

**2012**

Sistema de medición de consumo eléctrico de voltaje,  
corriente y potencia monitoreado por Bluetooth

Eugenio Salgado Plasencia



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Sistema de medición de consumo eléctrico de voltaje, corriente  
y potencia monitoreado por Bluetooth.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de  
INGENIERO EN AUTOMATIZACIÓN.

Presenta

Eugenio Salgado Plasencia

Dirigida por

Dr. Manuel Toledano Ayala

Santiago de Querétaro,  
Querétaro, Noviembre 2012



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Ingeniería en Automatización

Sistema de medición de consumo eléctrico de voltaje, corriente y potencia  
monitoreado por Bluetooth

## TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

INGENIERO EN AUTOMATIZACIÓN

### Presenta:

Eugenio Salgado Plasencia

### Dirigido por:

Dr. Manuel Toledano Ayala

## SINODALES

Dr. Manuel Toledano Ayala

Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Edgar Rivas Araiza

Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Gonzalo Macías Bobadilla

Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

M.C. José Luis Avendaño Juárez

Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Aurelio Domínguez González

Nombre y Firma

Director de la Facultad

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Noviembre 2012

México

## RESUMEN

El objetivo del proyecto es diseñar y desarrollar un sistema para monitoreo del consumo eléctrico de una red eléctrica monofásica mediante un dispositivo móvil con sistema operativo Android a través de Bluetooth. La medición del consumo eléctrico comienza con el acondicionamiento de las señales de corriente y voltaje de corriente alterna (CA) obtenidas por medio de transductores, este acondicionamiento incluye el rectificado, amplificación y limitación de niveles de salida de dichas señales que son adquiridas por una etapa de control construida con un Microcontrolador. El Microcontrolador adquiere las señales acondicionadas, realiza los cálculos y envía los valores finales por medio de un módulo externo de Bluetooth al dispositivo móvil, también muestra los valores de manera simultánea en una lcd16x2 para observarlos de manera local, estos valores incluyen tanto las magnitudes de corriente y voltaje como las de frecuencia, factor de potencia, potencia activa, potencia aparente, potencia reactiva y consumo eléctrico. Por último una aplicación que funciona con el sistema operativo Android recibe los valores de las mediciones enviados por el Microcontrolador a través de Bluetooth y los muestra en la pantalla de un Smartphone. Se realizaron 3 pruebas para comprobar el funcionamiento del sistema, primero la simulación de las magnitudes con un generador de funciones, segundo la medición de una red eléctrica con carga resistiva y finalmente la medición de una red eléctrica con carga inductiva con el fin de observar el comportamiento del sistema con la inserción de ruido eléctrico. Las mediciones se compararon con varios dispositivos que miden las magnitudes involucradas, los cuales muestran un parámetro para el resultado de las mediciones. Los resultados analizados fueron consistentes con los valores calculados y con los valores mostrados en los dispositivos que se usaron como referencia.

(Palabras clave: monitoreo eléctrico, sistemas embebidos, Android, calidad de la energía, consumo eléctrico)

## DEDICATORIAS

A todas las personas que me ayudaron a llegar hasta aquí.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y hermanos.

A mis amigos y compañeros.

A mis profesores.

Y al sistema.

# ÍNDICE

	Pagina.
RESUMEN .....	i
DEDICATORIAS .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE .....	iv
ÍNDICE DE CUADROS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
I - INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 - Descripción del problema.....	1
1.2 - Antecedentes.....	1
1.3 - Justificación.....	2
1.4 - Objetivos.....	3
1.5 - Hipótesis.....	3
II – REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1 – Medición.....	4
2.2 – Instrumento de medición.....	6
2.3 – Incertidumbre y error.....	8
2.4 – Análisis estadístico.....	9
2.5 – Corriente y voltaje.....	12
2.6 – Frecuencia y factor de potencia.....	14
2.7 – Potencia y consumo eléctrico.....	18
2.8 – Rectificación, Amplificación y Limitación de voltaje.....	20
2.9 – Microcontrolador.....	22
2.10 – Bluetooth.....	25

2.11 – Sistema operativo Android. ....	26
III - METODOLOGÍA .....	29
3.1 - Acondicionamiento de la señal de corriente.....	30
3.2 – Acondicionamiento de la señal de voltaje. ....	36
3.3 – Acondicionamiento y medición de la frecuencia.....	38
3.4 – Acondicionamiento y medición del Factor de Potencia. ....	43
3.5 - Cálculo de potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente.....	46
3.6 - Cálculo del consumo eléctrico. ....	47
3.7 – Elaboración de la interfaz de comunicación con Bluetooth. ....	47
3.8 – Elaboración del programa de control. ....	55
IV - RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	62
4.1 – Construcción de circuitos. ....	62
4.2 - Medición con generador de funciones. ....	65
4.3 – Medición con carga resistiva. ....	69
4.4 – Medición con carga inductiva. ....	75
V - CONCLUSIONES .....	81
VI - BIBLIOGRAFÍA.....	82
VII - APÉNDICE .....	83
7.1 - Lista de comandos AT. ....	83

## ÍNDICE DE CUADROS

	Pagina.
Cuadro 1. - Pines utilizados del modulo de Bluetooth. ....	48
Cuadro 2. - Características generales del PIC18F4553. ....	55
Cuadro 3. - Valores representativos del generador de funciones. ....	65
Cuadro 4. - Corriente y voltaje con generador de funciones. ....	66
Cuadro 5. - Frecuencia y FP con generador de funciones. ....	66
Cuadro 6. - Rango de los valores de corriente y voltaje con carga resistiva. ....	70
Cuadro 7. - Rango de los valores de frecuencia y FP con carga resistiva. ....	70
Cuadro 8. - Coeficiente de correlación con carga resistiva. ....	73
Cuadro 9. - Rango de valores de corriente y voltaje con carga inductiva. ....	76
Cuadro 10. - Rango de valores de frecuencia y FP con carga inductiva. ....	76
Cuadro 11. - Coeficiente de correlación con carga inductiva. ....	79
Cuadro 12. - Comandos AT. ....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 1. - Precisión y exactitud.....	6
Figura 2. - Recta de regresión. ....	11
Figura 3. - Diferentes grados del coeficiente de correlación. ....	12
Figura 4. - Corriente y voltaje directos (CD).....	13
Figura 5. - Diferentes valores de una señal de corriente alterna (CA). ....	14
Figura 6. - Periodo de una señal.....	15
Figura 7. - Ángulos de fase en un ciclo completo. ....	16
Figura 8. - a) señales en atraso. b) señales en adelanto. ....	17
Figura 9. - Triángulo de potencias (Boylestad, 2005). ....	19
Figura 10. - Tipos de rectificador. ....	20
Figura 11. - Símbolo del amplificador. ....	21
Figura 12. - Gráfica del limitador o recortador de voltaje.....	22
Figura 13. - Componentes del Microcontrolador.....	23
Figura 14. - Componentes del CPU.....	24
Figura 15. - Logotipo de Bluetooth.....	25
Figura 16. - Logotipo de Android. ....	27
Figura 17. - Diagrama de bloques del sistema. ....	30
Figura 18. - Transductor de corriente LA 55-P. ....	31
Figura 19. - Medición en el transductor de corriente LA 55-P.....	31
Figura 20. - Gráfica del transductor de corriente. ....	33
Figura 21. - Gráfica del rectificador de precisión. ....	34
Figura 22. - Rectificador de precisión o circuito MAV. ....	34
Figura 23. - Amplificador no inversor de la señal de corriente.....	35

Figura 24. -	Transformador de voltaje.....	36
Figura 25. -	Gráfica del transformador de voltaje.....	37
Figura 26. -	Amplificador no inversor de la señal de voltaje. ....	38
Figura 27. -	Gráfica del circuito amplificador. ....	39
Figura 28. -	Circuito amplificador con ganancia 1000.....	40
Figura 29. -	Gráfica de voltaje amplificado. ....	40
Figura 30. -	Algoritmo para el cálculo de la frecuencia. ....	42
Figura 31. -	Gráfica de voltaje y corriente amplificados.....	44
Figura 32. -	Algoritmo para el cálculo del factor de potencia. ....	45
Figura 33. -	cálculo de la frecuencia y del factor de potencia.....	46
Figura 34. -	Modulo de Bluetooth BM180. ....	48
Figura 35. -	Conexiones entre el Microcontrolador y el modulo de Bluetooth....	49
Figura 36. -	Conexión entre el modulo de Bluetooth y la PC. ....	51
Figura 37. -	Logotipo del MIT App Inventor. ....	52
Figura 38. -	Aplicación en Android.....	53
Figura 39. -	Algoritmo de la aplicación en Android. ....	54
Figura 40. -	Algoritmo para la medición del voltaje y la corriente. ....	57
Figura 41. -	Algoritmo para el cálculo de la frecuencia y del factor de potencia.	58
Figura 42. -	Diagrama de bloques del sistema. ....	59
Figura 43. -	Algoritmo general del sistema. ....	60
Figura 44. -	Secuencia de las pantallas mostradas en la LCD16x2. ....	61
Figura 45. -	PCB Circuito MAV. ....	62
Figura 46. -	PCB Circuito amplificador de ganancia 1000. ....	62
Figura 47. -	PCB de los dos circuitos.....	63
Figura 48. -	Tarjeta de pruebas con PIC18F2550. ....	64
Figura 49. -	Mediciones de voltaje (CH0) con generador de funciones. ....	67

Figura 50. -	Mediciones de corriente (CH1) con generador de funciones.....	67
Figura 51. -	Mediciones de frecuencia con generador de funciones.....	68
Figura 52. -	Mediciones de FP con factor de funciones.....	68
Figura 53. -	Mediciones de voltaje con carga resistiva. ....	71
Figura 54. -	Mediciones de corriente con carga resistiva.....	71
Figura 55. -	Mediciones de frecuencia con carga resistiva. ....	72
Figura 56. -	Mediciones de FP con carga resistiva.....	72
Figura 57. -	Gráfica del coeficiente de correlación con carga resistiva.....	73
Figura 58. -	Señales acondicionadas con carga resistiva.....	74
Figura 59. -	Mediciones de voltaje con carga inductiva. ....	77
Figura 60. -	Mediciones de corriente con carga inductiva.....	77
Figura 61. -	Mediciones de frecuencia con carga inductiva. ....	78
Figura 62. -	Mediciones de FP con carga inductiva. ....	78
Figura 63. -	Gráfica del coeficiente de correlación con carga inductiva.....	79
Figura 64. -	Señales acondicionadas con carga inductiva.....	80

## I - INTRODUCCIÓN

### 1.1 - Descripción del problema.

Una casa inteligente o vivienda domótica (Conjunto de sistemas que automatizan las diferentes instalaciones de una vivienda) se compone de una red de comunicación que permite la interconexión de diversos equipos con un sistema de control con el fin de obtener información del entorno doméstico y realizar acciones respectivas. En el campo de la energía eléctrica la domótica se encarga de gestionar el consumo de energía eléctrica.

La mayoría de los usuarios de viviendas tradicionales o no inteligentes no conocen el consumo de su red eléctrica, por lo que ignoran cuales aparatos eléctricos son los que tienen mayor o menor consumo. Esto se debe principalmente a que la mayoría de los hogares no cuentan con un sistema inteligente de monitoreo, lo que resulta en un desinterés por parte de los usuarios.

La acción de poder monitorear el consumo eléctrico de toda una vivienda por medio de un dispositivo móvil le facilita la tarea al usuario de llevar un registro y un control del consumo de los dispositivos conectados a su red eléctrica local, lo que se refleja en acciones que controlan y disminuyen el gasto del consumo de energía eléctrica.

### 1.2 - Antecedentes.

Durante las últimas dos décadas, la rápida evolución de las tecnologías de la información y un conocimiento creciente de edificios con factor limitativo estimuló a un flujo de desarrollo inteligente de tecnología y levantó abruptamente la demanda para el edificio “inteligente”. Sin embargo, el desarrollo de la vivienda domótica tiene una complejidad superior que un edificio inteligente y no-inteligente (es decir, tradicional).

La automatización del hogar empezó a permear a todos los niveles y dejó de ser un privilegio reservado sólo para personas de nivel socioeconómico alto. Estos procesos hacen más fácil la vida de las personas que habitan dichos hogares y permiten ahorros de energía importantes. A veces, el concepto de casa inteligente se confunde con vivienda para ricos, pero no es así, pues los sistemas de seguridad o para el ahorro de energía están abiertos a todos los estratos de la sociedad mexicana.

En el mercado actual existen varios dispositivos de medición eléctrica cuyas características varían dependiendo del costo, marca y modelo. La selección del dispositivo depende directamente de las características eléctricas que se desean conocer, por lo que es difícil decidir qué dispositivo de medición es adecuado a las necesidades requeridas, ya que la principal desventaja de los dispositivos de medición que existen es que cuentan con características que no siempre se necesitan para una aplicación específica y varias de estas características nunca son utilizadas, por otro lado tampoco se les pueden modificar sus características si así se requiriera, es decir, no son fácilmente adaptables.

La tecnología Bluetooth es una manera sencilla de comunicar dispositivos a corto alcance de forma segura, sencilla y sin cables. Bluetooth es líder en el mercado y es la única de corto alcance de la que se distribuyen más de cinco millones de unidades cada semana.

### 1.3 - Justificación.

Un sistema de monitoreo de consumo eléctrico le permite a un usuario verificar los niveles de consumo a través de un único sistema de control. Esto puede aplicarse para usuarios que controlan un proceso que incluye el consumo de energía eléctrica para advertir si existe algún error entre la medición y los

valores esperados, pero también puede aplicarse a usuarios de viviendas inteligentes que al conocer cuál es el consumo eléctrico en sus hogares pueden efectuar acciones para el ahorro de energía.

Al integrar todos los sistemas de monitoreo a un solo dispositivo inalámbrico se evita la necesidad de crear una red cableada que aumenta el costo de material, instalación y mantenimiento de la misma. La transmisión de datos a través de Bluetooth permite que cualquier dispositivo que cuente con esta tecnología sea capaz de conectarse al sistema y recibir los datos sin necesidad de configurar dicho dispositivo.

#### 1.4 - Objetivos.

Construir un sistema que sea capaz de medir el consumo de una red eléctrica utilizando sistemas embebidos con comunicación Bluetooth para mostrar los valores de las mediciones en un Smartphone con sistema operativo Android. El sistema también será capaz de obtener los valores de las magnitudes eléctricas relacionadas con el consumo eléctrico como corriente, voltaje, frecuencia, factor de potencia y potencia aparente, activa y reactiva.

#### 1.5 - Hipótesis.

Mediante el uso de sistemas embebidos y aplicaciones desarrolladas en Android comunicadas entre sí de manera inalámbrica se puede implementar un sistema de medición de la calidad de la energía que ayude al usuario final a aplicar acciones para disminuir el gasto por este servicio.

## II – REVISIÓN DE LITERATURA

Un sistema de medición de consumo eléctrico es un conjunto de elementos relacionados entre sí con el fin de obtener los valores en tiempo real de corriente, voltaje y potencia de un dispositivo o red eléctrica. Los datos son procesados en un módulo de control que monitorea dichos datos y los muestra ya sea mediante un indicador analógico o digital, o bien, los envía a un dispositivo remoto que puede ser cableado o inalámbrico. Para la medición de estas magnitudes es necesario utilizar ciertos elementos eléctricos y electrónicos específicos para cada una de ellas.

### 2.1 – Medición.

El objetivo de una medición es determinar el valor de una magnitud específica a medir o mesurando. Durante la realización de una medición intervienen una serie de factores que determinan su resultado tales como:

- El objeto de medición.
- El procedimiento de medición.
- Los instrumentos de medición.
- El ambiente de medición.
- El método de cálculo.

Además de la magnitud, el resultado de la medición está afectado por magnitudes de influencia, que incluyen las condiciones ambientales como son la temperatura, la presión barométrica, la humedad, etc. Así como fenómenos tales como las fluctuaciones de los instrumentos de medición, valores asociados con patrones de medición y datos de referencia de los cuales puede depender el resultado de la medición.

Una medición comienza con una especificación apropiada de la magnitud, del método de medición y de los procedimientos de medición.

- El método de medición es la secuencia lógica de operaciones usadas en la ejecución de las mediciones de acuerdo con un principio de medición determinado.
- El procedimiento de medición es el conjunto de operaciones descritas de forma específica utilizadas en la ejecución de mediciones de acuerdo a un método de medición determinado. Contiene un nivel suficiente de detalle que le permite a un operador realizar la medición sin información adicional.
- El principio de medición es el fundamento científico del método de medición, como por ejemplo la ley de Ohm que relaciona el voltaje con la corriente eléctrica.

Existen varios términos que caracterizan a una medición, estos son:

- Repetibilidad: cualidad de repetir una medición bajo las mismas condiciones, es decir, que ninguno de los factores que intervienen en la medición cambian. Estos factores son: la misma magnitud de medición; el mismo observador; el mismo instrumento de medición utilizado bajo las mismas condiciones, el mismo lugar de la medición, etc.
- Reproducibilidad: cualidad de repetir una medición bajo distintas condiciones.

Para caracterizar cualitativamente la calidad de una medición se utilizan los términos de exactitud y precisión.

La exactitud es la proximidad entre el valor medido y el valor real. El valor real se desconoce en principio, por lo que debe de estimarse mediante una hipótesis previa que la experimentación debe de demostrar como adecuada. La

experiencia y los modelos estadísticos desarrollados basándose en ella permiten estimar como valor real al valor esperado de la medida. Es decir, se considera como valor real al valor medio de las medidas porque es el mejor valor posible.

La precisión es la proximidad que obtenemos al realizar varias veces la misma medida de forma independiente. Mientras menos dispersos sean los valores, mayor será la precisión.

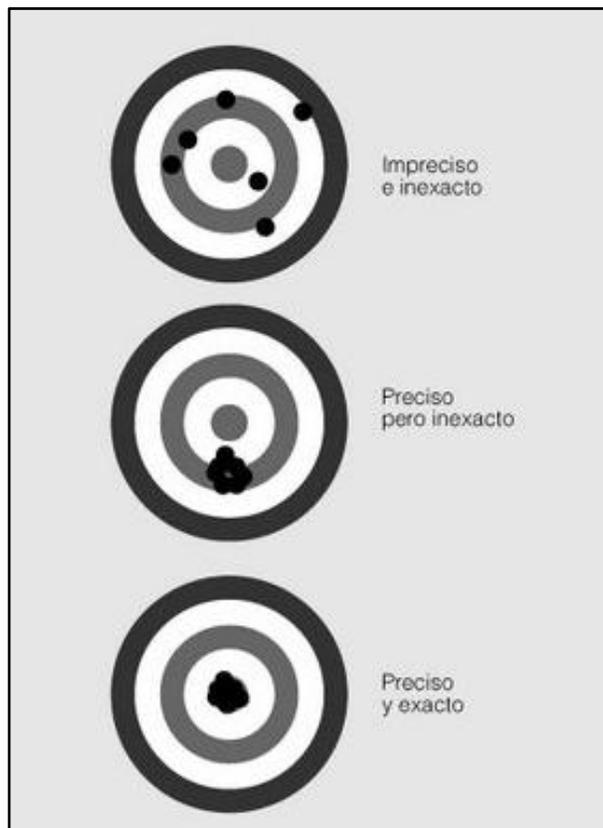


Figura 1. - Precisión y exactitud.

## 2.2 – Instrumento de medición.

Se denomina instrumento o aparato de medida a todo dispositivo destinado a realizar una medición, sólo o con dispositivos suplementarios y comprende: medidas materializadas, materiales de referencia, instrumentos

indicadores, transductores, etc., los cuales pueden agruparse y conformar sistemas de medición.

Independientemente de sus diseños, principios de funcionamiento y magnitudes que miden, a los instrumentos de medición les son comunes una serie de características metrológicas, entre las que se encuentran:

- Rango: Conjunto de los valores limitados por las indicaciones extremas del instrumento de medición. El rango es normalmente expresado en términos de sus límites inferior y superior.
- Valor nominal: Valor aproximado de una característica de un instrumento de medición que sirve de guía para su utilización.
- Intervalo de medición: valor de la diferencia entre los dos límites de un rango nominal.
- Valor de división: Diferencia entre los valores correspondientes a dos marcas sucesivas de la escala.
- Sensibilidad: Relación de la señal de salida o respuesta del instrumento respecto al cambio de la entrada o variable medida.
- Resolución: Cambio más pequeño en el valor medido el cual provoca una respuesta en el instrumento. Para un instrumento de indicación digital, es cuando el dígito menos significativo cambia en un paso (se incrementa o decremento).
- Condiciones nominales de funcionamiento: especifican el rango o valores nominales de la magnitud a medir y de las magnitudes influyentes.
- Condiciones límites: Condiciones extremas que puede soportar un instrumento de medición sin dañarse o degradar sus características metrológicas especificadas.
- Transparencia: Aptitud de un instrumento de medición de no modificar la magnitud a medir. Esta modificación siempre existe ya que el aparato de medida siempre extrae cierta cantidad de energía para realizar la medida.

### 2.3 – Incertidumbre y error.

La incertidumbre de la medición es una forma de expresar el hecho de que para un mensurando y su resultado de medición no hay un solo valor, sino un número infinito de valores dispersos alrededor del resultado, que son consistentes con todas las observaciones.

La incertidumbre del resultado de una medición generalmente consiste en varios componentes que pueden ser agrupados en dos categorías de acuerdo al método usado para estimar sus valores numéricos:

1. Componentes de incertidumbre que son evaluados mediante métodos estadísticos.
2. Componentes de incertidumbre que son evaluados por otros métodos o juicios científicos tales como resultados previos, conocimiento de propiedades de materiales o componentes, especificaciones de fabricantes, reportes de calibraciones, etc.

El resultado de una medición está completo únicamente cuando está acompañado por una declaración cuantitativa de la incertidumbre, que expresa la calidad del mismo y permite valorar la confiabilidad en este resultado.

En general, todo procedimiento de medición tiene imperfecciones que dan lugar a un error en el resultado de la medición, lo que provoca que el resultado sea sólo una aproximación o un estimado del valor de la magnitud.

El error es definido como la diferencia entre un resultado individual de una medición y el valor verdadero de la variable a medir, es decir, el error es un simple valor. Existen varios tipos de error:

- Graves o gruesos: Son en gran parte de origen humano, como la mala lectura de los instrumentos, ajuste incorrecto y aplicación inapropiada, así como equivocaciones en los cálculos.
- Sistemáticos: Se deben a fallas de los instrumentos, como partes defectuosas o desgastadas, y efectos ambientales sobre el equipo. Estos errores pueden evitarse mediante una buena elección del instrumento, aplicación de factores de corrección, o recalibrando contra un patrón.
- Aleatorios o fortuitos: Se deben a causas desconocidas y ocurren incluso cuando todos los errores sistemáticos han sido considerados. Para compensar estos errores debe incrementarse el número de lecturas y usar medios estadísticos para lograr una mejor aproximación del valor real de la cantidad medida.

#### 2.4 – Análisis estadístico.

El Análisis Estadístico de Datos se define como un conjunto de métodos, técnicas y procedimientos para el manejo de datos, su ordenación, presentación, descripción, análisis e interpretación, que contribuyen al estudio científico de los problemas planteados.

El análisis estadístico de datos de mediciones permite obtener una determinación analítica de la incertidumbre del resultado final. Es necesario resumir la información calculando algunas medidas descriptivas que buscan el lugar que ocupa un conjunto de datos, estas medidas se llaman medidas de localización y existen dos tipos:

1. Medidas de tendencia central. Definen el punto medio de una distribución o conjunto de datos. El resultado obtenido es una generalización para definir el centro de los datos.

2. Medidas de dispersión. Establecen el grado en que los valores de la variable se separan de un cierto valor central. Permiten identificar la concentración de los datos en un cierto sector del recorrido de la variable.

Para obtener el valor más representativo de una medición se utiliza la media aritmética, la cual es el valor característico comprendido entre los valores mayor y menor de una serie de datos cuantitativos. Mientras más grande sea el número de datos más representativo será el valor de la medición. La media aritmética está dada por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \quad (1)$$

Donde:

- $n$  es el número de datos.
- $a$  son los datos.

Si existe una relación entre dos variables de medición, esta se caracteriza por una ecuación de predicción que se denomina ecuación de regresión que relaciona matemáticamente ambas variables. Si la ecuación que mejor relaciona dichas variables es la de una recta, entonces existe una correlación lineal.

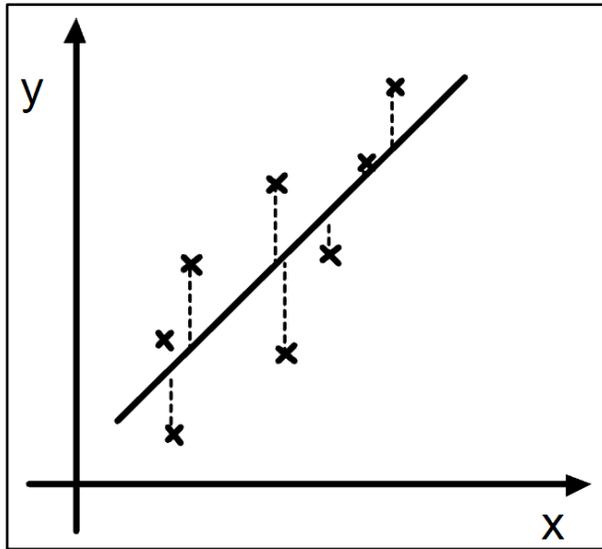


Figura 2. - Recta de regresión.

El coeficiente de correlación ( $r$ ) permite medir el grado de relación entre ambas variables y se define:

$$-1 \leq r \leq 1 \quad (2)$$

El valor del coeficiente de correlación se interpreta de la siguiente manera:

- Próximo a 0: variables independientes o no relacionadas linealmente.
- Próximo a -1: variables relacionadas inversamente, es decir, cuando una aumenta la otra disminuye.
- Próximo a 1: variables relacionadas directamente, es decir, cuando una aumenta la otra también.

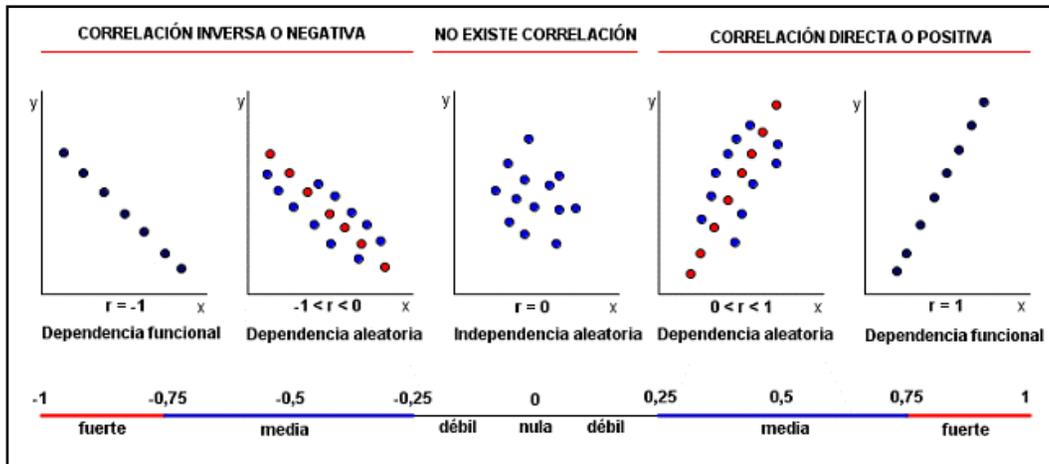


Figura 3. - Diferentes grados del coeficiente de correlación.

