



Proyecto final de graduación en ingeniería eléctrica  
Marzo 2015

---

## Diseño de un instrumento virtual para la medición de la calidad de la energía eléctrica

Autor:

Alumno. Carlos Hernán Teves.

Carrera: Ingeniería Eléctrica.

Tutor: Ing. Juan Antonio Suarez

Co-Tutor: Ing. Guillermo Murcia.

Evaluadores:

Ing. Gustavo Bacino.

Ing. Claudio Dimenna.

Ing. Ruben Ferreyra



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

## ***Resumen:***

Este trabajo propone diseñar y construir un prototipo de un instrumento de medida, capaz de medir los parámetros eléctricos referidos a la calidad de la energía eléctrica, que sea funcional, amigable con el usuario, adaptativo, o sea, que pueda ir evolucionando junto con la tecnología de las cargas que vaya a medir, portátil, compacto y de bajo costo.

El instrumento consiste de un medidor trifásico de potencia y calidad de la energía eléctrica, además de otra función como es la de determinar las características de las cargas monofásicas. Para este proyecto se optó por el software de programación en G, LabVIEW, por su acrónimo en inglés (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). LabVIEW es una herramienta poderosa y versátil para el análisis de señales eléctricas provenientes de todo tipo de sensores y señales, en este caso de tensión y corriente. Se utilizará una placa de adquisición de datos de la firma Cole-Palmer, encargada de digitalizar las señales analógicas que entregan los transductores de medida. Estos últimos integran el instrumento de medida al cual se le debe agregar un módulo de acondicionamiento de la señales que se ubica entre los sensores y la placa adquisidora, para que puedan ser admitidos por la placa adquisidora de datos, luego estos datos ya digitalizados por la placa adquisidora son transmitidos a la PC que tiene instalado el software LabVIEW para que éste calcule, a través de las aplicaciones a desarrollar, todos los parámetros necesarios referidos a la calidad de la energía eléctrica, tales como potencia, energía, factor de potencia, armónicos y otros. Cuenta con dos modos de trabajo, como medidor de parámetros eléctricos y como registrador de estos parámetros. Como medidor, los datos son mostrados en pantalla en tiempo real y, como registrador, los datos son guardados en archivos o enviados vía mail para su posterior análisis.

## **Palabras clave:**

CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA – INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN –  
MEDICIÓN VIRTUAL– DISTORSIÓN ARMÓNICA- TRANSDUCTORES -  
ANALIZADOR DE REDES

## **INDICE GENERAL**

### **Resumen**

### **Introducción**

#### **Capítulo 1. Calidad de la energía eléctrica.**

- 1.1. Definición de calidad de Energía eléctrica. Facetas.
- 1.2. Importancia de la calidad del Servicio eléctrico
- 1.3. Fenómenos electromagnéticos relacionados con la calidad de la energía eléctrica
  - 1.3.1. Indicadores de la calidad de la energía eléctrica.
- 1.4. Perturbaciones de tensión.
  - 1.4.1. Huecos de tensión (SAGS o DIPS)

#### **Capítulo 2. Normativas.**

- 2.1. Evolución de la normativa en relación a la calidad de la energía eléctrica.
  - 2.1.1. Marco regulatorio de la calidad del producto.
- 2.2. Límites de emisión fijados por normativa.
  - 2.2.1. Límite para variaciones lentas de tensión.
  - 2.2.2. Perturbaciones.

#### **Capítulo 3. Desarrollo del instrumento virtual**

- 3.1. ¿Por qué se realiza este instrumento de medida?
  - 3.2. ¿Por qué utilizar/diseñar un instrumento virtual?
  - 3.3. Diseño del instrumento virtual propio
    - 3.3.1 Descripción general.
    - 3.3.2 Descripción del Hardware.
      - 3.3.2.1. Transductores de corriente.
      - 3.3.2.2. Transductores de tensión.
      - 3.3.2.3. Acondicionamiento de la señal de corriente.
      - 3.3.2.4. Acondicionamiento de la señal de tensión.
      - 3.3.2.5. Descripción de la placa de adquisición de datos (DAQ)
      - 3.3.2.6. Elección de la placa de adquisición de datos "DAQ" y del software que se usarán en este proyecto
    - 3.3.3. Descripción del software.
      - 3.3.3.1. Introducción.
      - 3.3.3.2. Panel frontal.
      - 3.3.3.3. Diagrama de bloques.
      - 3.3.3.4. Paleta de herramientas.
      - 3.3.3.5. Estructura.
      - 3.3.3.6. ¿Qué es un subVI?.
-

