

**MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA USANDO CIRCUITOS INTEGRADOS DE  
PROPÓSITO ESPECÍFICO**

**JORGE ALBERTO ACOSTA ROMERO**

**EDGAR ALONSO CORZO SUÁREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2009**

**MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA USANDO CIRCUITOS INTEGRADOS DE  
PROPÓSITO ESPECÍFICO**

**JORGE ALBERTO ACOSTA ROMERO**

**EDGAR ALONSO CORZO SUÁREZ**

**Trabajo de grado para optar titulo de**

**Ingeniero Electrónico**

**Director:**

**Ms.C JAIME BARRERO PEREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2009**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	
<b>LISTA DE ANEXOS</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>1. MARCO TEORICO</b>	5
<b>1.1 DEFINICIONES GENERALES</b>	5
1.1.1 Valor eficaz	5
1.1.2 Potencia instantánea	5
1.1.3 Potencia aparente	6
1.1.4 Potencia activa	6
1.1.5 Potencia reactiva	6
1.1.6 Factor de potencia	7
1.1.7 Energía	7
<b>1.2 ANALISIS DE ARMÓNICOS</b>	7
1.2.1 Potencia aparente	8
1.2.2 Potencia activa	9
1.2.3 Potencia reactiva	9
<b>1.3 ANALISIS DE ALGORITMOS USADOS PARA CALCULAR POTENCIAS</b>	10
1.3.1 Modelo de Budeanu	11
1.3.2 Modelo de Fryze	12
1.3.3 Modelo de Czarnecki	13
1.3.4 Modelo IEEE 1459	14

<b>1.4</b>	<b>SISTEMAS DE MEDIDA</b>	22
1.4.1	Error	22
1.4.2	Exactitud	22
1.4.3	Precisión	22
1.4.4	Linealidad	22
1.4.5	Sensibilidad	22
1.4.6	Resolución	22
1.4.7	Reproducibilidad	23
1.4.8	Transductores	23
1.4.9	Sensores	23
<b>2.</b>	<b>DESCRIPCIÓN CIRCUITOS INTEGRADOS DE PROPOSITO ESPECÍFICO</b>	24
<b>2.1</b>	<b>SA9904B (SAMES)</b>	24
2.1.1	Descripción general	24
2.1.2	Protocolo de comunicación	24
2.1.3	Acceso a los registros	25
2.1.4	Registros de energías activa y reactiva	26
2.1.5	Cálculo de energías activa y reactiva	27
2.1.6	Cálculo de tensión	28
2.1.7	Cálculo de frecuencia	28
<b>2.2</b>	<b>ADE7758 (ANALOG DEVICE)</b>	29
2.2.1	Descripción general	29
2.2.2	Canales de corriente	29
2.2.3	Canales de tensión	30
2.2.4	Protocolo de comunicación	31
2.2.4.1	Operación de escritura serial	32

2.2.4.2	Operación de lectura serial	33
2.2.5	Cálculo de potencia activa	34
2.2.6	Cálculo de potencia reactiva	37
2.2.7	Cálculo de potencia aparente	38
2.2.8	Cálculo de corriente	39
2.2.9	Cálculo de tensión	40
2.2.10	Interrupciones	41
<b>3.</b>	<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE</b>	<b>43</b>
<b>3.1</b>	<b>ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES</b>	<b>44</b>
<b>3.2</b>	<b>SENSADO DE CORRIENTE</b>	<b>44</b>
<b>3.3</b>	<b>SENSADO DE TENSIÓN</b>	<b>46</b>
<b>3.4</b>	<b>AMPLIFICACIÓN DE SEÑALES</b>	<b>46</b>
<b>3.5</b>	<b>FILTRADO DE SEÑALES</b>	<b>49</b>
<b>3.6</b>	<b>ADQUISICIÓN SEÑALES DE CORRIENTE SA9904B</b>	<b>50</b>
<b>3.7</b>	<b>ADQUISICIÓN SEÑALES DE TENSIÓN SA9904B</b>	<b>52</b>
<b>3.8</b>	<b>ADQUISICIÓN SEÑALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE ADE7758</b>	<b>53</b>
<b>3.9</b>	<b>ALMACENAMIENTO DE DATOS</b>	<b>55</b>
<b>3.10</b>	<b>MANEJO DE PERIFÉRICOS</b>	<b>56</b>
<b>3.11</b>	<b>VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS</b>	<b>57</b>
<b>3.12</b>	<b>DISEÑO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN</b>	<b>58</b>
<b>4.</b>	<b>DESCRIPCIÓN SOFTWARE</b>	<b>61</b>
<b>4.1</b>	<b>PROGRAMA EN MICROCONTROLADOR GP32</b>	<b>61</b>
4.1.1	Rutina configurar medidor	63
4.1.2	Calibrar medidor	65
4.1.3	Iniciar medición	66

<b>4.2</b>	<b>PROGRAMA LABVIEW</b>	<b>70</b>
<b>5.</b>	<b>CALIBRACIÓN</b>	<b>76</b>
<b>5.1</b>	<b>CALIBRACIÓN ADE7758</b>	<b>76</b>
5.1.1	Calibración de offset en tensión y corriente	77
5.1.2	Calibración de ganancia	78
5.1.3	Calibración de fase	79
5.1.4	Calibración de offset en potencia	80
<b>5.2</b>	<b>CALIBRACIÓN SA9904B</b>	<b>81</b>
5.2.1	Calibración de tensión	81
5.2.2	Calibración de potencia y energía	82
<b>6.</b>	<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	<b>84</b>
<b>6.1</b>	<b>PRUEBAS CARGAS LINEALES, SISTEMAS EQUILIBRADOS</b>	<b>85</b>
<b>6.2</b>	<b>PRUEBAS CARGAS LINEALES, SISTEMAS NO EQUILIBRADOS</b>	<b>94</b>
<b>6.3</b>	<b>PRUEBAS CARGAS NO LINEALES, SISTEMAS EQUILIBRADOS</b>	<b>96</b>
<b>6.4</b>	<b>PRUEBA CARGA NO LINEAL, SISTEMA NO EQUILIBRADO</b>	<b>105</b>
<b>6.5</b>	<b>PRUEBAS DE MEDICIÓN DE ENERGÍA</b>	<b>106</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>110</b>
<b>8.</b>	<b>SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES</b>	<b>114</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>116</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Formato de direccionamiento de registros SA9904B.	26
Figura 2. Método de acumulación de energía SA9904B	27
Figura 3. Canal de corriente ADE7758.	30
Figura 4. Canal de tensión ADE7758.	31
Figura 5. Operación de escritura serial ADE7758.	32
Figura 6. Operación de lectura serial ADE7758.	33
Figura 7. Calculo de potencia activa ADE7758.	34
Figura 8. Calculo de energía activa ADE7758.	35
Figura 9. Calculo de energía reactiva ADE7758.	37
Figura 10. Calculo de energía aparente ADE7758.	38
Figura 11. Calculo de corriente ADE7758.	40
Figura 12. Calculo de tensión ADE7758.	41
Figura 13. Diagrama de bloques funcionamiento del medidor de energía	43
Figura 14. Esquema de conexión ACS712.	45
Figura 15. Esquema implementado para sensar corriente.	48
Figura 16. Esquema implementado para sensar tensión.	49
Figura 17. Canal de corriente SA9904B.	50
Figura 18. Circuito de adecuación de señales en el canal de corriente para la fase A en SA9904B.	51

Figura 19.	Canal de tensión SA9904B.	52
Figura 20.	Circuito de adecuación de señales en el canal de tensión para la fase A de SA9904B.	53
Figura 21.	Circuito de adecuación en el canal de corriente fase A de ADE7758.	54
Figura 22.	Circuito de adecuación en el canal de tensión fase A de ADE7758.	55
Figura 23.	Esquema de conexión fuente de alimentación digital.	59
Figura 24.	Esquema de conexión fuente de alimentación dual.	59
Figura 25.	Diagrama de flujo rutina de inicio.	62
Figura 26.	Diagrama de flujo rutina configurar medidor.	63
Figura 27.	Diagrama de flujo rutina ajustar parámetros.	64
Figura 28.	Diagrama de flujo rutina editar registros.	64
Figura 29.	Diagrama de flujo rutina calibrar medidor.	65
Figura 30.	Diagrama de flujo rutina iniciar medición.	67
Figura 31.	Paginas de visualización Pantalla LCD.	68
Figura 32.	Visualización ventana principal Labview.	71
Figura 33.	Ventana mostrando información de la energía y potencia reactiva por fase de ADE7758 y SA9904B.	71
Figura 34.	Diagrama para actualizar datos de forma automática o manual	72
Figura 35.	Escritura y lectura de datos por el puerto serial.	74

Figura 36.	Rutina principal de calibración del circuito ADE7758.	77
Figura 37.	Errores en las mediciones de potencias en ADE7758, para la prueba 1 variando niveles de corriente.	88
Figura 38.	Errores en las mediciones de potencias en SA9904B, para la prueba 1 variando niveles de corriente	88
Figura 39.	Errores en las mediciones de potencias en ADE7758, para la prueba 2 variando niveles de corriente.	90
Figura 40.	Errores en las mediciones de potencias en SA9904B, para la prueba 2 variando niveles de corriente.	91
Figura 41.	Errores en las mediciones de potencias en ADE7758, para la prueba 3 variando niveles de corriente.	93
Figura 42.	Errores en las mediciones de potencias en SA9904B, para la prueba 3 variando niveles de corriente.	93
Figura 43.	Error potencia aparente en ADE7758, variando el factor de potencia e inyectando corriente solo en la fase A.	96
Figura 44.	Error potencia aparente total en ADE7758, variando el orden de los armónicos en corriente.	99
Figura 45.	Error de la potencia aparente total en ADE7758, variando el factor de potencia e inyectando el segundo armónico en tensión y corriente.	102
Figura 46.	Error de la potencia aparente total en ADE7758, variando el factor de potencia e inyectando el tercer armónico en tensión y corriente.	104

## INDICE DE TABLAS.

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Índice de registros SA9904B.	25
Tabla 2. Formato de visualización de datos en la pantalla LCD.	58
Tabla 3. Paginas a visualizar en la pantalla LCD.	69
Tabla 4. Clasificación de los datos recibidos por el puerto serial mediante labview.	73
Tabla 5. Bandera de interrupción.	75
Tabla 6. Errores permitidos para prueba de variación de corriente según norma NTC 4052.	85
Tabla 7. Resultados prueba 1, con 100 mA.	86
Tabla 8. Errores prueba 1, con 100 mA.	86
Tabla 9. Resultados prueba 1, con 2.5 A.	87
Tabla 10. Errores prueba 1, con 2.5 A.	87
Tabla 11. Resultados prueba 1, con 5 A.	87
Tabla 12. Errores prueba 1, con 5 A.	87
Tabla 13. Resultados prueba 2, con 100 mA.	89
Tabla 14. Errores prueba 2, con 100 mA.	89
Tabla 15. Resultados prueba 2, con 2.5 A.	89
Tabla 16. Errores prueba 2, con 2.5 A.	89
Tabla 17. Resultados prueba 2, con 5 A.	90

Tabla 18.	Errores prueba 2, con 5 A.	90
Tabla 19.	Resultados prueba 3, con 100 mA.	91
Tabla 20.	Errores prueba 3, con 100 mA.	91
Tabla 21.	Resultados prueba 3, con 2.5 A.	92
Tabla 22.	Errores prueba 3, con 2.5 A.	92
Tabla 23.	Resultados prueba 3, con 5 A.	92
Tabla 24.	Errores prueba 3, con 5 A.	92
Tabla 25.	Errores permitidos para cargas no balanceadas según norma NTC 4052.	94
Tabla 26.	Resultados prueba 4, con FP=1	94
Tabla 27.	Errores prueba 4, con FP=1	95
Tabla 28.	Resultados prueba 4, Con FP=0,5 inductivo.	95
Tabla 29.	Errores prueba 4, con FP=0,5 inductivo.	95
Tabla 30.	Resultados prueba 4, con FP=0,8 capacitivo.	95
Tabla 31.	Errores prueba 4, con FP=0,8 capacitivo.	96
Tabla 32.	Resultados prueba 5, inyectando segundo armónico.	97
Tabla 33.	Errores prueba 5, inyectando segundo armónico.	97
Tabla 34.	Resultados prueba 5, inyectando tercer armónico.	97
Tabla 35.	Errores prueba 5, inyectando tercer armónico.	98
Tabla 36.	Resultados prueba 5, inyectando quinto armónico.	98
Tabla 37.	Errores prueba 5, inyectando quinto armónico.	98

Tabla 38.	Resultados prueba 5, inyectando séptimo armónico.	99
Tabla 39.	Errores prueba 5, inyectando séptimo armónico.	99
Tabla 40.	Resultados prueba 6, con FP=1	100
Tabla 41.	Errores prueba 6, con FP=1	100
Tabla 42.	Resultados prueba 6, Con FP=0,5 inductivo.	100
Tabla 43.	Errores prueba 6, con FP=0,5 inductivo.	101
Tabla 44.	Resultados prueba 6, con FP=0,8 capacitivo.	101
Tabla 45.	Errores prueba 6, con FP=0,8 capacitivo.	101
Tabla 46.	Resultados prueba 7, con FP=1.	102
Tabla 47.	Errores prueba 7, con FP=1	103
Tabla 48.	Resultados prueba 7, Con FP=0,5 inductivo.	103
Tabla 49.	Errores prueba 7, con FP=0,5 inductivo.	103
Tabla 50.	Resultados prueba 7, con FP=0,8 capacitivo.	104
Tabla 51.	Errores prueba 7, con FP=0,8 capacitivo.	104
Tabla 52.	Resultados prueba 8.	105
Tabla 53.	Errores prueba 8.	105
Tabla 54.	Resultados prueba 9, con 100 mA.	106
Tabla 55.	Errores prueba 9, con 100 mA.	106
Tabla 56.	Resultados prueba 9, con 2.5 A.	106
Tabla 57.	Errores prueba 9, con 2.5 A.	107

Tabla 58.	Resultados prueba 9, con 5 A.	107
Tabla 59.	Errores prueba 9, con 5 A.	107
Tabla 60.	Resultados prueba 10, con 100 mA.	108
Tabla 61.	Errores prueba 10, con 100 mA.	108
Tabla 62.	Resultados prueba 10, con 2.5 A.	108
Tabla 63.	Errores prueba 10, con 2.5 A.	109
Tabla 64.	Resultados prueba 10, con 5 A.	109
Tabla 65.	Errores prueba 10, con 5 A.	109

## RESUMEN

**TITULO:** MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA USANDO CIRCUITOS INTEGRADOS DE PROPÓSITO ESPECÍFICO\*

**AUTOR:** Jorge Alberto Acosta Romero, Edgar Alonso Corzo Suárez\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Medidor, ADE7758, SA9904B, DSP, Energía, Motorola, IEEE1459, Trifásico.

### DESCRIPCIÓN:

Tomando como base un trabajo de grado realizado en la Universidad Industrial de Santander donde implementan un medidor de energía monofásico, se continúa con este proyecto dedicado al estudio de la energía eléctrica en sistemas trifásicos.

El objetivo principal de este trabajo de grado consiste en implementar un prototipo de medidor electrónico de energía eléctrica en sistemas trifásicos, mediante dos circuitos integrados de propósito específico. Los circuitos integrados usados son el ADE7758 (ANALOG DEVICES) y SA9904B (SAMES). Se emplea un microcontrolador (MC68HC08GP32 Motorola), el cual se encarga de leer registros de los circuitos integrados en estudio para un posterior procesamiento de datos y también controlar periféricos tales como una pantalla LCD y un teclado matricial.

Debido a los diferentes algoritmos existentes para calcular potencia aparente en sistemas con cargas no balanceadas y no lineales, se realizaron pruebas en estas condiciones para comparar los resultados obtenidos mediante estos circuitos y los obtenidos en forma teórica utilizando el algoritmo propuesto por el estándar IEEE1459.

En el presente trabajo se exponen de forma detallada cada una de las etapas que hacen parte del funcionamiento de un medidor de energía, comenzando con la adquisición de señales de tensión y corriente y finalizando con los resultados mostrados en una pantalla LCD y el PC.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Director: Msc. Jaime Barrero Pérez.

## ABSTRACT

**TITLE:** MEASUREMENT OF ELECTRIC ENERGY USING INTEGRATED CIRCUITS OF SPECIFIC PURPOSE \*

**AUTHOR:** Jorge Alberto Acosta Romero, Edgar Alonso Corzo Suárez \*\*

**KEYWORDS:** Meter, ADE7758, SA9904B, DSP, Energy, Motorola, IEEE1459, Three-phase.

### DESCRIPTION:

Taking a work of degree accomplished in the University Industrial of Santander as a base, where a single phase energy meter is implemented, a study of energy metering in three-phase systems is carried out in this project. Most of the energy meters are being implemented using integrated circuits (IC) of specific purpose whence is important to make a study of this IC's.

The main objective of this work of degree consists of implementing an electronic meter of electric energy in three phase systems using two integrated circuits of specific purpose. The integrated circuits used are ADE7758 (ANALOG DEVICES) and SA9904B (SAMES). A microcontroller is used to control the system including peripherals as a screen (LCD) and a keyboard.

Despite of advantages of electronics meters their behaviors have been disputed in unbalanced systems and presence of harmonics. Several ways to calculate the apparent power has been proposed in systems with unbalanced loads and nonsinusoidal waves. The results obtained with these two ICs are compared with the standard IEEE1459 to check the performance in the conditions previously described.

Each stage of an energy meter is described in a detailed way starting with the acquisition of voltage and current signals in each phase and finishing with all the results showed in a LCD and a PC.

---

\* Work of Degree

\*\* Faculty of Physical Mechanicals Engineering. School of Electric, Electronic Engineering and telecommunications. Director: Jaime Barrero Perez.

## INTRODUCCIÓN

La adopción de la electrónica por parte de las empresas de servicios públicos ha crecido rápidamente durante los últimos años, en consecuencia las empresas de energía eléctrica se ven favorecidas de los medidores electrónicos, en aspectos como lograr disminuir la incertidumbre en la medición, tener menores dudas sobre las facturaciones, reducir el margen de pérdidas y aprovechar funciones adicionales.

Los primeros intentos en el diseño de medidores electrónicos de energía calculaban potencia de multiplicar corriente y tensión en el dominio analógico, pero la linealidad con respecto a la temperatura y el tiempo produjeron resultados no superiores a los medidores electromecánicos. Por fin, el poder de la tecnología moderna ha llegado a las puertas de la metrología de electricidad. Productos basados en *DSP* (Procesamiento Digital de Señal) digitalizan las señales de corriente y voltaje por medio de *ADCs* (Convertidores análogo-digital) antes de hacer los cálculos. El procesamiento digital de las señales permite el cálculo estable y exacto por encima de las variaciones de tiempo y medio ambiente. Este procesamiento digital se puede manejar de dos formas diferentes: *DSPs* programables y *DSPs* de función fija.

Las soluciones con *DSPs* programables ofrecen la ventaja de reconfiguración post diseño. Obviamente, la facilidad de la reconfiguración es una consideración importante para cualquier medidor electrónico, pero un *DSP* programable no es el método más exacto o el más económico de conseguir debido a las siguientes razones:

- Los productos estándar 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 analógica-digital fallan en la habilidad de continuamente efectuar sobre-muestreo a las señales análogas. La selección de una arquitectura *ADC* para los *DSPs* programables tendrá mayores costos y tendrá unos resultados más bajos en el número efectivo de bits de resolución.

- Los *DSPs* programables tienen un error inherente porque están limitados por un procesamiento discreto del tiempo. La potencia consumida durante los intervalos de los cálculos no se registra. Un producto con un *DSP* de función fija calcula la energía continuamente procesando la señal de potencia instantánea.
- Finalmente, el costo de los *DSPs* programables puede ser expresado en términos de la programación del código fuente y precios unitarios más altos. La simpleza de un *DSP* de función fija ofrece un bajo tiempo para llegar al mercado y costos generales bajos.

A pesar de las múltiples ventajas que presentan los medidores electrónicos, en sistemas trifásicos desequilibrados o con presencia de ondas distorsionadas existen problemas vinculados con las definiciones de la potencia aparente, reactiva y el factor de potencia. Múltiples definiciones han sido propuestas desde las primeras décadas del siglo XX, atendiendo a diferentes propósitos.

Considerando que las señales de corrientes o tensiones pueden ser no sinusoidales y en el caso de sistemas polifásicos presentar cierto desequilibrio se

debe redefinir el concepto de potencia aparente tradicional y definir el término de potencia no útil mediante la definición de potencia o corriente no activa. Este término comprende además de la potencia reactiva, los componentes de potencia o corrientes debidas a la distorsión de las formas de onda, la componente de continua o el desequilibrio de las fases.

Diferentes algoritmos han sido implementados para el cálculo de potencias y en consecuencia existe incertidumbre en la medición por parte de las empresas prestadoras de servicio de energía eléctrica, al no haber un consenso internacional ni una normativa sobre las definiciones de dichas magnitudes, que repercute en aspectos económico de dichas empresas.

La mayoría de medidores electrónicos de energía que se encuentran en el mercado están siendo implementados mediante circuitos integrados de propósito específico, por lo tanto se hace necesario un estudio de los mismos para obtener el conocimiento necesario sobre la forma de cálculo de estas variables y mirar si cumplen con los estándares vigentes y así poder emitir conceptos y criterios acerca del funcionamiento de estos circuitos, es decir, si la implementación es una buena alternativa en comparación con otros sistemas de medición utilizados actualmente.

Mediante el uso de circuitos integrados de propósito específico como ADE7758 de *Analog Devices* y SA9904B de *Sames*, se pretende realizar la medición de energía eléctrica en sistemas trifásicos, realizando un diseño e implementación de hardware para cada uno de estos circuitos y para la adquisición de señales de tensión y corriente, una interfaz en *Labview* para la visualización de los resultados y una serie de pruebas con el fin de comparar resultados, establecer criterios de selección, recomendaciones, ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Tomando como base los excelentes resultados obtenidos en un proyecto de grado realizado en la Universidad Industrial de Santander, en donde implementan un

medidor electrónico monofásico de energía<sup>1</sup>, se utilizó un circuito de la misma empresa que se usa en sistemas trifásicos. Se realizaron pruebas básicas para verificar el correcto funcionamiento del medidor y pruebas en condiciones no ideales como presencia de cargas no lineales y cargas no balanceadas.

---

<sup>1</sup> **FERRADA BAUTISTA** Federico Manuel - **SILVA PEÑALOZA** Mayra del pilar; Medición digital de la potencia activa para un sistema de calentamiento eléctrico monofásico. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander 2005.

## 1. MARCO TEORICO

El principal objetivo de este capítulo consiste en definir varios términos usados frecuentemente cuando de medidores de energía eléctrica se refiere. También se realiza una breve descripción de los cálculos de las potencias activa, reactiva y aparente en sistemas trifásicos. También se describen algoritmos para el cálculo de potencias cuando en el sistema hay presencia de armónicos y cargas no balanceadas.

### 1.1 DEFINICIONES GENERALES

#### 1.1.1 Valor eficaz

El valor eficaz de una señal periódica (tensión ó corriente) es una medida de su eficacia para entregar potencia a una carga resistiva. El concepto de valor eficaz se basa en tener una tensión o una corriente alterna que entregue a una resistencia, la misma potencia promedio que una tensión ó corriente continua equivalente entregaría. El valor eficaz también recibe el valor de valor efectivo ó valor *rms* y se define como:

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

Donde  $T$  es el periodo de la onda.

#### 1.1.2 Potencia instantánea

La tasa instantánea del flujo de energía o potencia instantánea  $p(t)$ , está definida como el producto de la tensión instantánea  $v(t)$  y la corriente instantánea  $i(t)$ .

$$p(t) = v(t) * i(t) \quad (W) \quad [2]$$

### 1.1.3 Potencia aparente

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. Indica el dimensionamiento que debe tener un sistema.

$$S = V * I \quad [3]$$

### 1.1.4 Potencia activa

Es la potencia asociada con el trabajo, que en circuitos eléctricos equivale a la consumida por la resistencia. Corresponde al valor medio de la potencia instantánea y se expresa como:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad [4]$$

Para el caso senoidal puro la expresión de la potencia activa es la siguiente:

$$P = V_{rms} * I_{rms} * \cos \alpha \quad [5]$$

Siendo  $\alpha$  el ángulo de desfase entre la corriente y la tensión.

### 1.1.5 Potencia reactiva

Es la potencia asociada a la magnetización o polarización de los materiales en el caso de sistemas con señales sinusoidales de una única frecuencia.

Para una onda senoidal la potencia reactiva esta definida como:

$$Q = V_{rms} * I_{rms} * \text{sen}\alpha \quad [6]$$

### 1.1.6 Factor de potencia

El factor de potencia corresponde a la razón entre la potencia que produce trabajo (potencia activa) y la potencia para la cual se dimensiona el sistema (potencia aparente).

$$FP = \frac{P}{S} \quad [7]$$

Para el caso senoidal el factor de potencia es igual a:

$$FP = \text{cos}\alpha \quad [8]$$

### 1.1.7 Energía eléctrica

Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico y obtener trabajo.

## 1.2 ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

Las empresas que suministran servicio de energía eléctrica deben preocuparse por la calidad de servicio que prestan, y esta calidad se ve reflejada en la onda de tensión.

La calidad de onda se refiere a las características con que se ofrece la tensión en las instalaciones del usuario, y se evalúa a partir de parámetros tales como la frecuencia, la amplitud, la forma y la simetría (sistemas trifásicos) en la onda.

Las variaciones de amplitud llevan asociados fenómenos de variaciones lentas de tensión, fluctuaciones rápidas (parpadeo) y tensiones transitorias (impulsos, microcortes).

La frecuencia lleva asociado fenómenos relacionados con la capacidad del sistema. La forma de onda lleva asociados armónicos, subarmónicos y la simetría se ve afectada por desequilibrios en el sistema.

Las cargas eléctricas se pueden clasificar en lineales y no lineales. Una carga lineal tomara una corriente proporcional a la tensión de alimentación, mientras que las cargas no lineales distorsionan la corriente consumida, causando caídas de tensión armónicas.