## 2.5 – Corriente y voltaje.

La corriente o intensidad eléctrica ( $I$ ) es el flujo de carga que atraviesa una sección por unidad de tiempo, su unidad es el Ampere (A). El voltaje o tensión eléctrica ( $V$ ) es la diferencia de potencial del paso de una corriente por un conductor, su unidad es el volt (V). La corriente y el voltaje se relacionan por medio de la ley de Ohm, la cual se define por:

$$I = \frac{V}{R} \quad (3)$$

La fórmula expresa que la corriente eléctrica ( $I$ ) es directamente proporcional al voltaje aplicado a una resistencia ( $V$ ) e inversamente proporcional al valor de dicha resistencia ( $R$ ). El valor del voltaje se calcula usando una variante de la ley de ohm despejando el valor del voltaje en la fórmula.

$$V = RI \quad (4)$$

Cuando la corriente o el voltaje son de naturaleza directa, el valor de corriente directa (CD) se mantiene constante.

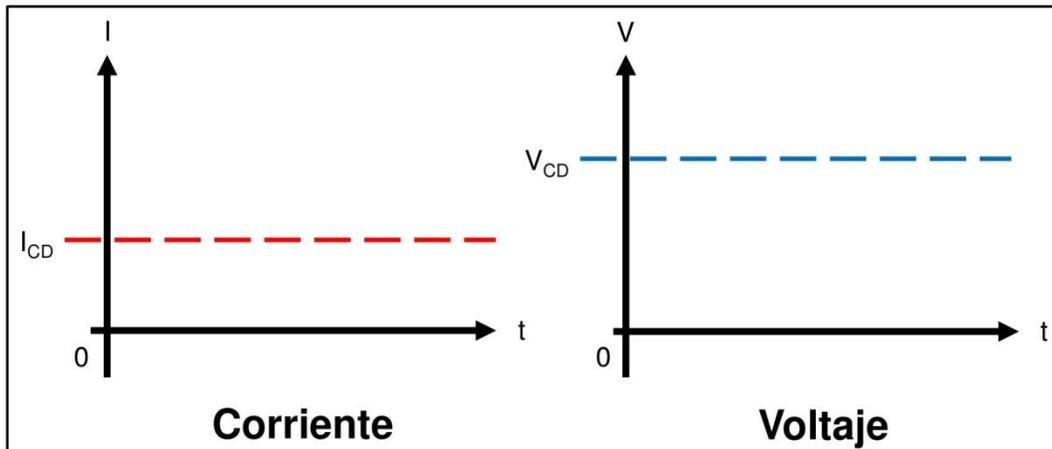


Figura 4. - Corriente y voltaje directos (CD).

Cuando la corriente y voltaje son de naturaleza alterna, el valor de corriente alterna (CA) tiene muchos valores a lo largo de un ciclo. Se toman algunos valores significativos para hacer la medición de una señal senoidal.

El valor pico ( $V_p$ ) que es el valor máximo ( $V_{max}$ ) que alcanza la señal en un intervalo positivo o negativo, El valor medio ( $V_m$ ) que es el promedio aritmético de todos los valores que alcanza la señal en un semiciclo y el valor RMS ( $V_{rms}$ ) que es valor en CA que disipa el mismo calor para un valor en CD (Boylestad, 2005). Estos valores se definen por:

$$V_p = V_{max} \quad (5)$$

$$V_m = 0.636V_p \quad (6)$$

$$V_{rms} = 0.707V_p \quad (7)$$

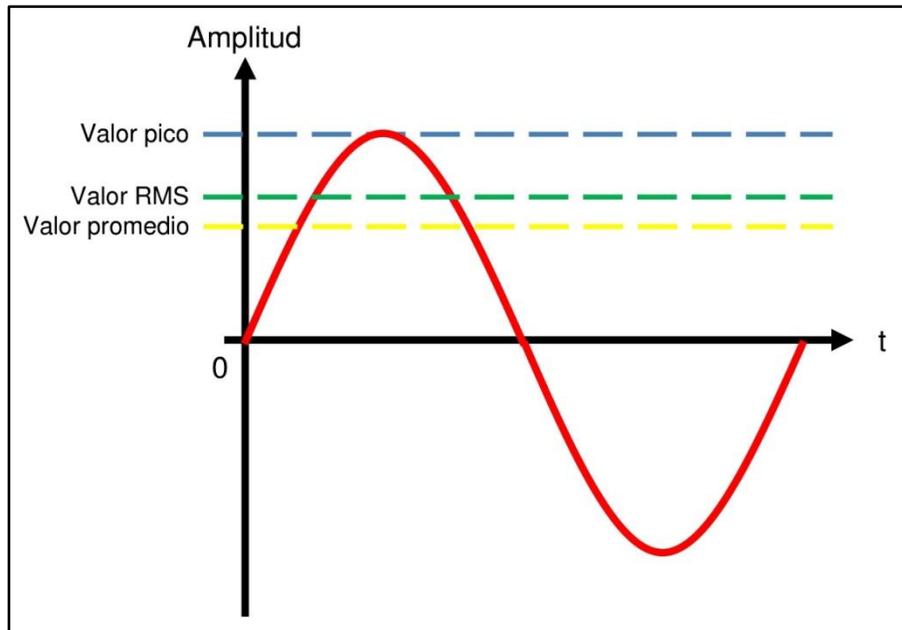


Figura 5. - Diferentes valores de una señal de corriente alterna (CA).

## 2.6 – Frecuencia y factor de potencia.

La frecuencia es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico, en este caso una señal eléctrica de corriente alterna. La unidad de medición es el Hert (Hz) que se refiere al número de veces que la señal se repite en un intervalo de un segundo, es decir, si la señal se repite diez veces en un segundo la frecuencia de la señal es de 10 Hz.

La frecuencia se calcula obteniendo el valor inverso del periodo (T) de la señal, que es el tiempo en segundos que transcurre entre dos puntos equivalentes de la onda (Boylestad, 2005). La frecuencia está definida por:

$$f = \frac{1}{T} \quad (8)$$

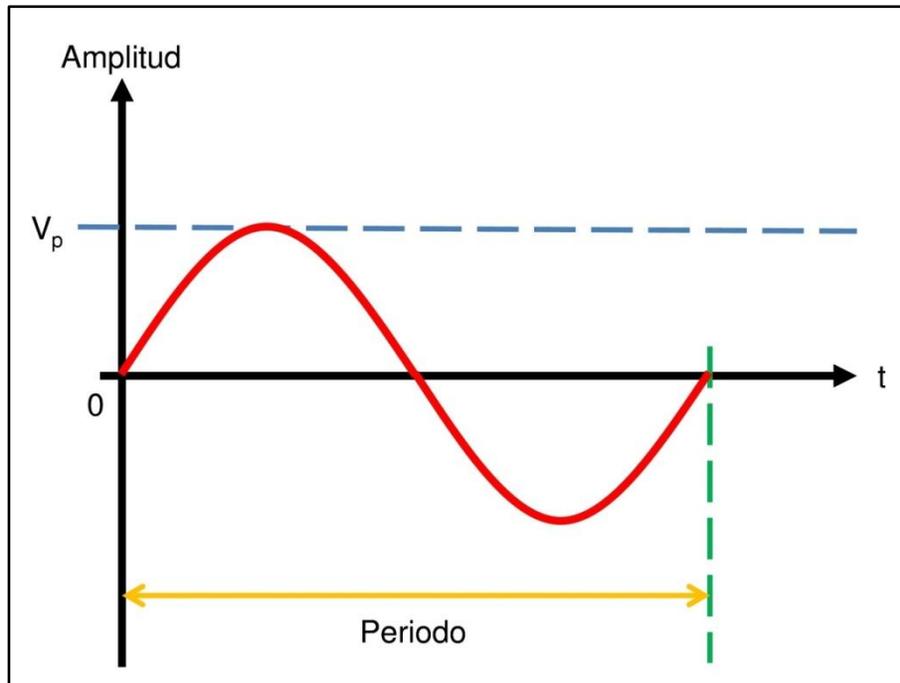


Figura 6. - Periodo de una señal.

Para obtener el factor de potencia (FP) es necesario obtener primero el ángulo de fase ( $\phi$ ), el cual es el valor en grados que existe cuando dos señales de onda alcanzan su máxima amplitud o bien cruzan por cero (Boylestad, 2005), en este caso la señal de corriente respecto a la señal de voltaje.

Se toma la señal de voltaje como referencia y se mide el ángulo de fase con respecto a la señal de corriente. Si este ángulo es mayor que  $0^\circ$  pero menor que  $180^\circ$  entonces el voltaje está adelantado con respecto a la de corriente. Pero si este ángulo es mayor de  $180^\circ$  y menor que  $360^\circ$  entonces la señal de voltaje está atrasada con respecto a la corriente.

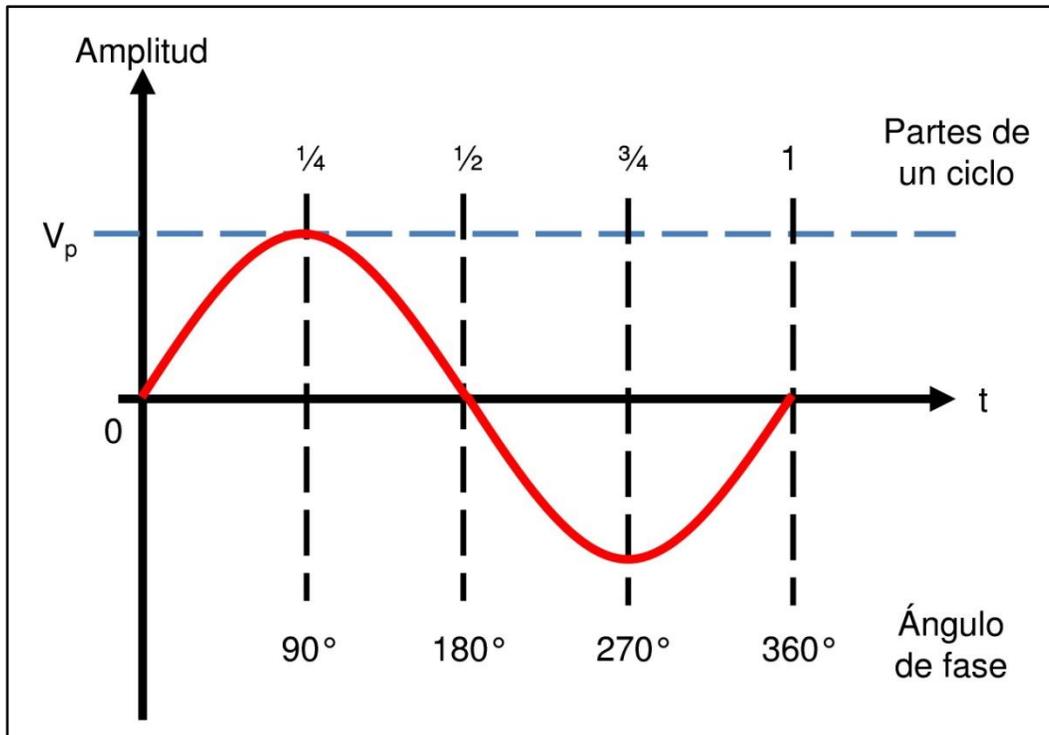
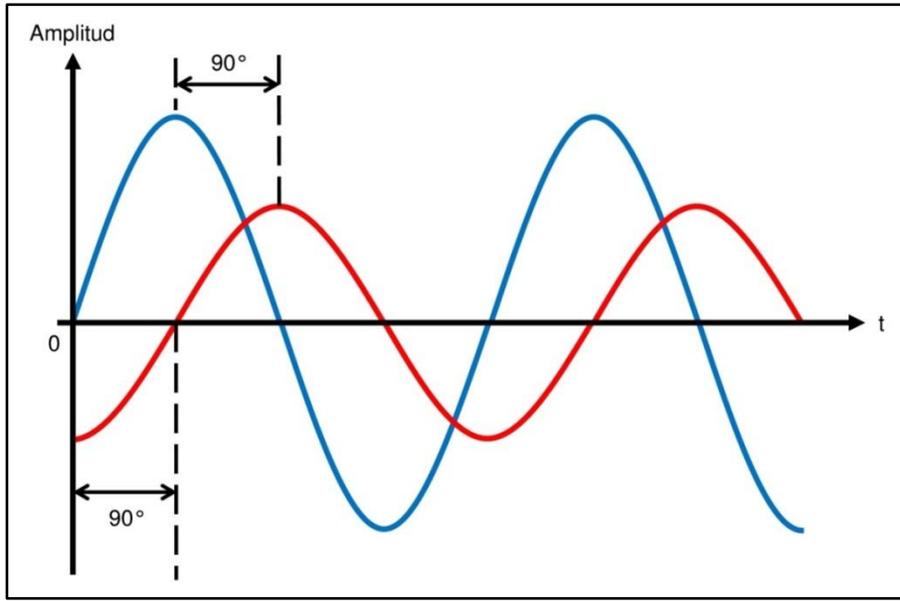


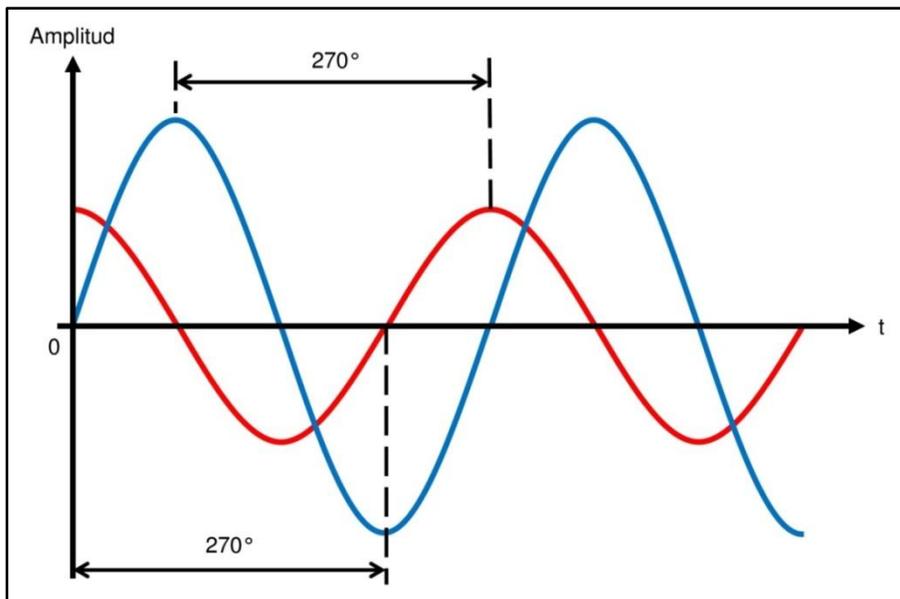
Figura 7. - Ángulos de fase en un ciclo completo.

Existen dos casos especiales que son cuando el ángulo de fase es igual a  $0^\circ$  o que las señales están en fase y cuando el ángulo es igual a  $180^\circ$  que es cuando las señales están en contrafase

Cuando se conecta una carga inductiva (motor, relevador, transformador, etc.) a la red eléctrica, la corriente se atrasa con respecto al voltaje. En caso contrario cuando se conecta una carga capacitiva (bancos de capacitores o condensadores y cables enterrados) la corriente se adelanta con respecto al voltaje.



a)



b)

Figura 8. - a) señales en atraso. b) señales en adelanto.

El factor de potencia de una señal senoidal se obtiene calculando el coseno del valor del ángulo de fase (Boylestad, 2005).

$$FP = \cos(\varphi) \quad (9)$$

El valor ideal del factor de potencia es 1, es decir, que las dos señales están en fase. Esto indica que toda la energía consumida por los aparatos conectados a una red de alimentación ha sido transformada en trabajo. Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa un mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil.

## 2.7 – Potencia y consumo eléctrico.

En corriente alterna, la potencia es igual al producto de los valores eficaces de voltaje y corriente por el factor de potencia. Hay de tener en cuenta las diferentes expresiones de la potencia:

1. Potencia aparente (S): Es el producto vectorial de la intensidad y la tensión. Es sólo una magnitud de cálculo, porque no tiene en cuenta el desfase entre la tensión y la intensidad de corriente. Su unidad es el volt-Ampere (VA).

$$S = VI \quad (10)$$

2. Potencia activa (P): Es la potencia eléctrica, que en los receptores se puede transformar en otra forma de energía (calorífica, mecánica,...). Su unidad es el Watt (W). El factor de potencia nos indica que potencia realmente se transforma en el receptor que contiene la potencia aparente.

$$P = VI \cos \varphi \quad (11)$$

3. Potencia reactiva (Q): Este tipo de potencia se utiliza, en los circuitos de corriente alterna, para la formación del campo en las bobinas y para la carga de los condensadores (creación de un campo eléctrico). La potencia reactiva no puede dar ningún tipo de energía. Su unidad es el volt-Ampere reactivo (VAR). La potencia reactiva representa una carga

para los generadores, las líneas y los transformadores, y se origina en ellos una pérdida real de potencia.

$$Q = \sqrt{S^2 + P^2} \quad (12)$$

El triángulo de potencia es la representación gráfica de la relación entre las potencias activa, reactiva y aparente y el factor de potencia.

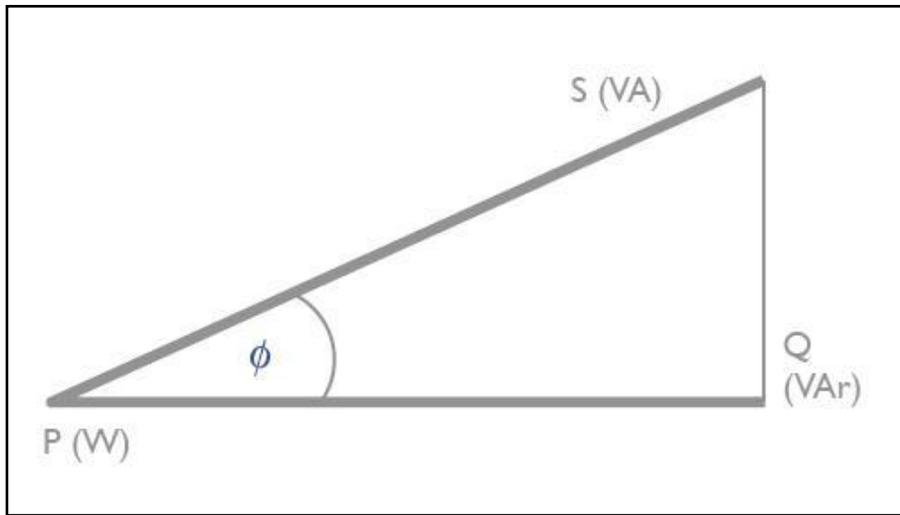


Figura 9. - Triángulo de potencias (Boylestad, 2005).

El cálculo del consumo eléctrico es simplemente el producto de la potencia activa en kilowatt (kW) por el número de horas de consumo. Está definido por:

$$\text{consumo} = kW (\text{hora}) \quad (13)$$

Cuando el cálculo que se realiza es para el consumo instantáneo, el número de horas es igual a 1. Entonces el consumo se define por:

$$\text{consumo} = kW (\text{hora}) = kW(1) = kW \quad (14)$$

La unidad del consumo eléctrico es kilo-Watt hora (kWh).

## 2.8 – Rectificación, Amplificación y Limitación de voltaje.

La rectificación es el proceso que transforma una señal de corriente alterna (CA) en una señal de corriente directa (CD) (Boylestad, 2005). Esto se logra utilizando un rectificador el cual es un circuito que tiene la capacidad de realizar esta conversión. Existen dos tipos de circuitos rectificadores: rectificadores de media onda y rectificadores de onda completa.

El rectificador de media onda es un circuito empleado para eliminar la parte negativa o positiva de una señal de corriente alterna de entrada. El rectificador de onda completa utiliza ambas partes de la señal senoidal de entrada, para obtener una salida unipolar, es decir, invierte los semiciclos negativos de la onda senoidal.

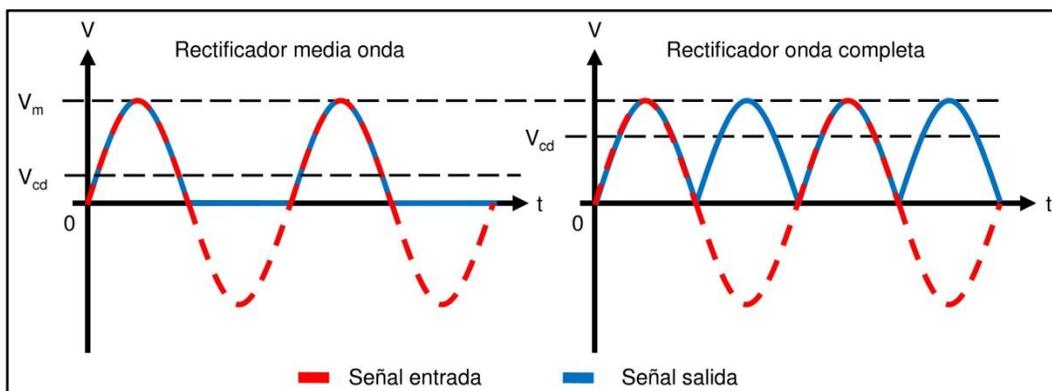


Figura 10. - Tipos de rectificador.

El valor  $V_{cd}$  (Boylestad, 2003) o voltaje de salida del rectificador de media onda se define por:

$$V_{cd} = 0.318V_m \quad (15)$$

Y para el rectificador de onda completa se define por:

$$V_{cd} = 0.636V_m \quad (16)$$

Un amplificador de voltaje es un circuito que entrega un voltaje de salida ( $V_o$ ) correspondiente a un voltaje de entrada ( $V_i$ ) por un factor de amplificación o ganancia ( $A$ ) (Coughlin y Driscoll, 1993). La ganancia de un amplificador está dada por:

$$A = \frac{V_o}{V_i} \quad (17)$$

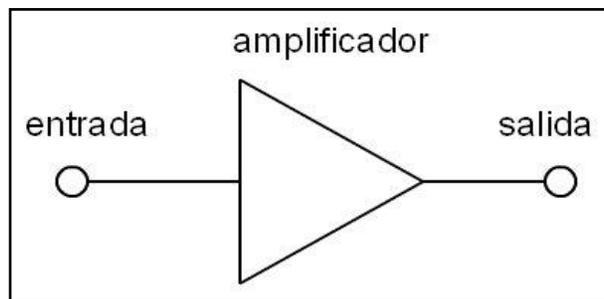


Figura 11. - Símbolo del amplificador.

Un limitador o recortador de voltaje es un circuito que elimina niveles de voltaje superiores a un voltaje de referencia (Coughlin y Driscoll, 1993). Esto con el fin de evitar que estos niveles de voltaje superiores dañen algunos circuitos.



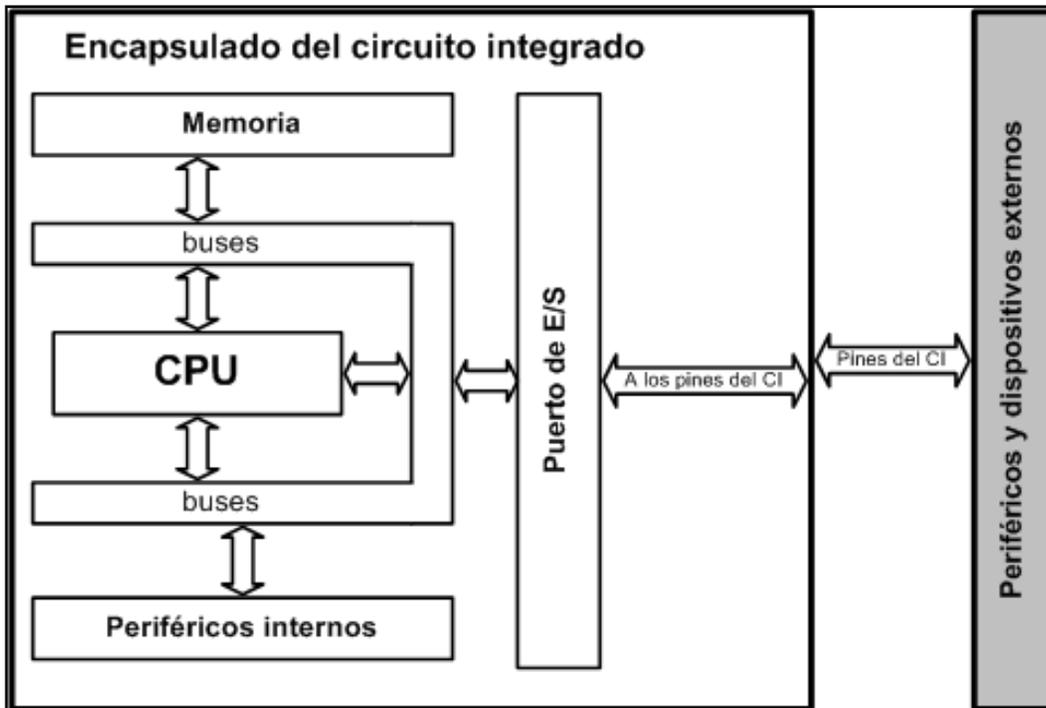


Figura 13. - Componentes del Microcontrolador.

El procesador del Microcontrolador está conformado por 4 partes:

1. Registros. Son un espacio en la memoria que permiten controlar la ejecución de tareas dentro de un Microcontrolador. Al modificar estos registros se controlan las funciones de los componentes del Microcontrolador, como almacenar datos en la memoria, habilitar puertos de entrada y salida, etc.
2. Unidad de control. Es la parte del procesador que codifica o interpreta las instrucciones alojadas en la memoria principal y las ejecuta. Para realizar esta acción administra los registros, controla la ALU y los buses de datos.
3. ALU (Unidad Aritmética Lógica). Realiza las operaciones lógicas del CPU.
4. Buses de datos. Transfieren la información entre los diferentes componentes del CPU así como a la memoria y los periféricos del Microcontrolador.