## **Capítulo 4. Aplicación en LabVIEW.**

### 4.1. Configuración de la placa DAQ.

### 4.2. Diseño de la aplicación en LabVIEW.

#### 4.2.1. Osciloscopio.

##### 4.2.1.1. Desarrollo del Programa.

##### 4.2.1.2. Bloque Trigger.

##### 4.2.1.3. Bloque Espectro.

##### 4.2.1.4. Calibración de los sensores de tensión.

##### 4.2.1.5. Calibración de los sensores de corriente.

##### 4.2.1.6. Panel Frontal del programa.

#### 4.2.2. Registrador.

##### 4.2.2.1 Desarrollo del Programa.

##### 4.2.2.2 Archivo de salida de datos.

##### 4.2.2.3 Cálculo de máximos y mínimos.

##### 4.2.2.4 Panel Frontal del programa.

#### 4.2.3 Analizador de Variaciones Lentas de Tensión.

##### 4.2.3.1 Análisis del Subanexo D.

##### 4.2.3.2 Desarrollo del Programa.

##### 4.2.3.3 Algoritmo de cálculo propuesto

##### 4.2.3.4 Selección de las opciones de grabación

##### 4.2.3.5 Diagrama fasorial de tensiones.

##### 4.2.3.6 Registro de la fecha de máximos y mínimos de las tensiones

##### 4.2.3.7 Indicación de penalización

##### 4.2.3.8 Archivos de texto de salida.

##### 4.2.3.9 Panel Frontal del programa.

## **Capítulo 5. Conclusión**

## *Introducción*

La calidad de energía eléctrica es hoy en día un tema muy importante que implica tanto a los distribuidores de energía eléctrica como a los consumidores. Normas Internacionales referidas al tema, tales como la norma IEC (61000-2-2/4) y la norma IEEE 1159 de 1995, establecen límites para la generación de armónicos de los equipos eléctricos e instalaciones. Sin embargo, los problemas de la calidad de energía eléctrica no son restringidos a los armónicos, también se pueden nombrar como perturbaciones importantes: impulsos, oscilaciones, sobretensiones, subtensiones, interrupciones, microcortes, ruido, flicker, factor de potencia, variaciones de frecuencia y otros. La monitorización de la calidad de la energía eléctrica es la mejor manera de detectar y diagnosticar problemas en sistemas de energía eléctrica. Sin embargo, estos equipos son generalmente muy costosos.

Durante la gestión del Ing. Claudio Dimenna en la Secretaría de Servicios de la Universidad Nacional de Mar del Plata se requirió al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería el estudio de la factibilidad de medición de la calidad de energía en distintos ámbitos de la propia Universidad. Dicho departamento posee, en su Laboratorio de Mediciones Eléctricas, un único instrumento analizador de redes, marca HIOKI 3166. El equipo actual, además de ser el único disponible, es algo obsoleto pues solo tiene posibilidad de grabar registros en la disquete de 3 ½" que está incorporada al aparato. Esta disposición constructiva acarrea problemas cuando se requiere un gran número de registros de lecturas, saturando al diskette por su escasa capacidad. Esta limitación constituye una importante desventaja, en cuanto a que el medio de almacenamiento de información se satura rápidamente y esto nos obliga a efectuar la descarga de la información guardada por el aparato, casi diariamente. Otra limitación importante es que lectoras de diskette 3 ½, hoy en día son muy difíciles encontrar en una PC y, mucho menos, en notebooks.

Por estas razones, en la cátedra de la materia optativa Instrumentación Avanzada de la carrera Ingeniería eléctrica surgió la inquietud de desarrollar un equipo de medición con las características que tiene un analizador de redes trifásico comercial, como el HIOKI, pero con el objetivo de mejorar todas las desventajas que el HIOKI presenta, mediante la utilización de una herramienta informática llamada **LabVIEW** (instrumentación virtual). Este software a través de una placa de adquisición de datos es capaz de procesar la información enviada por los transductores conectados a la red eléctrica, digitalizarla y enviarla a la PC para que las distintas rutinas desarrolladas se encarguen de calcular los parámetros eléctricos de calidad, los procesen y los visualicen en pantalla.

Este equipo de medición vendrá a suplir el déficit de equipamiento del Laboratorio de Mediciones de la Facultad, en cuanto a analizadores de redes.