### 1.2.1 Potencia aparente en sistemas con armónicos.

La potencia aparente en un sistema con armónicos tendrá un valor mayor que si en el sistema solo existieran ondas de una única frecuencia, por lo tanto el dimensionamiento del sistema debe ser mayor dependiendo de la distorsión armónica total tanto de tensión como de corriente. Para esta situación los valores eficaces de tensión y corriente se obtienen a partir de las componentes armónicas de la siguiente forma:

$$V = \sqrt{\sum_n V_n^2} \quad [9]$$

$$I = \sqrt{\sum_n I_n^2} \quad [10]$$

Donde  $V_n$  e  $I_n$ , corresponden a los valores eficaces de la tensión y la corriente respectivamente para cada una de las componentes armónicas.

El valor de S (potencia aparente) se obtiene reemplazando los valores de V e I en la ecuación donde no hay componentes armónicas.

### 1.2.2 Potencia activa en sistemas con armónicos

Para ondas de tensión y corrientes que presenten distorsión la potencia activa se define como la sumatoria de las potencias activas debidas a la tensión y corriente de cada una de los componentes armónicos.

Para formas de onda no senoidales con expresiones de tensión y corriente correspondientes a:

$$v(t) = \sum_n \sqrt{2}V_n \cos(n\omega t) \quad [11]$$

$$i(t) = \sum_n \sqrt{2}I_n \cos(n\omega t - \alpha_n) \quad [12]$$

La expresión para la potencia promedio o potencia activa se convierte en:

$$P = \sum_n V_n I_n \cos\alpha_n \quad [13]$$

### 1.2.3 Potencia reactiva en sistemas con armónicos

La potencia reactiva se puede definir para cada una de los componentes armónicos como:

$$Q_n = V_n I_n \operatorname{sen}\alpha_n \quad [14]$$

Por lo que se sugiere que la potencia reactiva total sea la suma de todas las componentes armónicas:

$$Q = \sum_n V_n I_n \text{sen} \alpha_n \quad [15]$$

La anterior ecuación tiene validez para obtener la potencia reactiva por armónico, sin embargo, su validez para obtener la potencia reactiva total del sistema es discutible, ya que esto implica la suma de valores pico de términos de frecuencia diferentes.

### 1.3 ANÁLISIS DE ALGORITMOS USADOS PARA CALCULAR POTENCIAS

Para analizar y modelar un sistema eléctrico de potencia actualmente es imprescindible generalizar las definiciones y relaciones entre las magnitudes eléctricas considerando que las señales, tanto tensiones como corrientes, pueden ser no sinusoidales y en el caso de sistemas polifásicos, presentar cierto desequilibrio. Ya no sirve únicamente la definición de potencia reactiva tradicional sino que hay que ampliar el concepto en un sentido más genérico de potencia no útil mediante la definición de la potencia o corriente no activa. Este término comprende, además de la reactiva, las componentes de corriente o potencia debidas a la distorsión de las formas de onda, la componente de continua o el desequilibrio de fases. La generalización de la teoría, en el sentido expresado, para el caso de sistemas monofásicos y polifásicos no sinusoidales y desequilibrados debe de permanecer válida para el caso particular de red equilibrada y con señales sinusoidales tanto monofásica como polifásica.

Por otro lado el concepto de potencia reactiva para sistemas con ondas no sinusoidales y desequilibrados, debe ser ampliado para tener en cuenta los efectos que sobre el sistema se presentan, esto implica que un sistema con distorsión y desbalanceado debe tener mayor dimensionamiento que un sistema ideal.

Las definiciones de potencia eléctrica y la forma de calcularlas han evolucionado progresivamente a medida que aparecen nuevas investigaciones originadas por la dinámica del funcionamiento del sistema. Hay un consenso con la forma de calcularla pero todavía es discutible su forma de hallar algunas de ellas, no hay una norma que rijan para el cálculo de estas potencias en cierta forma o bajo ciertas condiciones.

El análisis de las señales en un sistema eléctrico de potencia en régimen no sinusoidal se puede realizar en el dominio frecuencia o en el dominio temporal que, a su vez, se puede abordar partiendo de las definiciones de las corrientes o de las potencias. Dependiendo de la perspectiva adoptada se han originado diferentes teorías que describen la interacción entre generación y consumo. A continuación se realiza una síntesis de las más relevantes describiendo las ventajas y desventajas de cada una.

### 1.3.1 Modelo de Budeanu

En 1927 Budeanu propone la descomposición de la potencia aparente del sistema en tres componentes:

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2 \quad [16]$$

$P$  = Potencia activa del sistema

$Q_B$  = Potencia reactiva de budeanu, definida como:

$$Q_B = \sum_n V_n * I_n \sin \varphi_n \quad [17]$$

La potencia  $Q_B$  es atribuida al fenómeno originado por el flujo recíproco de energía magnetizante.

$D_B$  = Es la potencia de distorsión, definida como:

$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2}$$

La potencia de distorsión  $D_B$ , es atribuida a la distorsión de la forma de onda de corriente con respecto a la de tensión.

Teniendo en cuenta que la potencia  $Q_B$  es la amplitud de una señal que oscila al doble de la frecuencia de las componentes armónicas de tensión y corriente de orden K, es incorrecto expresar la potencia reactiva del sistema como la suma de las potencias reactivas de cada una de las componentes armónica presentes en el sistema. Como principales objeciones a esta teoría se plantean la falta de significado físico.

Esta expresiones pueden fallar debido a que cuando la potencia  $Q_B=0$ , puede existir flujo recíproco de la energía magnetizante y la forma de onda de corriente puede estar distorsionada con respecto a la tensión y la potencia de distorsión es igual a cero  $D_B = 0$ .

### 1.3.2 Modelo de Fryze

Fryze en 1931 establece el concepto de potencia no activa en sistemas monofásicos mediante la descomposición de la corriente de carga en dos componentes ortogonales, la corriente activa  $i_a(t)$  como la componente que tiene el mínimo valor necesario para transmitir la potencia activa, y la corriente no activa  $i_b(t)$ . Estas dos corrientes son mutuamente ortogonales, su producto es igual a cero. Entonces:

$$i^2(t) = i_a^2(t) + i_b^2(t) \quad [18]$$

Como resultado se define la relación entre potencias:

$$S^2 = P^2 + Q_F^2$$

Donde  $Q_F$  es la potencia ficticia y está dada por:

$$Q_F = |V(t)| * |I_b(t)| \quad [19]$$

La mayoría de los medidores de energía eléctrica utilizan para la medición de la energía el modelo de Budeanu y el modelo de Fryze. Sin embargo, todos estos medidores han sido diseñados considerando condiciones ideales del suministro de energía, como sistemas trifásicos balanceados con cargas equilibradas y libres de perturbaciones.

El principal inconveniente de esta descripción es que no se puede asegurar que la suma de potencias ficticias en un nodo sea cero, lo que complica los cálculos de flujo de potencia.

### 1.3.3 Modelo de Czarnecki

En 1990 Czarnecki realizó una comparación entre las diversas definiciones y presentó una propuesta para estimar la potencia en sistemas trifásicos.

El modelo propone una descomposición de la corriente en cinco componentes, estas son:

$I_a(t)$  La corriente debida, a la potencia activa del sistema.

$I_r(t)$  La corriente reactiva debido, a la magnetización de los materiales.

$I_u(t)$  La corriente debido al desbalance en los sistemas polifásicos.

$I_g(t)$  La corriente generada debido a la distorsión de la onda de corriente con respecto a la tensión.

$I_s(t)$  La corriente residual o de dispersión debida a la variación del circuito equivalente con la frecuencia

La tensión se calcula de la siguiente forma:

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^h V_n^2} \quad [20]$$

Las componentes de la corriente son mutuamente ortogonales por lo que la corriente total del sistema se puede calcular con la siguiente expresión:

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^h I_n^2} = \sqrt{I_u^2 + I_r^2 + I_u^2 + I_g^2 + I_s^2} \quad [21]$$

La potencia aparente puede expresarse como:

$$S^2 = V * I = \sqrt{P^2 + Q_r^2 + D_u^2 + D_g^2 + D_s^2} \quad [22]$$

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n = VI_u = V * I * \cos(\theta) : \text{Potencia activa} \quad [23]$$

$$Q_r = VI_r = V * I * \sin(\theta) : \text{Potencia Reactiva} \quad [24]$$

$$D_u = V * I_u : \text{Potencia de desbalance} \quad [25]$$

$$D_g = V * I_g : \text{Potencia generada} \quad [26]$$

$$D_s = V * I_s : \text{Potencia residual} \quad [27]$$

#### 1.3.4 Modelo IEEE 1459

El comité de instrumentación y medidas de sistemas de potencia de la sociedad *Power Engineering del IEEE*, propuso en el año 2000, el modelo de potencia denominado "IEEE std 1459-2000" *IEEE Trivial- User Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, No Sinusoidal, Balanced, Or Unbalanced Condition*.

El estándar intenta resolver los errores que se incurren al hallar las cuantías de la potencia aparente en un sistema con ondas no sinusoidales y desbalanceados. Con la propuesta de una definición basada en la tensión e intensidad efectiva y una descomposición de la potencia aparente efectiva que tiene tres características útiles.

- Separa convenientemente la componente de potencia aparente fundamental y sus componentes de activa y reactiva, de la potencia aparente no fundamental.
- Suministra una medida útil del grado de contaminación armónica a través de la potencia aparente no fundamental.
- También suministra una medida del grado de desequilibrio a partir de la introducción de la potencia aparente de desequilibrio.

Para el cálculo de la potencia aparente total del sistema, las tensiones y corrientes eficaces se dividen en dos componentes: la fundamental y la no fundamental

Los valores eficaces de tensión y intensidad son:

$$V = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2} \quad ; \quad I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}$$

Donde las componentes fundamentales son  $V_1$ ,  $I_1$  y las componentes armónicas  $V_H$ ,  $I_H$ .

$$V^2 = V_1^2 + V_H^2 \quad ; \quad I^2 = I_1^2 + I_H^2 \quad [28]$$

Donde las componentes armónicas:

$$V_H^2 = \sum_{n \neq 1}^{\infty} V_n^2 \quad ; \quad I_H^2 = \sum_{n \neq 1}^{\infty} I_n^2 \quad [29]$$

Para la potencia aparente se tiene que:

$$S^2 = (V * I)^2 = (V_1 * I_1)^2 + (V_1 * I_H)^2 + (V_H * I_1)^2 + (V_H * I_H)^2 \quad [30]$$

De la ecuación anterior se pueden distinguir dos componentes para la potencia aparente.

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad [31]$$

Donde:

$S_1$  Es la potencia aparente fundamental, que a su vez se puede descomponer en potencia activa fundamental  $P_1$  y en una potencia reactiva fundamental  $Q_1$

$$S_1^2 = (V_1 * I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad [32]$$

Con:

$$P_1 = V_1 * I_1 * \cos \theta_1 ; \quad Q_1 = V_1 * I_1 * \sin \theta_1$$

$\theta_1$  : **desfase entre la tensión y la corriente fundamental**

$S_N$  Es la potencia aparente no fundamental, y se descompone en potencia de distorsión de intensidad  $V_1 I_H$ , La potencia de distorsión de tensión  $V_H I_1$ , y la potencia aparente armónica  $V_H I_H$ .

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad [33]$$

La potencia aparente armónica  $S_H$  puede subdividirse como, potencia activa armónica total y potencia no activa armónica.

$$S_H^2 = (V_H I_H)^2 = P_H^2 + N_H^2 \quad [34]$$

Donde:

$$P_H = \sum_{n=1} V_n * I_n * \cos \theta_n \quad [35]$$

$\theta_n$ : desfase entre las componentes armónicas  $n$  de la corriente y tensión

$N_H$  La componente de potencia no activa armónica total.

Se reconoce que mientras es posible asignar una dirección al flujo tanto para  $P_1$  como para a  $Q_1$ , para las tres componentes de la potencia aparente no fundamental no es posible hacerlo, Estos realmente son solo productos formales, y a diferencia de la potencia activa no tienen significado físico. Sin embargo, tales componentes formales pueden servir como indicadores útiles para la operación de una red.

De la ecuación de potencia aparente se tiene que:

$$S_N^2 = \left(\frac{I_H}{I_1}\right)^2 * S_1^2 + \left(\frac{V_H}{V_1}\right)^2 * S_1^2 + \left(\frac{V_H I_H}{V_1 I_1}\right)^2 * S_1^2 \quad [36]$$

La ecuación anterior puede describirse en función de los índices de distorsión armónica total, THD, de la tensión y de la intensidad. La potencia aparente no fundamental normalizada a la potencia aparente fundamental es:

$$\left(\frac{S_H}{S_1}\right)^2 = (THD_I)^2 + (THD_V)^2 + (THD_I * THD_V)^2 \quad [37]$$

Tanto el valor de  $S_N$  como su valor normalizado  $S_N/S_1$  son mejores indicadores del nivel de distorsión de las ondas de tensión y corriente, que el valor de  $P_H$ .

El factor de potencia es la figura de merito mas conveniente para cuantificar la efectividad del flujo de energía eléctrica en un sistema. El factor de potencia total viene dado por:

$$F.P = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{S} \quad [38]$$

Para sistemas trifásicos equilibrados el análisis se realiza según el esquema sugerido anteriormente, Los sistemas desequilibrados requieren unas consideraciones adicionales. Se adopta una potencia aparente del sistema  $S_\theta$  o potencia aparente equivalente.

$$S_\theta = 3 * V_\theta * I_\theta \quad [39]$$

Donde la corriente y la tensión *rms* equivalente también se descomponen en una componente fundamental y una componente no fundamental.

$$I_\theta = \sqrt{I_{\theta 1}^2 + I_{\theta H}^2} \quad ; \quad V_\theta = \sqrt{V_{\theta 1}^2 + V_{\theta H}^2} \quad [40]$$

Para obtener las tensiones y corrientes efectivas en un sistema trifásico con tres hilos, la corriente de neutro, su componente fundamental como su componente armónica es cero.

$$I_\theta = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} \quad [41]$$

$$V_\theta = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} \quad [42]$$

Donde cada uno de los valores *rms* de tensión e intensidad se determinan de la siguiente forma:

$$I_a^2 = I_{a1}^2 + \sum_{h=1} I_{ah}^2 \quad [43]$$

$$V_a^2 = V_{a1}^2 + \sum_{h=1} V_{ah}^2 \quad [44]$$

Por lo que se tiene que:

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2}{3}} \quad ; \quad I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2}{3}} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad [45]$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2}{9}} \quad ; \quad V_{eH} = \sqrt{\frac{V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2}{9}} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad [46]$$

La potencia aparente efectiva estada por:

$$S_e^2 = (3V_e * I_e)^2 = (3V_{e1} * I_{e1})^2 + (3V_{e1} * I_{eH})^2 + (3V_{eH} * I_{e1})^2 + (3V_{eH} * I_{eH})^2 \quad [47]$$

El primer término es la potencia aparente efectiva fundamental.

$$S_{e1} = 3V_{e1}I_{e1} \quad [48]$$

Esta potencia puede separarse en la potencia fundamental de secuencia positiva  $S_1^+$  y una componente complementaria  $S_{u1}$ , atribuida al desequilibrio del sistema.  $S_1^+$  Es convenientemente resuelta en las componentes de potencia activa y potencia *reactiva* fundamental de secuencia positiva.

$$S_1^+ = P_1^+ + Q_1^+ \quad [48]$$

Con:

$$P_1^+ = 3V_1^+I_1^+ \cos \theta_+ \quad ; \quad Q_1^+ = 3V_1^+I_1^+ \sin \theta_+ \quad [49]$$

Y los siguientes tres términos corresponden la potencia aparente efectiva no fundamental:

$$S_{\theta N} = \sqrt{S_{\theta}^2 - S_{\theta 1}^2} = \sqrt{D_{\theta I}^2 + D_{\theta V}^2 + D_{\theta H}^2} \quad [50]$$

Donde:

$$D_{\theta I} = 3V_{\theta 1}I_{\theta H} = 3S_{\theta 1}(THD_{\theta I}) \quad ; \quad THD_{\theta I} = \frac{I_{\theta H}}{I_{\theta 1}} \quad [51]$$

Corresponde a la potencia de distorsión de intensidad efectiva.

**THD<sub>θI</sub>**: Distorcion armónica total equivalente de la intensidad

$$D_{\theta V} = 3V_{\theta H}I_{\theta 1} = 3S_{\theta 1}(THD_{\theta V}) \quad ; \quad THD_{\theta V} = \frac{V_{\theta H}}{V_{\theta 1}} \quad [52]$$

Es la potencia de distorsión de tensión efectiva.

**THD<sub>θV</sub>**: Distorcion armónica total equivalente de la tensión

$$D_{\theta H} = 3V_{\theta H}I_{\theta H} = 3S_{\theta 1}(THD_{\theta V} * THD_{\theta I}) \quad [53]$$

Es la potencia aparente armónica efectiva, que contiene la potencia activa armónica,

$$P_H = \sum_{\substack{h=1 \\ i=a,b,c}} V_{ih}I_{ih} \cos \theta_{ih} = P - P_1 \quad [54]$$

Y por ultimo el término no activo restante:

$$D_{\theta H} = \sqrt{S_{\theta H}^2 - P_H^2} \quad [55]$$

La potencia aparente efectiva se descompone en siete términos según el análisis realizado y ayuda a resumir la situación.

$$S_{\theta}^2 = (P_1^*)^2 + (Q_1^*)^2 + S_{\theta I}^2 + D_{\theta I}^2 + D_{\theta V}^2 + P_H^2 + D_{\theta H}^2 \quad [56]$$

Que tiene las siguientes ventajas:

- El “producto principal”  $P_1^+$  es separado de las restantes componentes de potencia activa. Las cargas no lineales convierten una pequeña parte de  $P_1^+$  en  $P_H$ ,  $P_1^-$  y  $P_1^0$  que son generadas hacia la red de potencia y disipadas.
- La potencia reactiva de secuencia positiva,  $Q_1$ , también es separada, así ayuda a disminuir los bancos de condensadores necesarios para corregir el factor de potencia fundamental.
- La potencia aparente no fundamental,  $S_{eN}$ , es una cantidad de gran importancia ya que ayuda a evaluar el de contenido de distorsión en las ondas de tensión y corriente que hay en el sistema.

Las expresiones generales siguen siendo las mismas para un sistema trifásico de cuatro hilos, solo que en este caso es necesario considerar el efecto de la corriente de neutro y las tensiones de fase.

Las corrientes están dadas por las expresiones

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}}$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}}$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2}{3}} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad [57]$$

Mientras que los valores rms de la tensión efectiva obedecen a las expresiones:

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} \{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2\}}$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{1}{18} \{3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2\}}$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{1}{18} \{3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2\}} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad [58]$$

El cálculo de potencias se realiza igual que en el caso de sistemas de tres hilos.

## 1.4 TERMINOLOGÍA EMPLEADA EN MEDICIONES.

### 1.4.1 Error

Diferencia existente entre el valor obtenido al medir una variable con relación a su valor real y objetivo.

### 1.4.2 Exactitud

Se denomina exactitud a la capacidad de un instrumento de medir un valor cercano al valor de la magnitud real.

### 1.4.3 Precisión

Se denomina precisión a la capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones.

### 1.4.4 Linealidad

Expresa el grado de coincidencia entre la curva de calibración y una línea recta determinada.

### 1.4.5 Sensibilidad

Es la razón entre la respuesta en la salida a un estímulo en la entrada.

### 1.4.6 Resolución

Es el incremento más pequeño que permite diferenciar una lectura de otra.

#### **1.4.7 Reproducibilidad**

Indica el grado de coincidencias de varias medidas individuales sobre el mismo parámetro con un método concreto pero con un conjunto de medidas a largo plazo.

#### **1.4.8 Transductores**

Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente de salida.

#### **1.4.9 Sensores**

Es un dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas. Un sensor se diferencia de un transductor en que el sensor está siempre en contacto con la variable a medir o a controlar.

## **2. DESCRIPCIÓN CIRCUITOS INTEGRADOS DE PROPÓSITO ESPECÍFICO.**

### **2.1 SA9904B (SAMES)**

#### **2.1.1 Descripción general**

El SA9904B es un circuito integrado que ha sido diseñado para medir energía activa y reactiva en sistemas trifásicos, tensión RMS y frecuencia. Cuenta con una interfaz serial integrada (SPI), empleada para la comunicación con un microcontrolador.

El SA9904B incluye todas las funciones requeridas para la medición de energía activa y reactiva en sistemas trifásicos, tales como el muestreo de conversores A/D para sensor las entradas de tensión y corriente.

El SA9904B integra la potencia instantánea en registros de 24 bits. Las variables de voltaje RMS y frecuencia son continuamente medidas y guardadas en sus respectivos registros.

Los valores medidos por este circuito son accesibles a través de registros internos presentes en el mismo. Los registros de energía activa y reactiva son capaces de acumular energía por un tiempo máximo de 52 segundos.

#### **2.1.2 Protocolo de comunicación SA9904B**

El SA9904B no cuenta con registros editables, por lo tanto, solo se pueden efectuar operaciones de lectura de datos. El protocolo de lectura se lleva a cabo mediante 4 señales  $SCK$ ,  $DI$ ,  $\overline{CS}$ ,  $DO$ .

**$SCK$ :** La señal de reloj en este pin es generada por el microcontrolador y determina la velocidad de transferencia de datos en los pines  $DO$  y  $DI$ .

**$DI$ :** Es la entrada serial de los datos para el SA9904B. Los datos entrarán a una velocidad determinada por el reloj serial ( $SCK$ ). Los datos serán aceptados solo durante un *chip select* activo ( $\overline{CS}$ ).

**$\overline{CS}$  (*chip select*):** Es usada para direccionar el SA9904B. Si este pin está en activo alto se habilitará el intercambio de datos.

**$DO$ :** Es la salida serial de datos del SA9904B. Los datos son transferidos solo cuando  $\overline{CS}$  esta activo. Esta salida es tri-estado cuando  $\overline{CS}$  esta en nivel bajo.

### 2.1.3 Acceso a los registros

El SA9904B contiene 9 registros de 24 bits cada uno, los cuales representan energía activa, energía reactiva, y tensión principal por fase. Un décimo registro representa la frecuencia de una fase valida. (Es el mismo registro para las tres fases).

**Tabla 1. Registros SA9904B**

Registro	Cabecera			A5	A4	A3	A2	A1	A0
Activa fase 1	1	1	0	x	x	0	0	0	0
Reactiva fase 1	1	1	0	x	x	0	0	0	1
Tension fase 1	1	1	0	x	x	0	0	1	0
Frecuencia	1	1	0	x	x	0	0	1	1
Activa fase 2	1	1	0	x	x	0	1	0	0

Reactiva fase 2	1	1	0	x	x	0	1	0	1
Tension fase 2	1	1	0	x	x	0	1	1	0
Frecuencia	1	1	0	x	x	0	1	1	1
Activa fase 3	1	1	0	x	x	1	0	0	0
Reactiva fase 3	1	1	0	x	x	1	0	0	1
Tension fase 3	1	1	0	x	x	1	0	1	0
Frecuencia	1	1	0	x	x	1	0	1	1

La cabecera de bits 110 (0x06) debe preceder las direcciones de los registros a los cuales se quiere acceder, los cuales tienen un tamaño de 6 bits. Cuando  $\overline{CS}$  esta en un nivel lógico alto los datos entran por el pin *DI* en el flanco de subida de la señal de reloj *SCK*. Los bits A5 y A4 pueden tener cualquier valor.

Los registros pueden ser leídos individualmente y en cualquier orden. Este pin de salida seguirá enviando datos hasta que el *chip select* ( $\overline{CS}$ ) esté inactivo. Después que el último bit de la dirección ha entrado en el flanco de subida, la salida *DO* pasa a nivel bajo en el flanco de bajada del reloj. Cada flanco de bajada posterior validará el próximo bit en el pin *DO*.

Los 9 bits que se necesitan para direccionar los registros pueden ser divididos en dos bytes, llenando de ceros los 7 bits más significativos como se puede observar en la figura 3:

**Figura 1. Bytes de direccionamiento**

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	A5	A4	A3	A2	A1	A0

Fuente [Autores]

#### 2.1.4 Registros de energía activa y reactiva

Las potencias activa y reactiva son acumuladas en registros de 24 bits para cada una de las fases. Estos registros son acumuladores que se incrementan o decrementan a una velocidad de 320000 muestras por segundo a condiciones nominales.

Los valores de los registros aumentarán en el caso de un flujo positivo de energía y disminuirán para un flujo negativo de energía tal y como la muestra la figura 4.

**Figura 2. Acumulación de energía, SA9904B**



**Fuente [Hoja de datos SA9904B, modificada por los autores]**

Los registros de energía activa y reactiva no son reinicializados después de leerlos, así que para determinar el valor correcto del registro, el valor previo leído se debe sustraer del registro actual. Los datos leídos de estos registros representan la potencia activa o reactiva integrada en el tiempo. El incremento o decremento entre las lecturas representan el consumo de energía.

### 2.1.5 Cálculos de energía activa y reactiva

Las señales de potencia instantánea son generadas multiplicando las señales de corriente y tensión.

$$Potencia_{activa} = V * I * \cos\alpha \quad [59]$$

$$Potencia_{reactiva} = V * I * sen\alpha \quad [60]$$

Las señales de potencia son continuamente agregadas a los respectivos registros de energía. Energías positivas son agregadas al registro de energía y energías negativas son sustraídas.

Las potencias activa y reactiva son calculadas por medio de la siguiente ecuación:

$$Potencia = \frac{Vnom * Inom * N}{INTtime * 320000} \quad W \text{ ó } VAr \quad [61]$$

Donde:

$N$ = diferencia de los valores leídos en los registros en lecturas sucesivas.

$INTtime$  = diferencia de tiempo entre lecturas sucesivas de los registros.

$Vnom$ = Tensión máxima permitida. (120 V)

$Inom$ = Corriente máxima permitida (5 A)

### 2.1.6 Cálculo de tensión

La tensión *rms* medida por el SA9904B es calculada como sigue:

$$Tension_{rms} = \frac{Vnom * Registro}{700} \quad [62]$$

Donde *registro* es el valor real leído del integrado.

### 2.1.7 Cálculo de frecuencia

La frecuencia es calculada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Frecuencia = \frac{Frecuencia_{cristal}}{Registro * 256} \quad [63]$$

Donde:

Frecuencia\_cristal= frecuencia cristal externo (3,5795 MHz)

*Registro*= bits D9 a D0 del registro de frecuencia.