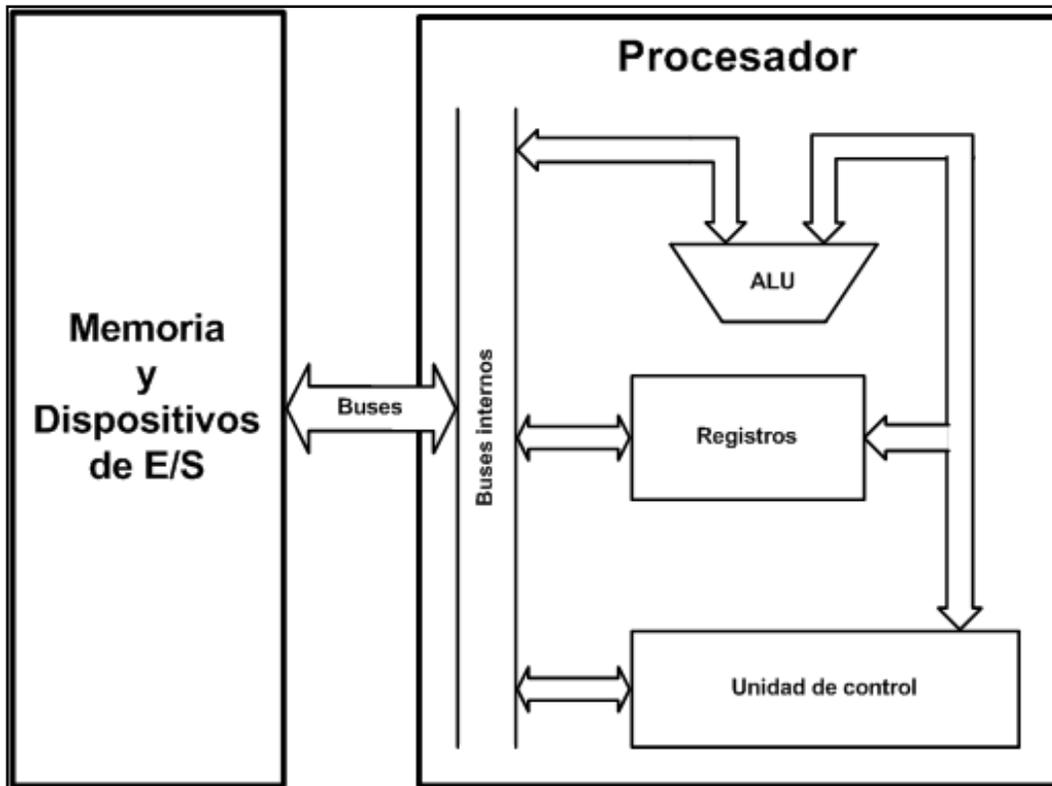


Figura 14. - Componentes del CPU.

El Microcontrolador también está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica tales como:

- ADC (Convertidor Analógico digital). Se les conoce también como entrada analógica, mide el nivel de voltaje en una entrada con respecto a un voltaje de referencia y devuelve un valor digital.
- Interrupciones. Una interrupción es un evento de entrada, cuando ésta ocurre el Microcontrolador ejecuta la acción asociada a la interrupción dándole una prioridad más alta que al resto de las instrucciones. Cuando finaliza la acción asociada a la interrupción, el Microcontrolador vuelve a ejecutar el resto del código en la instrucción que se estaba ejecutando antes de recibir la interrupción.
- Temporizadores. Un temporizador es un contador de los pulsos de reloj del Microcontrolador. Cuando el temporizador llega a su cuenta máxima, este se reinicia y comienza a contar desde cero.

- PWM. Algunas salidas se pueden utilizar en el modo de PWM (modulación de ancho de pulso). Se puede configurar tanto el periodo de salida como el ciclo de trabajo.
- Puerto de entrada y salida. Se utilizan para escribir y leer datos en los pines del Microcontrolador.
- Memoria de datos no volátil. Los Microcontroladores cuentan con una pequeña memoria que puede almacenar datos aun cuando se apague el Microcontrolador.
- Puertos de comunicación. Los Microcontroladores pueden comunicarse usando diferentes estándares de comunicación como son RS232, SPI, I2C y USB.

Los Microcontroladores actualmente son fáciles de conseguir, económicos, funcionan a altas velocidades; y son diseñados para reducir el costo económico y el consumo de energía de un sistema en particular.

## 2.10 – Bluetooth.

Bluetooth es una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal (WPANs) que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes equipos mediante un enlace por radiofrecuencia.



Figura 15. - Logotipo de Bluetooth.

Los principales objetivos que se pretenden conseguir con esta norma son:

- Facilitar las comunicaciones entre equipos móviles y fijos.

- Eliminar cables y conectores entre dispositivos.
- crear pequeñas redes inalámbricas y facilitar la sincronización de datos entre equipos personales.

Las características de Bluetooth son:

- Utilita el estándar IEEE 802.15.1.
- Funciona en una banda ISM (Industrial, Scientific and Medical por sus siglas en ingles) con frecuencia central en 2.4 GHz. ISM es una banda de frecuencias reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia en aplicaciones industriales, científicas y medicas.
- Tiene un alcance de 1 a 100 metros dependiendo de la clase del dispositivo. Los dispositivos de Clase 1 tienen un alcance de hasta 100 metros, los dispositivos de Clase 2 llegan hasta los 10 metros, mientras que los dispositivos de Clase 3 tienen un alcance máximo de 1 metro.
- La máxima velocidad de transmisión es de 3 Mbps.
- El canal de comunicación de máximo es de 720 kb/s (1 Mbps de capacidad bruta) con rango óptimo de 10 m o 100 m con repetidores.
- No es necesario que los dispositivos estén situados en la misma línea de visión, ya que se transmite en todas direcciones.

Los dispositivos que con mayor frecuencia utilizan esta tecnología pertenecen a sectores de las telecomunicaciones y la informática personal, como PDA, teléfonos móviles, computadoras portátiles, ordenadores personales, impresoras o cámaras digitales.

### 2.11 – Sistema operativo Android.

Android es un sistema operativo basado en Linux, utiliza aplicaciones middleware (software que facilita a una aplicación comunicarse con otras

aplicaciones, redes, hardware y sistemas operativos). Está enfocado para ser utilizado en dispositivos móviles como Smartphones, Tablets y otros dispositivos.



Figura 16. - Logotipo de Android.

Cuenta con las siguientes características y especificaciones.

- Se adapta a pantallas de mayor resolución.
- Utiliza una base de datos liviana para propósitos de almacenamiento de datos.
- soporta diferentes tecnologías de conectividad como Bluetooth y Wi-Fi.
- Soporta mensajes SMS y MMS.
- soporta diferentes formatos multimedia como: MPEG-4, 3GP, AAC, MP3, MIDI, WAV, JPEG, PNG, GIF, BMP, entre otros.
- Soporta diferentes tipos de hardware como: cámaras de fotos y vídeo, GPS, pantallas táctiles multi-touch, acelerómetros, giroscopios y sensores de luz, de proximidad y de presión.
- Las aplicaciones pueden ser descargadas directamente sin necesidad de una PC.

- Tiene soporte multitarea, es decir, las aplicaciones en segundo plano no se congelan sino que siguen ejecutándose.
- permite al dispositivo móvil ser utilizado como punto de acceso alámbrico o inalámbrico.

Android, se desarrolla de forma abierta y se puede acceder tanto al código fuente como al listado de incidencias donde se pueden ver problemas aún no resueltos y reportar problemas nuevos.

El desarrollo de aplicaciones para Android no requiere aprender lenguajes complejos de programación, todo lo que se necesita es un conocimiento básico de programación. Además todas las aplicaciones están comprimidas en formato APK, que se pueden instalar sin dificultad desde cualquier explorador de archivos en la mayoría de dispositivos.

### III - METODOLOGÍA

La construcción del sistema de medición de consumo eléctrico planteado consta de 5 partes principales:

1. Transductor: tomar las señales físicas y convertirlas en tensiones eléctricas.
2. Acondicionamiento de señales: tomar las tensiones eléctricas obtenidas y modificarlas o acondicionarlas para que puedan ser leídas por el sistema de control.
3. Procesamiento y control: adquirir las señales acondicionadas y realizar los cálculos para obtener los valores de las mediciones. controlar la visualización de los datos y el envío de estos por Bluetooth.
4. Visualización: mostrar los valores medidos y calculados por el sistema en una LCD16x2.
5. Comunicación Bluetooth: enviar los datos de las mediciones por Bluetooth para ser monitoreadas por un dispositivo móvil.

De manera específica el sistema se divide en:

1. Acondicionamiento de la señal de corriente.
2. Acondicionamiento de la señal de voltaje.
3. Acondicionamiento y medición de la frecuencia.
4. Acondicionamiento y medición del factor de potencia.
5. Cálculo de potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente.
6. Cálculo del consumo eléctrico.
7. Elaboración de la interfaz de comunicación con Bluetooth.
8. Elaboración del programa de control.

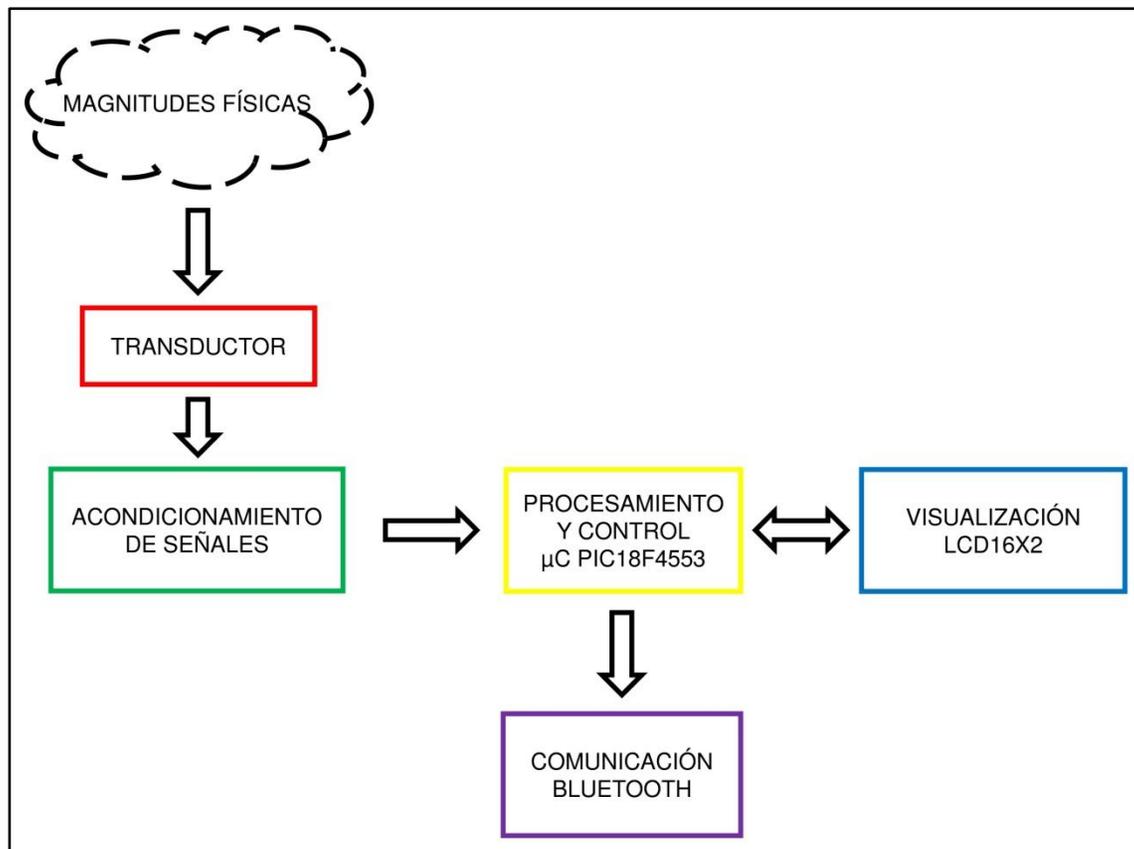


Figura 17. - Diagrama de bloques del sistema.

### 3.1 - Acondicionamiento de la señal de corriente.

La medición de la señal de corriente se realiza con un transductor de corriente, el cual entrega un nivel de voltaje proporcional a la corriente que se desea medir.

El transductor utilizado es el LA 55-P que cuenta con las siguientes características:

- Rango de medición de corriente primaria: 0 a 70  $A_{CA}$ .
- Relación de conversión: 1:1000.
- Voltaje de alimentación  $\pm 12$  a  $\pm 15$   $V_{CD}$ .
- Ancho de banda: 200 kHz.

- Linealidad < 0.15%.
- Tiempo de respuesta < 1  $\mu$ S.
- Peso: 18 gr.

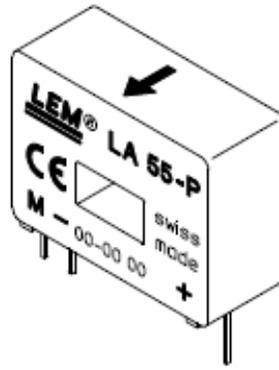


Figura 18. - Transductor de corriente LA 55-P.

El transductor entrega una corriente secundaria  $I_S$  con una relación de conversión de 1:1000. Esta corriente circula por una resistencia de precisión  $R_M$  en la cual hay una caída de tensión que se calcula con la ley de Ohm.

$$V = IR \tag{18}$$

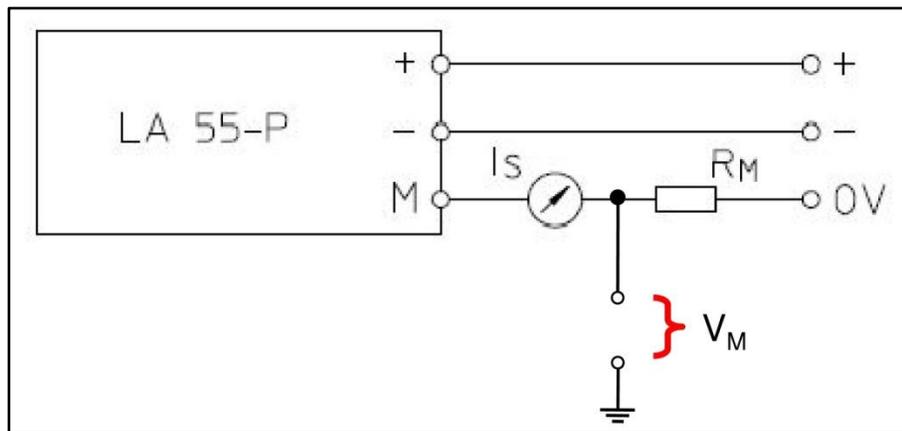


Figura 19. - Medición en el transductor de corriente LA 55-P.

Examinando los valores de operación de la hoja de datos, se indica que para medir una corriente máxima  $I_{Pmax}$  de 50 A<sub>CA</sub> con un voltaje de alimentación de  $\pm 15$  V<sub>CD</sub> se necesita una resistencia con valor de 50 a 160  $\Omega$ . Se calcula el valor de la resistencia tomando en cuenta que el voltaje máximo  $V_{Mmax}$  que se requiere es 5 V.

$$I_{s max} = \frac{I_{p max}}{\text{Factor de conversion}} \quad (19)$$

Para una corriente  $I_{p max} = 50$  A se tiene:

$$I_{smax} = I_{Pmax} / \text{factor de conversión} = 50 \text{ A} / 1000 = 50 \text{ mA}$$

Con este valor de corriente se calcula el valor de la resistencia utilizando la ley de ohm.

$$R_M = V / I_s = 5 \text{ V} / 50 \text{ mA} = 100 \Omega$$

Se tiene entonces que con una resistencia de 100  $\Omega$  y una corriente que circule por ella de 50 mA hay una caída de tensión de 5 V<sub>CD</sub>. Este valor de voltaje es óptimo, ya que está dentro de los niveles de operación del Microcontrolador.

El valor obtenido de voltaje es de naturaleza alterna por lo que es necesario someterlo a un proceso de rectificación para obtener su magnitud equivalente en corriente directa.

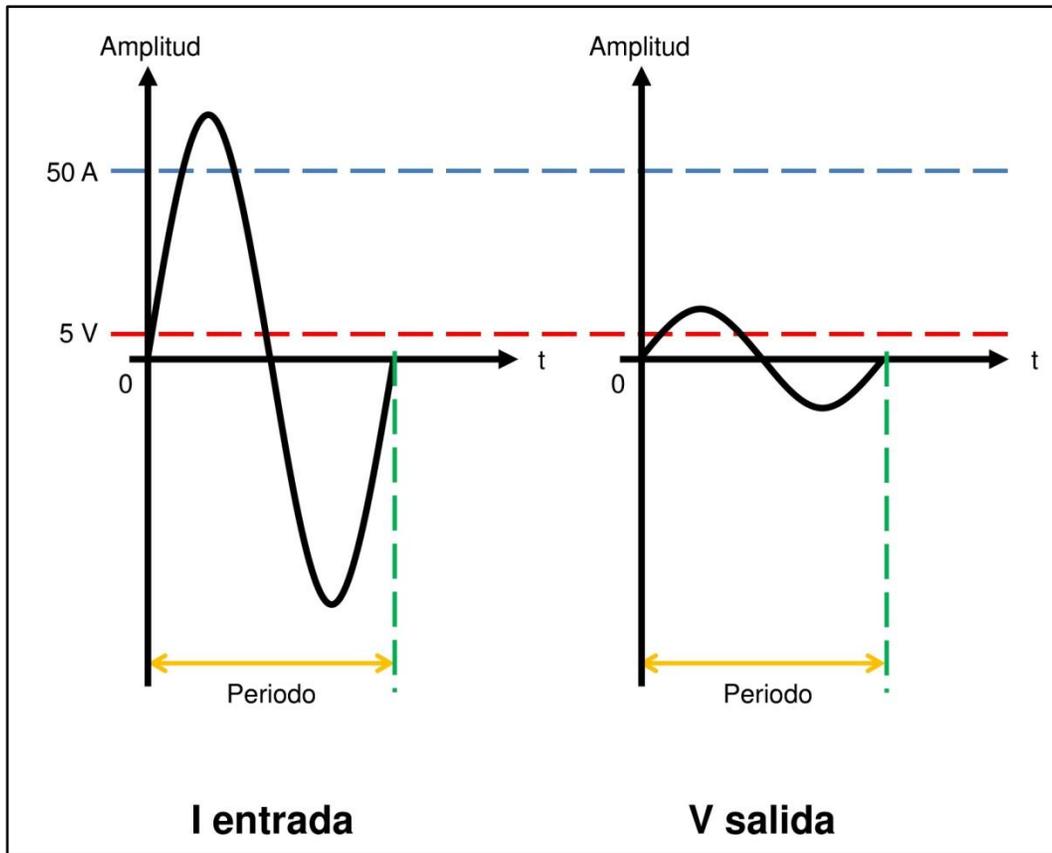


Figura 20. - Gráfica del transductor de corriente.

Para esto se utiliza un rectificador de precisión o circuito MAV (Coughlin y Driscoll, 1993) construido con operadores operacionales. No se utiliza un puente rectificador de diodos convencional, ya que al existir una caída de tensión en los diodos de 0.7 V no se podrían interpretar los valores de 0 a 0.7 V los cuales equivalen de 0 a 7 A.

Este circuito rectificador tiene como característica que le toma cerca de 50 ciclos del voltaje de entrada establecer el voltaje final de salida. Tomando en cuenta esto y de que generalmente el periodo de un ciclo es de 16.667 mS (frecuencia de 60 Hz) se calcula el tiempo que le toma al circuito establecer el voltaje final de salida.

$$\text{tiempo de establecimiento} \approx 50 (16.667 \text{ mS}) \approx 833.333 \text{ mS}$$

Al circuito se le agrega un amplificador no inversor (Coughlin y Driscoll, 1993) ya que el voltaje de salida está dado por:

$$V_{MAV} = \frac{2}{\pi} V_{in} \quad (20)$$

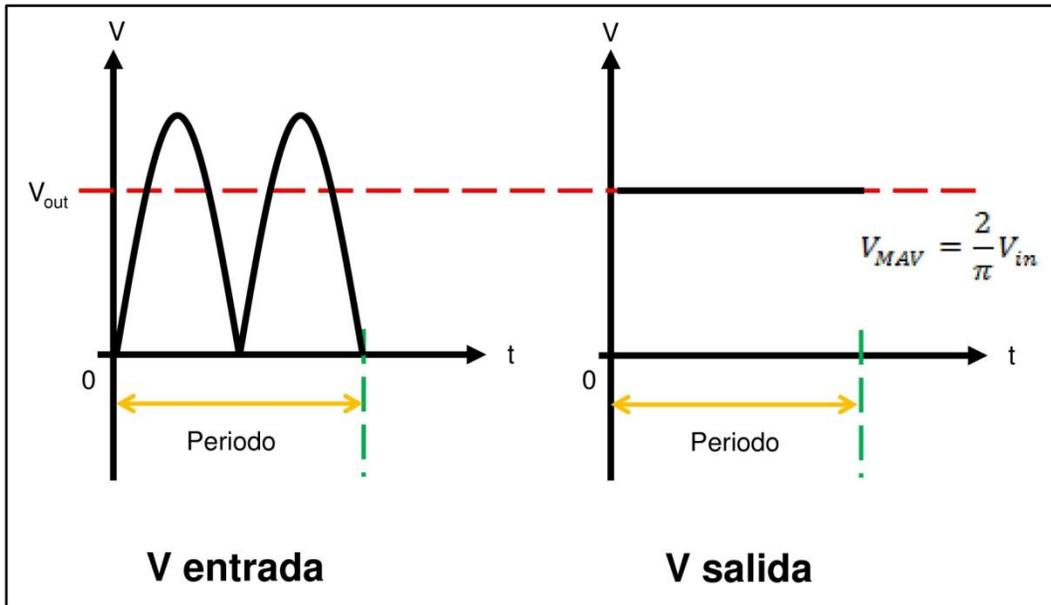


Figura 21. - Gráfica del rectificador de precisión.

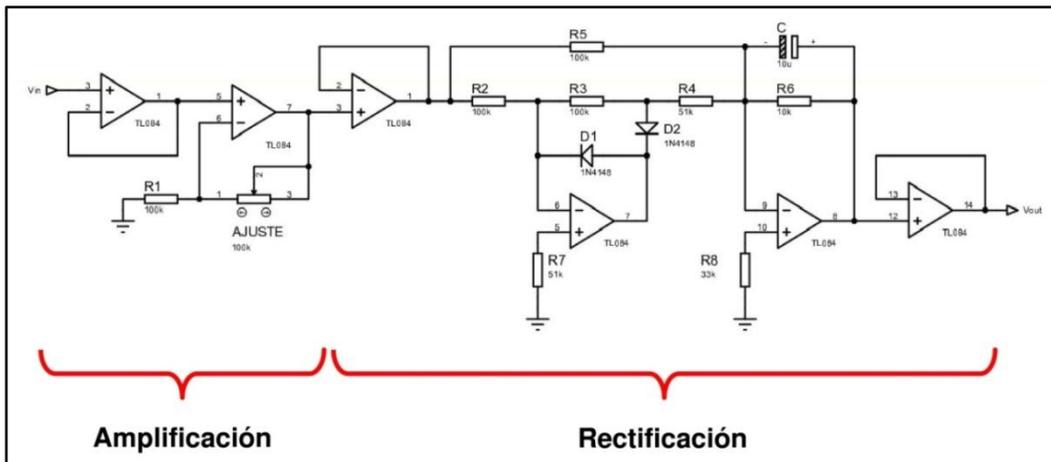


Figura 22. - Rectificador de precisión o circuito MAV.

Por lo tanto para obtener un voltaje de salida máximo de 5 V es necesario amplificar el voltaje de entrada. Primero se calcula el valor de voltaje necesario a la salida del amplificador.

$$V_{in} = (V_{MAV} \pi) / 2 = [(5 \text{ V}) \pi] / 2 = 7.854 \text{ V}$$

La ganancia del amplificador no inversor se calcula con la siguiente fórmula:

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (21)$$

Se calcula la ganancia teniendo los valores de voltaje tanto de entrada como de salida.

$$A = V_{out} / V_{in} = 7.854 / 5 = 1.571$$

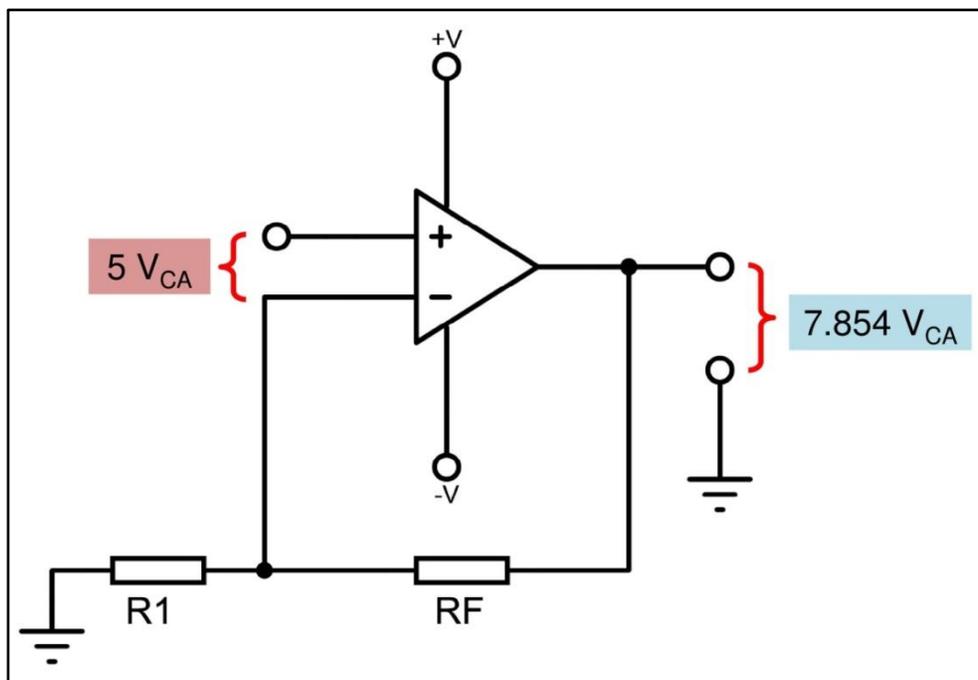


Figura 23. - Amplificador no inversor de la señal de corriente.

Ahora se calculan los valores de las resistencias que componen el circuito, proponiendo  $R_1$  con un valor de  $100 \text{ k}\Omega$ .

$$R_f = (A - 1) R_1 = (1.571 - 1) 100 \text{ k}\Omega = 57.08 \text{ k}\Omega$$

El valor de  $R_f$  es de  $57.08 \text{ k}\Omega$ , pero se coloca un trimpot para ajustarlo a este valor, ya que los valores calculados son ideales y las resistencias no siempre tienen estos valores.

Por último se agrega un seguidor de voltaje o acoplador de voltaje (Coughlin y Driscoll, 1993) a la entrada y uno a la salida, con el fin de que el sistema tenga alta impedancia a la entrada y baja impedancia a la salida y así no consuma corriente de la señal de medición.