## ***Objetivo del proyecto***

### ***Objetivo general:***

Investigar sobre la problemática referida a la calidad de la energía eléctrica: definiciones, historia, regulaciones, normativas internacionales y locales vigentes; asimismo, conocer qué efectos produce sobre las instalaciones y equipos eléctricos. Con esta información, desarrollar una solución ventajosa y de bajo costo para la monitorización de la calidad de energía eléctrica y análisis de potencia y energía, utilizando instrumentación virtual, con el lenguaje de programación en G, llamado por sus siglas en inglés LabVIEW. Y también señalar la necesidad de mejorar la calidad de la energía eléctrica en los sistemas de potencia modernos.

Para lograr este objetivo se planteó un plan de trabajo cuyo cumplimiento permitió alcanzar otros objetivos particulares, entre los cuales se destacan:

- ✓ Familiarizarse con el uso de las herramientas de programación gráfica.
- ✓ Evaluar las relaciones costo/prestación de distintos hardware de adquisición de datos, disponibles en la cátedra de instrumentación virtual. Elección de la mejor alternativa.
- ✓ Evaluar las relaciones costo/prestación y tecnologías de los sensores de corriente y tensión aplicables. Elección de la mejor alternativa.
- ✓ Analizar el funcionamiento de cargas no lineales de uso residencial, comercial y/o industrial.
- ✓ Familiarizarse con los indicadores de la calidad de la energía eléctrica.
- ✓ Construir un prototipo utilizando programación gráfica LabVIEW capaz de medir parámetros de calidad de energía en cargas no lineales. Evaluar su funcionamiento.
- ✓ Proponer mejoras al prototipo en función de su desempeño.
- ✓ Evaluar la funcionalidad del equipo para brindar un servicio a la Universidad Nacional de Mar del Plata, efectuando el análisis de calidad de la energía de las diferentes dependencias que así lo requieran

## *Capítulo 1. Calidad de la energía eléctrica.*

### *1.1. Definición de calidad de energía eléctrica. Facetas.*

En las últimas décadas, el estudio de la calidad de la energía eléctrica ha adquirido mayor importancia debido al afán de las industrias de aumentar su productividad y competitividad; para ello requieren optimizar su proceso productivo mediante:

- Utilización de equipos con mayor eficiencia, más grandes, por ende de mayor consumo, como por ejemplo: motores eléctricos, bombas, etc.
- Automatización de sus procesos mediante dispositivos electrónicos y de computación (microcontroladores, computadores, PLC, etc.).
- Reducción de costos vinculados con la continuidad del servicio y la calidad de la energía.
- Reducción de las pérdidas de energía. Evitar costos por sobredimensionamiento y tarifas.
- Evitar el envejecimiento prematuro de los equipos.

Cuando se habla de Calidad de la Energía Eléctrica o Power Quality (PQ), se está haciendo referencia tanto a la calidad de las señales de **tensión y corriente**, como a la **continuidad o confiabilidad del servicio** de energía eléctrica.

La creciente utilización de dispositivos basados en tecnología de semiconductores o microelectrónica, se atribuye a las características de ser más eficientes, más compactos, más rápidos y más amigables con el usuario y su entorno; además, se destacan sus capacidades para reducir notablemente los tiempos de los procesos industriales y para adaptarse a los cambios que el proceso productivo requiere. Todas estas ventajas dejan totalmente obsoletas a los antiguos, robustos, lentos controladores electromagnéticos que controlaban los procesos productivos.

Sin embargo, la tecnología de estos equipos electrónicos constituye cargas no-lineales, que deforman las señales de tensión y corriente; estas deformaciones están estrechamente ligadas con la calidad de la energía eléctrica y es cada día más necesario prestarles la debida atención. Por ello que en los últimos años se ha incrementado el interés por los temas que hacen a la calidad de la energía eléctrica y el desarrollo de equipos de medición, control y protección de las instalaciones eléctricas, teniendo en cuenta los fenómenos electrónicos relacionados y la terminología especial para describirlos.

Es así como el concepto de Power Quality (PQ) ha evolucionado en la última década a escala mundial. De hecho, ha aumentado la importancia de un suministro de energía eléctrica basada en criterios que van más allá de la simple continuidad o confiabilidad del servicio, pasando a un espectro mucho más amplio que tiene que ver con grandes desarrollos científicos y tecnológicos en los campos de la interferencia y la compatibilidad electromagnética.