## **2.2 ADE 7758 (ANALOG DEVICES)**

### **2.2.1 Descripción general**

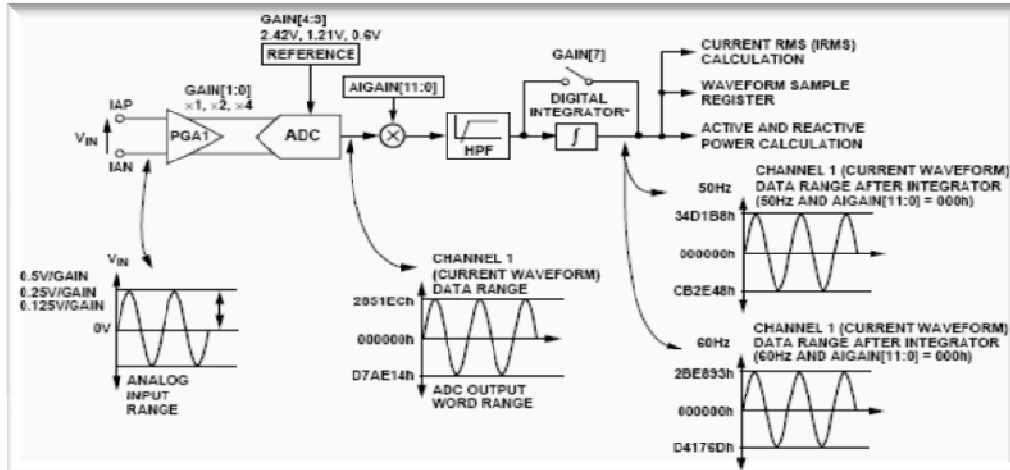
ADE7758 es un circuito integrado usado para la medición de energía eléctrica en sistemas trifásicos, el cual posee una interfaz serial y dos salidas de pulsos de frecuencia. Incorpora convertidores A/D de segundo orden, un integrador digital, y todo el procesamiento de señal requerido para realizar cálculos de energía activa, reactiva, aparente, cálculos de tensión y corriente eficaz con una gran precisión. Es capaz de medir energía activa, reactiva y aparente en varias configuraciones trifásicas, como delta o estrella, ambas con tres o cuatro cables. Este circuito también provee un sistema de calibración por cada fase, permitiendo corregir problemas de offset, y desfases entre otros.

### **2.2.2 Canales de corriente ADE7758**

La figura 3 muestra el camino que sigue la señal de entrada en el canal de corriente. En el modo de muestreo de forma de onda, las salidas del convertidor son palabras de 24 bytes cuyo formato es complemento a 2 muestreadas a un máximo de 26 kSPS. (Kilomuestras por segundo).

Con una señal analógica de entrada a plena escala de +/-0.5V, el convertidor produce su máximo valor de salida cuyo valor varía entre D7AE14h y 2851Ech.

**Figura 3. Canal de corriente ADE7758**



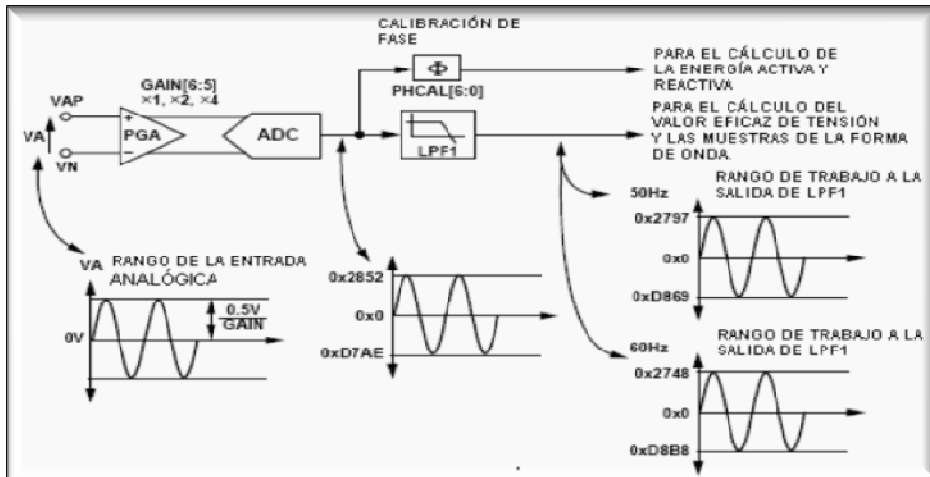
Fuente [7]

### 2.2.3 Canales de tensión ADE7758

La figura 4 muestra el procesamiento realizado para la entrada VA en el canal de tensión (igual para VB y VC).

Antes de pasar al registro de onda de forma, la salida del convertor pasa a través de un filtro pasa bajos (LPF1) con una frecuencia de corte de 260 Hz. Este filtro atenúa la señal suavemente, por ejemplo a 60 Hz esta señal es atenuada en un 3.575%. Las muestras de onda de forma son datos en complemento a 2 que varían entre 2748h y D8B8h.

Figura 4. Canal de tensión ADE7758



Fuente [7]

#### 2.2.4 Protocolo de comunicación ADE7758

El ADE7758 tiene integrada una interfaz de comunicación serial, la cual está compuesta de 4 señales: *SCLK*, *DIN*, *DOUT* y  $\overline{CS}$ .

**SCLK:** Señal de reloj. Todas las operaciones de transferencia de datos son sincronizadas con esta señal de reloj.

**DOUT:** Salida lógica que permite que los datos salgan en el flanco de subida de la señal de reloj.

**DIN:** Entrada lógica en la cual entran los datos en el flanco de bajada de la señal SCLK.

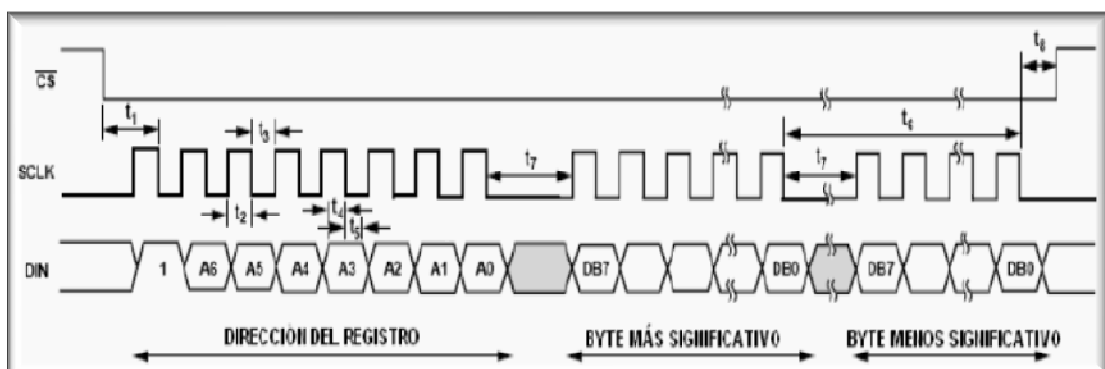
$\overline{CS}$ : Entrada lógica que actúa como la selección del integrado. Esta entrada es usada cuando múltiples dispositivos comparten el bus serial. Un flanco de bajada en CS coloca al ADE7758 en modo de comunicación y debe dejarse esta entrada en activo bajo para toda la transferencia de los datos.

Todas las operaciones en el *ADE 7758* deben empezar con una escritura al registro de comunicación. El registro de comunicación es un registro de solo escritura de 8 bits. El bit más significativo determina si la siguiente transferencia de datos es lectura o escritura. Si el bit más significativo es 1 indica que la operación que se quiere llevar a cabo es de escritura mientras que si es cero la operación es de lectura. Los siete bits menos significativos contienen la dirección del registro al cual se quiere acceder.

### 2.2.4.1 Operación de escritura serial

Con el *ADE7758* en modo de comunicación y la entrada *chip select* ( $\overline{CS}$ ) en activo bajo, una escritura debe ser realizada al registro de comunicación. El bit más significativo de este byte enviado debe ser ajustado a 1, indicando que la próxima operación es de escritura de datos. El *ADE7758* empieza a leer los datos en el próximo flanco descendente del reloj serial *SCLK* y los bits restantes son leídos en el flanco descendente de los pulsos de reloj posteriores. Si ocurre otra transferencia de datos, esta debe terminar como mínimo 900nS después de que haya ocurrido la transferencia del byte anterior.

**Figura 5. Operación de escritura serial *ADE7758***

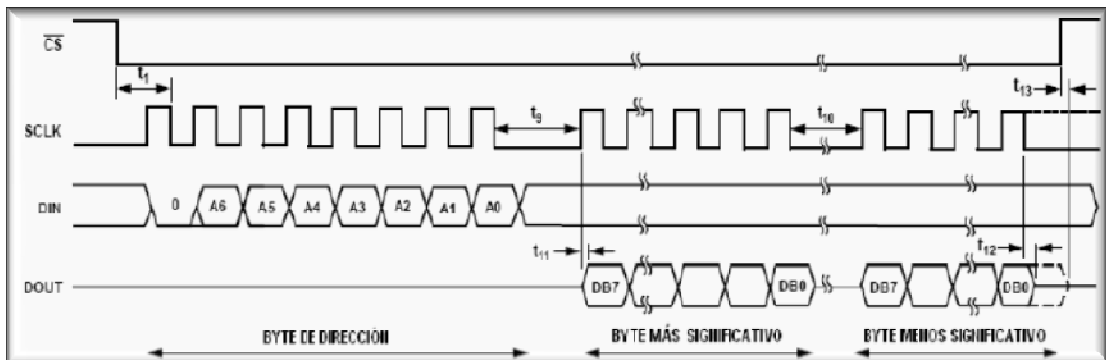


Fuente [7]

### 2.2.4.2 Operación de lectura serial

Durante una operación de lectura del *ADE7758* los datos son transferidos en el flanco ascendente del reloj serial. Como en el caso de la operación de escritura, una escritura debe ser realizada al registro de comunicación.

Figura 6. Operación de lectura serial *ADE7758*



Fuente [7]

Con el *ADE7758* en modo de comunicación y  $\overline{CS}$  en lógico bajo, se realiza una escritura al registro de comunicación con el bit más significativo de este ajustado a 0, indicando que se realizara una operación de lectura de datos. Los siete bits menos significativos contienen la dirección del registro que se quiere leer. En el momento en que el *ADE7758* recibe el último bit del primer byte la salida *DOUT* sale de un estado de alta impedancia y empieza a enviar datos por el bus serial. Cuando una operación de lectura se lleva a cabo, el comando de lectura no debería suceder al menos 1.1us después de la escritura en el registro de comunicación. Lo anterior se aprecia en la figura 6.

### 2.2.5 Cálculo de potencia activa ADE7758

La potencia activa promedio sobre un número de ciclos de línea esta dada por la siguiente expresión:

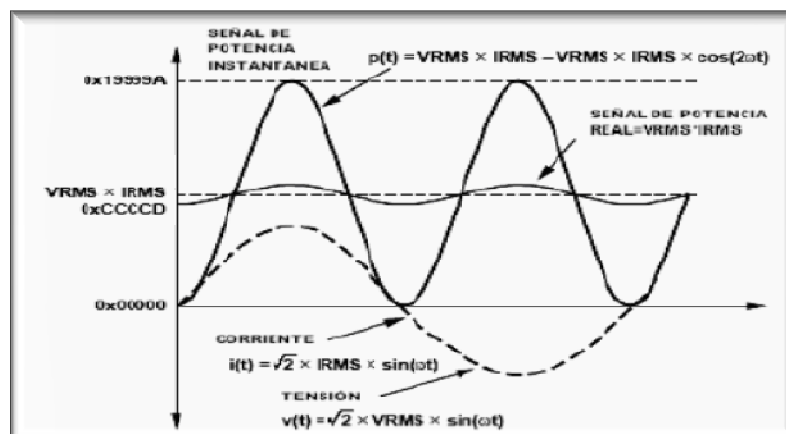
$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t) dt = V_{rms} * I_{rms} * \cos \alpha \quad [65]$$

Donde  $\alpha$  es la diferencia de fase entre la corriente y la tensión y  $T$  es el periodo del ciclo de línea.

La señal de potencia instantánea es generada multiplicando las señales de corriente y voltaje en cada fase. La componente DC de la potencia instantánea en cada fase es extraída por LPF2 (filtro pasa bajas).

La potencia activa de cada fase se acumula en el correspondiente registro de 16 bits (*AWATTHR*, *BWATTHR*, ó *CWATTHR*).

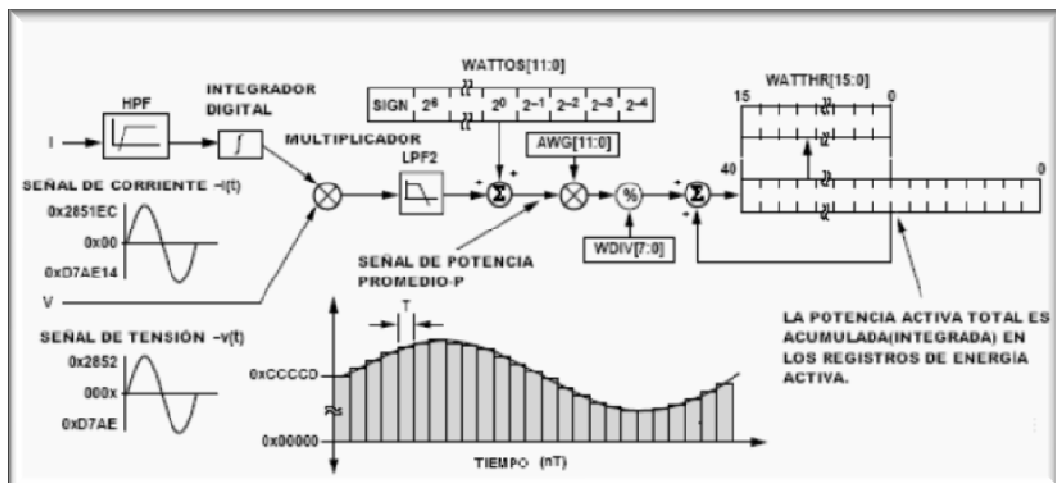
**Figura 7. Cálculo de potencia activa ADE7758**



**Fuente [7]**

El ADE7758 realiza la integración de la señal de potencia activa acumulando continuamente esta señal en registros internos de energía de 40 bits. Los registros *WATTHR* (*AWATTHR*, *BWATTHR*, ó *CWATTHR*) representan los 16 bits mas significativos de estos registros internos. La acumulación discreta en el tiempo es equivalente a la integración en tiempo continuo. La figura 7 muestra el cálculo de la potencia activa en al ADE7758.

**Figura 8. Cálculo de energía activa ADE7758**



**Fuente [7]**

El promedio de la señal de potencia activa es continuamente agregado al registro interno de energía. Esta adición es una operación con signo. Si la energía es negativa entonces es sustraída del registro de energía activa. Los valores que se aprecian en la figura son valores cuando las entradas de tensión y corriente son a plena escala o valores nominales.

La potencia activa promedio es dividida entre el contenido de un registro divisor antes de ser agregado al registro de acumulación correspondiente *WATTHR*. Cuando el valor en el registro *WDIV* [7:0] es 0 ó 1, la potencia activa es acumulada

sin división. *WDIV* es un registro sin signo, de 8 bits que es útil para aumentar el tiempo que les toma a los registros de energía en desbordarse.

Con señales de entrada a plena escala el tiempo mínimo que le toma a estos registros en desbordarse depende del registro de ganancia *xWATT GAIN*. Cuando este registro presenta valores de *7FFh, 000h*, y *800h* los tiempos mínimos son 0,13 , 0,52 y 0,79 segundos respectivamente.

Se puede activar una interrupción en el *ADE7758* para que avise cuando un registro de acumulación de energía esta lleno hasta la mitad, con el fin de leerlo antes que este registro se desborde y se pierdan los datos. Otra forma de leer estos registros es activar el bit *RSTREAD* con el fin de que estos registros vuelvan a cero después de una lectura.

El periodo de muestreo en tiempo discreto para la acumulación de energía es 0.4us ( $4/CLKIN$ ), por lo tanto se toman 2500 kSPS(kilo muestras por segundo). Si se supone una carga estable, el tiempo mínimo que transcurre antes que los registros de energía se desborden esta dado por la siguiente ecuación:

$$T_{\text{tiempo}_{\text{mínimo}}} = \frac{FF,FFFF,FFF h}{CCCCD h} * 0,4 \text{ us} = 0,5243 \text{ segundos}$$

Donde *FF,FFFF,FFF h* es el valor máximo que puede almacenar el registro interno de energía y *CCCCD h* es la máxima salida del filtro pasa bajas.

Para el cálculo de la potencia activa se divide el contenido del registro de energía entre el tiempo de acumulación de este registro, dicho tiempo se calcula de la siguiente forma:

$$T_{\text{tiempo}_{\text{acumulación}}} = T_{\text{tiempo}_{\text{mínimo}}} * WDIV[7:0]$$

Donde *T<sub>tiempo<sub>mínimo</sub></sub>* es el tiempo de acumulación cuando el registro de ganancia *WATT GAIN* es *000h* y que corresponde a 0.52 segundos, y *WDIV[7:0]* es el factor de escalamiento el cual puede ser de 255 veces máximo.

El *ADE7758* también provee un pin de salida (*APCF*) capaz de entregar información de la energía activa a través de pulsos de frecuencia, los cuales son proporcionales a la energía activa medida.

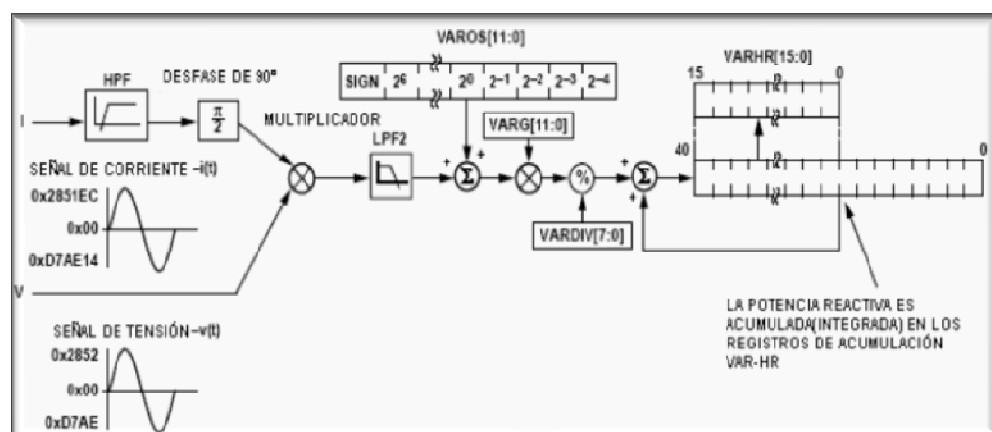
### 2.2.6 Cálculo de potencia reactiva *ADE7758*

La potencia reactiva promedio sobre un número de ciclos de línea esta dada por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} q(t) dt = V_{rms} * I_{rms} * \sin \alpha \quad [66]$$

Al igual que para la potencia activa, la componente DC de la señal de potencia reactiva instantánea en cada fase es extraída por un filtro pasa bajas. Este proceso es ilustrado en la figura 9. La potencia reactiva de cada fase es acumulada en el registro correspondiente de 16 bits (*AVARHR*, *BVARHR*, *CVARHR*).

Figura 9. Cálculo de energía reactiva *ADE7758*



Fuente [7]

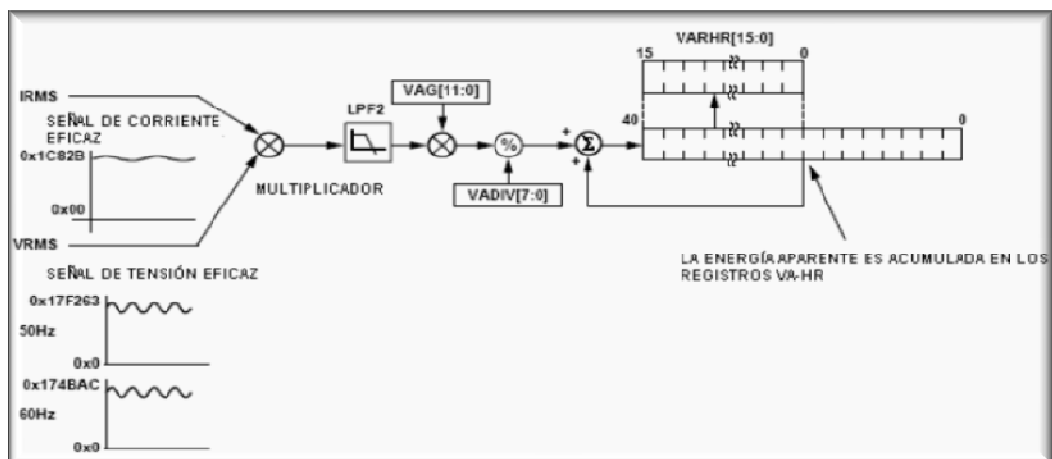
La figura 9 muestra el camino para el cálculo de energía reactiva. La señal de potencia reactiva es acumulada constantemente en los registros internos de energía. Esta adición es una operación con signo por lo tanto energías negativas son substraídas. La potencia activa promedio es dividida entre el contenido de un registro divisor **VARDIV[7:0]**, antes de que esta sea agregada al registro de energía con el fin de aumentar el tiempo en el cual se desborda el registro de energía.

El pin 17 (**VARCF**) de **ADE7758** es una salida que emite pulsos proporcionales a la energía reactiva total.

### 2.2.7 Cálculo de potencia aparente **ADE7758**

**ADE7758** usa el método de aproximación aritmética para calcular la potencia aparente.

**Figura 10. Cálculo de potencia aparente **ADE7758****



**Fuente [7]**

Los valores eficaces de la tensión y la corriente son multiplicados en cada fase para producir la potencia aparente de la correspondiente fase. La salida del

multiplicador pasa por un filtro pasa bajas para obtener la potencia aparente promedio.

A diferencia de la potencia activa y reactiva, no existen registros para compensar el *offset* existente en canal de potencia aparente. Esto se debe a que la compensación de *offset* que se le hace a los registros de tensión y corriente es suficiente.

El proceso para calcular la energía aparente es el mismo explicado anteriormente para la energía activa y reactiva. El único aspecto diferente es el tiempo mínimo de acumulación de energía, el cual es mayor en este caso y se muestra a continuación:

$$\text{Tiempos mínimo} = (1\text{FFFFFFF h} / \text{B9954 h}) * 0.4\text{us} = 1.157$$

Donde B9954h es la máxima salida del filtro.

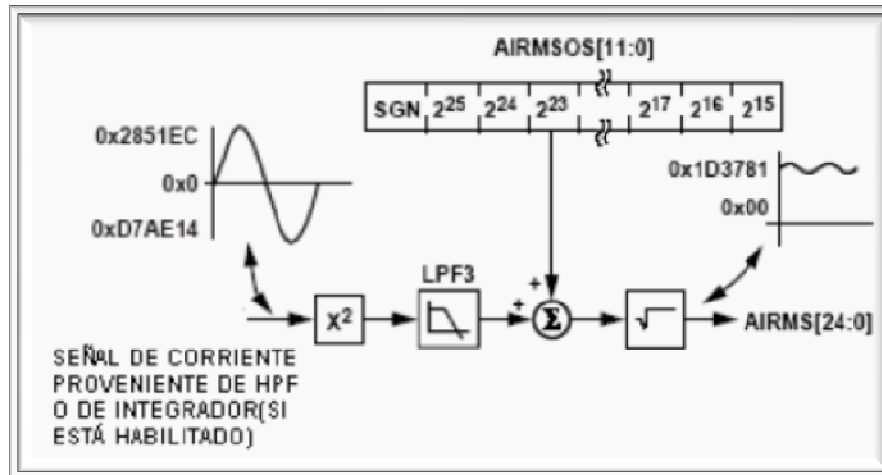
Utilizando el registro *VADIV* se puede aumentar el tiempo de acumulación de la energía aparente en los registros respectivos.

Ajustando el bit 7 en el registro *WAVMODE* se asegura que la salida de pulsos en el pin 17 muestra información acerca de la potencia aparente y no de la potencia reactiva.

### **2.2.8 Cálculo de corriente ADE7758**

La figura 11 muestra el proceso para calcular el valor la tensión *rms* por parte del *ADE7758* para una fase. El mismo procedimiento es usado para las dos fases restantes.

**Figura 11. Cálculo de corriente ADE7758**



**Fuente [7]**

El filtro LPF3 extrae el promedio de la señal de corriente al cuadrado, la señal resultante se suma con un registro que corrige el *offset* (*AIRMSOS*), para después extraer la raíz cuadrada y guardar el resultado en el registro de 24 bits *AIRMS*.

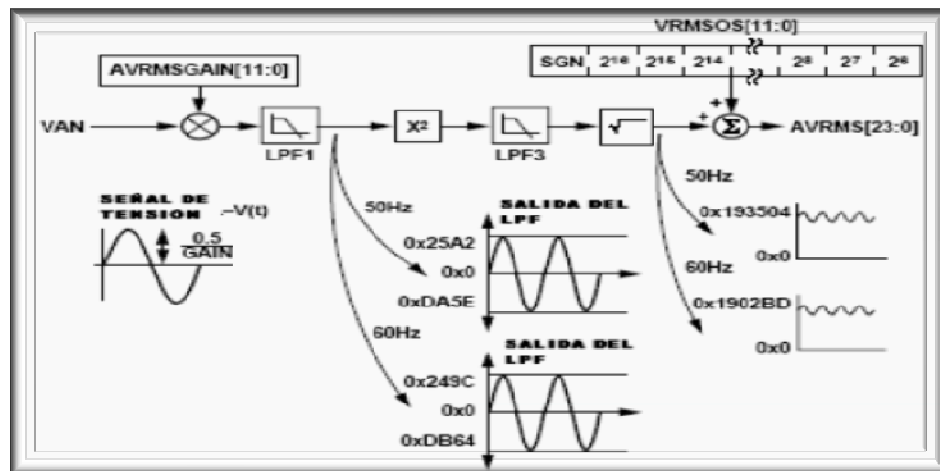
Con las señales de entrada a plena escala, el conversor produce un código de salida aproximado de 1D3781h. El ADE7758 tiene registros capaces de remover el *offset* presente en cualquiera de las fases (*AIRMSOS*, *BIRMSOS*, *CIRMSOS*). Un *offset* puede existir debido a ruidos de entrada que son integrados en la componente DC cuando se eleva al cuadrado la corriente.