### 3.2 – Acondicionamiento de la señal de voltaje.

La medición del voltaje se realiza utilizando un transformador de voltaje, el cual atenúa la señal de voltaje a un valor seguro de operación para el Microcontrolador. Se utiliza un transformador con salida de  $6 \text{ V } 1 \text{ A}$  ya que tiene una relación de  $140 \text{ V}/8 \text{ V}$ , es decir, si se aplica al primario  $140 \text{ V}_{CA}$ , en el secundario se tendrán  $8 \text{ V}_{CA}$ .

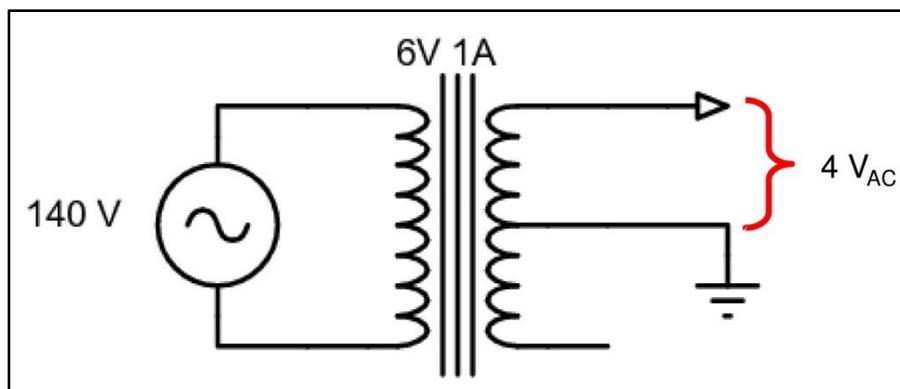


Figura 24. - Transformador de voltaje.

Se toma la derivación del secundario como referencia para así obtener  $4 V_{CA}$ . Se debe ser cuidadoso con qué lado del secundario se utiliza ya que uno de los lados invierte la señal de entrada.

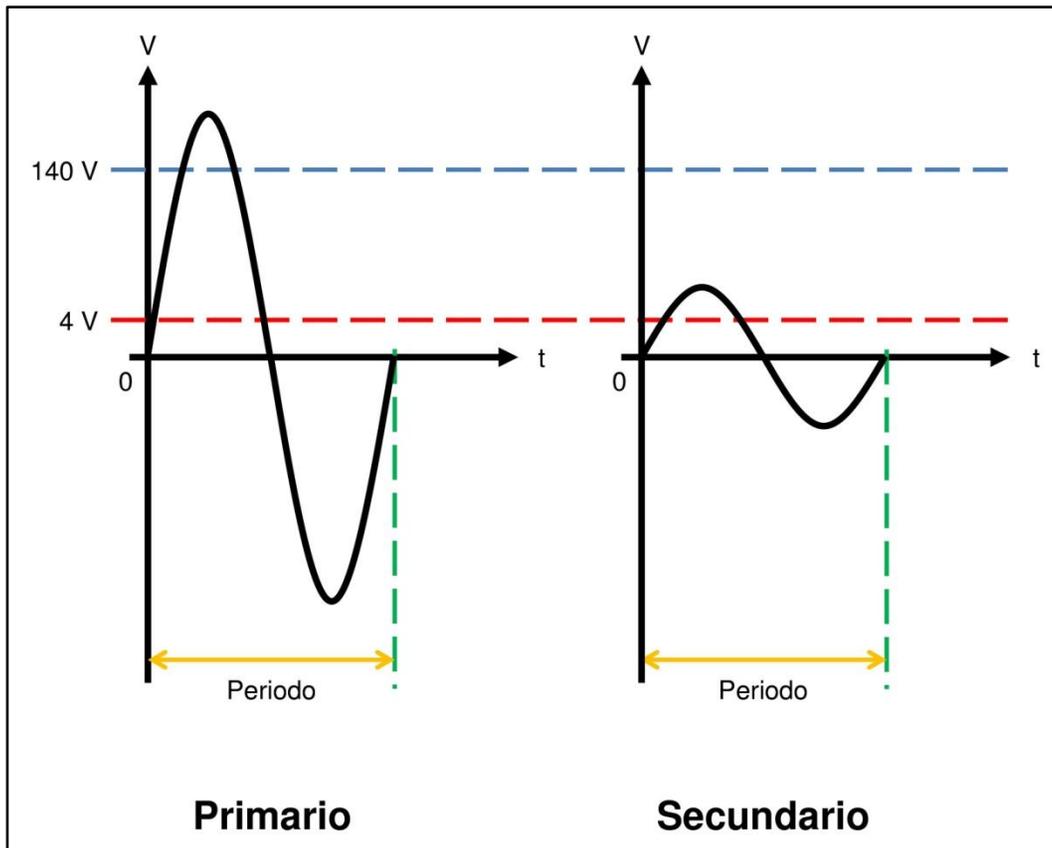


Figura 25. - Gráfica del transformador de voltaje.

Al igual que la señal de corriente se utiliza un rectificador de precisión para poder obtener un voltaje directo proporcional a la señal de medición. La parte amplificadora aumenta el voltaje de entrada de  $4 V_{CA}$  a  $7.854 V_{CA}$  con el fin de obtener  $5 V_{CD}$  a la salida del rectificador.

Se calcula la ganancia teniendo los valores de voltaje tanto de entrada como de salida.

$$A = V_{out} / V_{in} = 7.854 / 4 = 1.954$$

Posteriormente se calculan los valores de las resistencias que componen el circuito, proponiendo  $R_1$  con un valor de  $100 \text{ k}\Omega$ .

$$R_f = (A - 1) R_1 = (1.954 - 1) 100 \text{ k}\Omega = 95.37 \text{ k}\Omega$$

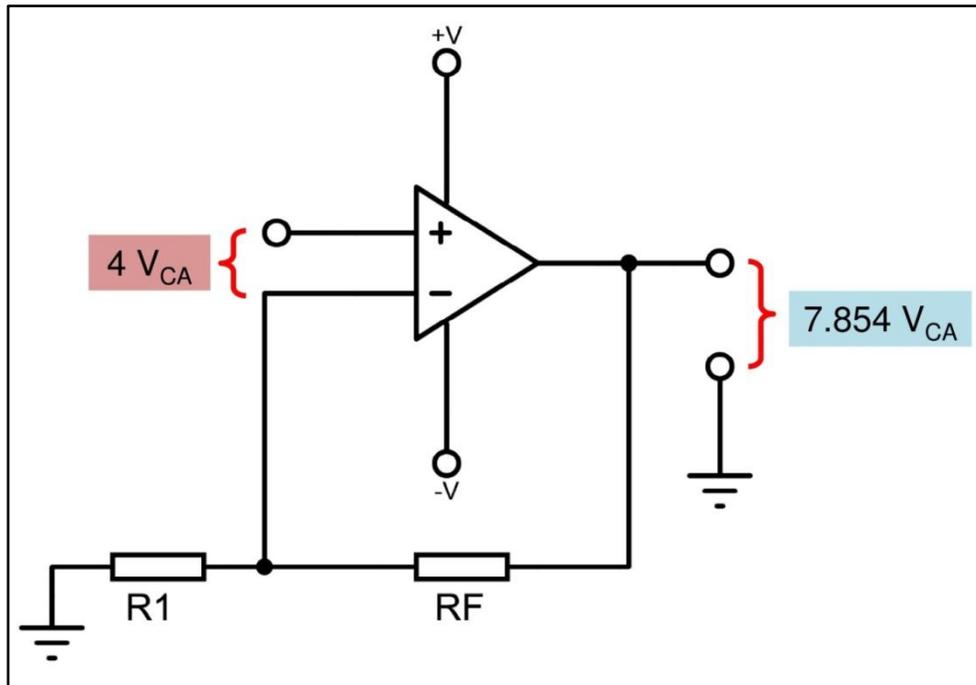


Figura 26. - Amplificador no inversor de la señal de voltaje.

Se coloca un trimpot para sustituir a  $R_f$  y así ajustarlo hasta obtener el valor calculado.

De la misma manera que el circuito rectificador de la señal de corriente, se agrega un seguidor de voltaje a la entrada y otro a la salida.

### 3.3 – Acondicionamiento y medición de la frecuencia.

La medición de la frecuencia se realiza analizando solamente una señal, ya sea la de voltaje o la de corriente ya que ambas señales tienen la misma frecuencia.



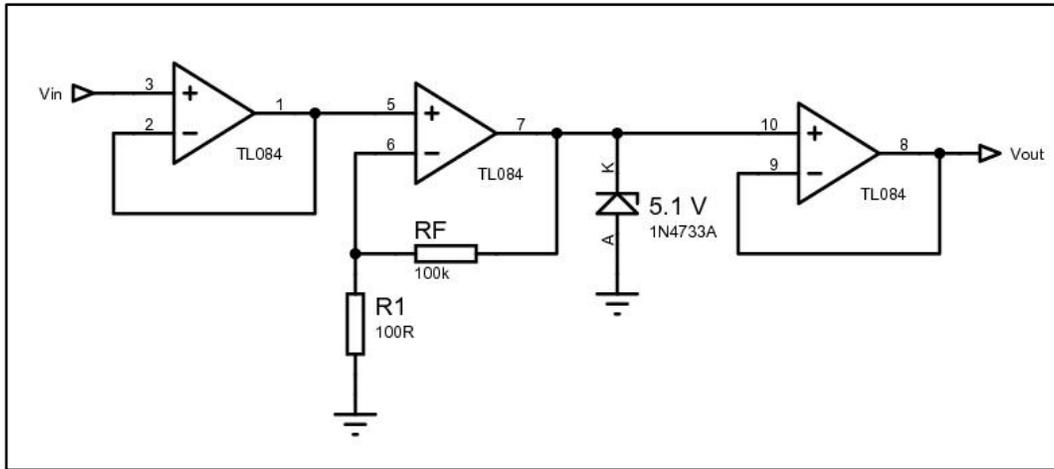


Figura 28. - Circuito amplificador con ganancia 1000.

Después se limita el voltaje de salida del amplificador por medio de un diodo Zener para que el valor no sea mayor de  $5.1 V_{CD}$  y no dañe el Microcontrolador. Se agregan dos seguidores de voltaje para no consumir corriente de la medición y que ésta sea más exacta. Tanto la señal de entrada como la de salida tienen la misma frecuencia.

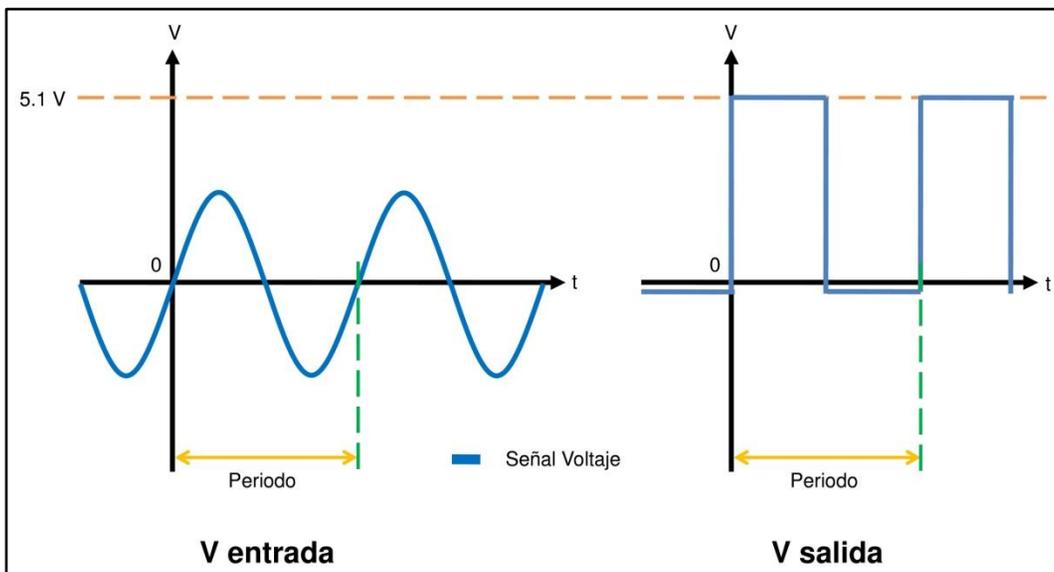


Figura 29. - Gráfica de voltaje amplificado.

Una vez que la señal cuenta con los valores adecuados de voltaje para ser adquiridos por el Microcontrolador, ésta se envía a la interrupción externa

INT0. Para obtener la frecuencia se mide el retardo que existe entre dos cruces por cero consecutivos de la señal de entrada. Estos valores representan el periodo de la señal con lo cual se obtiene la frecuencia.

El cálculo del periodo se realiza utilizando el Timer1 del Microcontrolador, el cual es un Timer1 de 16 bits (65536 valores). El Timer1 se configura para desbordarse o reiniciarse cada 100 mS, esto con el fin de contar 10 veces la interrupción del Timer1 y así realizar una medición cada 1 segundo. Para configurar el Timer1 al valor deseado se utiliza la siguiente fórmula (Breijo, 2008):

$$T = T_{CM} \textit{ Prescaler} (65536 - TMR1) \quad (23)$$

Donde  $T_{CM}$  es el ciclo de máquina que se calcula mediante la fórmula:

$$T_{CM} = \frac{4}{f_{osc}} \quad (24)$$

Despejando la fórmula para TMR1

$$TMR1 = 65536 - \frac{T}{T_{CM} \textit{ Prescaler}} \quad (25)$$

Sustituyendo los valores:

$$T = 100 \text{ mS} = 0.1 \text{ S}$$

$$T_{CM} = 4 / f_{osc} = 4 / 20 \text{ MHz} = 200 \text{ nS}$$

$$\textit{ Prescaler} = 8$$

$$TMR1 = 65536 - (0.1 \text{ S} / (200 \text{ nS} * 8)) = 3036$$

Por lo tanto se establece el inicio del Timer1 en 3036.

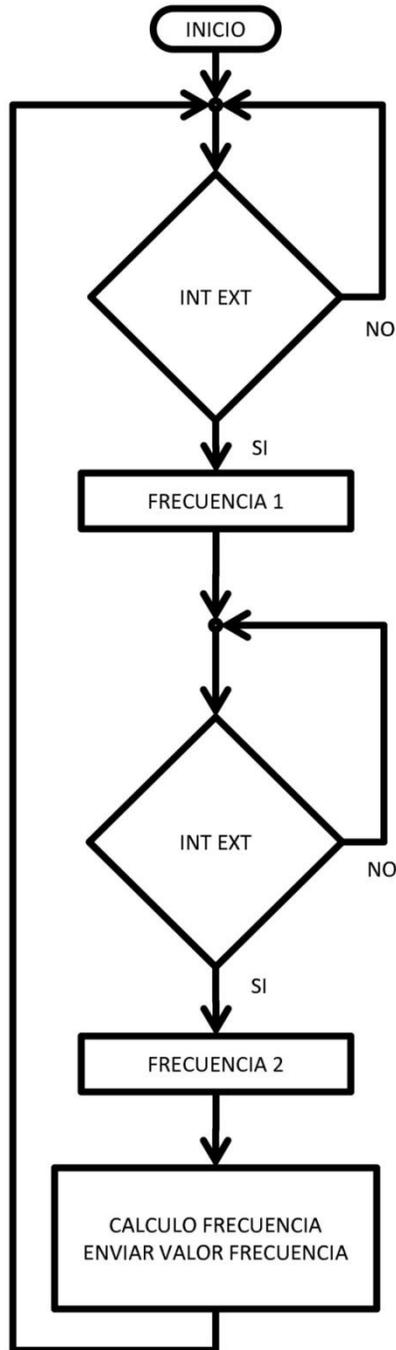


Figura 30. - Algoritmo para el cálculo de la frecuencia.

Quando se detecta el primer cruce por cero se guarda el valor del Timer1 en una variable llamada frec1 y en el siguiente cruce por cero se guarda el valor

del Timer1 en una segunda variable llamada frec2. Con la diferencia de estos valores se calcula el periodo en mS y la frecuencia.

$$dif = frec2 - frec1 \quad (26)$$

$$T = \frac{(dif)(100 \text{ mS})}{62500} \quad (27)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (28)$$

### 3.4 – Acondicionamiento y medición del Factor de Potencia.

Para la medición y cálculo del factor de potencia se utiliza el mismo circuito amplificador para medir la frecuencia, uno para amplificar la señal de voltaje y otro para amplificar la señal de corriente.

Una vez que las señales han sido amplificadas se envían a dos interrupciones externas del Microcontrolador, INT0 para la señal de voltaje e INT1 para la señal de corriente.

La medición del ángulo de fase se realiza de manera similar a la medición del periodo de la frecuencia, utilizando el Timer1 configurado para desbordarse cada 100 mS.

Cuando ocurre una interrupción debida a un cruce por cero en la señal de voltaje se guarda el valor del Timer en una variable llamada fp1. Después para la siguiente interrupción debida a un cruce por cero en la señal de corriente se guarda el valor del Timer en una segunda variable llamada fp2. La diferencia de estos dos valores es el ángulo de fase, el cual está en términos del contador del Timer1 por lo que se calcula el valor en mS.

$$dif = fp2 - fp1 \quad (29)$$

$$dif_{ms} = \frac{(dif)(100 \text{ mS})}{62500} \quad (30)$$

Después se obtiene el ángulo de fase en radianes. Teniendo en cuenta que el periodo de la frecuencia es igual a  $2\pi$ , se realiza el cálculo con la siguiente fórmula:

$$\varphi = \frac{dif_{ms} 2\pi}{T_{frec}} \quad (31)$$

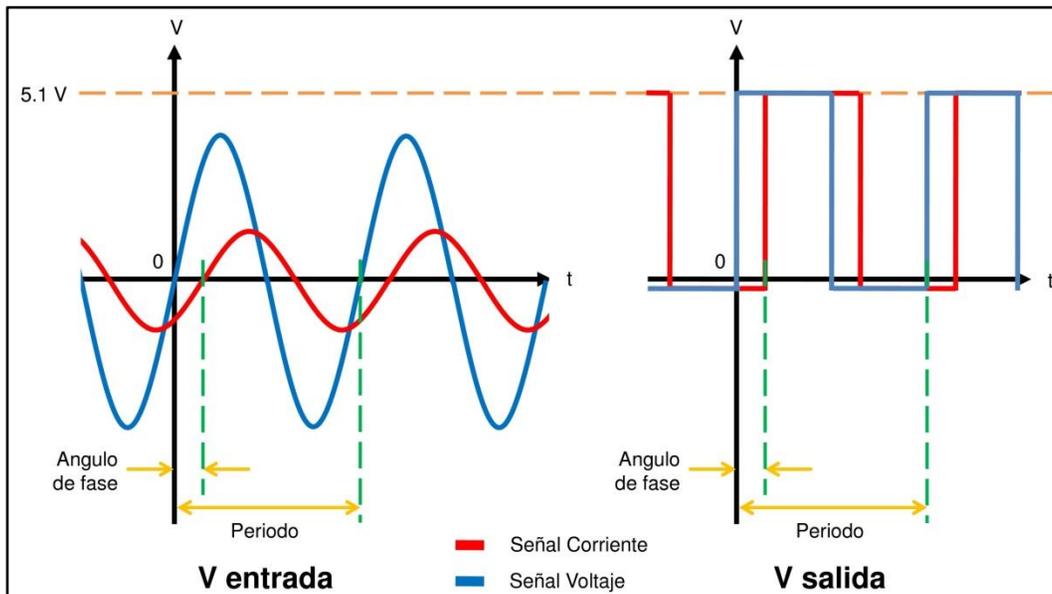


Figura 31. - Gráfica de voltaje y corriente amplificadas.

Finalmente se calcula el factor de potencia:

$$FP = \cos(\varphi) \quad (32)$$

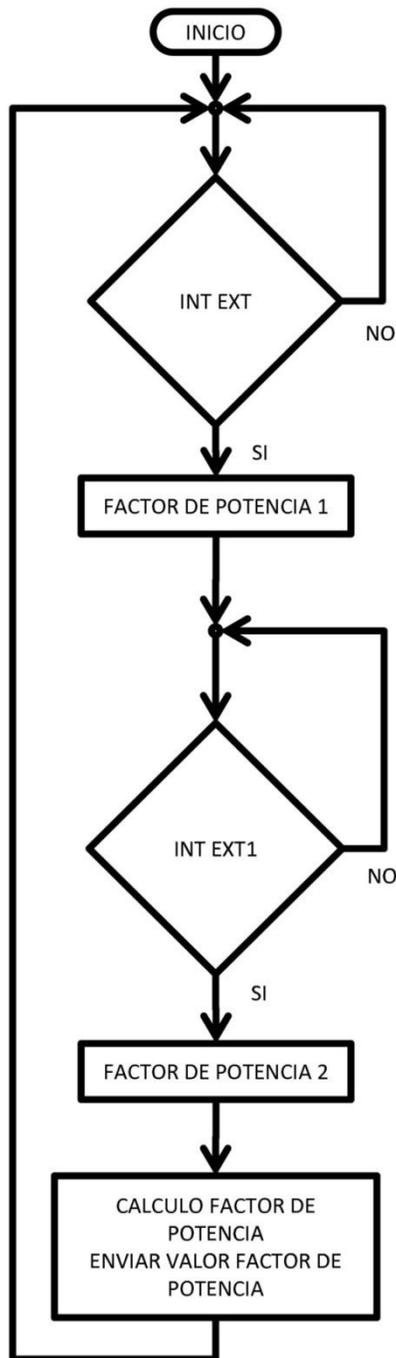


Figura 32. - Algoritmo para el cálculo del factor de potencia.

Primero se realizan las mediciones del periodo de la frecuencia y del ángulo de fase, para posteriormente realizar los cálculos haciendo primero el cálculo de la frecuencia y luego el cálculo del factor de potencia. Esto es porque para calcular el factor de potencia se necesita primero obtener el valor de la frecuencia.

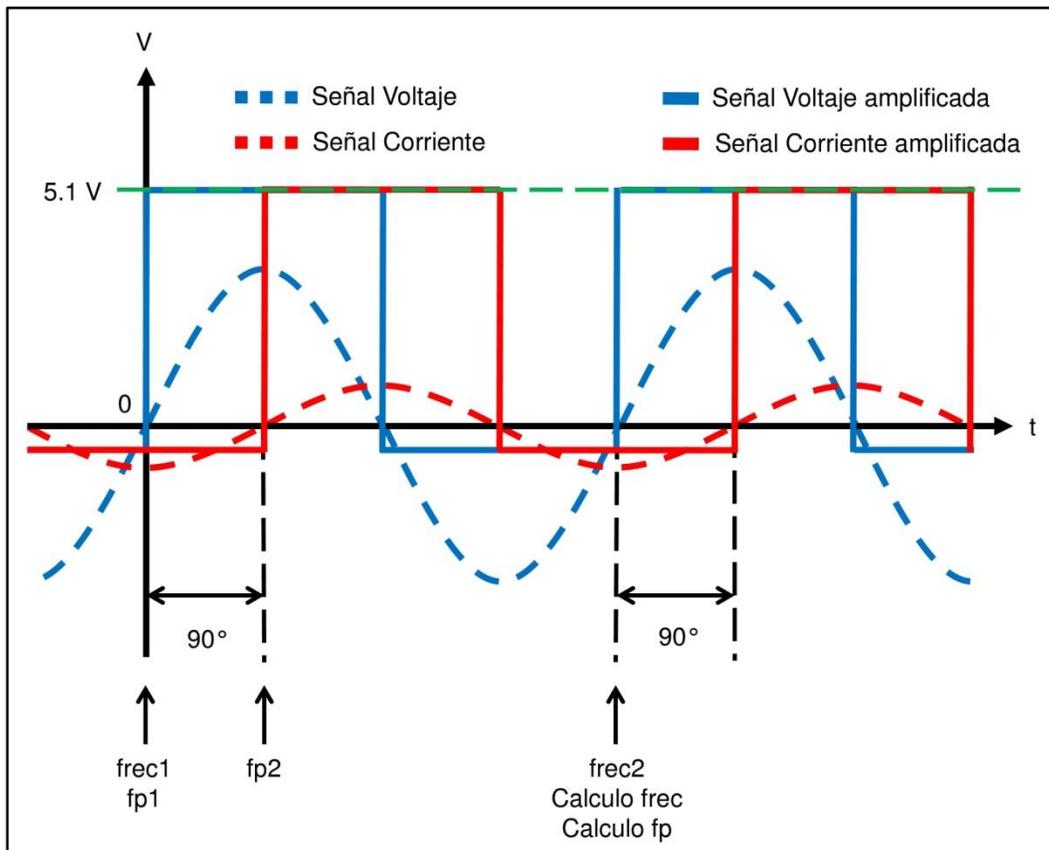


Figura 33. - cálculo de la frecuencia y del factor de potencia.

### 3.5 - Cálculo de potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente.

Para calcular los valores de potencia simplemente se sustituyen los valores previamente obtenidos de voltaje, corriente y el factor de potencia.

Primero se calcula la potencia aparente, que es simplemente el producto del voltaje por la corriente.

$$S = VI \quad (33)$$

Después se calcula la potencia activa, la cual es el producto del voltaje por la corriente por el factor de potencia.

$$P = VI \cos \varphi \quad (34)$$

Por último se calcula la potencia reactiva que es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la potencia activa y la potencia aparente.

$$Q = \sqrt{S^2 + P^2} \quad (35)$$

### 3.6 - Cálculo del consumo eléctrico.

Para poder obtener el valor en kW se divide por 1000 el valor de la potencia activa, es decir, si se tienen 2500 W divididos por 1000 esto es igual a 2.5 kW. La fórmula queda de esta manera:

$$\text{consumo} = \frac{kW}{1000} \quad (36)$$

### 3.7 – Elaboración de la interfaz de comunicación con Bluetooth.

La transmisión de datos entre el dispositivo móvil y el sistema de control que en este caso son un Smartphone Samsung Galaxy Ace y un Microcontrolador PIC18F4553 respectivamente se realiza mediante Bluetooth. El Smartphone ya cuenta con un modulo de Bluetooth, pero el Microcontrolador necesita un modulo externo para transmitir datos al dispositivo móvil.

El modulo utilizado es el BTM180 de la marca Rayson, el cual tiene las siguientes características:

- Bluetooth estándar versión 2.0.
- Bajo consumo de corriente.
- Soporta interfaces: USB, UART y PCM.
- Configuración por comandos AT.
- Alimentación de 3.3 o 1.8 V.
- Dimensiones: 25.0 x 14.5 x 2.2 mm.



Figura 34. - Modulo de Bluetooth BM180.

Los pines del modulo necesarios para poder realizar la comunicación son:

Cuadro 1. - Pines utilizados del modulo de Bluetooth.

# PIN	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
9	TX	Transmisión de datos
10	RX	Lectura de datos
14	VDD	Voltaje de alimentación
15	GND	Tierra
21	RESET	Reinicio

El modulo funciona con un voltaje de 3.3 V<sub>CD</sub> por lo que es necesario acondicionar las conexiones entre este y el Microcontrolador que utiliza voltajes de 5 V<sub>CD</sub> que pudieran dañar el modulo.

