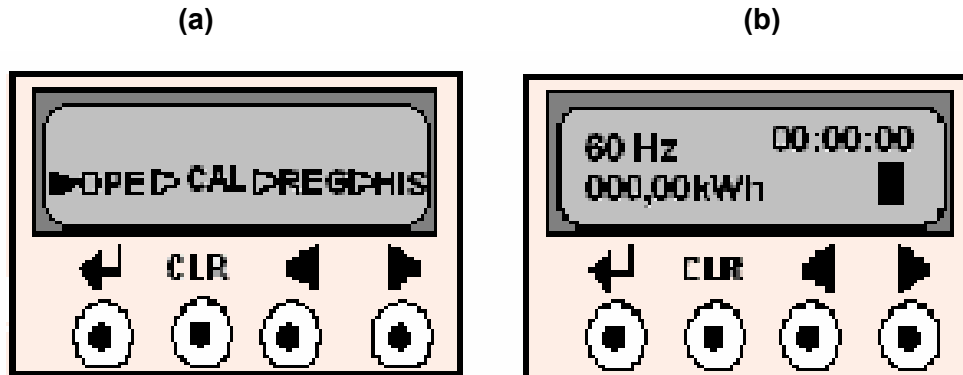


## 1. Manejo de los modos de operación del MDPE

### 3.1 Modo de operación normal

Al encender el equipo aparece en la pantalla el mensaje Inicial: "Medidor digital de Energía", luego se muestran los diferentes modos de operación; para revisar el modo de operación normal se debe pulsar la tecla ENTER (Ver figura 4(a)); inmediatamente aparece en la pantalla los resultados de energía medida en kWh, frecuencia de línea y tiempo de medición (ver figura 4 (b)). Adicionalmente en el extremo derecho de la pantalla aparece un pulsador que indica el conteo de pulsos equivalentes a los kWh consumidos por la carga.

Figura 4. Opción operación normal

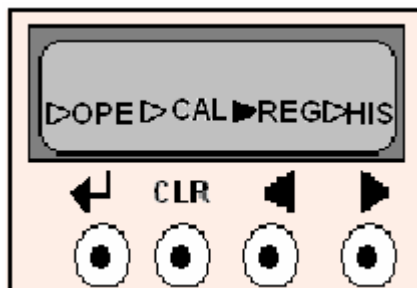


### 3.2 Modo de manejo de registros internos del ADE7756

Este modo permite acceder a todos los registros del ADE7756, teniendo la opción de cambiar su valor a aquellos que sean de escritura, en la tabla 1 se muestran el nombre de los registros que pueden modificarse.

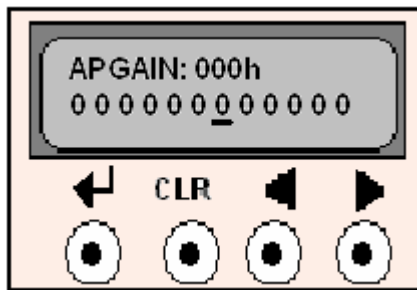
Si se desea entrar a la opción de registros se debe correr con la flecha hacia la derecha hasta REG, pulsando ENTER (Ver figura 5) aparecen cada uno de los registros del ADE7756, desplazándose por todos ellos con las flechas, unos de sólo lectura como el AENERGY y otros de lectura y escritura que se muestran en la tabla 1, los cuales pueden ser modificados.

Figura 5. Opción registros del ADE7756



Cuando se va a modificar el valor de un registro se debe pulsar la tecla ENTER para seleccionarlo, en la pantalla en la parte de arriba aparecerá su nombre con el valor actual en hexagesimal; en la parte de abajo aparece cada uno de sus *bits*, los cuales se podrán modificar con la tecla ENTER y desplazándose con las flechas para cambiar los que se deseen (ver figura 6).

**Figura 6. Ejemplo de la visualización de un registro del ADE7756**



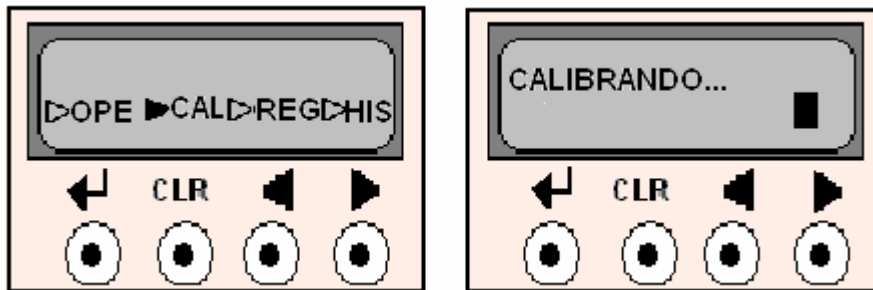
**Tabla 1. Registro de lectura y escritura del ADE7756**

Nombre del Registro	No. de bits	Función
<b>MODE</b>	<b>16</b>	Accede a la mayoría de la funcionalidad del ADE7756.
<b>CFDIV</b>	<b>12</b>	Registro que ajusta la frecuencia de salida equivalente a Energía.
<b>CH1OS</b>	<b>6</b>	Corrige offset en en canal de corriente.
<b>CH2OS</b>	<b>6</b>	Corrige offset del canal de tensión.
<b>GAIN</b>	<b>8</b>	Selección de ganancia en los canales de tensión y corriente.
<b>APGAIN</b>	<b>12</b>	Ajuste de ganancia de la potencia activa.
<b>PHCAL</b>	<b>6</b>	Calibración de fase en las señales de tensión y corriente $\pm 3^\circ$ a 60 Hz.
<b>APOS</b>	<b>12</b>	Corrección de los pequeños <i>offsets</i> en el cálculo de la potencia activa.
<b>ZXOUT</b>	<b>12</b>	Detección de cruce por cero con solicitud de interrupción (IRQ).
<b>SAGCYC</b>	<b>8</b>	Especifica el número de medios ciclos de línea consecutivos de la señal de tensión.
<b>IRQEN</b>	<b>8</b>	Habilitación o deshabilitación de las interrupciones.
<b>SAGLVL</b>	<b>8</b>	Nivel de señal pico en el pin SAG de la entrada de tensión.

### 3.3 Modo calibración

Para acceder a este modo de operación se desplaza con la tecla de flecha hacia la derecha, colocándose en CAL, pulsando la tecla ENTER, teniendo en cuenta que anteriormente el equipo debe estar conectado por el puerto serie al computador para la transferencia de datos (ver figura 7). Finalizado el proceso de calibración se deben introducir los datos calculados en el computador en los registros CFDIV y APGAIN, del modo explicado en el modo de operación de registros del ADE7756.

Figura 7. Opción calibración



### 3.4 Modo historial de interrupciones

En este modo se muestra el número de veces que han ocurrido las interrupciones que se encuentren habilitadas. Actualmente el equipo realiza el conteo de la interrupción por SAG de línea. Al igual que los demás modos de operación se debe desplazar hasta HIS y pulsar la tecla ENTER, para entrar a él. Ver figura 8.

Figura 8. Opción historial de interrupciones