### 2.2.9 Cálculo de tensión ADE7758

Con las señales analógicas de entrada a plena escala (0.5V), el filtro LPF1 produce un código de salida aproximado de +/-9,372d a 60 Hz. Posteriormente esta salida es elevada al cuadrado y pasa nuevamente por un filtro pasa bajas LPF3 con el fin de extraer el valor promedio de la señal de tensión. Luego es extraída la raíz cuadrada y finalmente se suma la señal resultante con un registro que corrige el

offset que se presente en el canal de tensión de cada fase. El registro  $xV_{RMSGAIN}^2$  es usado para escalar las salidas de los conversores A/D en +/- 50%.

Figura 12. Cálculo de tensión ADE7758



Fuente [7]

El error típico en la medición de la tensión RMS es de 0.5% y esta medición tiene un ancho de banda de 260Hz.

### 2.2.10 Interrupciones

Las interrupciones en el *ADE7758* son manejadas a través del registro de estado de interrupción, ( $STATUS[23:0]$ , dirección 19h) y del registro máscara de interrupción ( $MASK[23:0]$ , dirección 18h). Cuando un evento de interrupción ocurre en el *ADE7758*, la bandera correspondiente en el registro estado de interrupción cambia a 1 lógico. Si el bit de máscara para esta interrupción en el bit de máscara es un 1 lógico, entonces la salida lógica  $\overline{IRQ}$  pasa a activa bajo. Para determinar

<sup>2</sup> x hace referencia a la fase A, B o C.

la fuente de la interrupción, el microcontrolador debe realizar una lectura del registro *RSTATUS*. Después de realizada la lectura del registro la salida  $\overline{IRQ}$  vuelve a su estado normal activo alto.

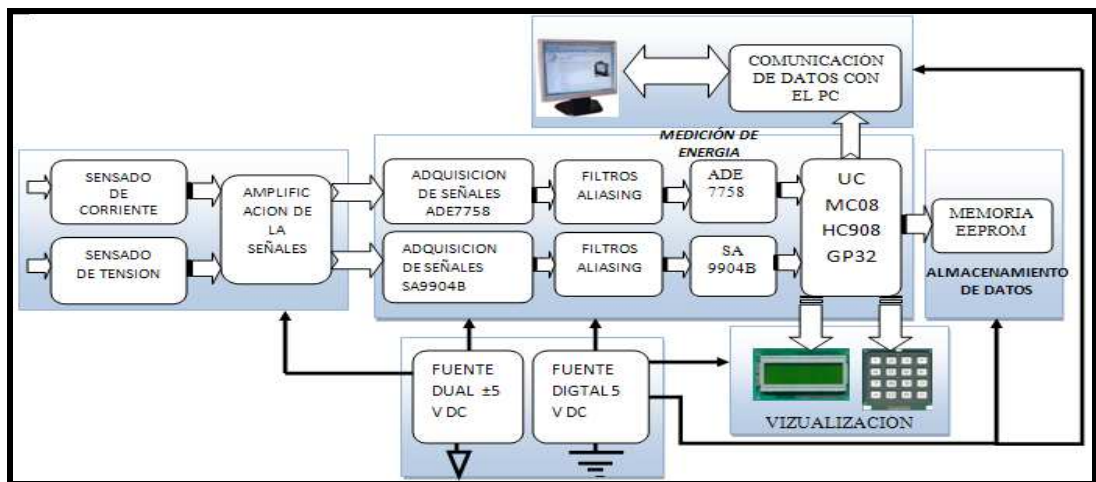
### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL HARDWARE

Este capítulo muestra el diseño de la etapa de hardware que se realiza para llevar a cabo el proceso de medición de energía. Se describen cada uno de los componentes usados y su función en cada módulo.

El principio de funcionamiento básico de un medidor de estado sólido está conformado por tres etapas principales que son:

- Acondicionamiento de señales.
- Adquisición, filtrado, procesamiento de señales digitales y almacenamiento.
- Visualización.

**Figura 13. Diagrama de bloques del funcionamiento del medidor de energía**



**Fuente [Autores]**

En los medidores de estado sólido, las señales analógicas de tensión y corriente son adquiridas y digitalizadas tomando muestras y convirtiendo estas muestras en un registro. Una vez digitalizadas, los valores de las muestras son utilizados para calcular los parámetros requeridos para evaluar las potencias y energías del

sistema. Estas métricas son almacenadas en memoria y están disponibles para su utilización; Este proceso corresponde a la etapa de procesamiento de señales.

Las estimaciones realizadas son visualizadas en una pantalla de cristal líquido (LCD) o leídas de la memoria del equipo por medio de un puerto de comunicaciones y una interfaz en el PC, para almacenamiento y procesamiento de volúmenes de datos y posterior visualización e interpretación.

### **3.1 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES**

Este módulo consta de una etapa para adquirir las señales de tensión y corriente de la red eléctrica trifásica y acondicionar estas señales a niveles adecuados. Una siguiente etapa hace uso de amplificadores de instrumentación, con el fin de obtener señales diferenciales y eliminar toda clase de ruido producido por el ambiente.

Las señales analógicas de salida son proporcionales a las señales de entrada y tienen una amplitud máxima de 2.5V cuando en la entrada hay plena escala. En total existen seis señales de salida, de las cuales tres corresponden a tensión ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ) y tres a corriente ( $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ). La corriente de neutro no es utilizada por los circuitos integrados para sus cálculos de potencia, por lo tanto no es necesaria su medida.

### **3.2 SENSADO DE CORRIENTE**

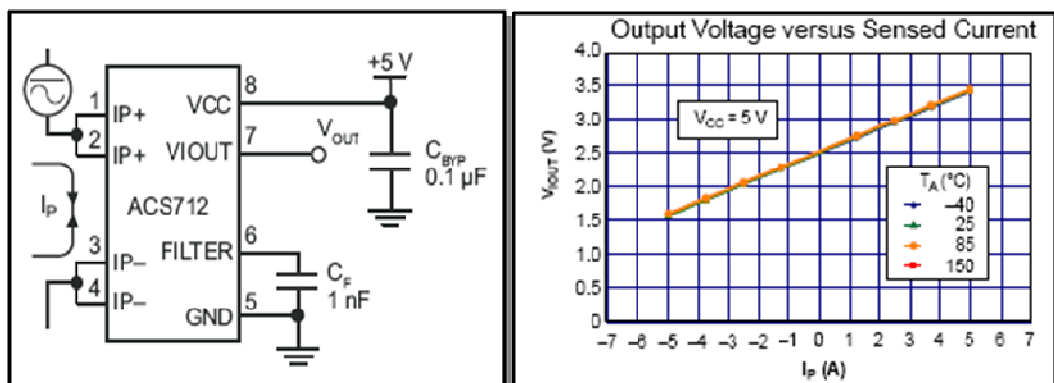
Para sensar corriente se utiliza un sensor de corriente de efecto *Hall* (ACS712) de la empresa *ALLEGRO MICROSYSTEMS*. Es un sensor de bajo offset, en donde la corriente aplicada fluye a través de un camino conductivo y genera un campo magnético el cual se sensa por el circuito integrado de efecto *Hall* y se convierte en una tensión proporcional. La precisión del dispositivo se optimiza a través de la

proximidad de la señal magnética con el transductor *Hall*. Sus principales características son:

- Posee un rango lineal.
- Bajo ruido en señales analógicas.
- Opera con una fuente de alimentación simple de 5 V DC.
- Baja resistencia de entrada ( $1.2\text{ m}\Omega$ ).
- Tiempo de respuesta de  $5\text{ }\mu\text{s}$
- La tensión de salida es analógica y proporcional a corrientes AC y DC.
- Sensibilidad de  $185\frac{\text{mV}}{\text{A}}$ .
- Alto ancho de banda  $50\text{KHz}$  .(configurable mediante el pin FILTER)
- Filtro para eliminar ruido magnético  $C_F$  .(Configurable mediante el pin FILTER)
- Bajo costo.

Se escogió este dispositivo por su bajo costo y sus características en su rango de medición.

**Figura 14. Esquema de conexión ACS712 (izquierda), Tensión de salida vs corriente de entrada ACS712 (derecha)**



Fuente [hoja de datos del fabricante]

La señal de salida del sensor esta centrada en un nivel de tensión de 2.5V (VCC/2). Cuando en la entrada hay plena escala (5  $A_{rms}$ ), la tensión máxima de salida es 3,425V.

Este sensor tiene una relación inversamente proporcional entre el ancho de banda y el ruido magnético. Para esta aplicación en particular se necesita que el ruido magnético que se introduce en el canal de corriente sea lo mas pequeño posible, por lo tanto el condensador ( $CF$ ) conectado entre el pin6 y GND debe ser escogido para que el sensor tenga un ancho de banda aceptable y una señal de ruido pequeña.

Escogiendo un valor de capacitancia de 33nF se tiene una señal de ruido aproximadamente de 10mv según la hoja de datos y un ancho de banda de:

$$BW = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad [67]$$

Donde  $R = 1.7 \text{ k}\Omega$ , valor especificado en la hoja de datos.

El ancho de banda que se tiene para los canales de corriente es:

$$BW=2.84 \text{ kHz}$$

### 3.3 SENSADO DE TENSIÓN

Para cada fase se implementó un divisor de tensión entre las terminales de la fase y la tierra analógica del circuito. Esto se realiza con el fin de llevar la señal de entrada a un nivel óptimo para la adecuación de las señales a cada uno de los circuitos integrados para su posterior procesamiento. Específicamente la tensión de salida del divisor tiene una amplitud de 2.5V.

### 3.4 AMPLIFICACIÓN DE SEÑALES

El componente fundamental de esta etapa es el amplificador de instrumentación AD620 de la empresa *ANALOG DEVICES*. Por cada señal de corriente y tensión existe un amplificador que además de eliminar la señal de modo común, ayuda a eliminar el ruido presente en los canales de tensión y corriente.

El uso del AD620 se hace más necesario en los canales de corriente, porque se necesita amplificar la señal de salida del sensor de corriente hasta un valor de 2.5V además de remover la componente de DC que esta presenta. Para eliminar la componente DC se recurre al circuito integrado AD780 de *ANALOG DEVICES*, el cual proporciona una tensión de referencia constante de 2.5V la cual se resta con la señal de DC resultando en una señal amplificada y centrada en 0V.

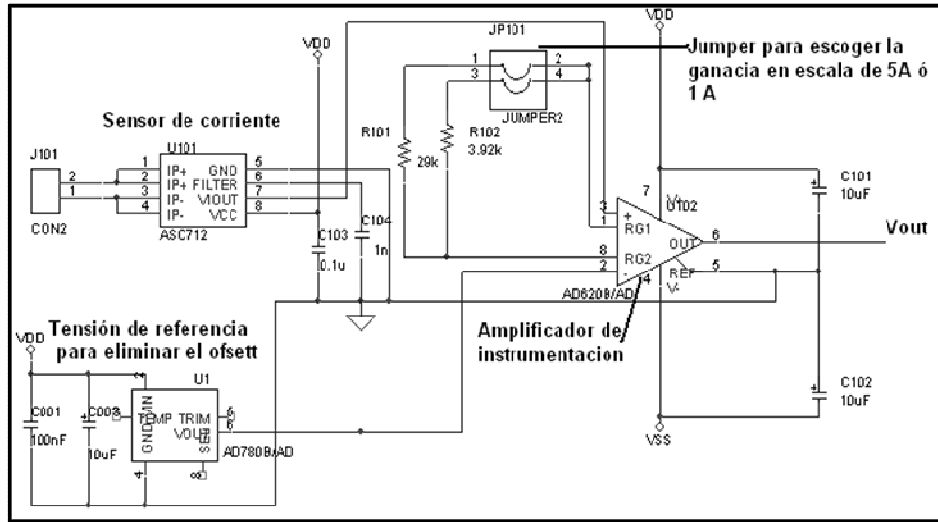
En los canales de tensión el uso del amplificador AD620 se limita a eliminar el efecto de carga producido por los circuitos en la etapa inmediatamente anterior, y a remover el ruido, el cual puede presentarse debido a que las resistencias usadas en el divisor resistivo superan el valor de 100k $\Omega$ , por lo que hace que las corrientes que circulen sean muy pequeñas.

Las principales características del AD620 se resumen a continuación:

- Rango de ganancia seleccionable con una resistencia externa.
- Bajo consumo de potencia 1.3 mA, con fuente de alimentación dual ( $\pm 2.3$  V a  $\pm 18$  V)
- 50  $\mu$ V máximo de offset.
- 100 dB mínimo de rechazo a modo común.
- Bajo ruido
- Posee un alto ancho de banda.

El circuito para la adquisición de la señal de corriente para una fase se muestra en la figura 15. El *jumper 2* permite cambiar la ganancia del amplificador de instrumentación, permitiendo seleccionar el rango de la corriente máxima de entrada, el cual puede ser en la escala de  $5 A_{rms}$  o  $1 A_{rms}$ . El mismo circuito aplica para las fases restantes.

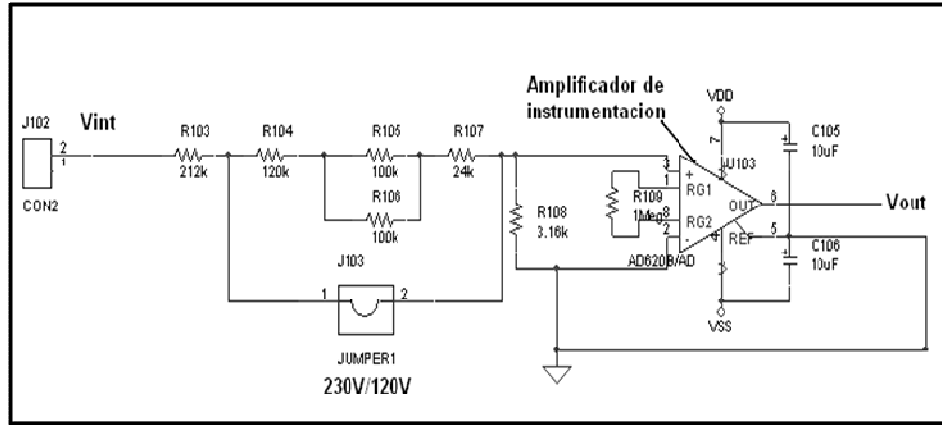
Figura 15. Esquema para sensor corriente (1 fase).



Fuente [Autores]

El circuito implementado para sensor tensión para una de las fases se muestra en la figura 16. El *jumper* 1 permite escoger la escala de tensión máxima permitida. Conectando el jumper se escoge una tensión máxima de 120Vrms y desconectándolo se elige una tensión de 230Vrms. El mismo circuito es usado para las 2 fases restantes.

**Figura 16. Esquema para sensar tensión (1 fase)**



**Fuente[Autores]**

El principio de adquisición de señales de los circuitos integrados en estudio difiere en el método utilizado. Mientras que el *ADE7758* sensa tensión, el *SAMES9904B* sensa corriente, por lo que se deben diseñar circuitos diferentes que permitan que las señales de entrada sean convertidas en niveles adecuados de tensión o corriente para el correcto procesamiento de los datos por parte de los circuitos medidores de energía.

Con el fin de evitar efectos de carga entre los circuitos integrados se implementa un seguidor de tensión para cada uno de los canales de tensión y corriente de los circuitos integrados medidores de energía.

Una etapa importante de este modulo es evitar o eliminar el efecto aliasing que se presenta en todos los sistemas de muestreo. Para este caso se siguen las especificaciones del fabricante y se implementa un filtro paso bajas de primer orden.

### **3.5 FILTRADO DE LAS SEÑALES**

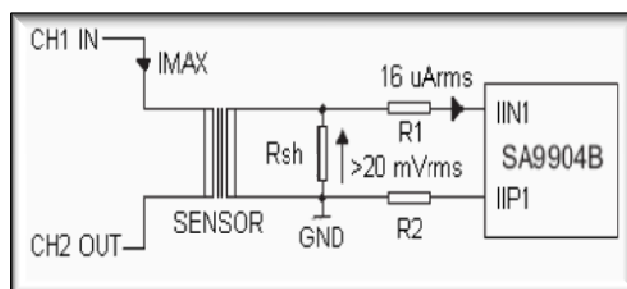
Es necesario una etapa de filtrado de las señales que entran a los circuitos integrados de propósito específico para evitar el efecto de “aliasing”. El aliasing es un fenómeno que aparece en todos los sistemas de muestreo. Señales de entrada con componentes de frecuencia más altas que la mitad de la tasa de muestreo de los conversores A/D, distorsionan las muestras de señal a frecuencias por debajo de la mitad de la tasa de muestreo.

Tomando como referencia las especificaciones del fabricante, se implementa un filtro paso bajos en cada una de las entradas analógicas de los conversores. Un simple filtro RC con valores de  $R=1k\ \Omega$  y  $C=33nF$  garantiza una frecuencia de corte de 10 KHz, suficiente para eliminar el aliasing.

### 3.6 ADQUISICIÓN SEÑALES DE CORRIENTE SA9904B

La figura 17 muestra la configuración propuesta por el fabricante para sensor corriente en una de las fases. El mismo circuito es propuesto para las fases restantes.

**Figura 17. Canal de corriente SA9904B**



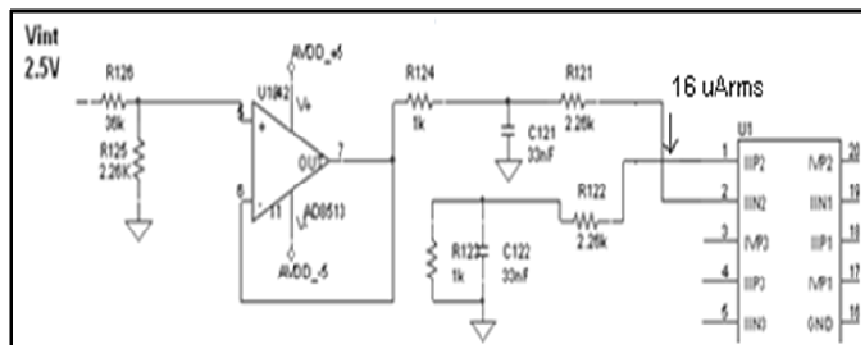
**Fuente [Hoja de datos SA9904B modificada por los autores]**

Los valores de resistencias  $R1$  y  $R2$  definen los niveles de corriente en los pines de entrada del circuito y deben asegurar que la corriente que entra a los pines IIN1

y IIP1 sea 16 uArms. La corriente de entrada del circuito se satura cuando alcanza un valor de +/- 25 uA pico. Las resistencias Rsh son las resistencias de salida del transformador de corriente en caso de usarlo. El voltaje a través de estas resistencias debería ser al menos de 20mV pero no mayor a 200mV. El valor ideal es aproximadamente 100 mV en condiciones normales de prueba.

El circuito de la figura no cuenta con el filtro para eliminar el aliasing, por lo que su configuración cambia como se muestra en la figura 19:

**Figura 18. Esquema para sensar corriente SA9904B**



**Fuente [Autores]**

Tomando como referencia una tensión de 100mVrms a la salida del seguidor de tensión, se calculan los valores de las resistencias que limitan la corriente de la siguiente forma:

$$I=16\mu = 0.1/(R123+R124+R121+R122)$$

Escogiendo  $R123=R124=1k\Omega$  (valores del filtro) y  $R121=R122$  se tiene que:

$$R121=R122=2,125k\Omega$$

El valor escogido fue 2,26kΩ.

Fijando el valor de  $R125$  a 2,26kΩ, se calcula el valor de  $R126$  y resulta en un valor de:

$R_{126}=36,033 \text{ k}\Omega$ .

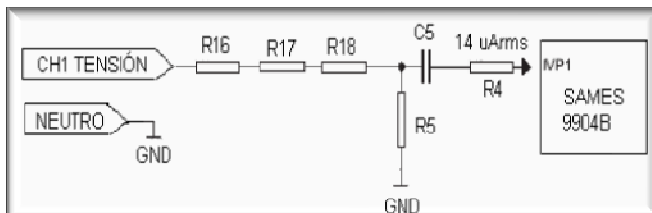
### 3.7 ADQUISICIÓN SEÑALES DE TENSIÓN SA9904B

La figura 19 muestra la configuración que propone el fabricante para sensor tensión en la fase A. El mismo circuito es usado para las otras dos fases. La corriente que entra a cada pin del circuito debe ser  $14 \mu\text{Arms}$  para condiciones nominales de tensión. Al igual que en los canales de corriente se presenta saturación para corrientes de entradas superiores a  $25 \mu\text{Arms}$  pico.

El capacitor C5 es usado para compensar algún desfase causado por el sensor de corriente y su valor se calcula de la siguiente forma:

$$C = \frac{1}{2 * \pi * \text{frecuencia} * \tan \alpha} \quad [68]$$

**Figura 19. Canal de tensión SA9904B**



**Fuente [Hoja de datos SA9904B modificada por los autores]**

El circuito implementado se muestra en la figura 20. Un divisor resistivo es usado para atenuar la señal de 2.5V hasta 1.11V, para luego hallar el valor de la resistencia R117 la cual limita el flujo de corriente que entra al canal de tensión.

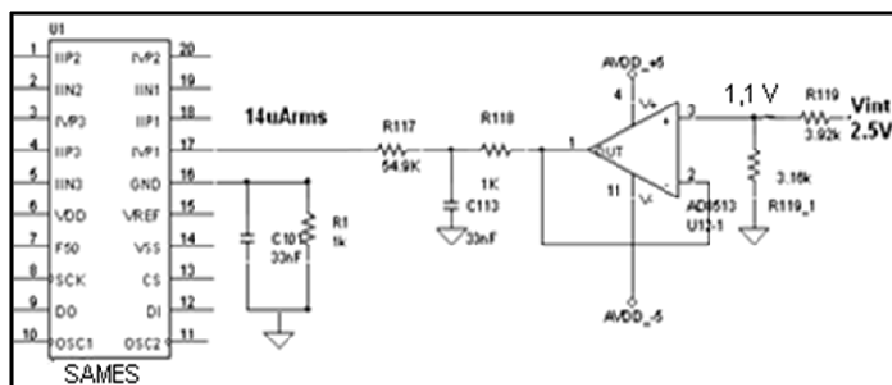
$$14 \mu * \sqrt{2} = \frac{1,11}{R_{117} + R_{118}}$$

Escogiendo  $R_{118}=1\text{k}\Omega$ , para el diseño del filtro, se procede a calcular el valor de  $R_{117}$ .

$R_{117}=55,06\text{k}\Omega$

El valor usado de resistencia es  $54,9\text{k}\Omega$ .

**Figura 20. Circuito de adecuación de señales en el canal de tensión para la fase A en el SA9904B**



Fuente [Autores]

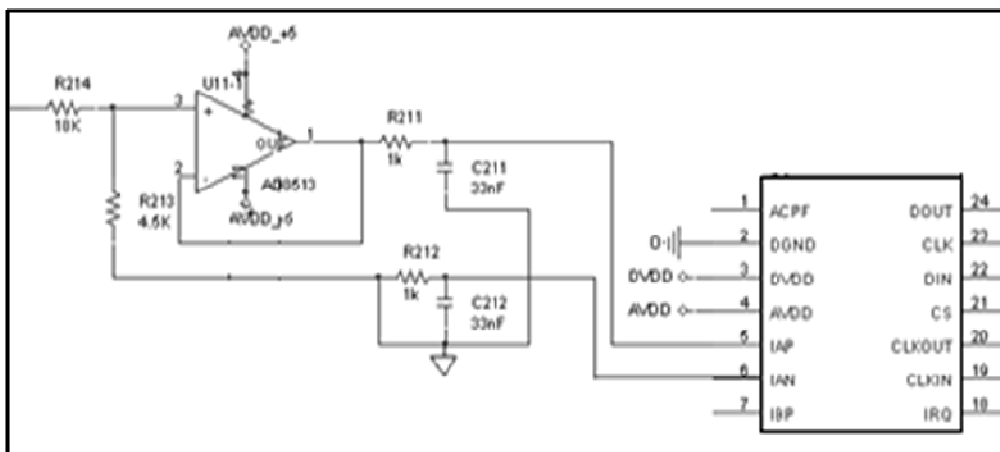
### 3.8 ADQUISICIÓN SEÑALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE ADE7758

El ADE7758 tiene un total de seis entradas análogas divididas en dos canales: corriente y tensión. El canal de corriente consiste de tres pares de entradas de tensión diferencial: IAP y IAN, IBP y IBN, ICP y ICN. Estas entradas de voltaje diferencial deben tener una amplitud máxima de  $\pm 0.5\text{V}$ . Este canal tiene un amplificador de ganancia programable (PGA) con posibles selecciones de ganancia de 1, 2 o 4, permitiendo que el valor de entrada sea ajustado a  $\pm 0.5\text{V}$ ,  $\pm 0.25\text{V}$  ó  $\pm 0.125\text{V}$  respectivamente. Lo anterior se logra escribiendo el valor deseado de ganancia en los bits 3 y 4 del registro *GAIN REGISTER*.

El canal de tensión tiene tres entradas: *VAP*, *VBP*, *VCP*. Estas entradas deben tener  $\pm 0.5V$  como máximo con respecto a *VN* (*neutro*). Al igual que el canal de corriente este canal cuenta con un amplificador programable mediante los bits 5 y 6 del registro GAIN REGISTER.

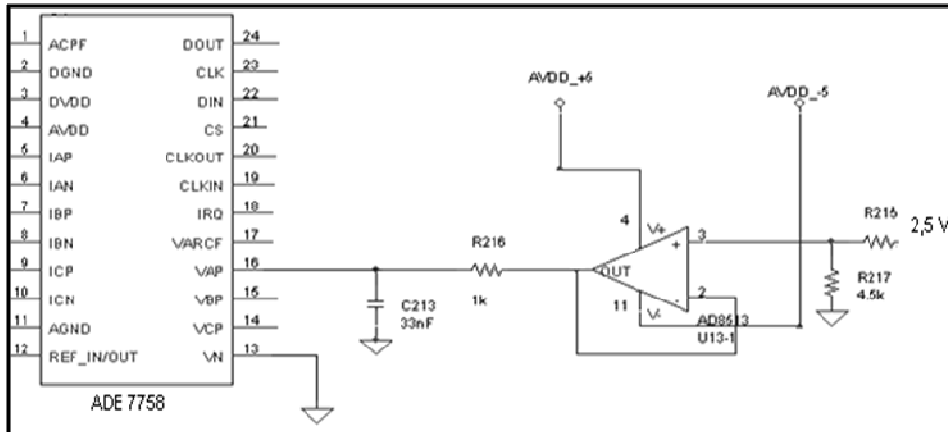
El nivel de tensión para la máxima conversión ó el nivel máximo permisible que se escogió para trabajar es  $\pm 0.5V$  en los canales de corriente y de tensión. Para obtener el valor deseado en los pines del ADE7758 se utiliza un divisor de tensión resistivo.