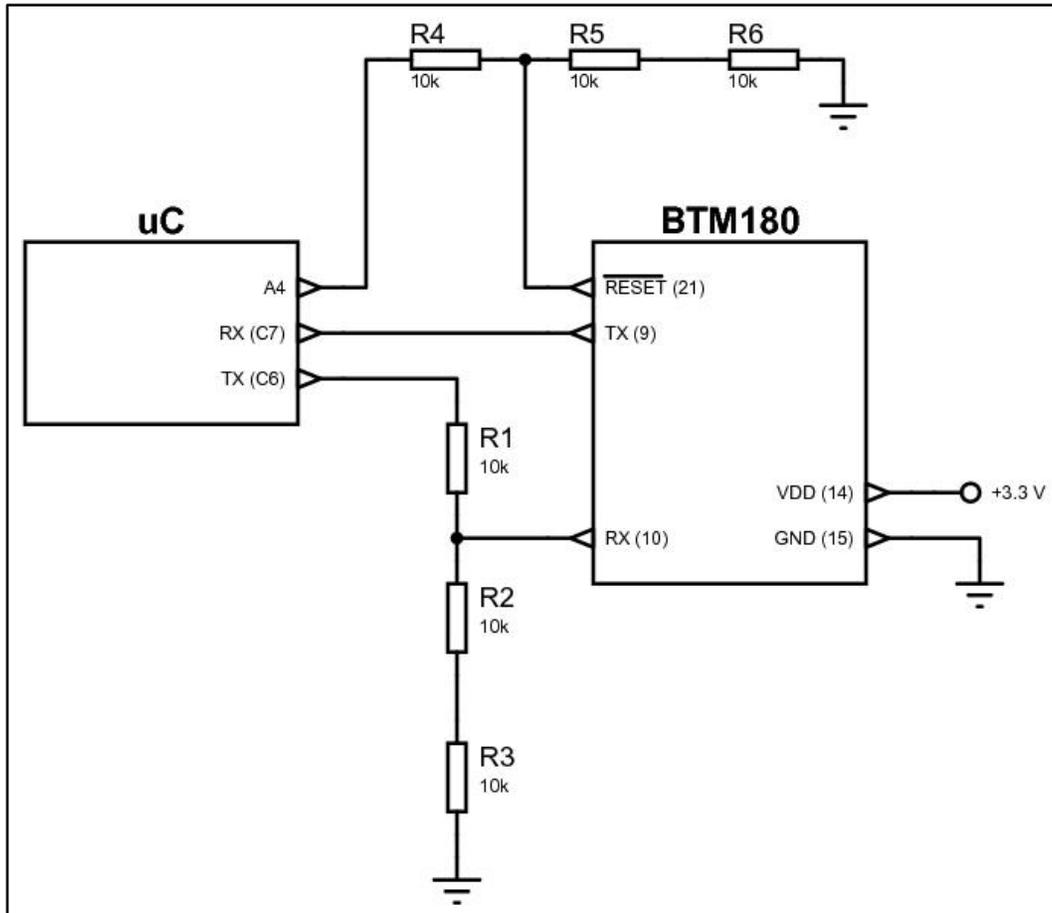


Figura 35. - Conexiones entre el Microcontrolador y el modulo de Bluetooth.

Para la transmisión de datos del Microcontrolador hacia el modulo se utiliza un divisor de voltaje (Boylestad, 2005) compuesto por 3 resistencias de 10 kΩ cada una para que el voltaje dividido sea de 3.3 V<sub>CD</sub> y así no dañar el modulo de Bluetooth. Para comprobar esto se utiliza la fórmula del divisor de voltaje.

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V \quad (37)$$

En este caso  $R_1$  son dos resistencias de  $10\text{ k}\Omega$  que están conectadas en serie y  $R_2$  es la tercera resistencia de  $10\text{ k}\Omega$ . Sustituyendo los valores de  $R_1 = 20\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$  y  $V = 5\text{ V}_{\text{CD}}$  se obtiene el voltaje  $V_1$ .

$$V_1 = (20\text{ k}\Omega / (20\text{ k}\Omega + 10\text{ k}\Omega)) 5\text{ V} = 3.333\text{ V}$$

Para poder comenzar con la transmisión de datos primero hay que configurar el modulo de Bluetooth. Esto se realiza mediante comandos AT (sección 7.1) enviados al modulo por medio de una PC utilizando el protocolo de comunicación RS232. Se configuran parámetros como el nombre del modulo, la contraseña para emparejar el modulo con el dispositivo móvil, la velocidad de transmisión, etc.

Los valores finales de configuración del modulo son:

- ATC=1, HARDWARE FLOW CONTROL (habilitar flujo de datos).
- ATD=0000-00-000000, NEVER SET BLUETOOTH ADDRESS (sin conexión automática).
- ATE=0, NEVER ECHO CHARACTERS (no regresar caracteres recibidos).
- ATH=1, DISCOVERABLE (habilitar modo visible).
- ATK=0, ONE STOP BIT (1 bit de stop).
- ATL=5, BAUD RATE is 115200 (velocidad de 115200 baudios).
- ATM=0, NONE PARITY\_BIT (sin bit de paridad).
- ATN=PM1-UAQ, LOCAL NAME (nombre del dispositivo = PM1-UAQ).
- ATO=0, ENABLE AUTO CONNECTING (habilitar autoconexión).
- ATP=1234, PIN CODE (código PIN = 1234).
- ATQ=0, SEND RESULT CODE (enviar código de resultado).
- ATR=1, SLAVE ROLE (modo esclavo).

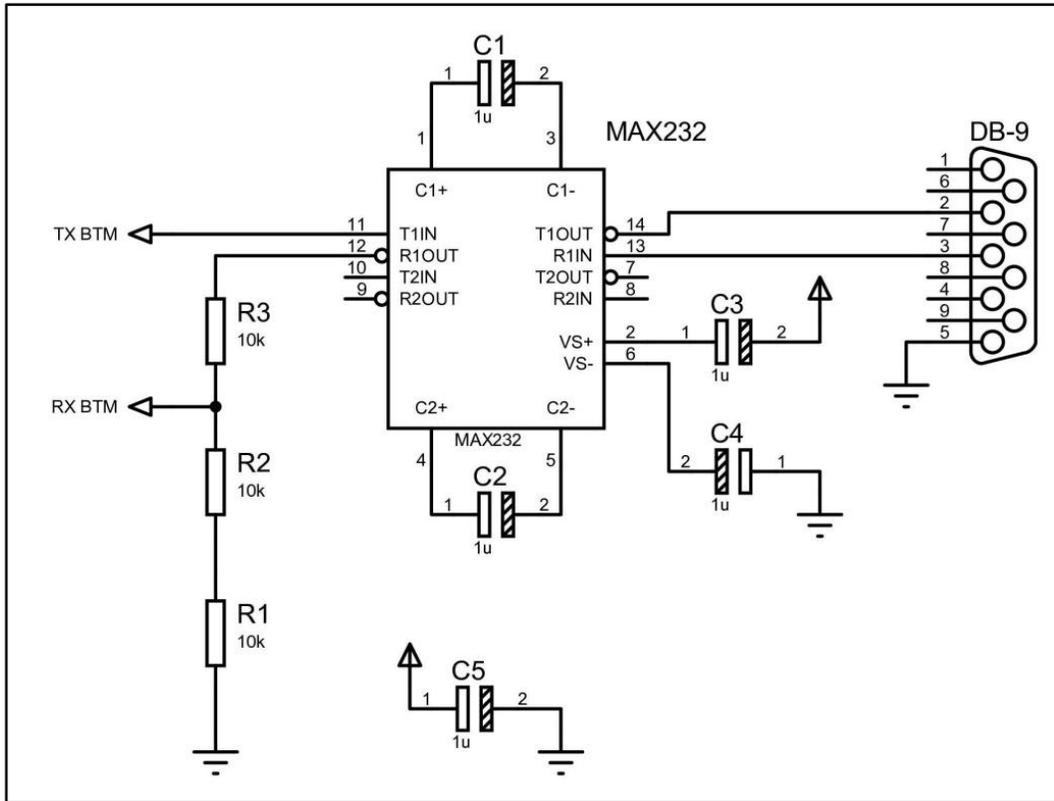


Figura 36. - Conexión entre el módulo de Bluetooth y la PC.

Finalmente se elabora un programa para Android que reciba los datos enviados por el Microcontrolador a través del módulo de Bluetooth y los muestre en la pantalla del Smartphone.

Este programa se realiza utilizando una herramienta creada por Google y administrada actualmente por el Tecnológico de Massachusetts (MIT) llamada "MIT App Inventor" (Massachusetts Institute of Technology, 2012) donde se pueden elaborar aplicaciones en Android de manera sencilla y sin tener muchos conocimientos de programación.



Figura 37. - Logotipo del MIT App Inventor.

La aplicación se ejecuta online en la página <http://appinventor.mit.edu/> y accedendo a ella con una cuenta de Google. Se compone en dos partes principalmente: una pantalla donde se observa cómo quedará la aplicación en el dispositivo y un editor de bloques donde se programa que acción realizarán todos los componentes agregados en la primera pantalla.

La aplicación en Android recibe los valores de corriente, voltaje, frecuencia y factor de potencia y calcula los valores de potencia aparente, potencia activa, potencia reactiva y consumo el kilo Watt hora (kWh) y los muestra en la pantalla del Smartphone.

La programación de la aplicación tiene ciertas limitantes respecto a la conexión y la activación del Bluetooth del dispositivo por lo que antes de acceder a la aplicación es necesario activar el Bluetooth del dispositivo y emparejar el modulo de Bluetooth. Esto se debe a que no existen características para activar el Bluetooth del dispositivo desde la aplicación creada en Android.

La aplicación funciona de la siguiente manera:

1. Se comprueba si se ha recibido un dato.
2. Se lee el dato recibido.
3. Si el dato es "i" se guardan los siguientes 5 datos en el valor de la corriente, 2 datos enteros, 1 punto decimal y 2 datos decimales para el valor máximo de la corriente que es de 50.00 A.
4. Si el dato es "v" se guardan los siguientes 5 datos en el valor del voltaje, 3 datos enteros, 1 punto decimal y 1 dato decimal para el valor máximo del voltaje que es de 140.0 V.

5. Si el dato es “f” se guardan los siguientes 5 datos en el valor de la frecuencia, 2 datos enteros, 1 punto decimal y 2 datos decimales para el valor máximo de la frecuencia que es de 99.99 Hz.
6. Si el dato es “p” se guardan los siguientes 6 datos en el valor de la corriente, 1 datos entero, 1 punto decimal y 3 datos decimales para el valor máximo del factor de potencia que es de 1.000.
7. Después se calculan los valores de potencia activa, potencia aparente, potencia reactiva y el consumo eléctrico.
8. Finalmente se muestran todos los valores en la pantalla.



Figura 38. - Aplicación en Android

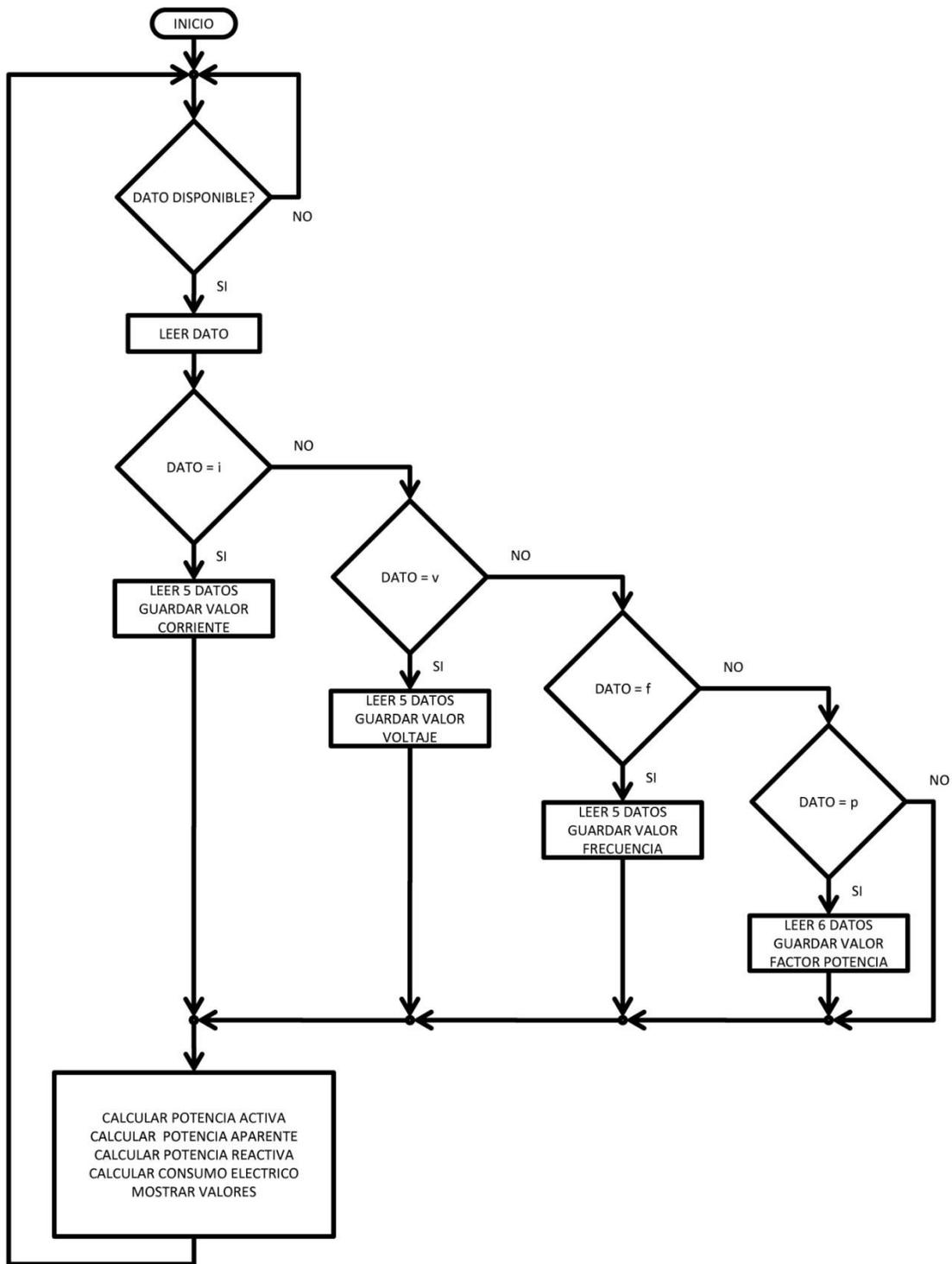


Figura 39. - Algoritmo de la aplicación en Android.

### 3.8 – Elaboración del programa de control.

El programa de control se realizó utilizando un Microcontrolador PIC18F4553, el cual cuenta con las características necesarias para soportar las necesidades del proyecto.

Cuadro 2. - Características generales del PIC18F4553.

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	12-Bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EUSART	Comp.	Timers 8/16-Bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I <sup>2</sup> C™			
PIC18F2458	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2553	32K	16384											
PIC18F4458	24K	12288			35	13	1/1	Yes					
PIC18F4553	32K	16384											

Las características del Microcontrolador son:

- Convertidor analógico digital (ADC) de 12 bits.
- Timer de 16 bits.
- Transmisión de datos por rs232.
- Modulo CCP configurable como PWM
- 35 entradas/salidas.

Primero se calcula la resolución del Microcontrolador (mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida).el cálculo se realiza con la siguiente fórmula (Breijo, 2008):

$$resolucion = \frac{V_{in}}{2^n - 1} \quad (38)$$

Donde n es el número de bits del ADC.

Entonces para  $V_{in} = 5 \text{ V}$  y  $n = 12$  tenemos:

$$V_{in} = 5 \text{ V}$$

$$n = 12$$

$$\text{resolución} = 5 \text{ V} / (2^{12} - 1) = 5 \text{ V} / (4096 - 1) = 0.001221 \text{ V} = 1.221 \text{ mV}$$

Esto quiere decir que para que exista un cambio en el resultado de la medición debe de haber un cambio en el voltaje de entrada de 1.221 mV.

Después se construyo un código para leer y enviar al dispositivo los valores de voltaje y corriente cada 1 segundo. El código utiliza el TIMER1 del Microcontrolador configurado para desbordarse cada 5 mS con el fin de obtener 100 valores y posteriormente calcular un promedio o media aritmética, con el fin de obtener el resultado más representativo de la medición.

Sustituyendo los valores para calcular el valor inicial del Timer1:

$$T = 5 \text{ mS} = 0.005 \text{ S}$$

$$T_{CM} = 4 / f_{osc} = 4 / 20 \text{ MHz} = 200 \text{ nS}$$

$$\text{Prescaler} = 1$$

$$TMR1 = 65536 - (0.005 \text{ S} / (200 \text{ nS} * 1)) = 40536$$

Por lo tanto se establece el inicio del Timer1 en 40536.

El promedio se calcula a partir de la suma de todos los valores dividida entre la cantidad de valores, que en este caso son 100.

$$\bar{x} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} a_i = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_{100}}{100} \quad (39)$$

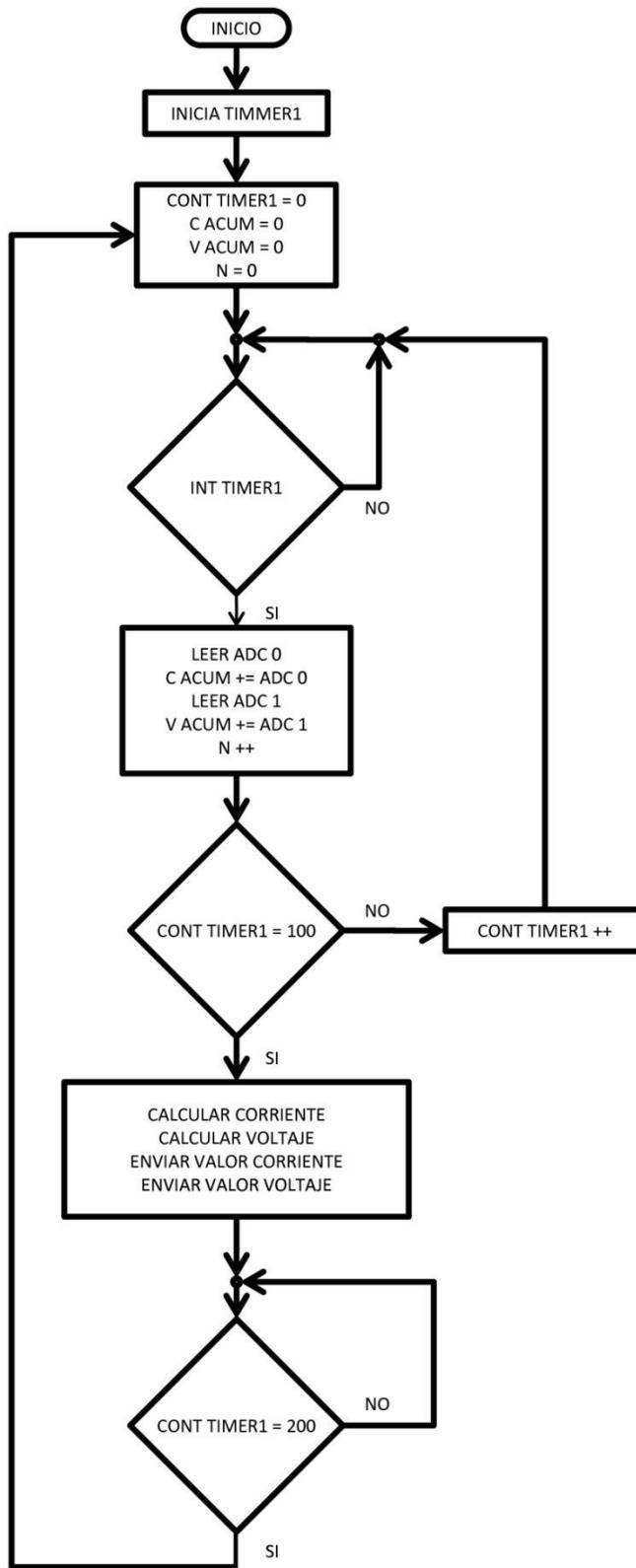


Figura 40. - Algoritmo para la medición del voltaje y la corriente.

Posteriormente se elaboró un código que mide y calcula los valores de frecuencia y factor de potencia. Se utilizan las interrupciones externas INT0 e INT1 para detectar el cruce por cero de las señales de voltaje y corriente respectivamente.

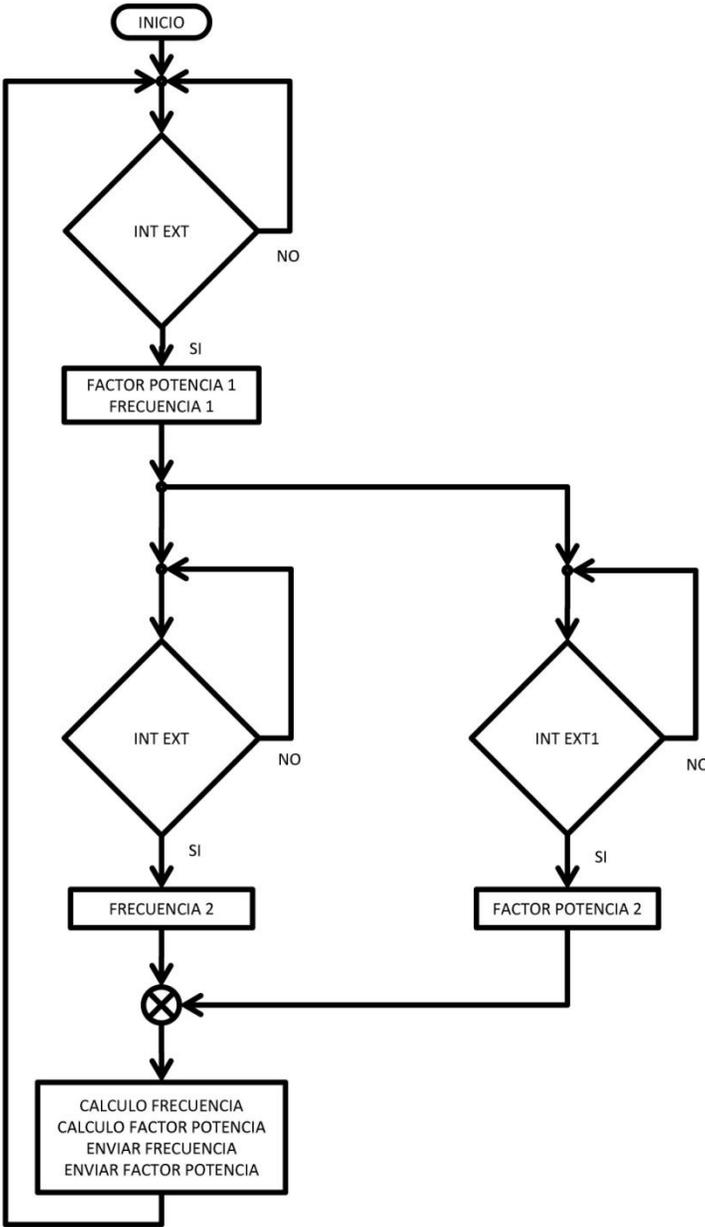


Figura 41. - Algoritmo para el cálculo de la frecuencia y del factor de potencia.

Se utilizan dos Microcontroladores, el PIC18f4553 y el PIC18F2550 con las siguientes configuraciones:

- PIC18F4553.
  - Rol de maestro.
  - Medición de corriente (ADC0) y voltaje (ADC1).
  - Cálculo de potencia activa, potencia aparente, potencia reactiva y consumo eléctrico.
  - Control de la LCD16x2.
  - Control del PIC18F2550.
  - Enviar los valores de las mediciones al dispositivo móvil.
  
- El PIC18f2550.
  - Rol de esclavo.
  - Medición de frecuencia y de factor de potencia.
  - Enviar los valores de las mediciones al PIC18F4553 por RS232.

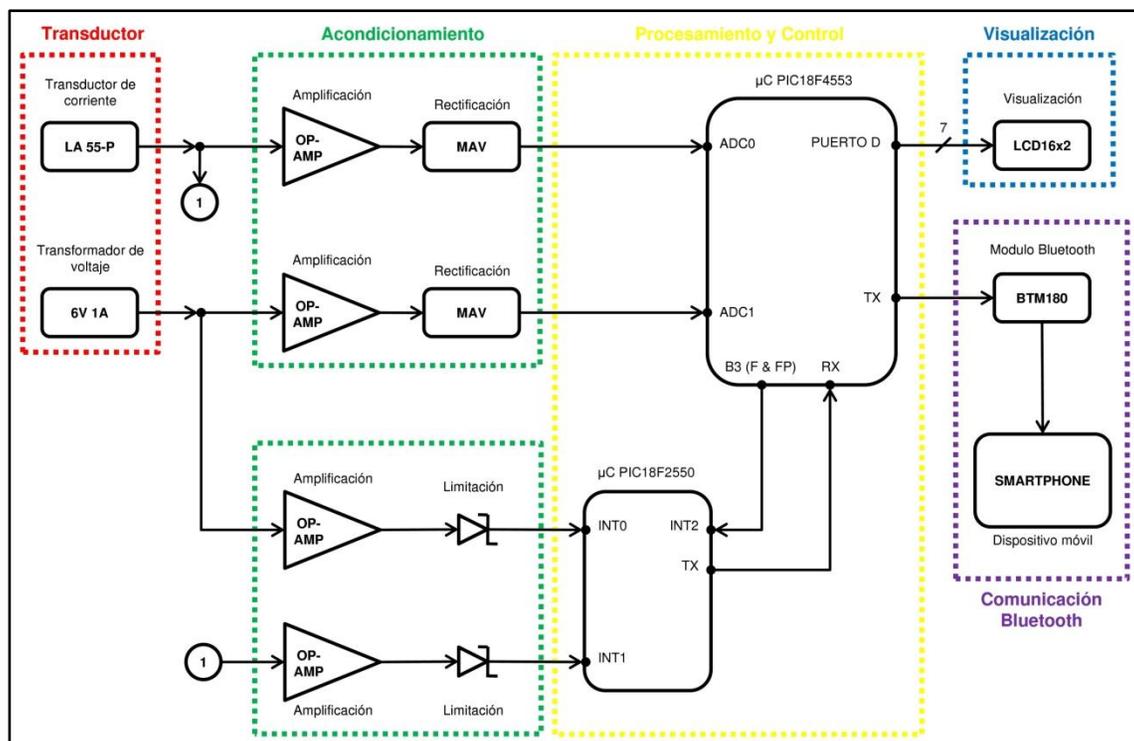


Figura 42. - Diagrama de bloques del sistema.

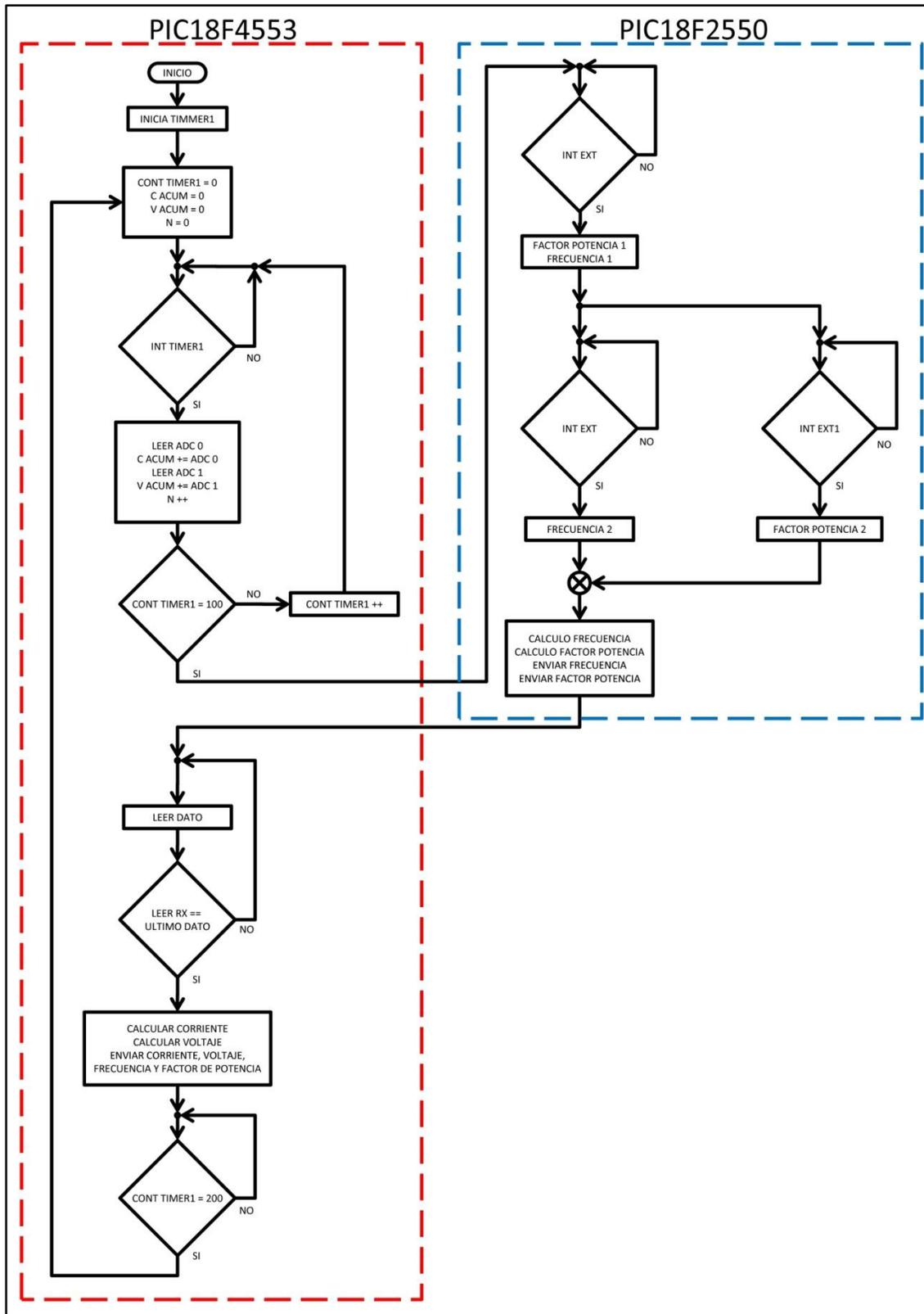


Figura 43. - Algoritmo general del sistema.

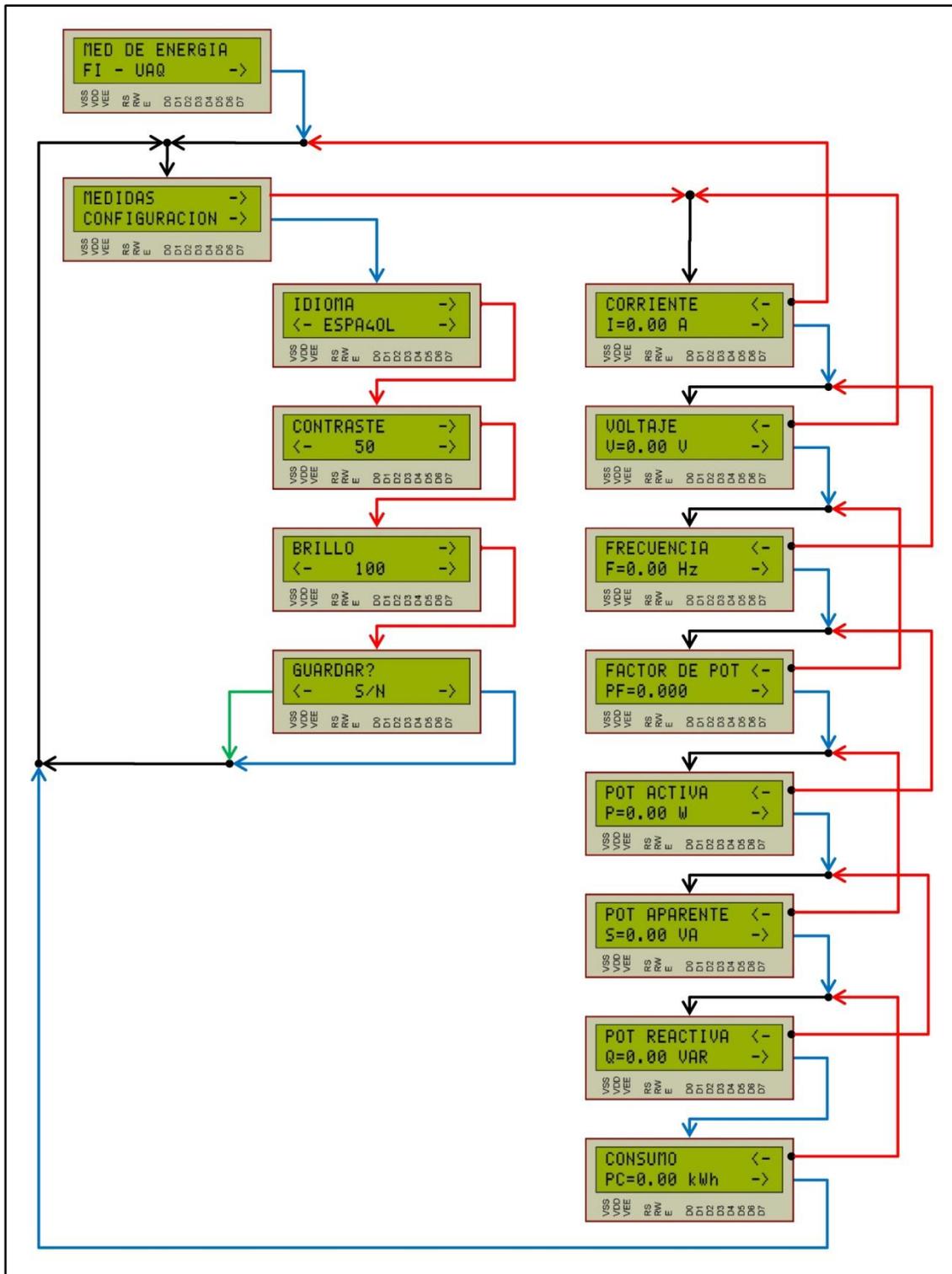


Figura 44. - Secuencia de las pantallas mostradas en la LCD16x2.

## IV - RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 – Construcción de circuitos.

Primero se construyeron tanto el circuito amplificador-rectificador para las mediciones de corriente y voltaje como el circuito amplificador-limitador para las mediciones de frecuencia y factor de potencia.

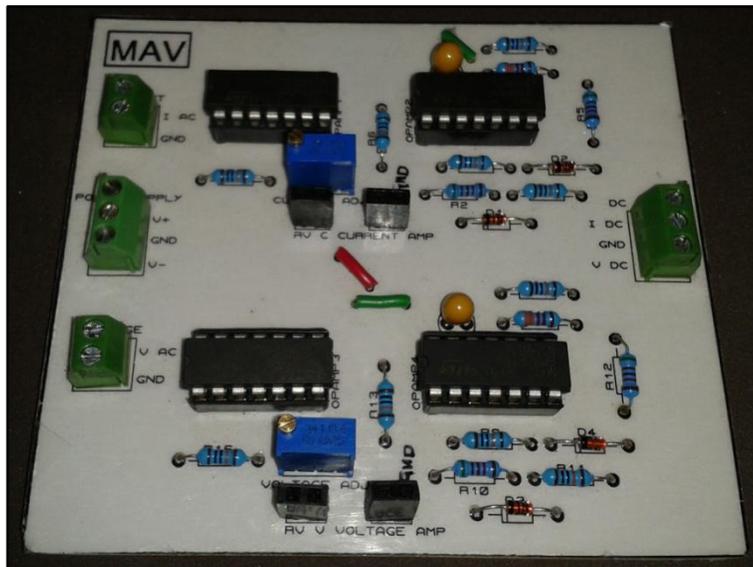


Figura 45. - PCB Circuito MAV.

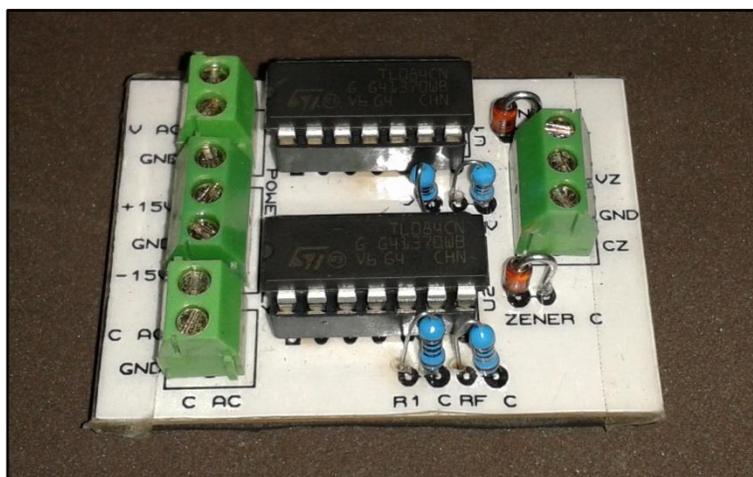


Figura 46. - PCB Circuito amplificador de ganancia 1000.

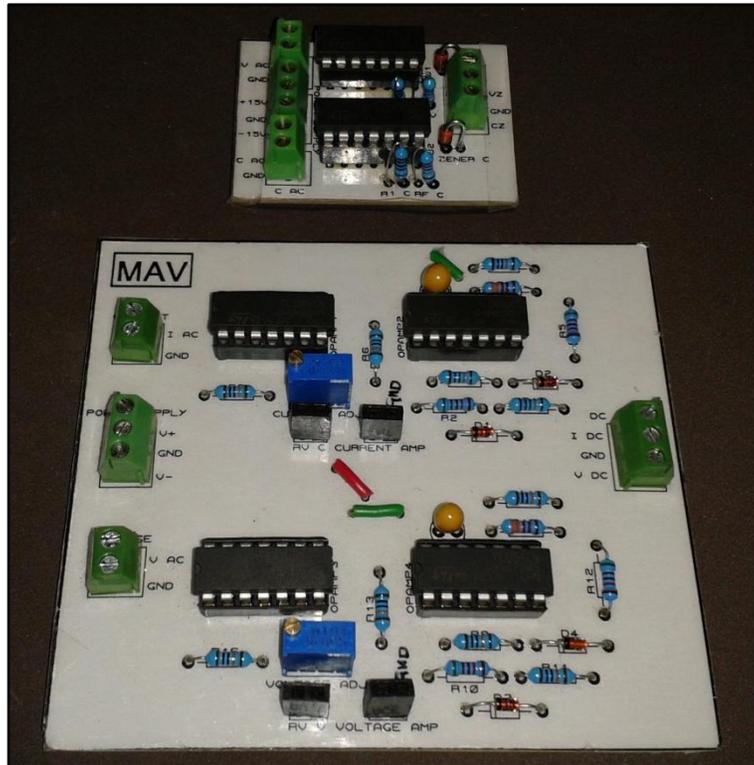


Figura 47. - PCB de los dos circuitos.

Se utilizaron amplificadores operacionales (OP-AMP) TL084 que cuentan con las siguientes características:

- Bajo consumo de energía.
- baja corriente de Offset
- Salida con protección contra cortocircuitos
- Baja distorsión armónica.
- Alta impedancia de entrada.
- Además de ser económico y fácil de conseguir.

Posteriormente se comprobó el funcionamiento tanto de los circuitos como de los códigos con un PIC18F2550 utilizado en una tarjeta de prácticas desarrollada en la misma facultad de ingeniería.

Esta tarjeta cuenta con varios periféricos que facilitan las pruebas del proyecto tales como potenciómetros, botones, conector DB9, pantalla LCD16x2, salida de 3.3 V<sub>CD</sub>, entre otros.

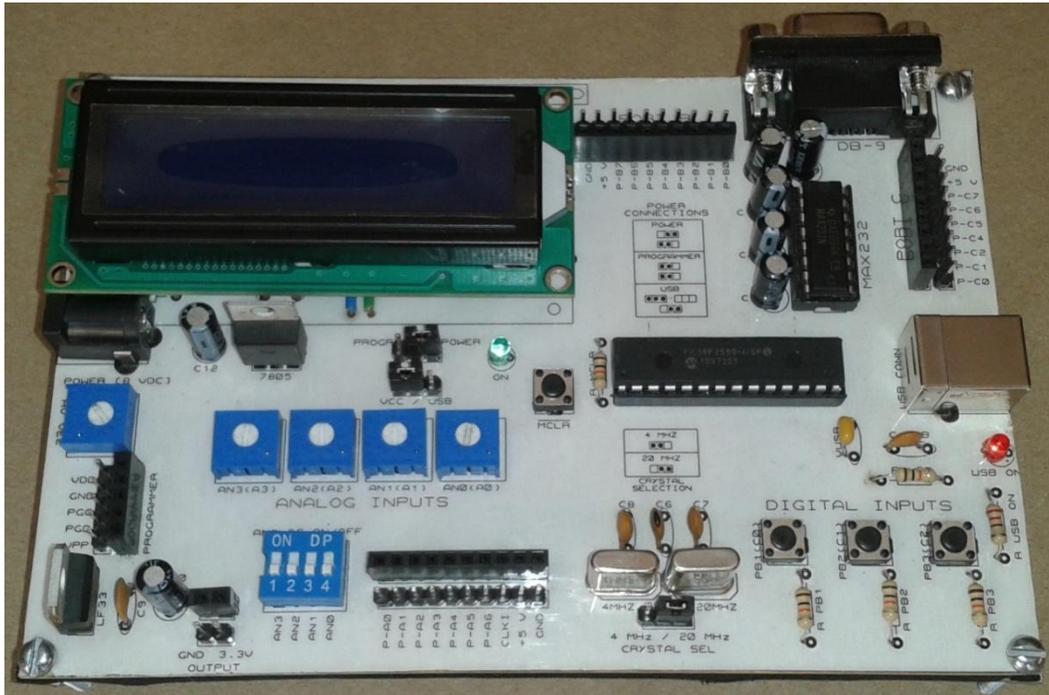


Figura 48. - Tarjeta de pruebas con PIC18F2550.

#### 4.2 - Medición con generador de funciones.

Las primeras mediciones se realizaron utilizando un generador de funciones de dos canales para simular las señales de voltaje y corriente que se obtienen del transformador y del transductor de corriente. Con la ventaja de que se puede modificar la frecuencia de las señales y el ángulo de fase entre ellas.

Se tomaron 50 mediciones para 5 valores diferentes del voltaje de salida del generador, que simulan 5 valores diferentes de voltaje y corriente alterna.

Los valores fueron:

1. Voltaje mínimo. CH1 = 50 m  $V_{CA}$ , CH2 = 50 m  $V_{CA}$ .
2. CH1 = 1  $V_{CA}$ , CH2 = 1.25  $V_{CA}$ .
3. CH1 = 2  $V_{CA}$ , CH2 = 2.5  $V_{CA}$ .
4. CH1 = 3  $V_{CA}$ , CH2 = 3.75  $V_{CA}$ .
5. CH1 = 4  $V_{CA}$ , CH2 = 5  $V_{CA}$ .

Cuadro 3. - Valores representativos del generador de funciones.

Señal	Vout generador	Vout amplificador	Vout MAV	Medición PIC
Voltaje (CH1)	0 - 4 $V_{CA}$	0 - 7.854 $V_{CA}$	0 - 5 $V_{CD}$	0 - 140 $V_{CA}$
Corriente (CH2)	0 - 5 $V_{CA}$	0 - 7.854 $V_{CA}$	0 - 5 $V_{CD}$	0 - 50 $A_{CA}$

Posteriormente se tomaron 50 mediciones para 5 valores diferentes de frecuencia y ángulo de fase de las dos señales. Los valores fueron:

1. 20 Hz.
2. 50 Hz.
3. 60 Hz.
4. 100Hz.
5. 200 Hz

Al variar la frecuencia de las señales el generador proporcionaba un valor aleatorio en el ángulo de fase, por lo que se tomó ese valor sin modificarlo.

Cuadro 4. - Corriente y voltaje con generador de funciones.

		calculado	media	Dif	mínimo	máximo	rango
1	Corriente (A)	0.33	0.20	0.13	0.15	0.39	0.25
	Voltaje (V)	1.26	0.78	0.48	0.55	1.23	0.68
2	Corriente (A)	12.42	12.30	0.12	12.17	12.46	0.29
	Voltaje (V)	34.94	34.36	0.59	34.07	34.76	0.69
3	Corriente (A)	24.82	24.79	0.03	24.63	24.87	0.24
	Voltaje (V)	69.83	69.35	0.48	68.83	69.79	0.96
4	Corriente (A)	37.40	37.29	0.11	37.19	37.43	0.24
	Voltaje (V)	104.72	104.16	0.56	103.80	104.50	0.70
5	Corriente (A)	50.00	49.89	0.11	49.75	49.95	0.20
	Voltaje (V)	140.00	139.34	0.66	139.00	139.50	0.50

Cuadro 5. - Frecuencia y FP con generador de funciones.

		calculado	media	Dif	mínimo	máximo	rango
1	Frecuencia (Hz)	19.99	20.00	-0.01	20.00	20.00	0.00
	FP	0.999	0.999	0.00	0.999	0.999	0.000
2	Frecuencia (Hz)	50.00	50.00	0.00	50.00	50.01	0.01
	FP	0.695	0.694	0.00	0.693	0.694	0.001
3	Frecuencia (Hz)	60.00	60.00	0.00	60.00	60.01	0.01
	FP	-0.530	-0.533	0.00	-0.533	-0.532	0.001
4	Frecuencia (Hz)	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	0.00
	FP	-1.000	-0.999	0.00	-0.999	-0.999	0.000
5	Frecuencia (Hz)	200.00	200.08	-0.08	200.00	200.10	0.10
	FP	-0.809	-0.812	0.00	-0.813	-0.811	0.002

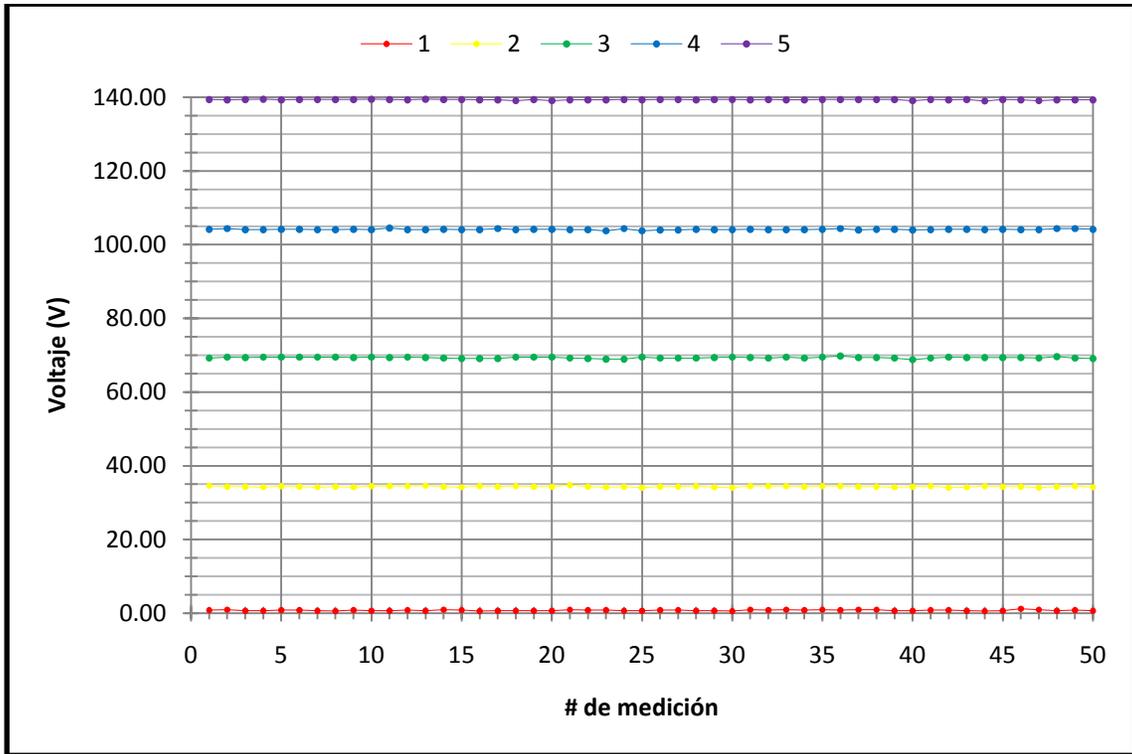


Figura 49. - Mediciones de voltaje (CH0) con generador de funciones.

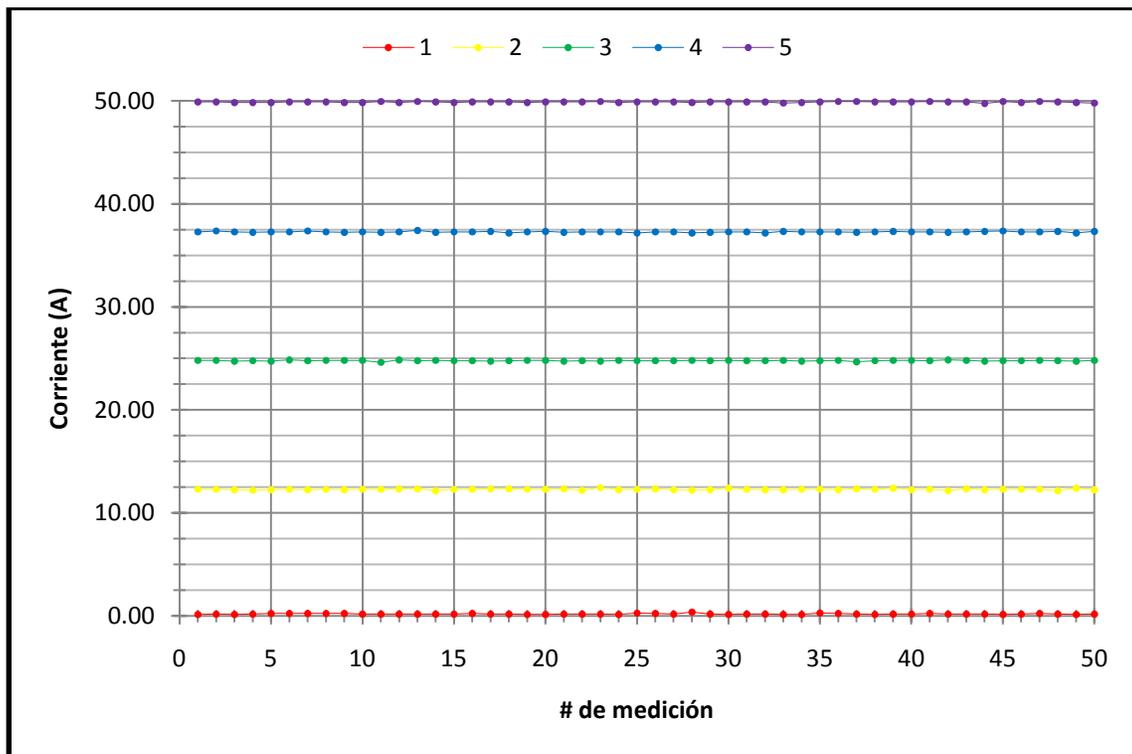


Figura 50. - Mediciones de corriente (CH1) con generador de funciones.

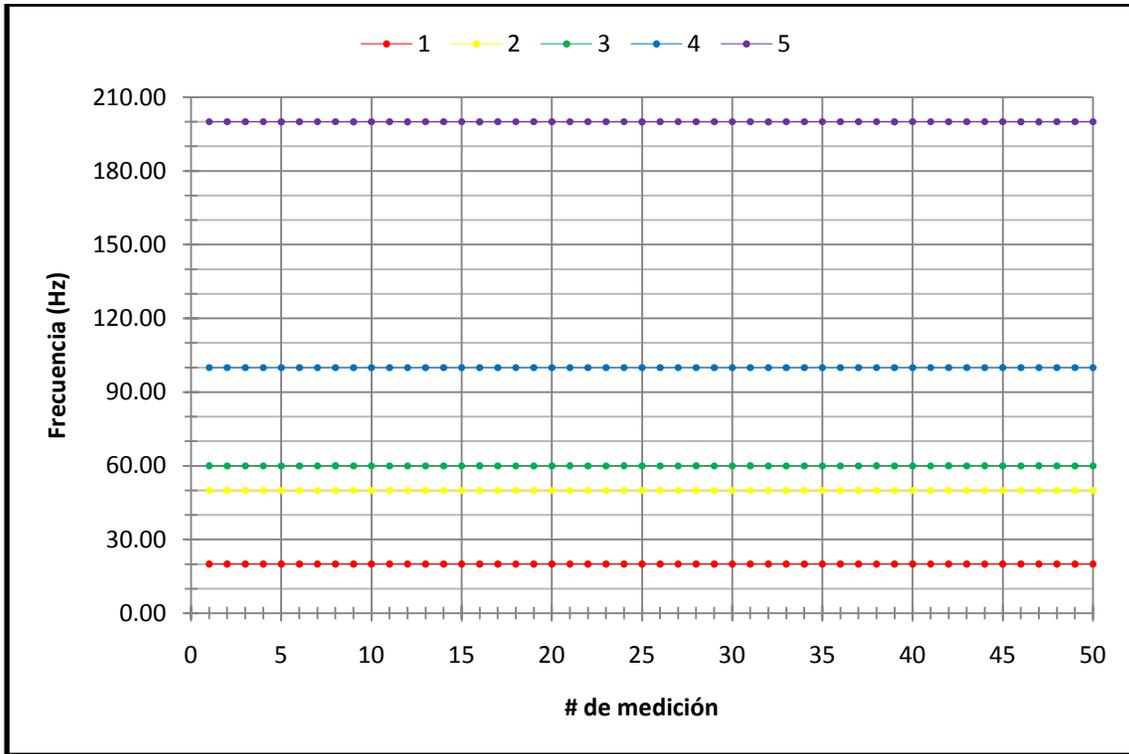


Figura 51. - Mediciones de frecuencia con generador de funciones.