**Figura 21. Circuito de adecuación en el canal de corriente fase A ADE7758**



**Fuente [Autores]**

**Figura 22. Circuito de adecuación en el canal de tensión fase A ADE7758**



**Fuente [Autores]**

### 3.9 ALMACENAMIENTO DE DATOS

El almacenamiento de datos se hace con el objeto de cargar los valores de calibración de los registros del ADE7758 y del SA9904B cada vez que se reinicie la tarjeta; esto con el fin de evitar calibrar el medidor cada vez que se inicia una nueva medición dado que los DSP de función fija poseen memoria volátil. Otro uso importante es el de guardar periódicamente los valores de energía acumulados en caso que se presente un corte de energía.

Con el fin de no ocupar espacio de la memoria ROM del microcontrolador, los mensajes que se muestran en la pantalla LCD son también guardados en esta memoria.

Para esta aplicación se utilizó una memoria serial EEPROM 24LC256 de la empresa MICROCHIP, la cual cuenta con un tamaño de memoria de 256k bits, capaz de operar en un rango de 2.5V hasta 5.5V e intercambiar datos con una

velocidad máxima de 400 kHz. La comunicación con el microcontrolador se realiza por medio del protocolo de comunicación *I<sup>2</sup>C* .

### **3.10 MANEJO DE PERIFÉRICOS Y CONTROL DEL SISTEMA**

Para el manejo de periféricos, almacenamiento de parámetros y control del sistema se eligió el microcontrolador de acuerdo al número de puertos utilizados para realizar dichas tareas, las herramientas de desarrollo disponibles (software y hardware) en el mercado local y el bajo costo. Por las razones descritas se escogió el microcontrolador MC68HC908GP32 (*Motorola*), ya que cuenta con los puertos necesarios para esta aplicación y se ha usado en varios proyectos por lo que hay suficiente información para su programación y manejo. La función principal del microcontrolador es leer cada uno de los registros de los DSP de función fija y realizar los procesamiento necesario de la información en cada uno de ellos, guardarla en la memoria EEPROM, visualizarla en el *display*(LCD) y comunicación con la interfaz gráfica en el PC.

La disposición de cada uno de los puertos se distribuyó para cada uno de los periféricos de la siguiente forma

- ◆ Para el teclado se asignó el puerto A (*PTA0-PTA7*). Se utiliza el módulo KBI del microcontrolador para manejar el teclado por medio de interrupciones.
- ◆ Para el manejo del display (LCD) se asignó el puerto B. Los pines PTB0-PTB3 son usados para enviar los datos a la pantalla LCD, los pines PTB4 para el control y PTB5 para habilitar la LCD. Los pines PTB6 Y PTB7 se dejaron para obtener los pulsos para la calibración de energía activa y reactiva del integrado ADE7758.
- ◆ Para la comunicación de los DSP de función fija y el microcontrolador se utilizó el módulo SPI el cual por defecto es el puerto D del microcontrolador.

Los pines PTC1 Y PTC0 cumplen la función de seleccionar el circuito integrado con el cual se quiere establecer la comunicación. PTC1 es usado para habilitar el SA9904B, y el PTC0 para habilitar el ADE7758. La frecuencia a la cual se transfieren los datos entre el microcontrolador y los circuitos medidores de energía es 19.2 kHz.

- ◆ El puerto C se usa para conectar los LEDS que permiten calibrar la energía activa y reactiva del integrado SA9904B. PTC2 indica energía activa total y PTC3 indica energía reactiva.
- ◆ Los pines PTD4 y PTD5 son usados para la transferencia de datos entre el microcontrolador y la memoria EEPROM.
- ◆ El modulo SCI (puerto E) se utiliza para la comunicación del microcontrolador y el PC.

### **3.11 VIZUALIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS**

La visualización de los datos calculados se hace por medio de una pantalla de cristal líquido LCD de 4 líneas y 20 caracteres, también por medio de una interfaz gráfica en el PC desarrollada en *Labview*.

La ventaja que presenta la pantalla de cristal líquido es el bajo consumo de potencia, fácil conexión con el microcontrolador y buena capacidad de visualización ya que con 4 líneas es posible observar el título de la variable medida, a la vez que se visualizan los resultados de los 2 circuitos al mismo tiempo con el fin de contrastar los valores medidos.

En esta pantalla se puede visualizar la potencia activa, reactiva, aparente, factor de potencia, energía activa, reactiva, aparente de cada una de las fases del sistema o la total del sistema trifásico, también valores RMS de tensión, valores RMS de corriente y frecuencia de cada una de las fases y otros parámetros para la

medición del índice de calidad de energía. En la siguiente tabla se muestran los formatos usados para visualizar los datos en la pantalla LCD.

**Tabla 2. Formato de visualización de datos en la pantalla LCD.**

Energías	XXXXXX,xxxx	kWh, kVARh, ó kVAh
Potencias	XXX,x	kW, kVAR, ó kVA
Tensiones	XXX,x	V rms
Frecuencias	XX,x	Hz
Corrientes	X,xxx	A rms
Factor de potencia	X,xx	Atraso o adelanto

La comunicación con el microcontrolador se realizó mediante la transferencia de datos a través de sus líneas de datos y de control. Pueden usarse 4 u 8 líneas de datos. Si se escoge 8 líneas se facilita la programación en el microcontrolador, pero toca disponer de mas puertos I/O del MCU. Para esta aplicación se escogió trabajar con 4 líneas de datos con el fin de ahorrar puertos del microcontrolador que se necesitan para otros periféricos.

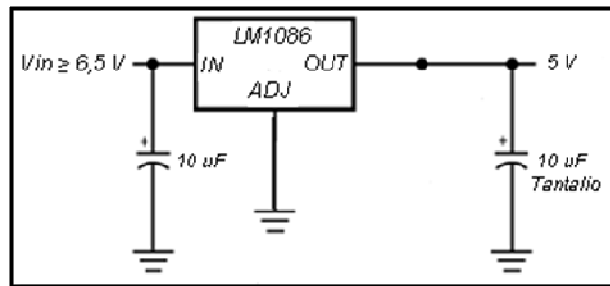
### **3.12 DISEÑO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN.**

Para la fuente de alimentación de los circuitos integrados fue necesario implementar una fuente digital de 5V DC y una fuente analógica dual con tensiones de 5 y -5 volts DC. Para este propósito se usa un transformador con TAP central, el cual entrega señales de +/- 9V AC. Mediante un puente rectificador y filtros se convierten estos niveles de tensión a +/- 9V DC.

La fuente de alimentación digital de 5V se implementó mediante el regulador de tensión LM1086 (*NATIONAL SEMICONDUCTOR*), el cual tiene un rango de entrada que va desde 6.5V hasta 20V, tensión de salida de 5V con una variación

de 10mV máximo y corriente de salida de 1.5 A máximo. Esta fuente es la encargada de alimentar los circuitos digitales como el microcontrolador, la memoria eeprom, el MAX232 así como al SA9904B.

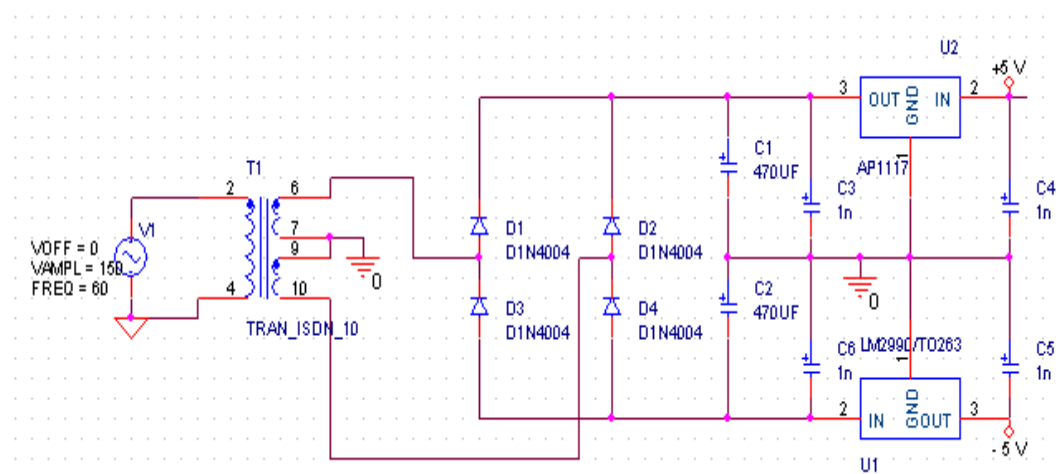
**Figura 23. Esquema de conexión fuente de alimentación digital**



**Fuente [Hoja de datos del fabricante modificada por los autores]**

En el diseño de la fuente analógica dual de 5V y -5V DC se usaron los reguladores AP1117 y LM2290. El AP1117 (*DIODES INCORPORATED*) se utiliza para regular la fuente positiva a un valor deseado de 5V. El LM2290 (*NATIONAL SEMICONDUCTOR*) regula el nivel de tensión a -5V.

**Figura 24. Esquema de conexión fuente de alimentación dual**



**Fuente [Hoja de datos del fabricante]**

El esquema del circuito de la fuente de alimentación dual se muestra en la figura 24. Esta configuración es la ofrecida por los fabricantes.

La alimentación del circuito integrado medidor de energía SA9904B requiere de 2.5 V y -2.5V, los cuales se obtienen a partir de los reguladores LT1963 (*LINEAR TECHNOLOGY*) y LM337 (*NATIONAL SEMICONDUCTOR*), tomando como entrada 5V y -5V.

La fuente de alimentación analógica dual alimenta a los amplificadores operacionales, amplificadores de instrumentación y el sensor de efecto hall usado para sensar corriente.

Dado que los niveles de tensión del microcontrolador y el SA9904B son diferentes, fue necesario agregar una etapa de acople entre estos dos. El integrado utilizado para esta función fue el optoacoplador HCPL2631 (*FAIRCHILD SEMICONDUCTOR*), el cual convierte niveles lógicos de tensión desde -2.5 V y 2.5 V a 5 V y 0 V respectivamente.

## 4. DESCRIPCIÓN SOFTWARE IMPLEMENTADO

Como se mencionó anteriormente el microcontrolador escogido para esta aplicación fue el MC68HC08GP32 (*Motorola*), el cual se programó utilizando el software *Codewarrior*. Una de las funciones del microcontrolador es enviar los datos calculados al PC por medio del puerto serial, los cuales son recibidos y adecuados para mostrarlos con ayuda del programa *Labview*.

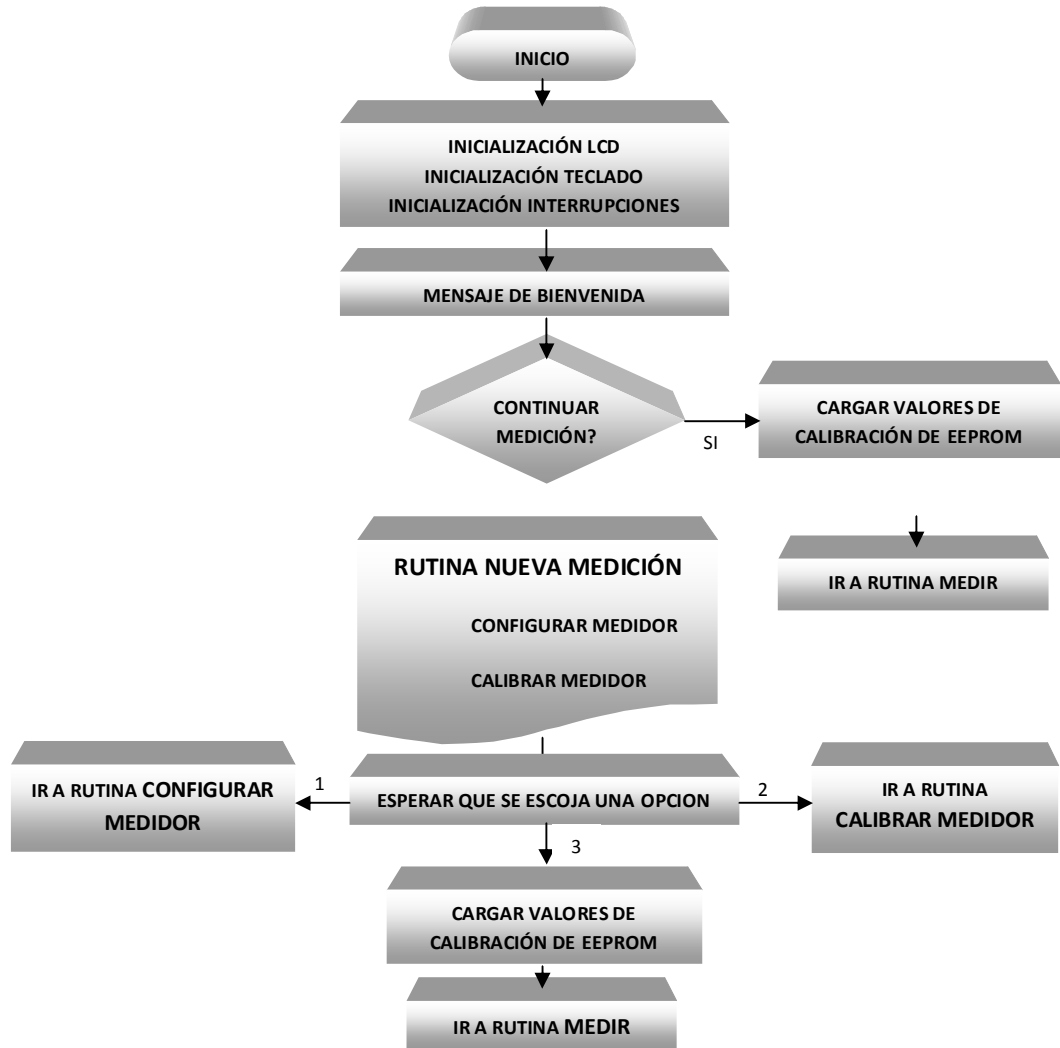
### 4.1 CONTROL DEL SISTEMA CON EL MICROCONTROLADOR.

El programa implementado en el microcontrolador contiene varias rutinas que se encargan de inicializar periféricos, calibrar y configurar el medidor, así como iniciar o restaurar una medición.

El modulo de inicialización como su nombre lo indica se encarga de inicializar periféricos tales como la pantalla LCD, teclado, puerto serial y activar las interrupciones necesarias en el microcontrolador. Además esta rutina se encarga de cargar constantes y factores de calibración de la memoria eeprom y copiarlas a la memoria RAM, para su posterior uso en la rutina principal de medición de energía.

Un mensaje de bienvenida da comienzo a la rutina, la cual retomará una medición antigua si el usuario no presiona ENTER en el teclado matricial. En caso que se presione esta tecla el programa entra a un menú llamado **nueva medición** poniendo a cero todas las variables que contienen información de las energías medidas anteriormente. El diagrama de flujo que explica lo antes mencionado se muestra a continuación:

Figura 25. Diagrama de flujo rutina de inicio



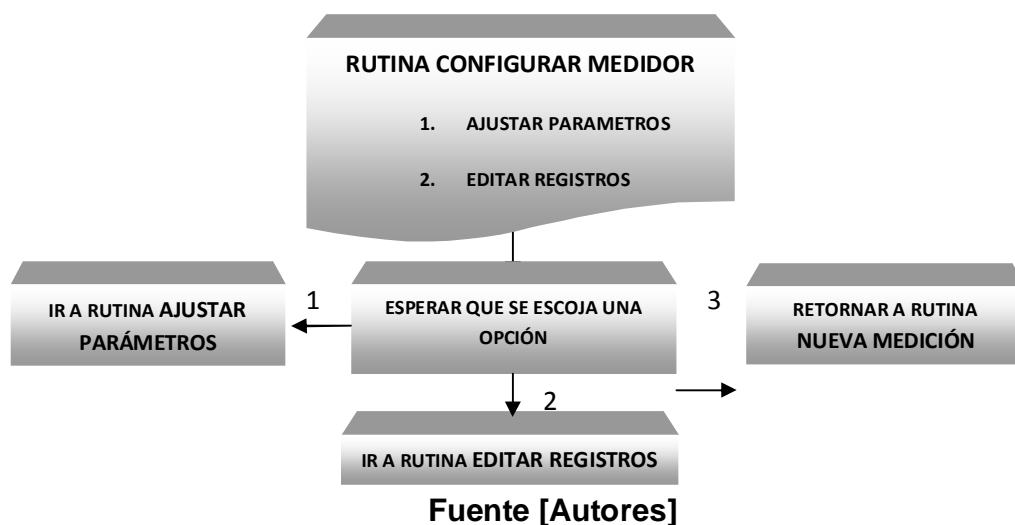
Fuente [Autores]

#### 4.1.1 Rutina configurar medidor

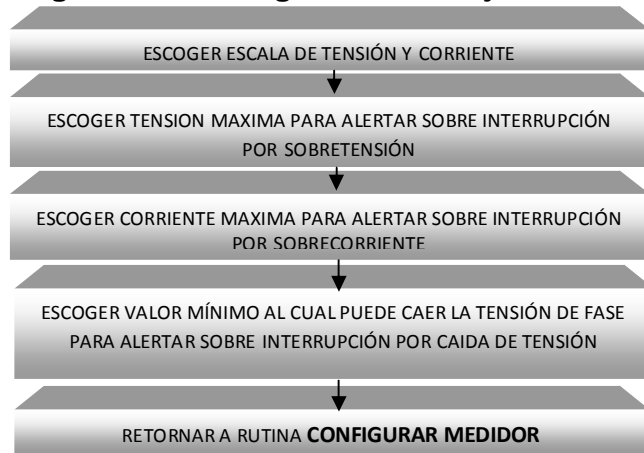
Este submenú es implementado especialmente para el circuito ADE7758, ya que este contiene registros que pueden ser editados, permitiendo cambiar algunas características de medición de este circuito.

En esta parte del programa se pueden escoger los valores máximos de tensión y corriente con el fin de definir la escala a la cual se quiere trabajar, valores a los cuales el ADE7758 marcará interrupción por sobretensión, sobrecorriente o caídas de tensión. También se pueden activar o desactivar los pulsos de frecuencia que suministran información de la energía consumida y las fases a incluir en dichos pulsos.

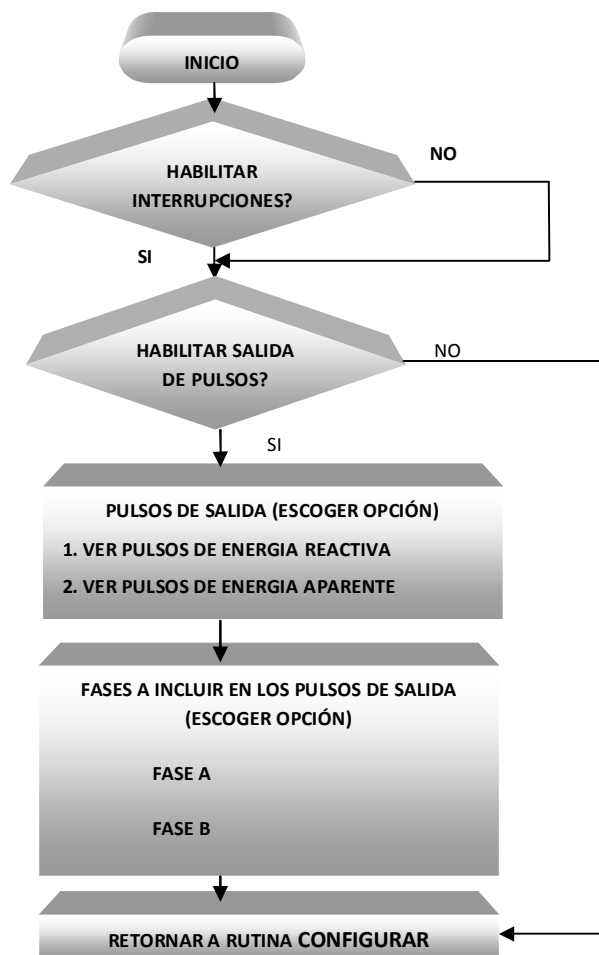
**Figura 26. Diagrama de flujo rutina configurar medidor**



**Figura 27. Diagrama de flujo rutina ajustar parámetros.**



**Figura 28. Diagrama de flujo rutina editar registros.**



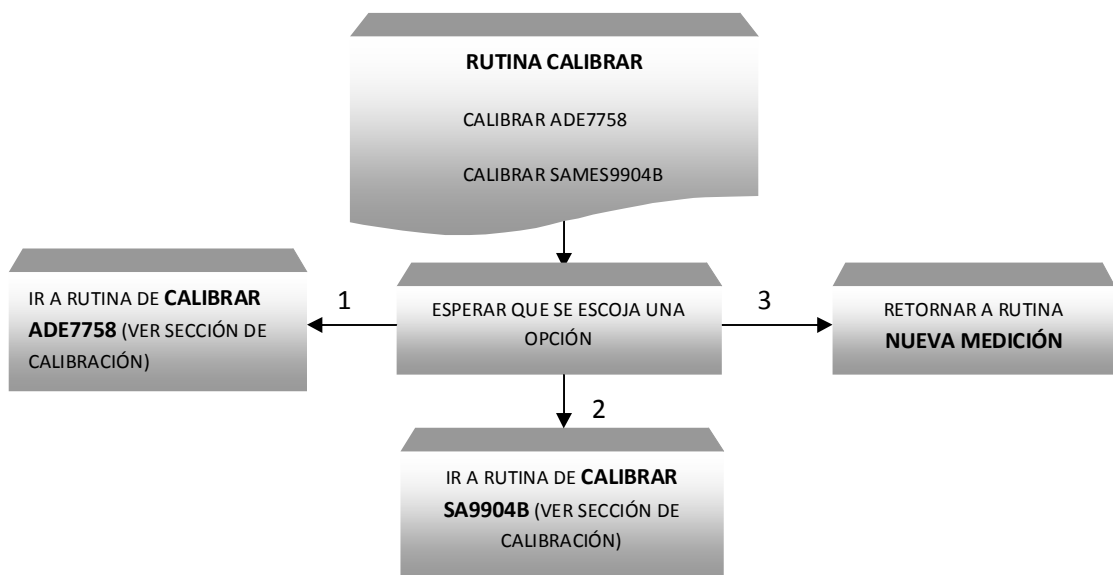
#### 4.1.2 Calibrar medidor

La calibración de los medidores permite establecer las constantes que relacionan a los registros leídos de los circuitos integrados con el verdadero valor de la variable a medir.

Cabe destacar que la programación de la rutina de calibración en el ADE7758 es más extensa que en el SAMES9904B pero a la vez es más precisa y más fácil de implementar, además que permite eliminar problemas de offset presentes en el circuito y errores de fase existentes entre los canales de tensión y corriente.

El código implementado para la rutina de calibración hace que se ocupe un espacio considerable de memoria ROM en el microcontrolador pero a al vez evita el uso de un computador para realizar este proceso.

**Figura 29. Diagrama de flujo calibrar medidor**



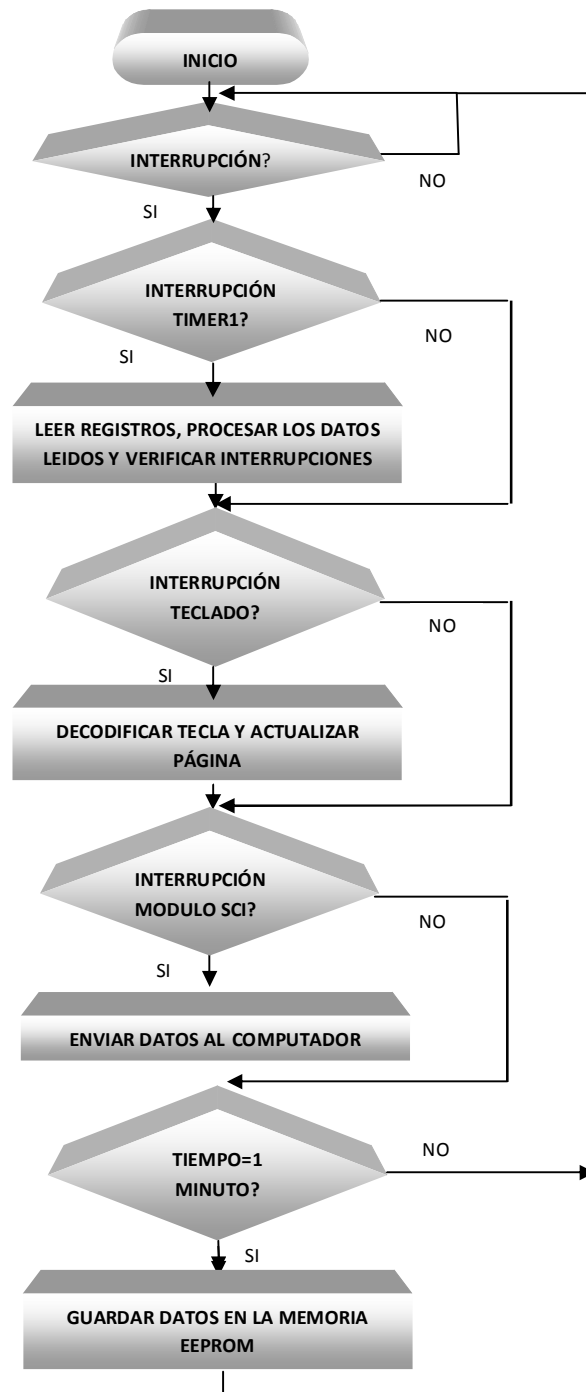
**Fuente [Autores]**

### **4.1.3 Rutina iniciar medición**

Este módulo carga valores de calibración guardados previamente en la memoria eeprom, y da inicio a la rutina principal encargada de la medición de los parámetros de interés. El microcontrolador continuamente lee registros del ADE7758 y SAMES9904B los cuales son multiplicados por las respectivas constantes de conversión y los resultados son guardados en las correspondientes posiciones de memoria RAM. Al mismo tiempo el microcontrolador monitorea registros del ADE7758 que indican presencia de interrupciones.

Los registros de energía son guardados en la memoria eeprom cada minuto y enviados por el puerto serial cada vez que el programa implementado en labview le indique que debe enviar datos.