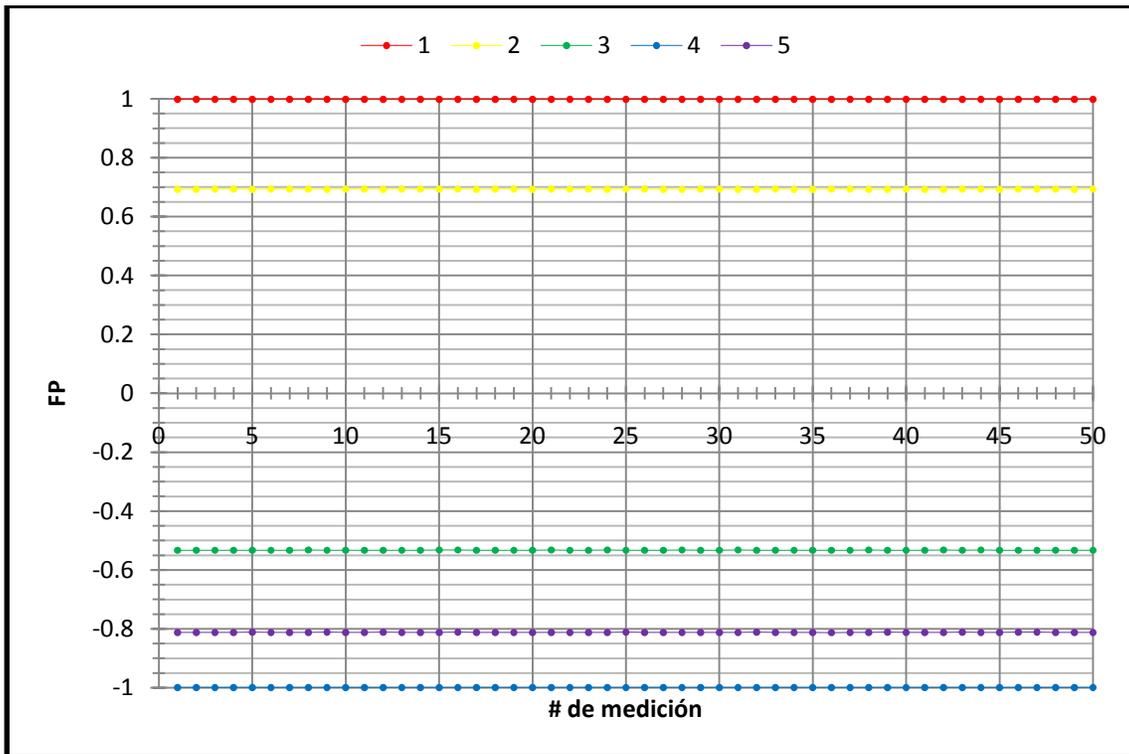


Figura 52. - Mediciones de FP con factor de funciones.

Los resultados muestran que para las mediciones de la frecuencia y el factor de potencia existe una diferencia muy pequeña entre los valores calculados y los valores medidos

Por otro lado existe una diferencia entre los valores medidos y calculados del voltaje y la corriente que es consistente en todas las mediciones. Esta diferencia se considera también pequeña y se debe a una tensión de offset que altera la referencia de la medición haciéndola más pequeña.

#### 4.3 – Medición con carga resistiva.

Se realizaron mediciones con una carga resistiva conectada a una red eléctrica alimentada por un Variac con un rango de 0-140  $V_{CA}$ . Se analizaron 100 mediciones para 5 valores diferentes del voltaje de salida del Variac, estos valores fueron:

1. Voltaje mínimo de salida del Variac.
2. 35  $V_{CA}$ .
3. 70  $V_{CA}$ .
4. 105  $V_{CA}$ .
5. 140  $V_{CA}$ .

Con ayuda de Excel se calculó la media, valor mínimo, valor máximo y rango de las 100 mediciones para cada valor de voltaje. El rango indica los valores máximo y mínimo que tomaron las mediciones.

Cuadro 6. - Rango de los valores de corriente y voltaje con carga resistiva.

		calculado	media	Dif	mínimo	máximo	rango
<b>Mínimo</b>	<b>Corriente (A)</b>	0.14	0.34	-0.20	0.27	0.40	0.13
	<b>Voltaje (V)</b>	4.66	4.99	-0.33	4.75	5.23	0.48
<b>35 V</b>	<b>Corriente (A)</b>	1.35	1.54	-0.19	1.47	1.60	0.13
	<b>Voltaje (V)</b>	34.89	35.17	-0.28	34.76	35.48	0.72
<b>70 V</b>	<b>Corriente (A)</b>	2.70	2.87	-0.17	2.80	2.94	0.15
	<b>Voltaje (V)</b>	70.06	70.11	-0.06	69.77	70.49	0.72
<b>105 V</b>	<b>Corriente (A)</b>	3.99	4.12	-0.13	4.05	4.19	0.15
	<b>Voltaje (V)</b>	105.42	105.11	0.31	104.77	105.49	0.72
<b>140 V</b>	<b>Corriente (A)</b>	5.23	5.39	-0.16	5.32	5.48	0.16
	<b>Voltaje (V)</b>	139.44	139.31	0.13	138.70	139.90	1.20

Cuadro 7. - Rango de los valores de frecuencia y FP con carga resistiva.

		observado	media	Dif	mínimo	máximo	rango
<b>Mínimo</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	60.01	60.01	0.00	59.98	60.06	0.08
	<b>FP</b>	0.927	0.914	0.01	0.911	0.918	0.007
<b>35 V</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	60.01	60.01	0.00	59.97	60.04	0.07
	<b>FP</b>	0.997	0.997	0.00	0.996	0.997	0.001
<b>70 V</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	60.02	60.02	0.00	59.97	60.07	0.10
	<b>FP</b>	0.998	0.998	0.00	0.997	0.998	0.001
<b>105 V</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	59.98	60.02	-0.04	59.97	60.07	0.10
	<b>FP</b>	0.997	0.998	0.00	0.997	0.998	0.001
<b>140 V</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	59.96	60.01	-0.05	59.93	60.04	0.11
	<b>FP</b>	0.994	0.993	0.00	0.993	0.994	0.001

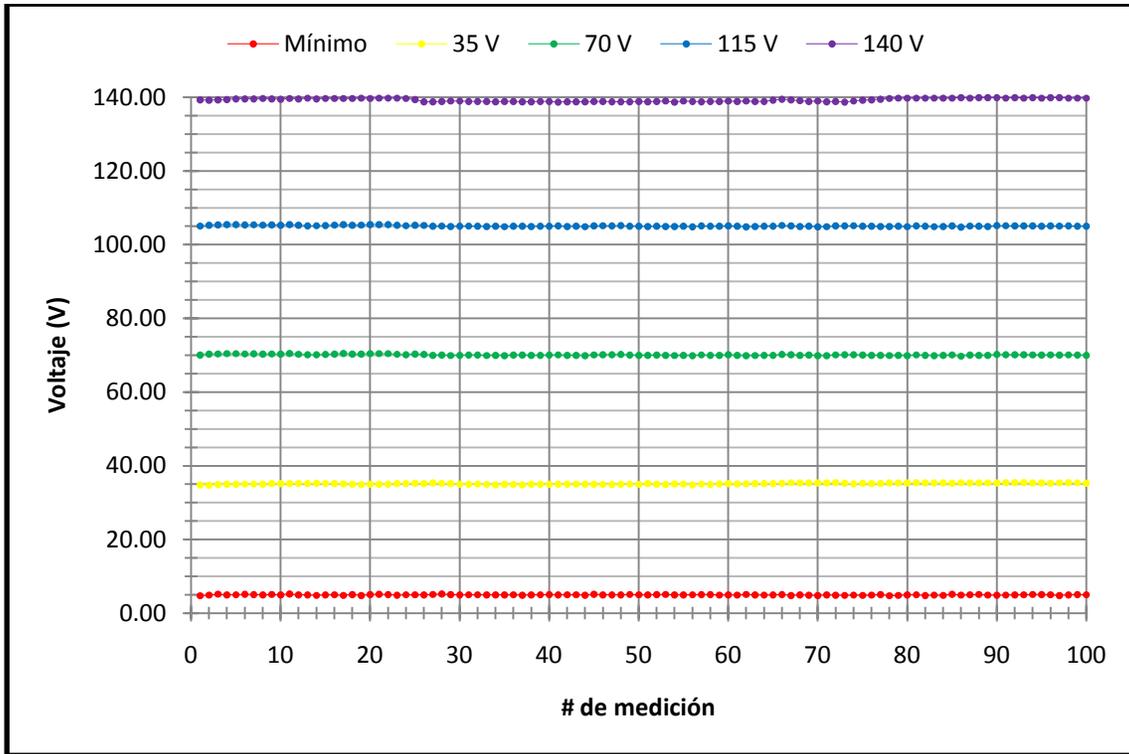


Figura 53. - Mediciones de voltaje con carga resistiva.

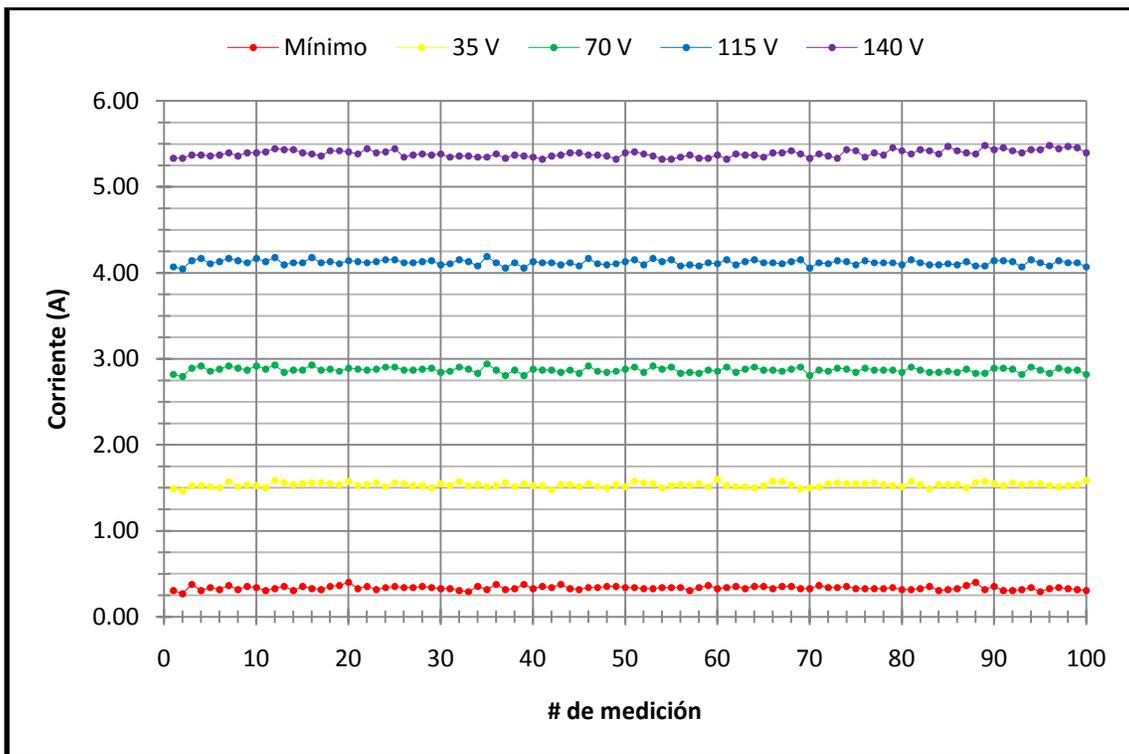


Figura 54. - Mediciones de corriente con carga resistiva.

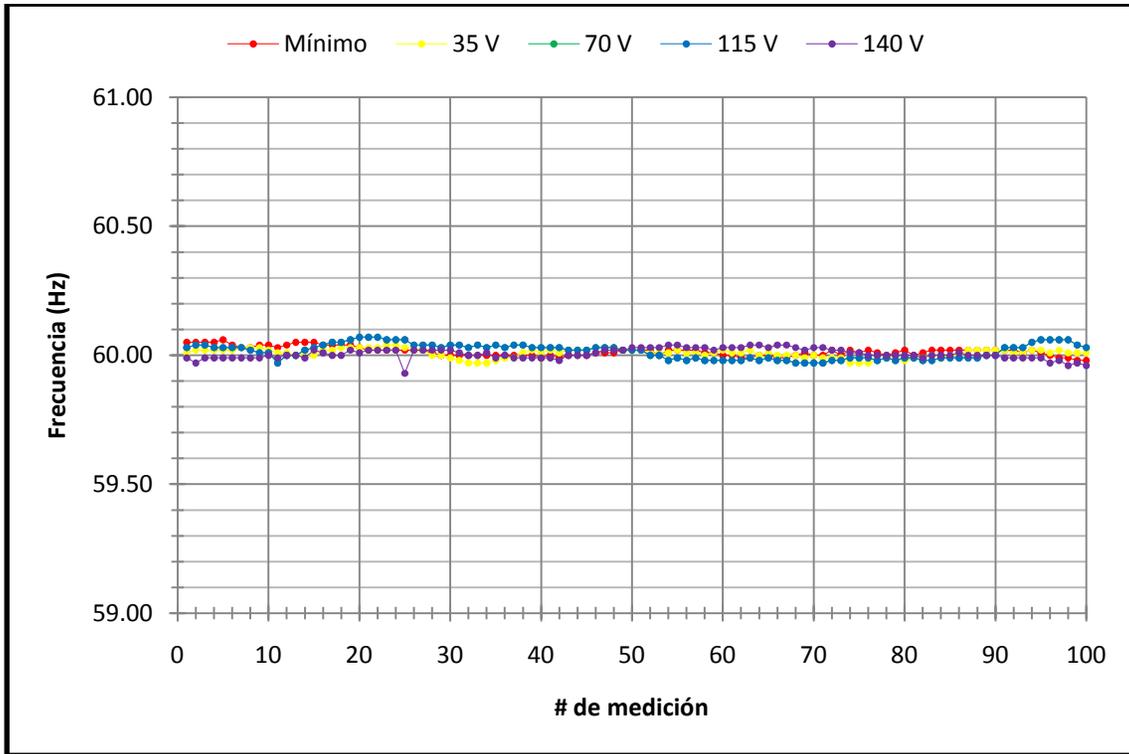


Figura 55. - Mediciones de frecuencia con carga resistiva.

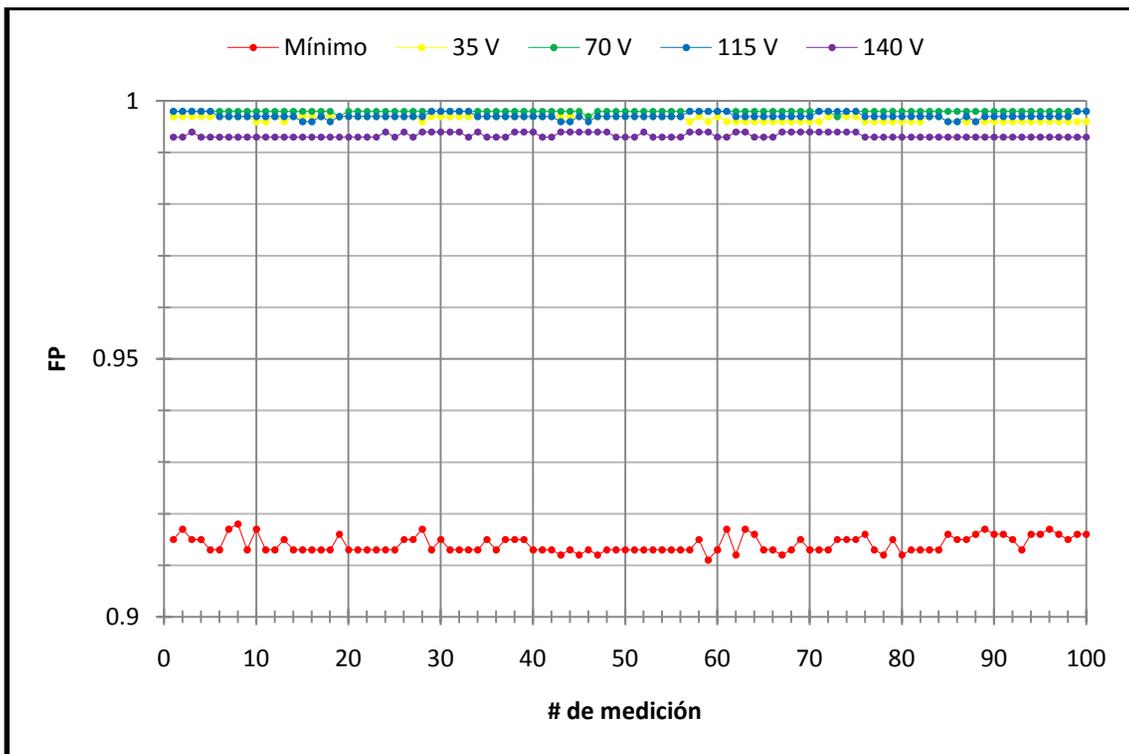


Figura 56. - Mediciones de FP con carga resistiva.

También se calculó el coeficiente de correlación que existe entre el voltaje y la corriente. Como la carga resistiva que se conectó a la red es fija, la correlación entre voltaje y corriente es lineal, es decir, para cada valor de voltaje existe un valor de corriente que es proporcional al valor de la resistencia.

Cuadro 8. - Coeficiente de correlación con carga resistiva.

	Calculado		Medido	
	Voltaje (V)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Corriente (A)
<b>Mínimo</b>	4.66	0.14	4.99	0.34
<b>35 V</b>	34.89	1.35	35.17	1.54
<b>70 V</b>	70.06	2.70	70.11	2.87
<b>105 V</b>	105.42	3.99	105.11	4.12
<b>140 V</b>	139.44	5.23	139.31	5.39
<b>r</b>	0.999804		0.999821	

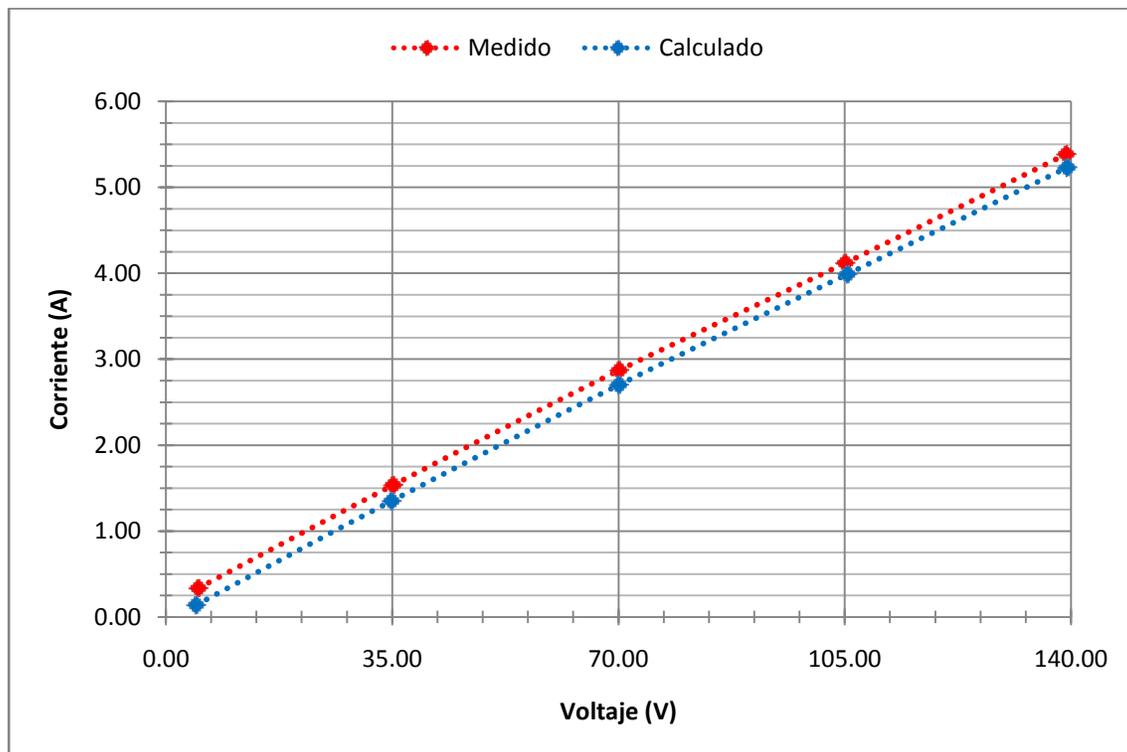


Figura 57. - Gráfica del coeficiente de correlación con carga resistiva.

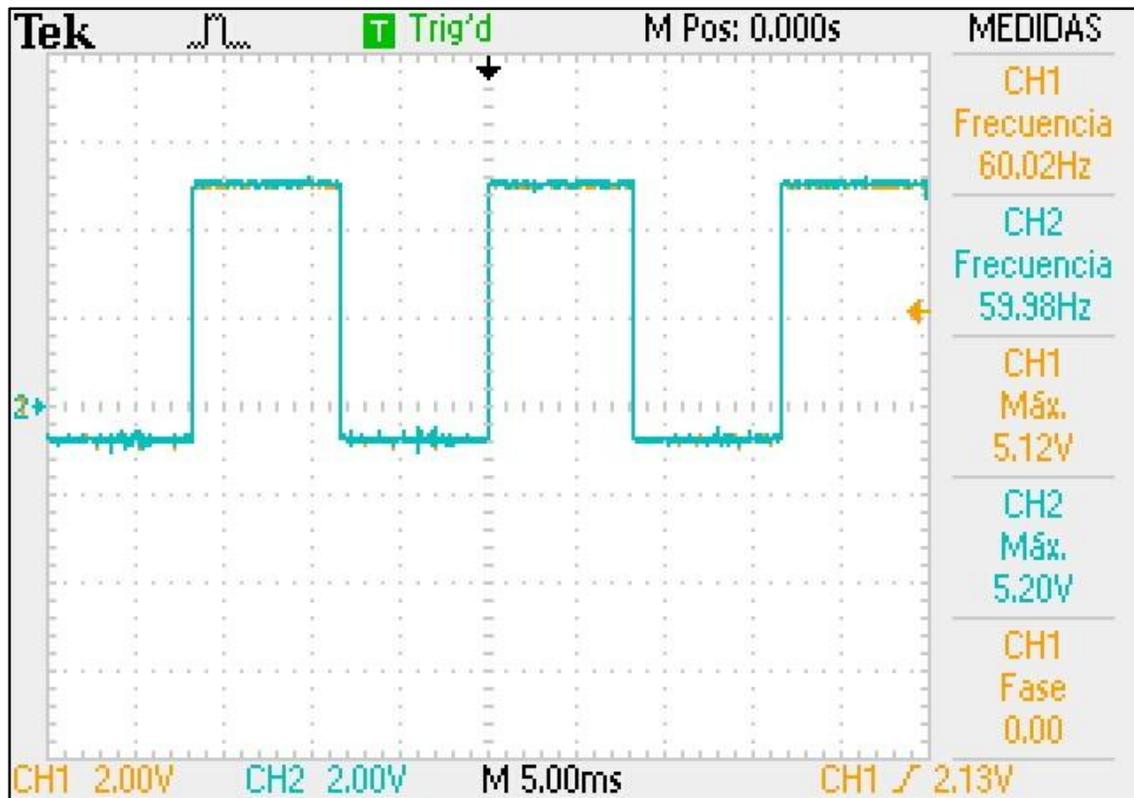


Figura 58. - Señales acondicionadas con carga resistiva.

De manera similar al análisis de las mediciones con el generador de funciones, los resultados muestran que para las mediciones de la frecuencia y el factor de potencia existe una pequeña diferencia entre los valores calculados y los valores medidos.

También existe una diferencia entre los valores medidos y calculados del voltaje y la corriente que es consistente en todas las mediciones. Esta diferencia también se debe a una tensión de offset que altera la referencia de la medición haciéndola mas grande.

Se observa también que existe una relación lineal entre el voltaje y la corriente.

#### 4.4 – Medición con carga inductiva.

Por último se realizaron mediciones con una carga inductiva conectada a una red eléctrica alimentada por un Variac con un rango de voltaje de 0-127  $V_{CA}$ . Se utilizó un motor de corriente alterna (taladro) con un voltaje nominal de 127  $V_{CA}$  con la finalidad de introducir ruido al sistema y observar su comportamiento.

Se analizaron 100 mediciones para 5 valores diferentes del voltaje de salida del Variac, estos valores fueron:

1. Voltaje mínimo de salida del Variac.
2. 35  $V_{CA}$ .
3. 70  $V_{CA}$ .
4. 105  $V_{CA}$ .
5. 127  $V_{CA}$ .

No se utilizó 140  $V_{CA}$  como valor máximo de medición, ya que el voltaje de funcionamiento del motor es de 127  $V_{CA}$  y pudiera sufrir daños si se le suministra un voltaje mayor.

De la misma manera que se realizó el análisis estadístico para las mediciones con carga resistiva se calculó la media, valor mínimo, valor máximo y rango de las 100 mediciones para cada valor de voltaje.

Cuadro 9. - Rango de valores de corriente y voltaje con carga inductiva.

		Calculado	Media	Dif	Mínimo	Máximo	Rango
<b>Mínimo</b>	<b>Corriente (A)</b>	0.48	0.67	-0.19	0.54	0.82	0.28
	<b>Voltaje (V)</b>	4.34	5.03	-0.69	4.41	5.78	1.37
<b>35 V</b>	<b>Corriente (A)</b>	1.61	1.70	-0.09	1.54	1.97	0.43
	<b>Voltaje (V)</b>	35.11	35.62	-0.52	35.11	36.20	1.09
<b>70 V</b>	<b>Corriente (A)</b>	2.18	2.31	-0.13	2.10	2.55	0.45
	<b>Voltaje (V)</b>	70.39	70.83	-0.44	70.11	71.65	1.54
<b>105 V</b>	<b>Corriente (A)</b>	2.59	2.71	-0.12	2.42	2.89	0.48
	<b>Voltaje (V)</b>	106.05	106.08	-0.03	105.60	106.70	1.10
<b>127 V</b>	<b>Corriente (A)</b>	2.93	3.05	-0.12	2.82	3.22	0.40
	<b>Voltaje (V)</b>	127.51	127.40	0.11	126.50	128.40	1.90

Cuadro 10. - Rango de valores de frecuencia y FP con carga inductiva.

		Calculado	Media	Dif	Mínimo	Máximo	Rango
<b>Mínimo</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	60.01	59.99	0.02	59.94	60.02	0.08
	<b>FP</b>	0.443	0.443	0.00	0.439	0.449	0.010
<b>35 V</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	60.01	60.02	-0.01	59.91	60.18	0.27
	<b>FP</b>	0.907	0.906	0.00	0.896	0.913	0.017
<b>70 V</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	60.02	60.02	0.00	59.88	60.18	0.30
	<b>FP</b>	0.959	0.963	0.00	0.938	0.970	0.032
<b>105 V</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	59.98	60.01	-0.03	59.93	60.11	0.18
	<b>FP</b>	0.978	0.974	0.00	0.968	0.979	0.011
<b>127 V</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	60.00	60.02	-0.02	59.99	60.06	0.07
	<b>FP</b>	0.975	0.973	0.00	0.968	0.977	0.009

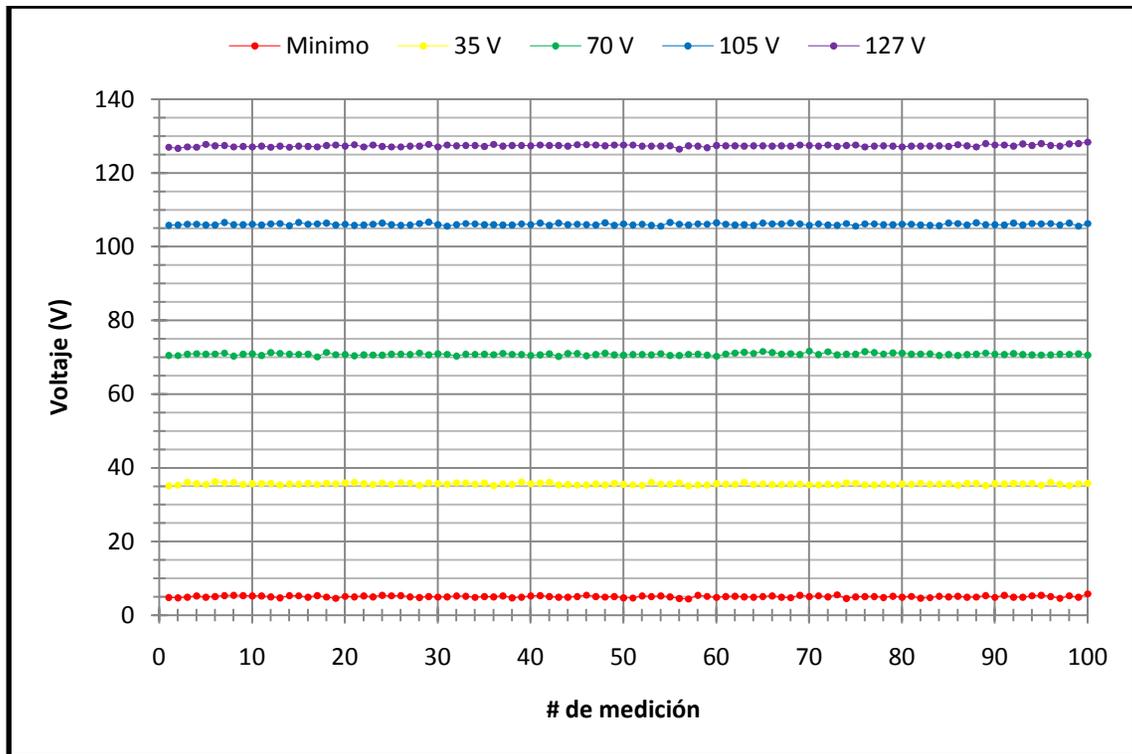


Figura 59. - Mediciones de voltaje con carga inductiva.

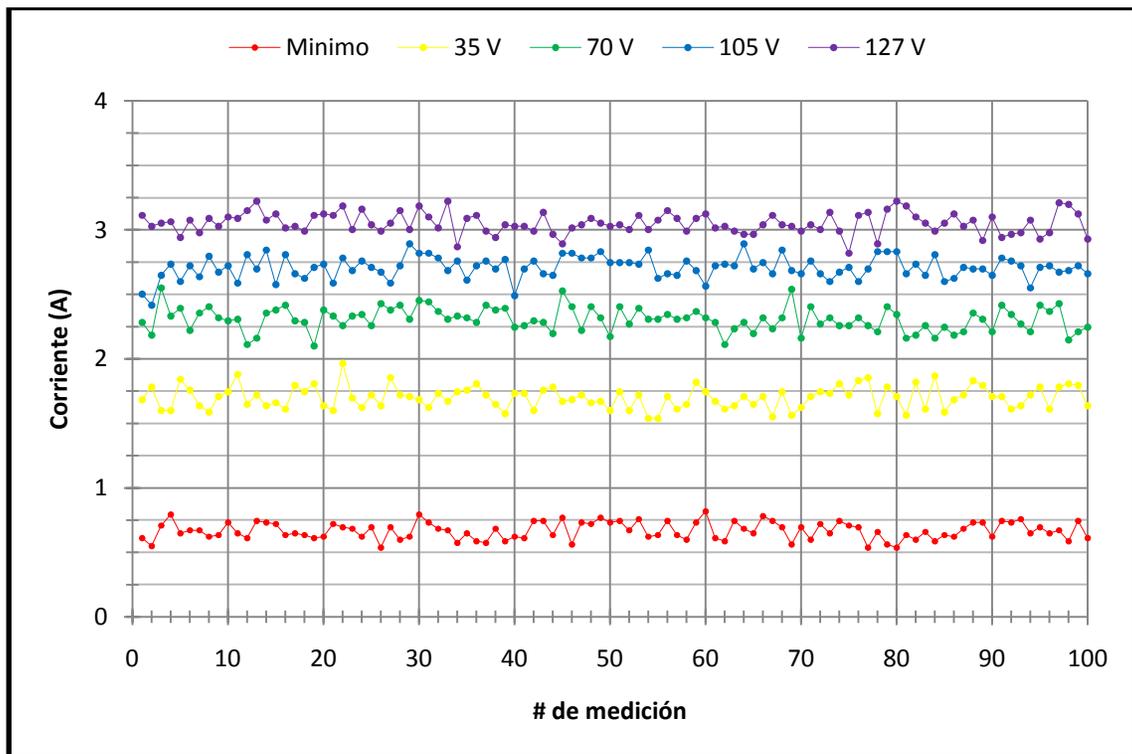


Figura 60. - Mediciones de corriente con carga inductiva.

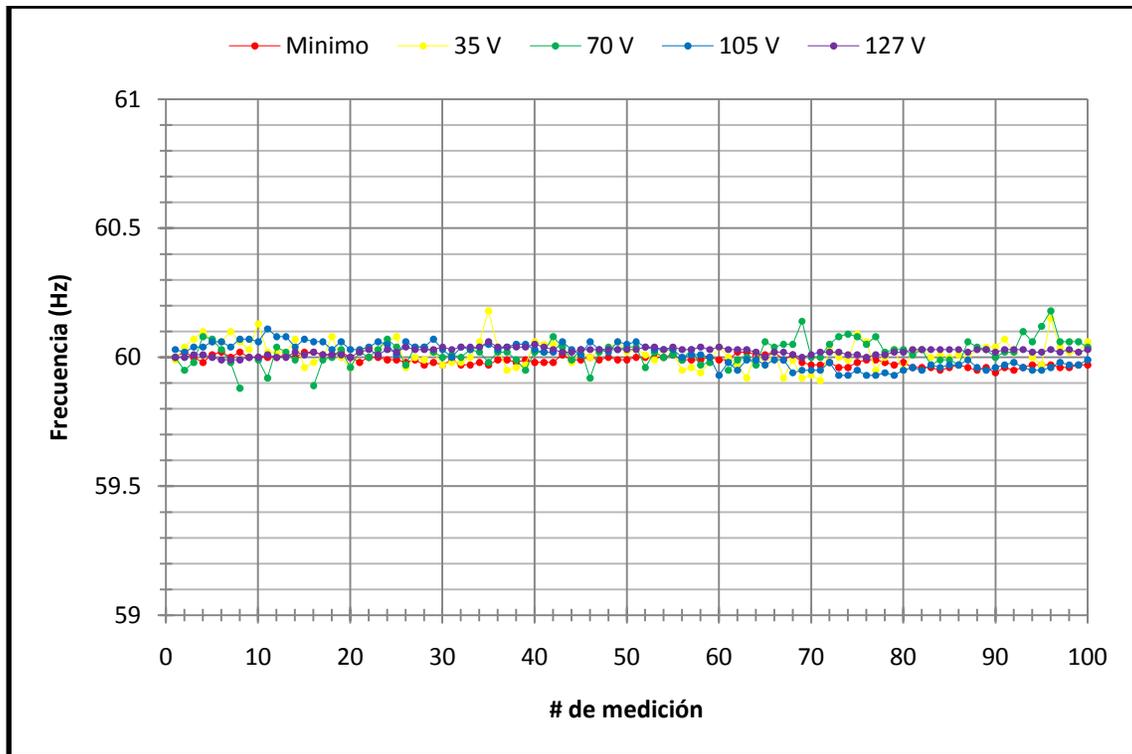


Figura 61. - Mediciones de frecuencia con carga inductiva.

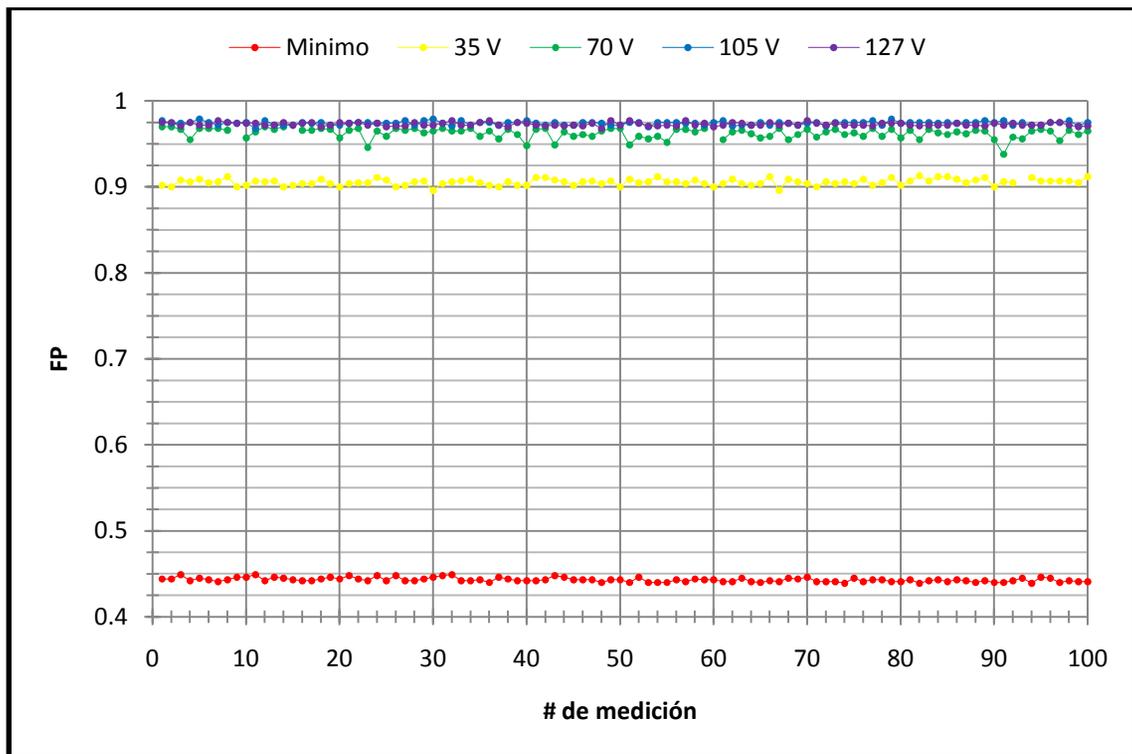


Figura 62. - Mediciones de FP con carga inductiva.

Por último se calculó el coeficiente de correlación para observar el grado de relación entre el voltaje y la corriente.

Cuadro 11. - Coeficiente de correlación con carga inductiva.

	Calculado		Medido	
	Voltaje (V)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Corriente (A)
<b>Mínimo</b>	4.34	0.48	5.03	0.67
<b>35 V</b>	35.11	1.61	35.62	1.70
<b>70 V</b>	70.39	2.18	70.83	2.31
<b>105 V</b>	106.05	2.59	106.08	2.71
<b>127 V</b>	127.51	2.93	127.40	3.05
<b>r</b>	0.971108		0.976952	

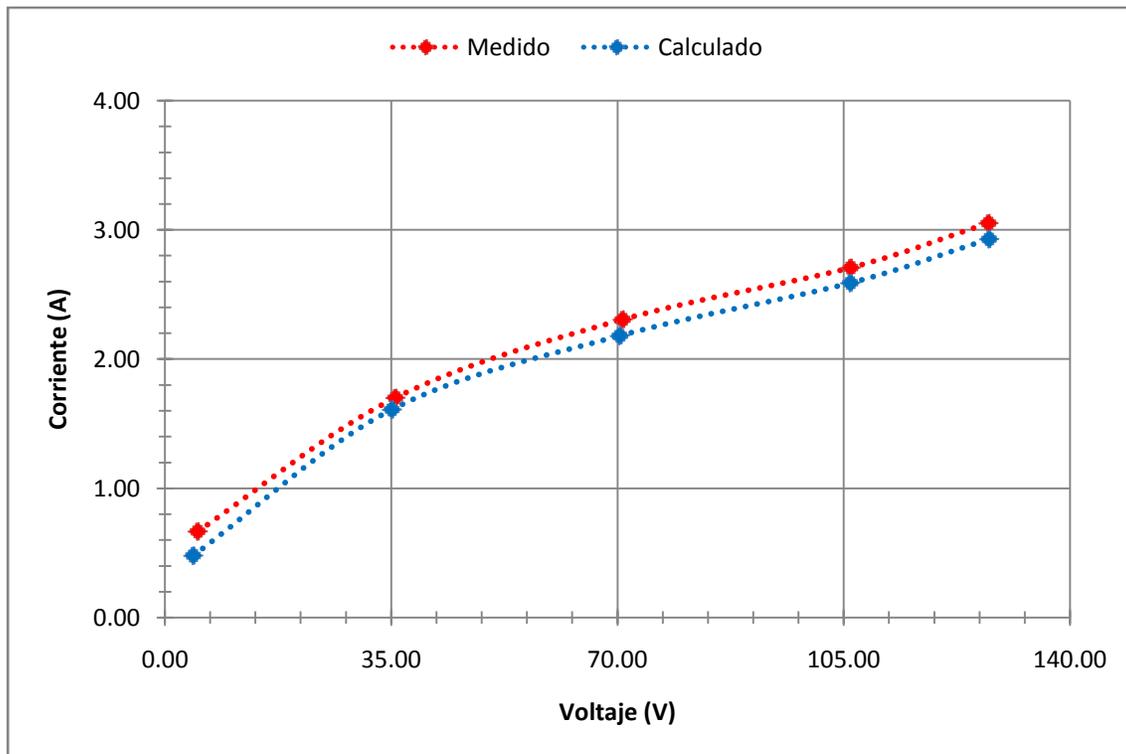


Figura 63. - Gráfica del coeficiente de correlación con carga inductiva.

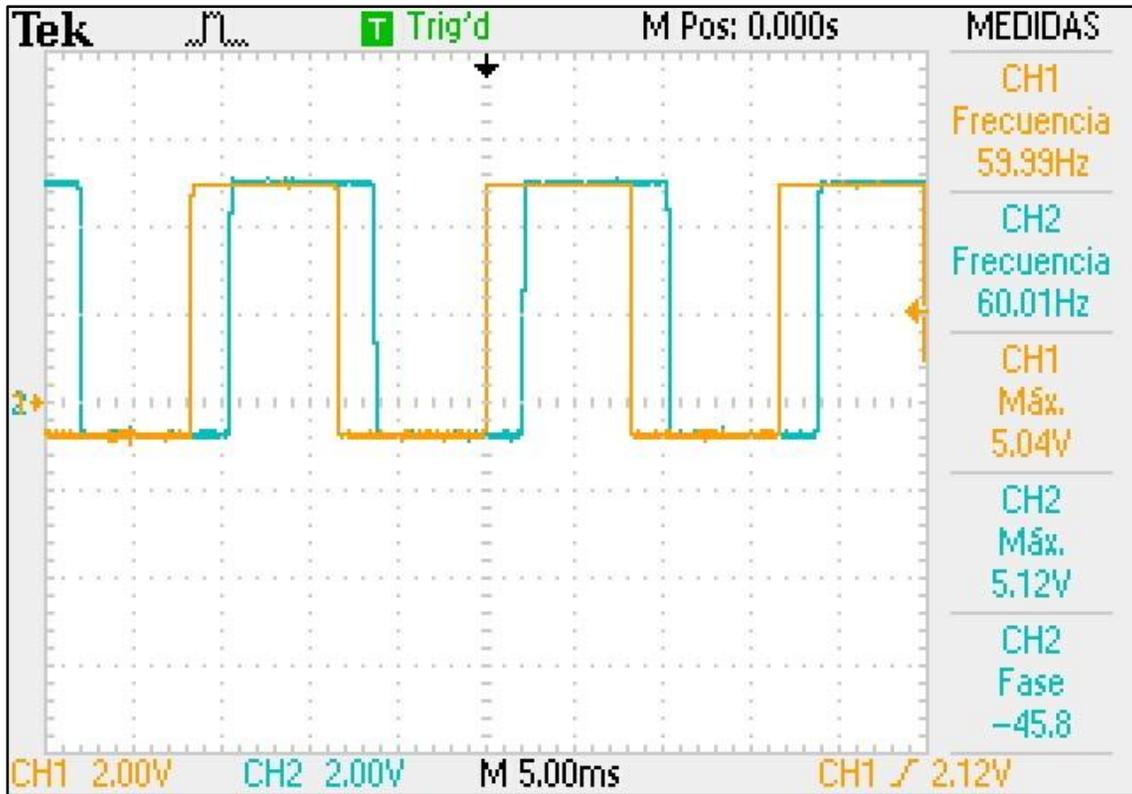


Figura 64. - Señales acondicionadas con carga inductiva.

De manera similar al análisis de las dos mediciones anteriores los resultados muestran que para las mediciones de la frecuencia y el factor de potencia existe una diferencia muy pequeña entre los valores calculados y los valores medidos.

Los valores tanto de voltaje y corriente medidos tienen una diferencia con respecto a los valores calculados. La diferencia es constante y se debe también a una tensión de offset.

Sin embargo se observa que el rango de las mediciones es mayor, es decir, los datos están más dispersos. Esto es consistente con el valor observado del voltaje de salida del Variac, que al no entregar un voltaje fijo y tener variaciones, provoca que existan variaciones en la medición.

## V - CONCLUSIONES

El sistema muestra de manera continua en la pantalla de un Smartphone y en una pantalla LCD los valores de las magnitudes involucradas con la medición del consumo eléctrico: corriente, voltaje, frecuencia, factor de potencia, potencia aparente, potencia activa, potencia reactiva y consumo eléctrico.

Los circuitos elaborados para el acondicionamiento de las señales analógicas de corriente y voltaje funcionaron de acuerdo a lo calculado, obteniendo a la salida un error menor al 1%. Al ser circuitos pequeños, sencillos y contruidos con componentes básicos, su elaboración es sencilla y su costo es económico tanto en su construcción como en la sustitución de algún componente dañado.

Los códigos implementados en el Microcontrolador y la aplicación creada para el dispositivo móvil funcionaron perfectamente permitiendo observar los valores obtenidos y calculados de manera continua y sin interrupciones. Ambas partes pueden ser utilizadas para futuras aplicaciones o ser modificadas, si así se requiere, para monitorear solamente alguna magnitud en particular.

De las 500 muestras que se tomaron para realizar el análisis estadístico de los datos, solamente 4 valores mostraron diferencias muy grandes a lo esperado, es decir, se obtuvo una mala medición cada 125 mediciones.

El trabajo futuro de este proyecto es implementar todas las partes en un dispositivo que capture y muestre constantemente los valores de una red eléctrica específica.

## VI - BIBLIOGRAFÍA

- [1] Boylestad, Robert L. 2005. Análisis introductorio de circuitos. (3ra. Edición). Trillas. ISBN: 968-24-5188-4.
- [2] Boylestad, Robert L. Nazhelsky, Louis. 2003. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. (8va. Edición). Pearson Prentice Hall. ISBN: 970-26-0436-2.
- [3] Breijo, Eduardo García. 2008. Compilador C CCS y simulador PROTEUS para Microcontroladores PIC. (1ra. edición). Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V. ISBN: 9788426714954.
- [4] C Compiler Reference Manual February. 2011. Custom Computer Services Incorporated.
- [5] Coughlin, Robert F. Driscoll, Frederick F. 1993. Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales. (4ta. Edición). Pearson Prentice Hall. ISBN: 9688802840.
- [6] Deitel, Harvey M. Deitel, Paul J. 2004. Cómo programar en C/C++ y Java. (4ta. Edición). Pearson Prentice Hall. ISBN: 9702605318.
- [7] Massachusetts Institute of Technology. 2012. MIT App Inventor Beta. Obtenida el 7 de marzo de 2012 de <http://beta.appinventor.mit.edu/>.
- [8] Massachusetts Institute of Technology. 2012. Reference Documentation. Obtenida el 7 de marzo de 2012 de <http://beta.appinventor.mit.edu/learn/reference/>.

## VII - APÉNDICE

### 7.1 - Lista de comandos AT.

Cuadro 12. - Comandos AT.

<b>+++</b> (Escape Sequence)	When the device is in Data mode, it can be forced back into Command mode while maintaining the connection to the remote device. The sequence characters should be with 1000ms guard time	
<b>A</b> (Establish connection)	This command is used to establish a connection in manual master role.	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
	A	Connect to a device which has been assigned by "ATD= xxxxxxxxxxxx"
	A1~A8	Connect to a device1~8 in neighborhood found through "ATF?".
<b>B</b> (Display local BD address)	This command display the local device BD address	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
	B?	Inquire the Local BD address
<b>C</b> (Flow Control)	This command enable or disable flow control signals (CTS/RTS) of the COM port. Note, the setting is not affected by ATZ0 but will cause a reboot	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
	C0	Disable flow control.
	C1 (Default)	Enable flow control.
	C?	Inquire the current setting
<b>D</b> (Set Remote BD address)	For security purpose, We can specifies the unique remote device can be connected. In master role, it automatically inquire and search the slave even the slave is undiscoverable. In slave role, the command should be as a filter condition to accept the master's inquiry.	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
	D=xxxxxxx	"xxxxxxx" is a string of 12 hexadecimal digits.
	D0 (Default)	Clear Remote BD address setting, inquire any slave in master mode or accept any master in slave mode.
	D?	Inquire the Remote BD address setting
<b>E</b> (Local Echo)	This command specifies whether the device should echo characters received from the UART back to the Host	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
	E0	Characters received from the UART are not echoed back to the Host
	E1 (Default)	Characters received from the UART are echoed back to the Host.
	E?	Inquire the current setting
<b>F</b> (Find Bluetooth device)	This command is used to find any bluetooth device in neighborhood within 60 seconds timeout. If any device is found, its name and address will be listed. The search ends with a message "Inquiry ends, xx device(s) found." This command is available only when the adaptor is in the master role.	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
	F?	Inquire scan Bluetooth neighborhood devices.
<b>H</b> (Discoverable Control)	This command is used to drop connection either master or slave role. And it is used to specify whether the device could be discovered by remote master device. note : it will cause a reboot when ATH0 or ATH1 take the effect	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>

	<b>H</b>	Drop current connection in Online command mode	
	<b>H0</b>	The device enters undiscoverable mode. If a pair have been made, the original connection could be connected again. Other remote master device can not discovery this device.	
	<b>H1</b> (Default)	The device enters discoverable mode.	
	H?	Inquire the current setting	
<b>I</b> (Information)	This command is used to Inquire the information		
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>	
	<b>I0</b>	Inquire the version Codes	
	<b>I1</b>	Listing all setting value	
	<b>I2</b>	Inquire RSSI in Online command mode	
<b>K</b> (Stop setting)	bits	This command is used to specify one or two stop bits of COM port	
		<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
		<b>K0</b> (Default)	One Stop bit
		K1	Two stop bits
		K?	Inquire the current setting
<b>L</b> (Baud Rate Control)	This command is used to specify the baud rate of COM port		
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>	
	L#	1200bps	
	L*	2400bps	
	L0	4800bps	
	L1	9600bps	
	<b>L2</b> (Default)	19200bps	
	L3	38400bps	
	L4	57600bps	
	L5	115200bps	
	L6	230.4Kbps	
	L7	460.8Kbps	
	L8	921.6Kbps	
L?	Inquire the current setting		
<b>M</b> (Parity setting)	bits	This command is used to specify the parity bit setting of COM port	
		<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
		<b>M0</b> (Default)	None Parity bit.
		M1	Odd parity setting.
		M2	Even parity setting
M?	Inquire the current setting		
<b>N</b> (Set device name)	We can specifies the device a friendly name using 0 to 9, A to Z, a to z, space and -, which are all valid characters. Note that "firs space or -, last space or - isn't permitted". The default name is "Serial Adaptor"		
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>	

	N=xxxx	"xxxx" is a character string, maxima length is 16
	N?	Inquire the device name
<b>O</b> (Auto connect setting)	This command is used to enable/disable auto-connection feature in master role. By the way, it is used to online switch from command mode to data mode. Note, it will cause a reboot when ATO0 or ATO1 take effect.	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
	<b>O</b>	Online switch from command mode to data mode
	<b>O0</b> (Default)	Automatically connecting to a device which is assigned in "ATD" or any available device if "ATD" was not assigned.
	O1	Disable auto-connection feature, user should manually use "ATA" command to connect a remote device.
	O?	Inquire the current setting
<b>P</b> (Set PIN code)	This command specifies the PIN number. It control to off the PIN code authorization that allow to establish a connection without PIN code. Default PIN number is "1234"	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
	<b>P=xxx</b> (Default)	"xxx" is 4~8 digit string
	<b>P0</b>	Turn off the PIN code authorization
	P?	Inquire the current PIN number
<b>Q</b> (Result Code Supression)	The command is used to determine if result Codes should be sent to the Host. When result Codes are supressed, the device does not generate any characters in response to the completion of a command or when an event occurs. Four Result Codes : OK,CONNECT,DISCONNECT,ERROR	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
	<b>Q0</b> (Default)	The device will prompt Result Codes
	Q1	The device will not prompt Result Codes
	Q?	Inquire the current setting
<b>R</b> (Set Role)	This command specifies whether the device could be master or slave device. If change the role, the adaptor will reboot and clear all paired addresses.	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
	<b>R0</b>	The device as master role.
	<b>R1</b> (Default)	The device as slave role.
	R?	Inquire the current setting
<b>Z</b> (Restore)	This command is used to restore default setting and reboot	
	<i>Modifiers</i>	<i>Description</i>
	<b>Z0</b>	Restore the default setting

La configuración de fábrica es la siguiente:

- Velocidad de transmisión: 19200 bps.
- Bits de datos: 8.
- Bit de paridad: no.

- Bit de stop: 1.