Figura 30. Diagrama de flujo rutina iniciar medición



Fuente [Autores]

Cuando se ingresa en el modulo de medición, el microcontrolador hace uso de de las interrupciones y espera a que una de estas ocurra. En el momento que se produzca una interrupción este deja su estado de espera y realiza una consulta para verificar la fuente de la interrupción, dándole prioridad a la interrupción del *timer1*, la cual indica que ha transcurrido 1 segundo y que se pueden leer los registros de los circuitos medidores de energía.

Si el *timer1* no es la fuente de la interrupción, el programa sigue buscando hasta encontrar dicha fuente y tomar la decisión adecuada. Después de realizar la tarea especifica que cada interrupción indica microcontrolador vuelve a su estado de espera de alguna interrupción.

Los módulos de interrupción con los que cuenta el microcontrolador ayudan a implementar esta rutina de una manera fácil y organizada. Las diferentes fuentes de interrupción usadas son descritas a continuación:

**Bandera SCRF:** Indica la correcta recepción de un byte en el modulo SCI durante la comunicación entre el microcontrolador y el computador.

**Bandera SPRF:** indica la correcta recepción de un byte en el modulo SPI durante la comunicación entre el microcontrolador y los circuitos medidores de medición.

**Bandera KEYF:** Indica que una tecla fue presionada en el teclado matricial.

**Bandera TOF:** Indica que un 1 segundo ha transcurrido, para proceder a leer registros.

**Figura 31. Paginas de visualización LCD**



La interrupción del teclado matricial es usada principalmente para cambiar las páginas que se visualizan en la pantalla LCD. Permite ver el mensaje y el valor actual de cualquiera de las variables medidas. El menú principal de medición contiene 8 páginas principales, las cuales a su vez contienen varias subpáginas que permiten ver la fase escogida.

Al presionar una tecla se activa una bandera la cual indica que hay una interrupción pendiente que debe ser atendida. La primera acción que se toma es limpiar dicha bandera para activar una posible nueva interrupción y luego decodificar para saber cual tecla fue presionada. Cuando el valor de esta tecla es conocido se procede a cambiar de paginas y por ende los valores de la variable a mostrar.

La mayoría de las paginas contienen información de los dos circuitos integrados descritos en este proyecto, a excepción de las paginas de energía aparente, potencia aparente, y corrientes las cuales solo contienen información del circuito ADE7758, ya que el SAMES9904B no contiene registros de estas variables.

La tecla 8 debe usarse solamente si se quiere dar inicio a una nueva medición, lo cual hace que todos los registros deban reinicializarse e ir a la rutina de nueva medición explicada anteriormente.

El índice de la página indica la variable a mostrar y la subpágina la fase de dicha variable, exceptuando la página 1 que solo muestra el tiempo acumulado de medición. La siguiente tabla muestra la relación existente entre las páginas y la variable a visualizar en la pantalla LCD.

**Tabla 3. Paginas a visualizar en la pantalla LCD**

PAGINA	VARIABLE A VISUALIZAR EN PANTALLA
1	TIEMPO DE MEDICIÓN
2	ENERGÍA ACTIVA
3	ENERGÍA REACTIVA

4	ENERGÍA APARENTE
5	POTENCIA ACTIVA
6	POTENCIA REACTIVA
7	POTENCIA APARENTE
8	TENSIÓN
9	FRECUENCIA
10	CORRIENTE
11	INTERRUPCIONES
12	FACTOR DE POTENCIA

## 4.2 PROGRAMA IMPLEMENTADO EN LABVIEW

Esta parte del capítulo explica en forma detallada la forma como se adquieren los datos y se muestran en *Labview* usando el protocolo de comunicación RS232. Este programa se encarga de editar registros del circuito ADE7758, mostrar alarmas de sobrecorriente, sobretensión y caídas de tensión al mismo tiempo que muestra todas las variables medidas que envía el microcontrolador.

La configuración del puerto serial se realiza utilizando el módulo VISA, el cual se encarga de establecer los parámetros a usar en la comunicación. La velocidad de transmisión de datos es 19200 baudios, se utiliza 1 bit de parada, sin paridad y el puerto serial usado es escogido por el usuario.

Por defecto la ventana principal del programa carga una rutina denominada créditos, la cual muestra el título, autores, fecha del proyecto, y la fecha actual.

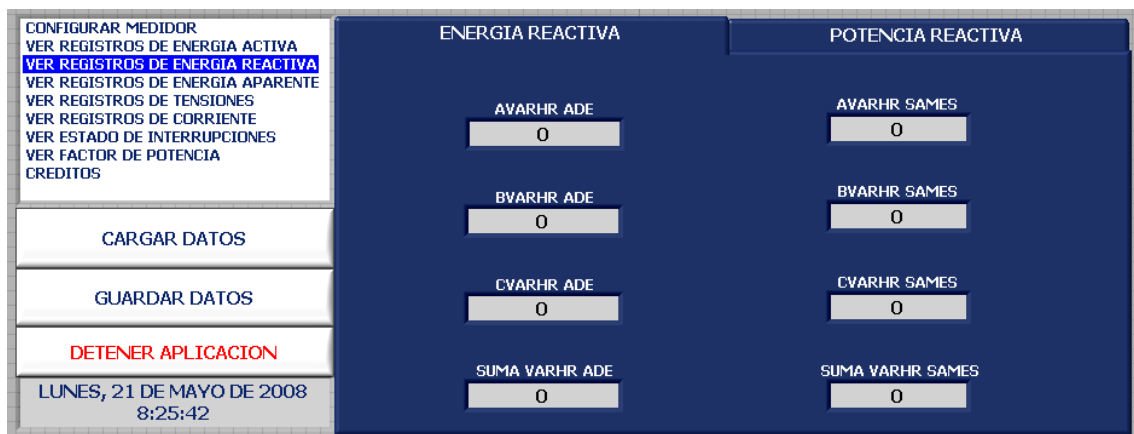
**Figura 32. Ventana por defecto mostrada por labview. (CREDITOS)**



Fuente [Autores]

Una ventana al lado izquierdo de la pantalla contiene títulos que actúan como enlaces y muestran la información de la variable seleccionada. Al hacer click sobre cualquiera de estos títulos, aparecerá una ventana emergente mostrando los datos correspondientes, como se muestra en la figura 33.

**Figura 33. Ventana que muestra información de energía y potencia reactiva por fase de ADE7758 y SA9904B.**



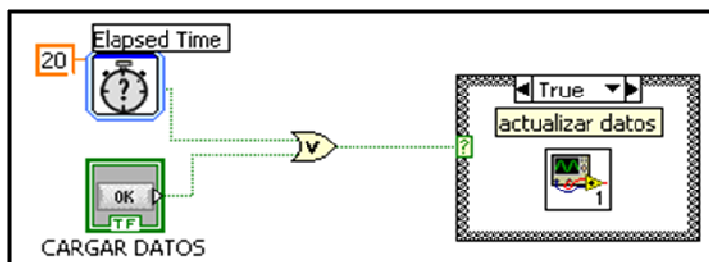
Fuente [Autores]

VARIABLES globales se crean y actualizan cada vez que se lean datos del puerto serial, dichas variables se llaman cuando se necesite mostrar su resultado en pantalla.

El esquema general del programa consiste de una estructura *WHILE* que solo se detiene cuando se presiona el botón de detener medición. Las ventanas emergentes que muestran la información de las distintas variables se controlan por una estructura *CASE* que habilita o deshabilita la visibilidad de cada una de estas ventanas.

Existen 2 formas en que el programa puede actualizar los datos. La primera es manual y consiste en presionar el botón CARGAR DATOS, con lo cual el PC envía un 1 por el puerto serial indicando que está listo para recibir los datos del microcontrolador. La segunda forma es automática y controlada por un *timer*, cuyo valor configura el usuario, haciendo que los registros se actualicen cada cierto tiempo sin necesidad de presionar ningún botón en el programa. Por defecto el *timer* está configurado para que se actualicen datos cada 10 segundos.

**Figura 34. Diagrama que permite actualizar datos de manera automática o manual.**



**Fuente [Autores]**

El programa puede leer registros que el microcontrolador guarda en su memoria RAM o editar algunos registros del circuito ADE7758. El PC envía un byte haciendo que se active una bandera de interrupción en el modulo SCI. Si el byte

recibido corresponde a un 1 el microcontrolador debe enviar todos los datos almacenados en su memoria. En caso contrario debe realizar una acción de edición de registros escribiéndole al ADE7758.

El envío de los datos consiste en un solo paquete compuesto de 185 bytes, en donde van incluidos los valores de todas las variables y además la confirmación de las interrupciones presentes. El paquete de bytes enviado en orden está conformado de la siguiente manera:

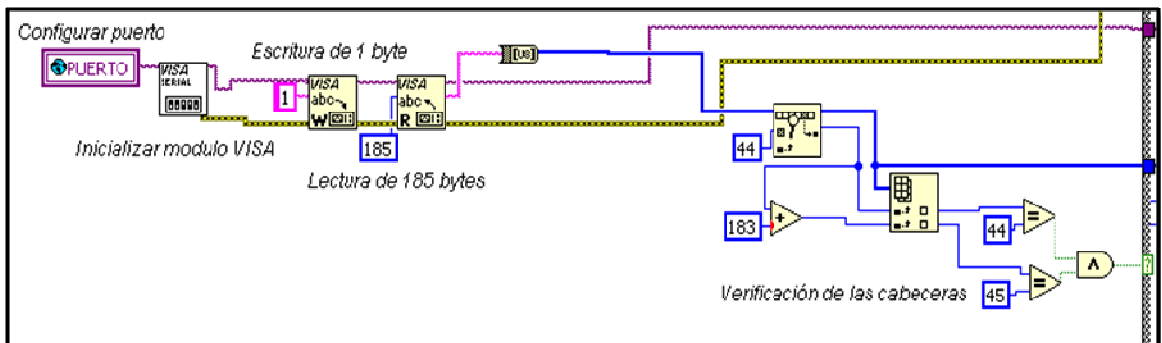
**Tabla 4. Clasificación de los datos recibidos por el PC.**

NUMERO DE BYTES	VARIABLE
1	CABECERA(indica el comienzo de una transmisión)
44	INFORMACIÓN DE LA FASE A
44	INFORMACIÓN DE LA FASE B
44	INFORMACIÓN DE LA FASE C
20	SUMA DE LAS ENERGÍAS(ENERGÍA TOTAL)
20	SUMA DE LAS POTENCIAS(POTENCIA TOTAL)
4	INFORMACIÓN DE LAS INTERRUPCIONES
3	FACTOR DE POTENCIA
4	TIEMPO DE MEDICION
1	CABECERA(indica fin de una transmisión)

La recepción de los datos es bastante simple. Primero se configura el programa para que se lea exactamente el número de datos enviado por el microcontrolador. En caso tal que se lean menos o más datos el programa entenderá que esa información es errónea y no continúa con el proceso de reagrupar y guardar los datos. La anterior operación se realiza con las cabeceras, las cuales indican el principio y el fin de una transmisión. Específicamente el primer byte es 44 y el ultimo 45, por lo que el programa en *Labview* lo primero que tiene que realizar es una comparación para verificar el valor de estos 2 bytes. En caso que la

comparación resulte verdadera se procede a extraer los datos teniendo en cuenta que se conoce cuantos datos son enviados, además del conocimiento del orden en que son enviados. Al final se extrae cada dato y se le asigna este valor a una variable global que guarda dicho valor.

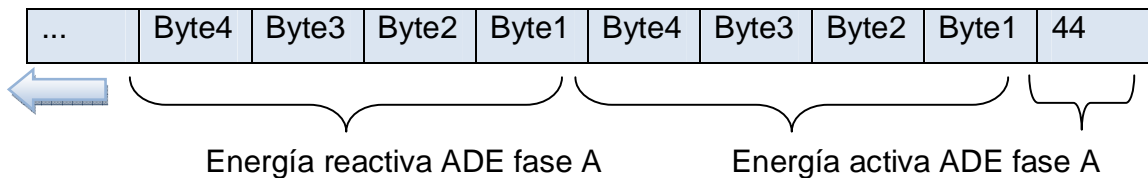
**Figura 35. Escritura y lectura de datos por el puerto serial**



**Fuente [Autores]**

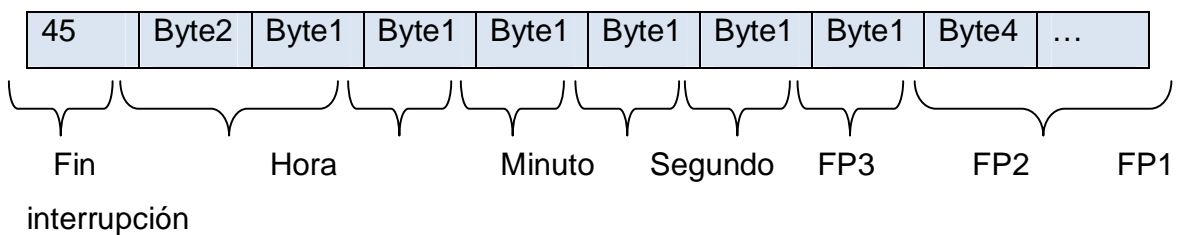
A continuación se muestra el proceso de envío de datos:

9 primeros bytes enviados



Inicio

10 últimos bytes enviados



En donde FP hace referencia al factor de potencia, interrupción a una bandera de 4 bytes que indican cuales interrupciones se presentan y esta configurada de la siguiente manera:

**Tabla 5. Bandera de interrupción**

<b>BIT</b>	<b>INTERRUPCIÓN</b>
3	Indica interrupción por caída de tensión en la fase A
4	Indica interrupción por caída de tensión en la fase B
5	Indica interrupción por caída de tensión en la fase C
6	Indica interrupción por falta de señal de tensión en la fase A
7	Indica interrupción por falta de señal de tensión en la fase B
8	Indica interrupción por falta de señal de tensión en la fase C
14	Indica interrupción por sobretensión
15	Indica interrupción por sobrecorriente
19	Indica interrupción por error de secuencia de fase
20	Indica que la interrupción por sobretensión o sobrecorriente es en la fase A
21	Indica que la interrupción por sobretensión o sobrecorriente es en la fase B
22	Indica que la interrupción por sobretensión o sobrecorriente es en la fase C

El programa entiende que existe una interrupción cuando cualquiera de los bits mencionados en la tabla tiene valor de 1. Los bits que no se mencionan pueden tener cualquier valor.

## 5. RUTINAS DE CALIBRACIÓN

Con el fin de emplear el medidor correctamente, existen registros que se deben inicializar con un valor específico para la correcta interpretación del contenido de los registros leídos posteriormente.

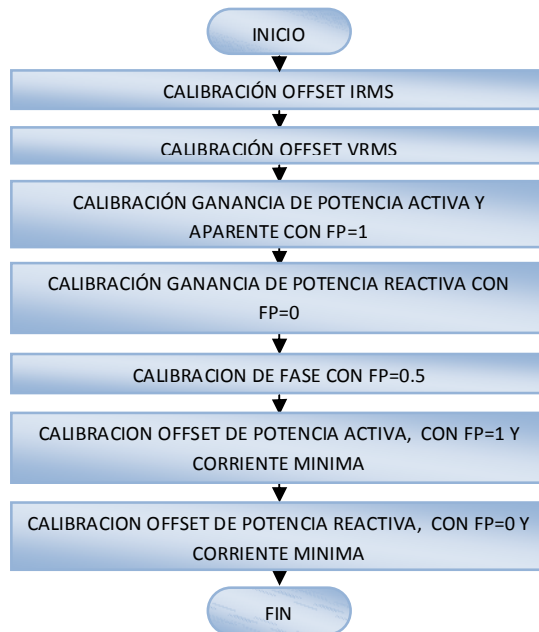
Los objetivos principales de la calibración es establecer la constante correcta que relaciona a los impulsos/kW-hr, impulsos/kVAR-hr, impulsos/kVA-hr con la salida de pulsos emitida por el medidor, y obtener una relación entre el contenido de los registros leídos con los valores reales de energía, tensiones y corrientes. También se busca eliminar errores de offset. Para calibrar el medidor se requiere un medidor de referencia o fuentes precisas de tensión y corriente.

### 5.1 CALIBRACION ADE 7758

El ADE7758 se puede calibrar mediante 2 formas. En la primera el medidor se emplea la salida de pulsos de frecuencia, que ofrece información de la energía total medida, y en la segunda se emplea el método de acumulación de línea. Por facilidad y rapidez para el procedimiento se empleó el método de acumulación de línea, el cual configura los nueve registros de energía de tal manera que la cantidad de energía acumulada en un número entero de medios ciclos de línea (medio periodo) aparezca en los registros después de una interrupción causada por el registro *LINECYC*.

A continuación se muestra un diagrama de flujo indicando los pasos a seguir para calibrar el medidor en su respectivo orden. Todas las fases pueden ser calibradas al mismo tiempo lo que hace que se ahorre tiempo durante la calibración.

**Figura 36. Rutina principal de calibración ADE7758**



### 5.1.1 Calibración de offset en tensión y corriente

Los registros  $xIRMSOS$  y  $xVRMSOS$  son usados para cancelar ruido y contribuciones de offset desde las entradas.

El procedimiento es sincronizar las lecturas de los registros de tensión y corriente con los cruces por cero de la onda de tensión y promediar algunas muestras.

Para realizar estas pruebas se debe ajustar la tensión a dos valores recomendados los cuales son  $V_{test}$  y  $\frac{V_{test}}{20}$ , y la corriente a  $I_{test}$  e  $\frac{I_{max}}{500}$ .

Donde:

$V_{test}$  = Tensión de prueba,  $I_{test}$  = corriente de prueba, e  $I_{max}$  = corriente máxima permitida.

Estos cuatro valores de prueba se combinan y dan como resultado tres condiciones a evaluar, las cuales se muestran a continuación:

Primera condición:  $I_{test}$  y  $V_{test}$  .

Segunda condición:  $\frac{I_{max}}{500}$  y  $V_{test}$  .

Tercera condición:  $I_{test}$  y  $\frac{V_{test}}{20}$  .

Los valores a escribir en los registros de offset se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$IRMSOS = \frac{1}{16384} \times \frac{\left( I_{TEST}^2 \times I_{TEST_{RMS}}^2 \right) - \left( \frac{I_{MAX}^2}{x} \times \frac{I_{MAX}^2}{x_{RMS}} \right)}{\frac{I_{MAX}^2}{x} - I_{TEST}^2}$$

Donde  $I_{test-rms}$  y  $I_{max/x-rms}$  son los valores de los registros leídos sin corrección de offset para las entradas  $I_{test}$  y  $I_{max}/500$  respectivamente.

$$VRMSOS = 64 \times \frac{\left( \frac{V_{NOM} \times V_{NOM}}{20_{RMS}} \right) - \left( \frac{V_{NOM}}{20} \times V_{NOM-RMS} \right)}{\frac{V_{NOM}}{20} - V_{NOM}}$$

Donde  $V_{nom-rms}$  y  $V_{nom}/20-rms$  son los valores de los registros leídos sin corrección de offset para las entradas  $V_{nom}$  y  $V_{nom}/20$  respectivamente.

### 5.1.2 Calibración de ganancia.

La calibración de la ganancia se emplea para determinar las constantes que relacionan los registros leídos con la energía real medida por el ADE7758 y se pueden hallar de la siguiente forma:

Constante para Energía Activa

$$\frac{Wh}{LSB} = \frac{I_{TEST} \times V_{NOM} \times Accumtime}{3600 \times xWATTHR} \longrightarrow$$

$$\frac{VAh}{LSB} = \frac{I_{TEST} \times V_{NOM} \times Accumtime}{3600 \times xVAHR} \longrightarrow \text{Constante para Energía Reactiva}$$

$$\frac{VARh}{LSB} = \frac{I_{TEST} \times V_{NOM} \times Accumtime}{3600 \times xVARHR} \longrightarrow \text{Constante para Energía Aparente}$$

Donde:

$V_{nom}$  = Tensión de prueba

$I_{test}$  = Corriente de prueba

$AccumTime$  = Tiempo de acumulación de la energía en el registro correspondiente y cuyo valor depende del contenido del registro LINECYC, el cual indica el número de medios ciclos de línea en los que se acumula la energía y viene dado por:

$$AccumTime = (LINECYC[15:0]) / (2 * frecuencia)$$

$xWATTHR$ ,  $xVAHR$ , y  $xVARHR$  son los valores de los registros de energía leídos en el tiempo establecido.

### 5.1.3 Calibración de fase

El ADE7758 incluye un registro para cada fase que se emplea para compensar errores de fase pequeños causados por los sensores de corriente usados. Errores grandes de fase se deben compensar ajustando los filtros *antialiasing*. La calibración de fase del ADE7758 consiste en retardos de tiempo de ancho variable en dirección positiva o negativa.

El procedimiento a seguir para calcular el desfase consiste en medir el error entre los registros de energía leídos a  $FP=1$  y  $FP=0,5$  de la siguiente forma:

$$Error = \frac{xWATTHR_{PF=0.5} - \frac{xWATTHR_{PF=1}}{2}}{\frac{xWATTHR_{PF=1}}{2}}$$

El error de fase en grados se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Error\ de\ fase = -Arcsin\left(\frac{Error}{\sqrt{3}}\right)$$

Los valores a escribir en los registros de calibración de fase se calculan mediante la ecuación:

$$xPHCAL = Arcsin\left(\frac{Error}{\sqrt{3}}\right) \times \frac{9,6\mu s}{2,4\mu s} \times \frac{FREQ[11:0]}{360}$$

Donde  $FREQ[11:0]$  es el valor leído del registro de frecuencia.

#### 5.1.4 Calibración de offset en potencia.

La calibración del *offset* se realiza para destacar el rendimiento sobre un rango dinámico de 1000:1 y debe ser realizada con la corriente mínima o un valor cercano a ella. El ADE7758 tiene registros de *offsets* para la potencia activa y reactiva. El *offset* en la medida de la potencia aparente es compensado ajustando el *offset* de los registros de tensión y corriente explicados anteriormente.

Para calcular los valores a escribir en los registros de *offset* se deben aplicar las siguientes ecuaciones:

$$Offset_{pot\ activa} = \frac{xWATTHR_{I_{min}} \times I_{TEST} - xWATTHR_{I_{TEST}} \times I_{MIN}}{I_{MIN} - I_{TEST}}$$

$$Offset_{pot_{reactiva}} = \frac{xVARHR_{I_{min}} \times I_{TEST} - xVARHR_{I_{TEST}} \times I_{MIN}}{I_{MIN} - I_{TEST}}$$

Donde  $xWATTHR_{I_{min}}$  es el registro leído con corriente mínima,  $xWATTHR_{I_{test}}$  es el registro leído con corriente de prueba. Las condiciones anteriores también aplican a  $xVARHR_{I_{min}}$  y  $xVARHR_{I_{test}}$ .

$$xWATTOS[11:0] = \frac{Offset \times 4}{Accumtime \times CLKII}$$

## 5.2 CALIBRACIÓN SAMES 9904B

Una de las limitaciones del circuito integrado SA98904B es no contar con registros de escritura que ayuden con el proceso de calibración para corregir errores introducidos por los transductores y por otros factores. Ante esta situación se debe programar el microcontrolador para hallar estos valores de calibración. La rutina de calibración del SAMES9904B empieza con el calculo teórico de las variables de interés, luego se procede a su medición y finalmente se halla el porcentaje de error, guardando estos en la memoria eeprom 24LC256. En cuanto el medidor inicie o retome una medición estos valores pasan a la memoria RAM del microcontrolador.

### 5.2.1 Calibración de tensión.

Este proceso comienza escribiendo por medio del teclado un valor conocido de tensión. Al terminar de escribir dicho valor, el microcontrolador inicia una operación de lectura a los registros de tensión, calculando de esta forma el valor experimental de la variable. Se realizan alrededor de 20 lecturas para establecer

un promedio de la tensión calculada, la cual puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$Tensión\ promedio = \frac{Tensión_{nominal} * Registro_{leído}}{CAL_{tensión}}$$

Donde:

$CAL_{tensión}$  = Factor de calibración, el cual por defecto es un valor de 800.

$Tensión_{nominal}$  = Tensión ajustada inicialmente.

$Registro\ leído$  = Valor leído del registro del circuito integrado.

El error que se presenta en la medición se calcula de la siguiente manera:

$$Error = \frac{Valor_{teórico} - Valor_{experimental}}{Valor_{teórico}}$$

Por lo tanto el nuevo valor de tensión RMS incluye el error hallado anteriormente y se calcula como sigue:

$$Tensión = \frac{Tensión_{nominal} * Registro_{leído}}{CAL_{tensión} * (1 + error)}$$

### 5.2.2 Calibración de potencia y energía

El proceso se realiza individualmente para cada una de las fases, y se describe a continuación.

El medidor debe ajustarse a la tensión máxima,  $I_{max}/4$ , y  $FP=0$  o  $FP=1$  dependiendo si se desea calibrar energía activa o reactiva. Es necesario introducir el tiempo de prueba para calcular la energía y potencia teórica que se espera medir.

Inmediatamente estén dadas las condiciones mencionadas, el microcontrolador inicia una medición de energía y potencia hasta que el tiempo introducido sea igual a cero.

Para el cálculo teórico de energía y potencia se usan las siguientes ecuaciones:

$$Energia_{activa} = \frac{V * I * t * \cos\alpha}{3600000} \text{ (kWh)}$$

$$Potencia_{activa} = V * I * \cos\alpha \text{ (W)}$$

$$Energia_{reactiva} = \frac{V * I * t * \sen\alpha}{3600000} \text{ (kVARh)}$$

$$Potencia_{reactiva} = V * I * \sen\alpha \text{ (VAR)}$$

Donde:

V=tensión de prueba ( $V_{max}$ )

I=corriente de prueba  $\left(\frac{I_{max}}{4}\right)$

t =tiempo en segundos de la prueba de medición.

Para ver el cálculo de los valores experimentales, referirse a la sección de descripción de los circuitos integrados.

Los valores de calibración de energía y potencia tienen un valor por defecto de cero. El error hallado es el valor de calibración, el cual es el factor multiplicador de los registros leídos de los circuitos.

## 6. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para verificar el funcionamiento del medidor implementado con los dos circuitos integrados de propósito específico se realizan mediciones de potencia en vez de energía para acortar el tiempo de las pruebas además de reducir costos en el préstamo de los equipos utilizados. Al finalizar las pruebas de potencia, se realizan algunas pruebas básicas de energía para verificar el correcto funcionamiento del medidor.

Los equipos utilizados para realizar las pruebas pertenecen a la empresa *COPOWER* y constan de inyectores de tensión y de corriente trifásicos capaz de generar formas de onda totalmente sinusoidales con frecuencia programable hasta 420 Hz, ángulo de fase variable y generar hasta el séptimo armónico con una resolución de  $\pm 0,003$  Hz.

El inyector de tensión puede generar una tensión de hasta 300V por fase y el de corriente genera una intensidad máxima de 50 A. La precisión de los inyectores es  $\pm 0,5\%$  y presentan una distorsión máxima de 1%.

El diseño de las pruebas realizadas corresponde con las pruebas establecidas en las normas NTC 4052 y NTC 4856 de ICONTEC. Los ensayos establecidos por estas normas corresponden con las especificaciones de las pruebas tipo las cuales se clasifican en pruebas mecánicas, magnéticas y eléctricas. El estudio del presente proyecto se enfoca específicamente en las especificaciones eléctricas del medidor debido a que no se pretende realizar un prototipo de medidor electrónico de energía sino revisar el funcionamiento y los resultados arrojados por los circuitos de propósito específico en estudio.

Los errores estimados se calculan comparando los valores obtenidos con los calculados teóricamente mediante las ecuaciones dadas por el estándar IEEE1459.

Las pruebas a realizar son las siguientes:

### 6.1 PRUEBAS CARGAS LINEALES, SISTEMAS EQUILIBRADOS.

Estas pruebas se realizan con el fin de estudiar la influencia de la variación del factor de potencia al igual que la variación en la intensidad de corriente en las mediciones de potencia cuando no hay presencia de componentes armónicas y el sistema esta balanceado.

En la tabla 6 se resume esta prueba junto con los errores permitidos para cada una de ellas.

**Tabla 6. Errores permitidos para prueba de variación de corriente según norma NTC 4052.**

Corriente	Cosφ	Senφ	Limites de error en porcentaje para medidores	
			Activa clase 1	Reactiva clase 2
0.05 <i>I<sub>n</sub></i>	1,0		± 1,5	
		1,0		± 3,0
<i>I<sub>n</sub></i>	0,5 ind		± 1,5	
		0,5 ind		± 3,0
<i>I<sub>n</sub></i>	0,8 cap		± 1,5	
		0,8 cap		±3,0
<i>I<sub>n</sub></i>	1,0		± 1,25	
		1,0		± 2,5
<i>I<sub>max</sub></i>	1,0		± 1,25	
		1,0		± 2,5

Todas las pruebas que sugiere la tabla se realizan a tensión y frecuencia nominales.

$I_n$  = corriente nominal

$I_{max}$  = corriente máxima

Los resultados obtenidos en estas condiciones son los siguientes

**PRUEBA 1. Tensión=120 V, FP=1, variando corriente.**

**Tabla 7. Resultados prueba 1. Corriente=100 mA**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	12	0	12	12,1	0	12,0	12,2	0
Fase_B	12	0	12	11,9	0	12,1	12,2	0
Fase_C	12	0	12	11,9	0	12,1	12,1	0

**Tabla 8. Errores prueba 1, corriente=100 mA**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	-0,83	0	0	-1,6	0
Fase_B	0,83	0	-0,83	-1,6	0
Fase_C	0,83	0	-0,83	-0,83	0

**Tabla 9. Resultados prueba 1. Corriente=2,5 A.**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	300	0	300	299,7	0	300,2	300,6	0
Fase_B	300	0	300	299,1	0	300,3	300,5	0
Fase_C	300	0	300	299,3	0	299,8	300,1	0

**Tabla 10. Errores prueba 1. Corriente=2,5 A.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0,1	0	-0,06	-0,20	0
Fase_B	0,3	0	-0,1	-0,16	0
Fase_C	0,23	0	0,06	-0,03	0

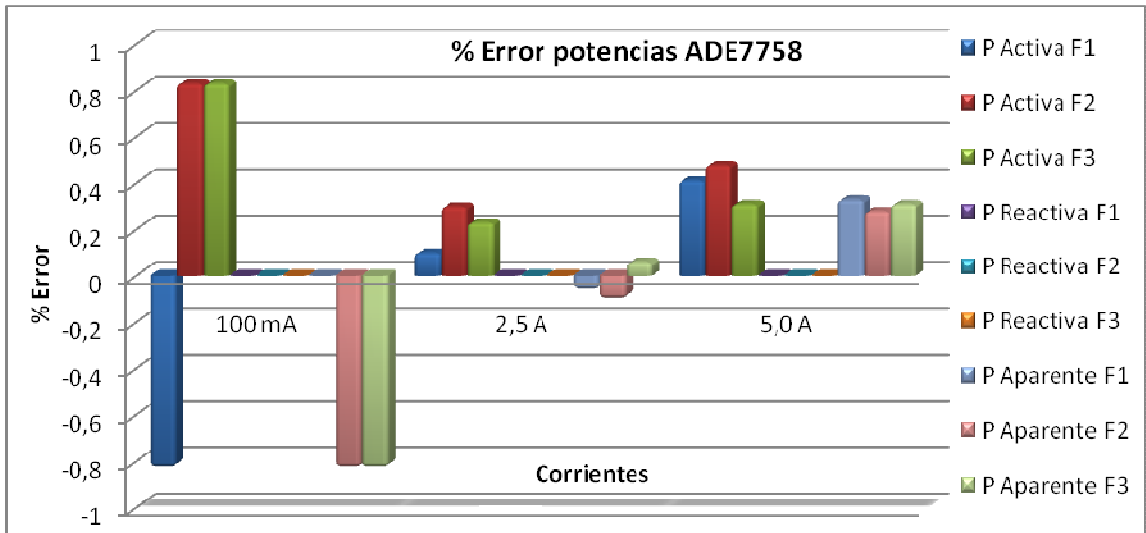
**Tabla 11. Resultados prueba 1. Corriente=5 A.**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	600	0	600	597,5	0	598,0	602,2	0
Fase_B	600	0	600	597,1	0	598,3	602,0	0
Fase_C	600	0	600	598,1	0	598,1	601,9	0

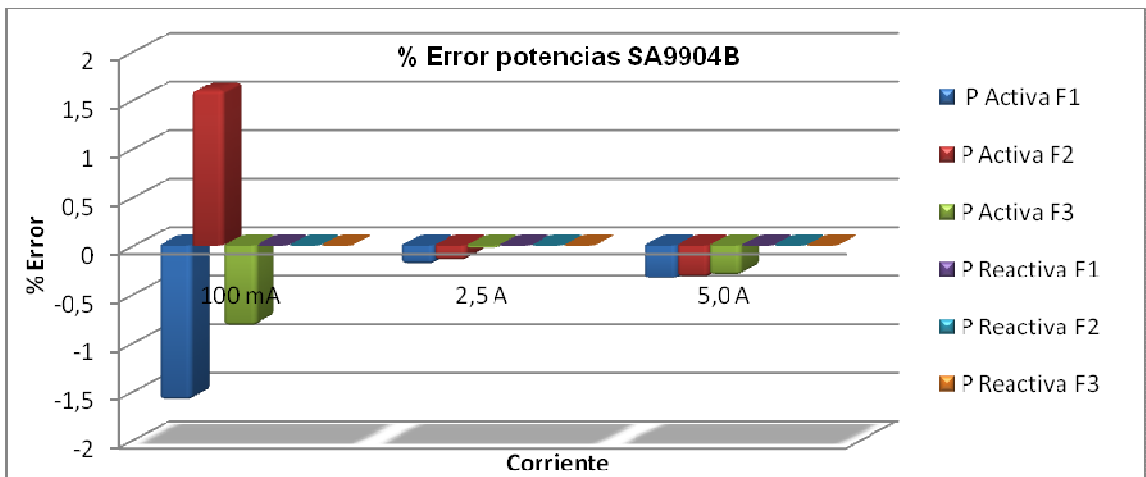
**Tabla 12. Errores prueba 1. Corriente=5 A.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0,41	0	0,33	-0,36	0
Fase_B	0,48	0	0,28	-0,33	0
Fase_C	0,31	0	0,31	-0,31	0

**Figura 37. Errores de potencias ADE7758 para prueba1, variando niveles de corriente.**



**Figura 38. Errores de potencias SA9904B para prueba 1, variando niveles de corriente**



**PRUEBA 2. Tensión=120 V, FP=0,5 Inductivo, variando corriente.**

**Tabla 13. Resultados prueba 2. Corriente=100 mA**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	6	10,39	12	6,1	10,5	12,5	6,1	10,6
Fase_B	6	10,39	12	6,1	10,6	12,5	6,2	10,5
Fase_C	6	10,39	12	6,2	10,7	12,4	6,1	10,5

**Tabla 14. Errores prueba 2. Corriente=100 mA.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	-1,66	-1,05	-4,16	-1,66	-2,02
Fase_B	-1,66	-2,02	-4,16	-3,33	-1,05
Fase_C	-3,33	-2,98	-3,33	-1,66	-1,05

**Tabla 15. Resultados prueba 2. Corriente=2,5 A.**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	150	259,8	300	150,2	260,4	302,0	150,5	261,1
Fase_B	150	259,8	300	150,3	261,1	302,4	150,6	261,2
Fase_C	150	259,8	300	150,1	260,3	301,7	151,0	262,0

**Tabla 16. Errores prueba 2. Corriente= 2,5 A.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	-0,13	-0,23	-0,66	-0,33	-0,5
Fase_B	-0,20	-0,5	-0,80	-0,4	-0,53
Fase_C	-0,06	-0,19	-0,56	-0,66	-0,84

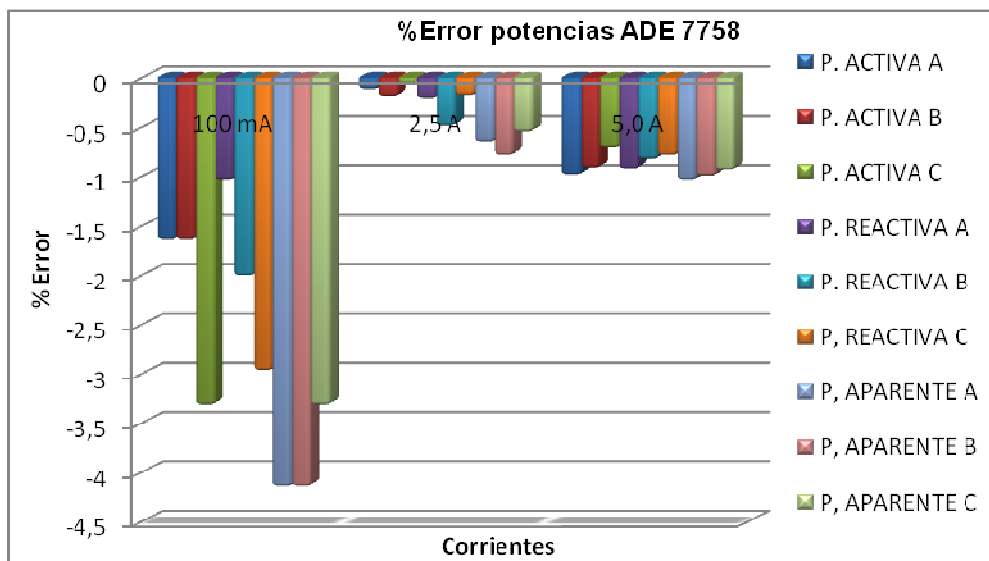
**Tabla 17. Resultados prueba 2. Corriente=5 A**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	300	519,6	600	303,0	524,5	606,3	304,0	525,1
Fase_B	300	519,6	600	302,8	524,0	606,1	303,7	524,9
Fase_C	300	519,6	600	302,2	523,8	605,7	303,1	525,6

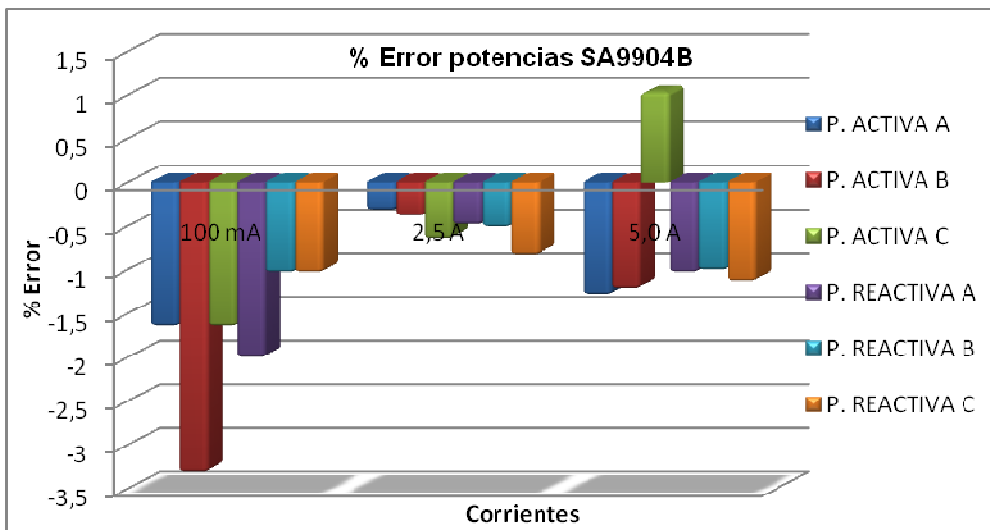
**Tabla 18. Errores prueba 2. Corriente=5 A.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	-1,00	-0,94	-1,05	-1,30	-1,05
Fase_B	-0,93	-0,84	-1,01	-1,23	-1,02
Fase_C	-0,73	-0,80	-0,95	1,03	-1,15

**Figura 39. Errores de potencias ADE7758 para prueba 2, variando corriente**



**Figura 40. Errores de potencias SA9904B para prueba 2, variando corriente.**



**PRUEBA 3. Tensión=120 V, FP=0,8 Capacitivo, variando corriente.**

**Tabla 19. Resultados prueba 3. Corriente=100mA**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	9,60	-7,20	12	9,7	-7,3	12,3	9,8	-7,4
Fase_B	9,60	-7,20	12	9,7	-7,3	12,2	9,7	-7,1
Fase_C	9,60	-7,20	12	9,7	-7,1	12,2	9,8	-7,3

**Tabla 20. Errores prueba 3. Corriente=100 mA**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	-1,04	-1,38	-2,5	-2,08	-2,77
Fase_B	-1,04	-1,38	-1,66	-1,04	1,38
Fase_C	-1,04	1,38	-1,66	-2,08	-1,38

**Tabla21. Resultados prueba 3 . Corriente=2,5 A**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	240	-180	300	241,8	-181,4	301,6	242,0	-181,6
Fase_B	240	-180	300	241,1	-181,5	301,5	241,8	-181,8
Fase_C	240	-180	300	241,5	-182,0	301,1	241,9	-182,1

**Tabla 22. Errores prueba 3. Corriente=2,5 A.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	-0,75	-0,77	-0,53	-0,83	-0,88
Fase_B	-0,45	-0,83	-0,50	-0,75	-1,00
Fase_C	-0,62	-1,11	-0,36	-0,79	-1,16

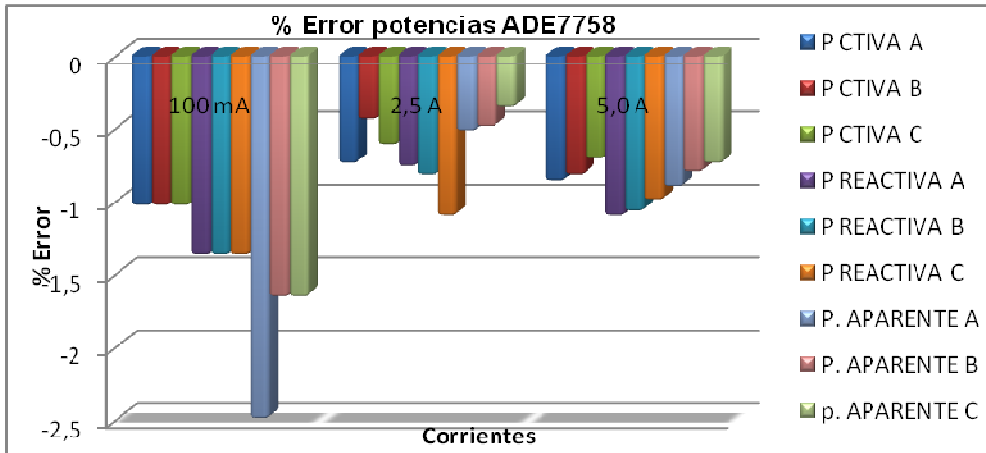
**Tabla 23. Resultados prueba 3. Corriente=5 A**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	480	-360	600	484,2	-364,0	605,5	485,1	-365,2
Fase_B	480	-360	600	484,0	-363,9	604,9	484,8	-364,8
Fase_C	480	-360	600	483,5	-363,6	604,5	485,2	-364,2

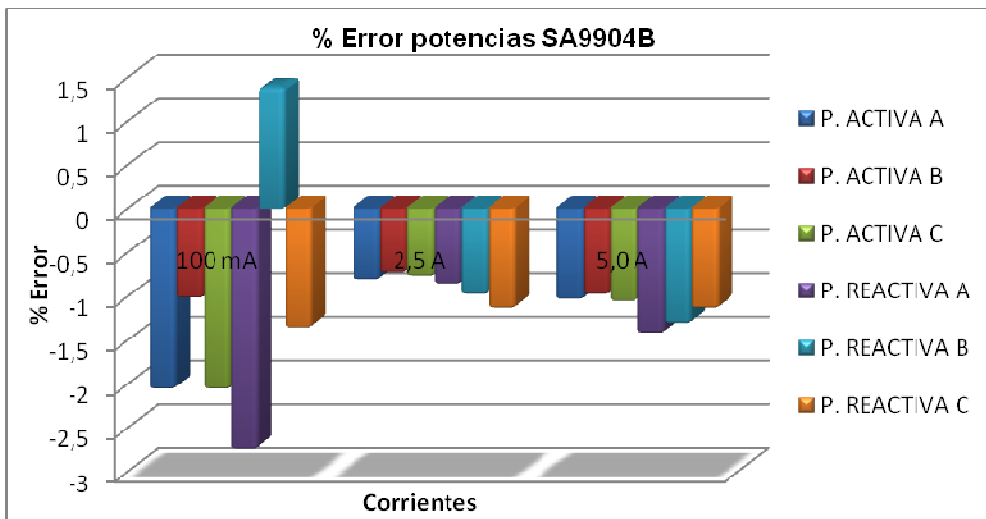
**Tabla 24. Errores prueba 3. Corriente= 5 A.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	-0,87	-1,11	-0,91	-1,06	-1,44
Fase_B	-0,83	-1,08	-0,81	-1,00	-1,33
Fase_C	-0,72	-1,00	-0,75	-1,08	-1,16

**Figura 41. Errores de potencia ADE7758 para prueba 3, variando nivel de corriente.**



**Figura 42. Errores de potencia SA9904B para prueba 3, variando nivel de corriente.**



## 6.2 PRUEBAS CARGAS LINEALES Y SISTEMAS NO EQUILIBRADOS.

Esta prueba consiste en verificar el comportamiento de los circuitos cuando las corrientes que circulan por las fases no es la misma. Los errores permitidos para potencia activa y reactiva se muestran en la tabla:

**Tabla 25. Errores permitidos para cargas no balanceadas según norma NTC 4052**

Corriente	Tipo de carga (Fases)	Cos $\phi$	Sen $\phi$	Limites de error en porcentaje para medidores	
				Activa clase 1	Reactiva clase 2
<i>In</i>	Monofásica ®	1,0		± 2,25	
			1,0		± 3,5
<i>In</i>	Monofásica (S)	1,0		± 2,25	
			1,0		± 3,5
<i>In</i>	Monofásica (T)	1,0		± 2,25	
			1,0		± 3,5

**PRUEBA 4. Tensión=120 V, Corriente=2,5 A solo en la fase A, y variando factor de potencia.**

**Tabla 26. Resultados prueba 4. FP=1.**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VAR)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
<b>Fase_A</b>	300	0	244,9	298,8	0	298,2	298,8	0
<b>Total</b>	300	0	734,8	298,8	0	298,2	298,8	0

**Tabla 27. Errores prueba 4. FP=1**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0,40	0	-21,74	0,40	0
Total	0,40	0	59,40	0,40	0

**Tabla 28. Resultados prueba 4. FP=0,5 inductivo**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VAR)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	150	259,8	244,9	149,1	261,0	296,4	148,9	258,6
Total	150	259,8	734,8	149,1	261,0	296,4	148,9	258,6

**Tabla 29. Errores prueba 4. FP=0,5 inductivo.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0,6	-0,46	-21,0	0,73	0,46
Total	0,6	-0,46	59,66	0,73	0,46

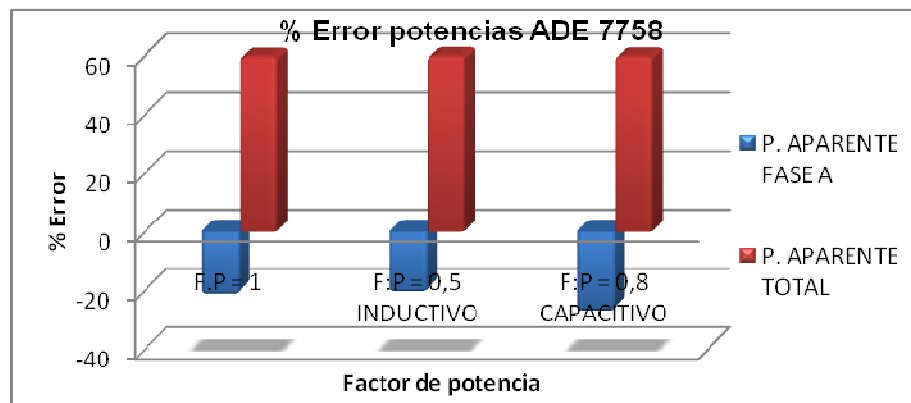
**Tabla 30. Resultados prueba 4. FP=0,8 capacitivo.**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VAR)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	240	-180	244,9	241,3	-179,3	297,3	241,6	-179,1
Total	240	-180	734,8	241,3	-179,3	297,3	241,6	-179,1

**Tabla 31. Errores prueba 4. FP=0,8 capacitivo.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	-0,54	0,38	-21,37	-0,66	0,5
Total	-0,54	0,38	59,54	-0,66	0,5

**Figura 43. % Error potencia aparente, variando factor de potencia e inyectando corriente solo en la fase A.**



### 6.3 PRUEBAS CARGAS NO LINEALES Y SISTEMAS EQUILIBRADOS

La finalidad de estas pruebas es determinar el error introducido por componentes armónicas en los canales de tensión y corriente en sistemas balanceados y equilibrados.

#### 6.3.1 Solo armónicos en corriente.

**PRUEBA 5. Tensión=120 V con frecuencia fundamental 60 Hz, corriente=2,5<sup>a</sup> variando orden del armónico.**

**Tabla 32. Resultados prueba 5. Orden del armónico=2**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	0	0	300	0	0	299,0	0	0
Fase_B	0	0	300	0	0	295,5	0	0
Fase_C	0	0	300	0	0	296,9	0	0
Total	0	0	900	0	0	891,4	0	0

**Tabla 33. Errores prueba 5. Orden del armónico=2**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0	0	0,33	0	0
Fase_B	0	0	1,5	0	0
Fase_C	0	0	1,03	0	0
Total	0	0	0,96	0	0

**Tabla 34. Resultados prueba 5. Orden del armónico=3**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	0	0	300	0	0	298,5	0	0
Fase_B	0	0	300	0	0	294,6	0	0
Fase_C	0	0	300	0	0	296,6	0	0
Total	0	0	900	0		889,7	0	0

**Tabla 35. Errores prueba 5. Orden del armónico=3**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0	0	0,50	0	0
Fase_B	0	0	1,80	0	0
Fase_C	0	0	1,13	0	0
Total	0	0	1,15	0	0

**Tabla 36. Resultados prueba 5. Orden del armónico=5**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	0	0	300	0	0	297,7	0	0
Fase_B	0	0	300	0	0	294,0	0	0
Fase_C	0	0	300	0	0	295,4	0	0
Total	0	0	900	0	0	887,1	0	0

**Tabla 37. Errores prueba 5. Orden del armónico=5**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0	0	0,76	0	0
Fase_B	0	0	2,00	0	0
Fase_C	0	0	1,53	0	0
Total	0	0	1,43	0	0

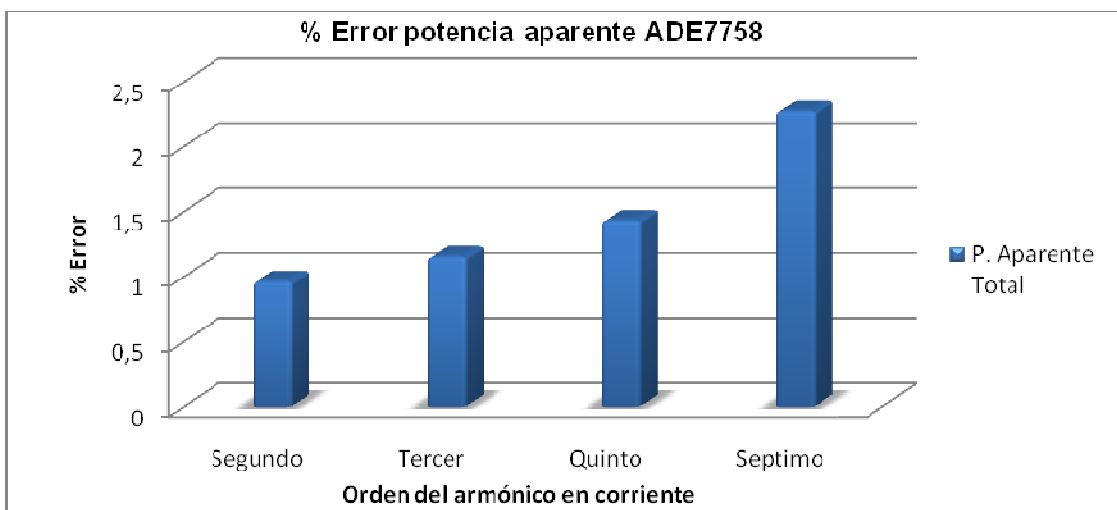
**Tabla 38. Resultados prueba 5. Orden del armónico=7**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia Reactiva teórica (VAR)	Potencia aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	0	0	300	0	0	295,5	0	0
Fase_B	0	0	300	0	0	291,3	0	0
Fase_C	0	0	300	0	0	292,8	0	0
Total	0	0	900	0	0	879,6	0	0

**Tabla 39. Errores prueba 5. Orden del armónico=7.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0	0	1,50	0	0
Fase_B	0	0	2,90	0	0
Fase_C	0	0	2,40	0	0
Total	0	0	2,27	0	0

**Figura 44. % de error de la potencia aparente total, tensión fundamental y variando el orden de los armónicos en corriente**



**Fuente [Autores]**

### 6.3.2 Armónicos en corriente y tensión

**PRUEBA 6. Tensión=120 V, corriente=2,5 A, segundo armónico en tensión y corriente, variando el factor de potencia.**

**Tabla 40. Resultados prueba 6. FP=1**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	300	0	300	297,9	0	280,1	298,0	0
Fase_B	300	0	300	298,3	0	275,9	297,9	0
Fase_C	300	0	300	298,0	0	276,3	297,3	0
Total	900	0	900	894,2	0	832,3	893,2	0

**Tabla 41. Errores prueba 6. FP=1**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0,70	0	6,63	0,66	0
Fase_B	0,56	0	8,03	0,70	0
Fase_C	0,66	0	7,90	0,90	0
Total	0,65	0	7,53	0,76	0

**Tabla 42. Resultados prueba 6. FP=0,5 inductivo.**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	150	259,8	300	148,8	256,5	278,3	148,1	256,1
Fase_B	150	259,8	300	148,5	257,2	273,1	148,5	256,4
Fase_C	150	259,8	300	148,7	257,1	274,2	148,3	255,9
Total	450	779,4	900	446	770,8	825,6	444,9	768,4

**Tabla 43. Errores prueba 6. FP=0,5 inductivo.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0,80	1,27	7,23	1,26	1,42
Fase_B	1,00	1,00	8,96	1,00	1,30
Fase_C	0,86	1,03	8,60	1,13	1,50
Total	0,88	1,10	8,27	1,13	1,41

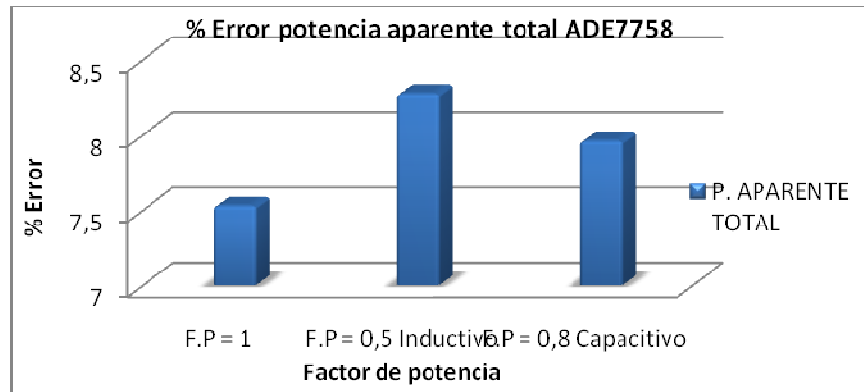
**Tabla 44. Resultados prueba 6. FP=0,8 capacitivo.**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	240	-180	300	238,0	-178,1	279,1	237,4	-178,0
Fase_B	240	-180	300	238,0	-178,3	274,0	237,5	-178,1
Fase_C	240	-180	300	238,3	-178,0	275,3	238,0	-177,7
Total	720	-540	900	714,3	-534,4	828,4	712,9	-533,8

**Tabla 45. Errores prueba 6. FP=0,8 capacitivo.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0,83	1,05	6,96	1,08	1,11
Fase_B	0,83	0,94	8,66	1,04	1,05
Fase_C	0,70	1,11	8,23	0,83	1,27
Total	0,79	1,04	7,96	0,99	1,15

**Figura 45. % Error de la potencia aparente total variando el factor de potencia con el segundo armónico en tensión y corriente**



**Fuente [Autores]**

**PRUEBA 7. Tensión=120 V, corriente=2,5 A, Tercer armónico en tensión y corriente, variando el factor de potencia.**

**Tabla 46. Resultados prueba 7. FP=1**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	300	0	300	297,6	0	252,1	297,1	0
Fase_B	300	0	300	298,1	0	248,5	297,8	0
Fase_C	300	0	300	297,8	0	249,3	297,0	0
Total	900	0	900	893,5	0	749,9	891,9	0

**Tabla 47. Errores prueba 7. FP=1.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	0,80	0	15,96	0,96	0
Fase_B	0,63	0	17,16	0,73	0
Fase_C	0,73	0	16,90	1,00	0
<b>Total</b>	<b>0,72</b>	<b>0</b>	<b>16,68</b>	<b>0,90</b>	<b>0</b>

**Tabla 48. Resultados prueba 7. FP=0,5 inductivo.**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	150	259,8	300	148,3	256,2	251,0	147,9	255,8
Fase_B	150	259,8	300	148,4	257,0	247,3	148,3	256,3
Fase_C	150	259,8	300	148,5	256,8	248,1	148,1	255,6
<b>Total</b>	<b>450</b>	<b>779,4</b>	<b>900</b>	<b>445,2</b>	<b>770</b>	<b>746,4</b>	<b>444,3</b>	<b>767,7</b>

**Tabla 49. Errores prueba 7. FP=0,5 inductivo.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	1,13	1,38	16,33	1,40	1,53
Fase_B	1,06	1,07	17,56	1,13	1,34
Fase_C	1,00	1,15	17,30	1,26	1,61
<b>Total</b>	<b>1,07</b>	<b>1,21</b>	<b>17,07</b>	<b>1,27</b>	<b>1,50</b>

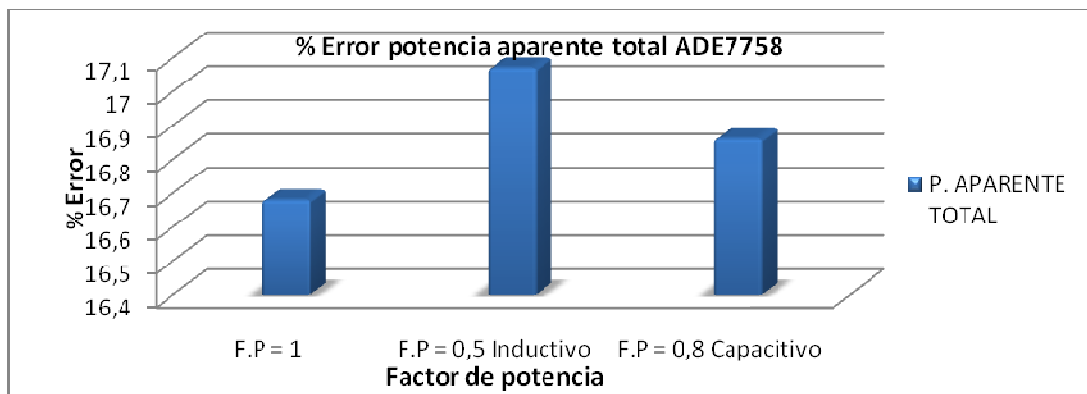
**Tabla 50. Resultados prueba 7. FP=0,8 capacitivo.**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
Fase_A	240	180	300	237,6	178,0	251,6	237,1	177,9
Fase_B	240	180	300	237,7	178,1	248,0	237,4	177,8
Fase_C	240	180	300	238,0	177,7	248,7	237,8	177,4
Total	720	540	900	713,3	533,8	748,3	712,3	533,1

**Tabla 51. Errores prueba 7. FP=0,8 capacitivo.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
Fase_A	1,00	1,11	16,13	1,20	1,16
Fase_B	0,95	1,05	17,33	1,08	1,22
Fase_C	0,83	1,27	17,10	0,91	1,44
Total	0,93	1,15	16,86	1,07	1,28

**Figura 46. % error en potencia aparente total, con el tercer armónico en tensión y corriente, variando el factor de potencia**



**Fuente [Autores]**

#### 6.4 CARGA NO LINEAL Y SISTEMA NO EQUILIBRADO

Esta última parte describe un escenario donde existen componentes armónicas impares y al mismo tiempo cargas no equilibradas. Se pretende demostrar que bajo estas condiciones el error en la medición es mayor en comparación con las pruebas realizadas anteriormente.

Esta prueba solo se realiza para un factor de potencia de 1, e inyectando corriente solo en la fase A.

**PRUEBA 8. Tensión=120 V, corriente=2,5 A solo en la fase A, Tercer armónico en tensión y corriente, FP=1,**

**Tabla 52. Resultados prueba 8**

	Potencia Activa teórica (W)	Potencia reactiva teórica (VAR)	Potencia Aparente teórica (VA)	Potencia Activa ADE (W)	Potencia Reactiva ADE (VAR)	Potencia Aparente ADE (VA)	Potencia Activa SAMES (W)	Potencia Reactiva SAMES (VAR)
<b>Fase_A</b>	300	0	244,9	294,5	0	252,1	295,1	0
<b>Total</b>	300	0	734,8	294,5	0	252,1	295,1	0

**Tabla 53. Error prueba 8.**

	%Error Potencia Activa ADE	%Error Potencia Reactiva ADE	%Error Potencia Aparente ADE	%Error Potencia Activa SAMES	%Error Potencia Reactiva SAMES
<b>Fase_A</b>	1,83	0	-2,92	1,63	0
<b>Total</b>	1,83	0	65,69	1,63	0

## 6.5 PRUEBAS DE MEDICIÓN DE ENERGÍA

Se realizaron pruebas cortas de 1 hora de duración variando corriente y variando factor de potencia con el fin de comprobar la exactitud en la medida de los circuitos integrados en estudio. Para estas mediciones se supone un sistema balanceado y sin armónicos.

**PRUEBA 9. Tensión=120 V, FP=1, tiempo=1 hora, variando corriente.**

**Tabla 54. Resultados prueba 9. Corriente=100mA**

	Energía Activa teórica (kWh)	Energía reactiva teórica (kVARh)	Energía Aparente teórica (kVAh)	Energía Activa ADE (kWh)	Energía Reactiva ADE (kVARh)	Energía Aparente ADE (kVAh)	Energía Activa SAMES (kWh)	Energía Reactiva SAMES (kVARh)
Fase_A	0,0120	0	0,0120	0,0122	0	0,0124	0,0120	0
Fase_B	0,0120	0	0,0120	0,0120	0	0,0122	0,0122	0
Fase_C	0,0120	0	0,0120	0,0122	0	0,0124	0,0122	0

**Tabla 55. Errores prueba 9. Corriente=100 mA**

	%Error Energía Activa ADE	%Error Energía Reactiva ADE	%Error Energía Aparente ADE	%Error Energía Activa SAMES	%Error Energía Reactiva SAMES
Fase_A	-1,66	0	-3,33	0	0
Fase_B	0	0	-1,66	-1,66	0
Fase_C	-1,66	0	-3,33	-1,66	0

**Tabla 56. Resultados prueba 9. Corriente= 2,5 A**

	Energía Activa teórica (kWh)	Energía reactiva teórica (kVARh)	Energía Aparente teórica (kVAh)	Energía Activa ADE (kWh)	Energía Reactiva ADE (kVARh)	Energía Aparente ADE (kVAh)	Energía Activa SAMES (kWh)	Energía Reactiva SAMES (kVARh)
Fase_A	0,3000	0	0,3000	0,3020	0	0,3018	0,3022	0
Fase_B	0,3000	0	0,3000	0,3018	0	0,3022	0,3026	0
Fase_C	0,3000	0	0,3000	0,3018	0	0,3016	0,3024	0

**Tabla 57. Errores prueba 9. Corriente=2,5 A**

	%Error Energía Activa ADE	%Error Energía Reactiva ADE	%Error Energía Aparente ADE	%Error Energía Activa SAMES	%Error Energía Reactiva SAMES
Fase_A	-0,66	0	-0,60	-0,73	0
Fase_B	-0,60	0	-0,73	-0,86	0
Fase_C	-0,60	0	-0,53	-0,80	0

**Tabla 58. Resultados prueba 9. Corriente= 5 A**

	Energía Activa teórica (kWh)	Energía reactiva teórica (kVARh)	Energía Aparente teórica (kVAh)	Energía Activa ADE (kWh)	Energía Reactiva ADE (kVARh)	Energía Aparente ADE (kVAh)	Energía Activa SAMES (kWh)	Energía Reactiva SAMES (kVARh)
Fase_A	0,6000	0	0,6000	0,6050	0	0,6048	0,6050	0
Fase_B	0,6000	0	0,6000	0,6046	0	0,6046	0,6052	0
Fase_C	0,6000	0	0,6000	0,6048	0	0,6050	0,6054	0

**Tabla 59. Errores prueba 9. Corriente=5 A**

	%Error Energía Activa ADE	%Error Energía Reactiva ADE	%Error Energía Aparente ADE	%Error Energía Activa SAMES	%Error Energía Reactiva SAMES
Fase_A	-0,83	0	-0,80	-0,83	0
Fase_B	-0,76	0	-0,76	-0,86	0
Fase_C	-0,80	0	-0,83	-0,90	0

**PRUEBA 10. Tensión=120 V, FP=0,5 inductivo tiempo=1 hora, variando corriente.**

**Tabla 60. Resultados prueba 10. Corriente=100mA**

	Energía Activa teórica (kWh)	Energía reactiva teórica (kVARh)	Energía Aparente teórica (kVAh)	Energía Activa ADE (kWh)	Energía Reactiva ADE (kVARh)	Energía Aparente ADE (kVAh)	Energía Activa SAMES (kWh)	Energía Reactiva SAMES (kVARh)
Fase_A	0,0060	0,01039	0,0120	0,0062	0,0106	0,0126	0,0062	0,0106
Fase_B	0,0060	0,01039	0,0120	0,0060	0,0104	0,0124	0,0064	0,0108
Fase_C	0,0060	0,01039	0,0120	0,0062	0,0106	0,0126	0,0064	0,0108

**Tabla 61. Errores prueba 10. Corriente=100 mA**

	%Error Energía Activa ADE	%Error Energía Reactiva ADE	%Error Energía Aparente ADE	%Error Energía Activa SAMES	%Error Energía Reactiva SAMES
Fase_A	-3,33	-2,02	-5,00	-3,33	-2,02
Fase_B	0	-0,09	-3,33	-6,60	-3,94
Fase_C	-3,33	-2,02	-5,00	-6,60	3,94

**Tabla 62. Resultados prueba 10. Corriente= 2,5 A**

	Energía Activa teórica (kWh)	Energía reactiva teórica (kVARh)	Energía Aparente teórica (kVAh)	Energía Activa ADE (kWh)	Energía Reactiva ADE (kVARh)	Energía Aparente ADE (kVAh)	Energía Activa SAMES (kWh)	Energía Reactiva SAMES (kVARh)
Fase_A	0,1500	0,2598	0,3000	0,1512	0,2618	0,3020	0,1512	0,2618
Fase_B	0,1500	0,2598	0,3000	0,1510	0,2616	0,3020	0,1514	0,2620
Fase_C	0,1500	0,2598	0,3000	0,1512	0,2618	0,3018	0,1514	0,2620

**Tabla 63. Errores prueba 10. Corriente=2,5 A**

	%Error Energía Activa ADE	%Error Energía Reactiva ADE	%Error Energía Aparente ADE	%Error Energía Activa SAMES	%Error Energía Reactiva SAMES
Fase_A	-0,80	-0,76	-0,66	-0,80	-0,76
Fase_B	-0,66	-0,69	-0,66	-0,93	-0,84
Fase_C	-0,80	-0,76	-0,60	-0,93	-0,84

**Tabla 64. Resultados prueba 10. Corriente= 5 A**

	Energía Activa teórica (kWh)	Energía reactiva teórica (kVARh)	Energía Aparente teórica (kVAh)	Energía Activa ADE (kWh)	Energía Reactiva ADE (kVARh)	Energía Aparente ADE (kVAh)	Energía Activa SAMES (kWh)	Energía Reactiva SAMES (kVARh)
Fase_A	0,3000	0,5196	0,6000	0,3030	0,5256	0,6052	0,3030	0,5254
Fase_B	0,3000	0,5196	0,6000	0,3028	0,5254	0,6050	0,3030	0,5260
Fase_C	0,3000	0,5196	0,6000	0,3026	0,5254	0,6054	0,3032	0,5258

**Tabla 65. Errores prueba 10. Corriente=5 A**

	%Error Energía Activa ADE	%Error Energía Reactiva ADE	%Error Energía Aparente ADE	%Error Energía Activa SAMES	%Error Energía Reactiva SAMES
Fase_A	-1,00	-1,15	-0,86	-1,00	-1,11
Fase_B	-0,93	-1,11	-0,83	-1,00	-1,23
Fase_C	-0,86	-1,11	-0,90	-1,06	-1,19

## 7. CONCLUSIONES

- Para la implementación de un medidor electrónico de energía eléctrica en sistemas trifásicos, se recomienda el uso del circuito integrado ADE7758 (ANALOG DEVICES) sobre el SA9904B (SAMES). Se observa claramente que los errores en el ADE7758 son menores para la mayoría de los escenarios, además cuenta con la ventaja que tiene registros de potencia aparente, lo cual permite ver el comportamiento del circuito para cargas no lineales y sistemas no balanceados.
- No es posible analizar los resultados del circuito SA9904B para sistemas con cargas no lineales y sistemas no balanceados. Lo anterior se debe a que estos casos mencionados solo afectan gravemente la medición de potencia aparente y al no contar este circuito con registros de potencia aparente resulta imposible emitir un concepto acerca de su exactitud en la medida de dicha variable.
- Otra ventaja del ADE7758 sobre el SA9904B radica en la existencia de registros configurables en el mismo, lo que permite entre otras opciones remover problemas de offset y desfase entre los canales de corriente y tensión. A su vez el ADE7758 tiene un registro de interrupción el cual indica si existe sobretensión, sobrecorriente, caída de tensión, error de secuencia de fase entre otros. El ADE7758 cuenta además con 2 pines para conectar *leds*, los cuales indican el consumo de energía activa y reactiva sin la necesidad de usar pines del microcontrolador para este propósito.

- Una de las desventajas principales en el *ADE7758* es el error en la medición de tensión y por ende en potencia aparente, cuando existen armónicos en el canal de tensión. Lo anterior se debe a que la señal de tensión pasa por un filtro paso bajas de frecuencia de corte de 160Hz y atenúa la señal antes de calcular la potencia aparente.
- De acuerdo con los errores hallados se puede decir que es mejor sensar tensión que corriente en los pines de entrada de los circuitos. Cabe destacar que el *SAMES* sensa corriente de niveles aproximados de 16uArms mientras que el *ADE7758* sensa tensiones diferenciales de 1V, lo que permite que las señales de tensión que entran en el *ADE7758* tengan una mejor relación de señal-ruido.
- Los registros de energía y tensión del *ADE7758* cuentan con una mayor cantidad de bits, por lo que la resolución de estas medidas es mejor. Lo anterior quiere decir que cuando exista un cambio mínimo e igual en los registros del *ADE7758* y *SA9904B*, la salida que tiene menor variación es la del *ADE7758*.
- Como era de esperarse el comportamiento del *ADE7758* es cuestionable para sistemas con armónicos. El error obtenido cuando solo existen armónicos en corriente es aceptable y está dentro de los rangos permitidos por las normas mencionadas en este proyecto. El problema principal es cuando se introducen armónicos en tensión, afectando fundamentalmente

la medición de potencia aparente introduciendo errores por fase hasta de 17%.

- Los resultados obtenidos para cargas no balanceadas tampoco son muy buenos en cuanto a potencia aparente se refiere. Las pruebas realizadas se ajustan al peor escenario de desbalance que puede existir en un sistema trifásico, donde solo funciona la carga de una fase. La potencia activa y reactiva no se ven afectadas directamente por el hecho que dos fases no se encuentren funcionando. Los valores experimentales se comparan con los teóricos usando para estos últimos las ecuaciones de la IEEE1459.
- Los sensores de corriente utilizados no son recomendables para este tipo de aplicación. El ruido introducido inicialmente alcanza valores que son proporcionales a 40mA. Lo anterior quiere decir que sin corriente alguna el medidor marca corriente y en caso de que existiera tensión marcaría potencia. La mayor parte del problema mencionado se logró corregir introduciendo otro valor de capacitancia entre los pines FILTER y GND del sensor pero con la desventaja de reducir el ancho de banda del sensor. El nivel de ruido que introduce el sensor afecta principalmente la medición cuando se aplica un nivel de corriente bajo, es por eso que las pruebas realizadas indican mayor error cuando la corriente es 100mA.
- El orden de los armónicos afecta la medición de potencia aparente de una forma proporcional. A medida que el orden del armónico aumenta el error en la medición se hace más apreciable. De igual manera se comprobó con los resultados obtenidos que los armónicos impares son más influyentes que los pares.

- En condiciones normales de operación (Cargas lineales y sistemas balanceados), los circuitos cumplen con los errores establecidos en la norma NTC 4052 y NTC 4856 obteniendo errores mayores cuando el factor de potencia disminuye y cuando la corriente disminuye como se explicó anteriormente.
- No fue posible utilizar una misma constante en los medidores. El ADE7758 tiene una constante de 25000 impulsos/Kwh y el SA9904B de 2000 impulsos/Kwh. Lo anterior sucede porque los *leds* que indican consumo de energía en el SA9904B se conectan de manera directa al microcontrolador, por lo tanto la constante de SA9904B depende del tiempo entre lecturas sucesivas; Para este caso el tiempo entre lecturas es de 1 segundo. Por otro lado el ADE7758 cuenta con un registro configurable que define la constante; por el rango de tensión y corriente que se trabaja en este proyecto el valor escogido no debe ser menor a 25000 impulsos/kWh.

## 8. SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES

- Uno de los dispositivos más importantes en la medición de energía eléctrica es el sensor de corriente. De la escogencia de un buen sensor depende los errores que se puedan presentar en las variables medidas. Inicialmente en este proyecto de grado no se pretendía realizar un prototipo de medidor electrónico trifásico, por lo que la adquisición de las señales no era el principal objetivo. El sensor de corriente ACS712 se ajustaba en un principio a lo requerido por la aplicación en cuanto a costos, tamaño, fácil implementación y rango de operación. Luego de la implementación del sensor en el circuito impreso, el problema de ruido a bajos niveles de corriente se hizo evidente. Fue posible reducir el error pero no de manera total, por lo tanto no se recomienda el uso de este sensor para medición de energía.
- Para obtener mas resolución en la medición de energía y por lo tanto reducir el error, se recomienda activar el modulo PLL del microcontrolador y así trabajar a la máxima frecuencia de bus. En el presente proyecto se configura el microcontrolador para operar a una frecuencia de bus de 1.22MHz, lo que permite tener una resolución máxima de 0,0002 Kwh/Hvarh/Kvah.
- Las pruebas realizadas en la empresa COPOWER corresponden a pruebas de potencia y no de energía. Lo anterior radica en el número de pruebas a realizar lo que deriva en un tiempo de medición considerable que a su vez implica mayor costo en el alquiler de los equipos, el cual es asumido directamente por los autores del proyecto.

- Se recomienda implementar la fuente de alimentación en una tarjeta aparte de la tarjeta de procesamiento de señales. Lo anterior se recomienda para evitar toda clase de ruido que podría introducir la fuente en los circuitos integrados medidores de energía; a demás evitar cambiar toda la tarjeta en caso de que se presente un daño.
- Si se requiere toda la capacidad de la memoria ROM del microcontrolador para realizar el proceso de medición de energía y controlar periféricos, se hace necesario la ayuda de un computador para realizar el proceso de calibración. Para este caso particular se utilizó el microcontrolador para realizar dicho proceso debido a la ausencia de un PC portátil por parte de los autores, por lo tanto el código implementado ocupó mas espacio de lo esperado.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] **ACEVEDO RUEDA** José - **GONZÁLEZ SUA** Gabriel - **MORALES SUÁREZ** Luís; Diseño y construcción de un prototipo de potencióstato galvanostato para el laboratorio de corrosión de la escuela de ingeniería metalúrgica. Tesis de grado Universidad Industrial de Santander. 2003.
- [2] **ANALOG DEVICES.** *Poly phase multifunction energy metering ic with per phase information, data sheet.* <http://analog.com>
- [3] **ARDILA José Gregorio**; Diseño e implementación de la tarjeta de desarrollo del MC68HC908GP32 para el laboratorio de microcontroladores de la escuela de ingeniería electrónica eléctrica y telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Tesis de grado Universidad Industrial de Santander. 2005.
- [4] **FERRADA BAUTISTA** Federico Manuel - **SILVA PEÑALOZA** Mayra del pilar; Medición digital de la potencia activa para un sistema de calentamiento eléctrico monofásico. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander 2005.
- [5] **GAMEZ LAMUS** Edward Yesid - **QUINTERO FRIAS** Oscar; Contadores de estado sólido y digitales: análisis de los algoritmos de medición de energía e índices de calidad de onda que se pueden evaluar. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander 2004.
- [6] **LÁZARO** Antonio Manuel, *labview*, programación grafica para el control de la programación. 1997
- [7] **MOTOROLA**, MC68HC908GP32 *technical data*.

- [8] **NATIONAL INSTRUMENTS**, *labview 7 express, user manual. Labview basics I & II course manual*. National Instruments septiembre 2002.
- [9] **PETIT SUÁREZ** Johann Farit - **USTARIZ FARFÁN** Armando Jaime; Análisis general de armónicos: revisión de las definiciones de potencia. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander 1997.
- [10] **SAMES**; *three phase power / energy IC with SPI interface, data sheet*.  
[http:// www.sames.co.za](http://www.sames.co.za)
- [11] **ANALOG DEVICES**. Nota de aplicación 564.
- [12] **ICONTEC** Normas NTC para medidores de energía activa clase 1 y 2, y reactiva clase 2 y 3.
- [13] **ALLEGRO MICROSYSTEM**. Hall effect current sensor ACS712 data sheet.  
<http://www.allegromicro.com>
- [14] **IEEE Trial – Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, June 2000**. IEEE Standard 1459.
- [15] **NATIONAL SEMICONDUCTOR**. Negative Regulator LM337 data sheet.  
Regulator LM2290 data sheet.
- [16] **LINEAR TECHNOLOGY**. Regulator LT1963 data sheet.
- [17] **DIODES INCORPORATED**. Regulator AP1117 data sheet.
- [18] **FAIRCHILD SEMICONDUCTOR**. Optocoupler HCPL2631 data sheet.