Por lo expuesto, quien diseña una instalación eléctrica industrial debe otorgarle singular importancia a la calidad de la energía eléctrica, ya que de lo contrario podría ocasionar problemas tales como que un equipo no trabaje como se espera, o que salten protecciones sin ninguna falla eléctrica, o bien capacitores que, en casos extremos, literalmente pueden explotar por presencia de armónicos, entre otros.

Calidad de la energía eléctrica, o PQ, en términos generales es un conjunto de propiedades inherentes tanto al servicio como a la señal de tensión o corriente eléctrica que permiten apreciarla como igual, mejor o peor que otras. Por tanto, podemos afirmar que PQ, en su concepto más amplio, debe considerar tanto la continuidad del servicio como también el nivel de deformación de las señales de tensión y corriente eléctrica, en un tiempo dado y en un espacio determinado de un sistema de potencia eléctrico.

La definición del término Calidad de la Energía Eléctrica no es única y varía de país en país. El Instituto EPRI (Electric Power Research Institute) de los Estados Unidos, por ejemplo, define PQ como: *"Cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, de la corriente o de la frecuencia, de sus valores ideales que ocasione falla o mala operación del equipo de un usuario."*

La norma IEC (61000-2-2/4) define a la Calidad de la Energía Eléctrica como: *"Una característica física del suministro de electricidad, la cual debe llegar al cliente en condiciones normales, sin producir perturbaciones ni interrupciones en los procesos del mismo"*.

Para la norma IEEE 1159 de 1995: *"El término se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctricas, en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia"*.

Algunos países han incluido en el concepto de Calidad de Energía Eléctrica tanto lo correspondiente al diseño, construcción y operación de la instalación eléctrica como la atención al usuario (facturación y reclamos).

A continuación se propone definir a la calidad de la energía eléctrica(PQ) y a partir de allí, desarrollar su concepto:

La Calidad de la Energía Eléctrica (PQ), *"es un conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente para un tiempo dado y un espacio determinado, con el objetivo de satisfacer necesidades de un cliente"*

Algunos autores consideran que la entidad a la cual se aplica el concepto de Calidad de la Energía Eléctrica es solamente la señal de tensión. Esto sería cierto si se considera un sistema eléctrico lineal en el cual el generador alimenta una sola carga, mediante una fuente de tensión. Sin embargo, los sistemas eléctricos pueden ser enmallados y una carga (corriente) puede contaminar nuevamente la red de alimentación y esta a su vez aumentar la perturbación a otra carga con una señal de tensión y corriente contaminada. Por ello lo más conveniente es involucrar en el concepto de PQ (la Calidad de la Energía Eléctrica) tanto a la fuente como a la carga, es decir las señales de tensión y corriente.

Las características físicas de PQ, son la continuidad del servicio durante las 24 horas del día y los 365 días del año, la amplitud, frecuencia, forma de onda de la señal de tensión y corriente, las cuales están definidas por valores o índices en resoluciones, guías o normas nacionales e internacionales, dentro de rangos que son técnica y económicamente aceptables.

La discontinuidad o variación de estos valores o índices, pueden causar degradación, mal funcionamiento o fallas en dispositivos, equipos o sistemas eléctricos, electrónicos o de comunicación, que disminuyen la Calidad de la Energía Eléctrica y afectan técnica y económicamente a sus usuarios.

La calidad de energía eléctrica puede dividirse en tres grandes facetas:

- **Calidad del Servicio Técnico:** se entiende por calidad de servicio técnico a un conjunto de indicadores que evalúan la continuidad del servicio. En general la evaluación de la continuidad se hace por la medición del complemento de esta, es decir por las interrupciones. Las interrupciones como indicador de “mala calidad” tiene dos aspectos: Frecuencia y Duración. Cuanto más frecuentes y prolongadas sean las interrupciones peor será la calidad del servicio.
- **Calidad del Producto Técnico:** se entiende por calidad de producto técnico (o calidad del suministro), al control del nivel de tensión y de perturbaciones que pudieran afectar a la misma. A diferencia de la calidad de servicio que mide si hay o no suministro, la calidad del producto evalúa parámetros e índices reveladores de las características del suministro.
- **Calidad del Servicio Comercial:** se entiende por calidad del servicio comercial a los tiempos de respuesta para conectar nuevos usuarios, emisión de facturación estimada, reclamos por errores de facturación, restablecimiento del suministro suspendido por falta de pago.

## 1.2. *Importancia de la calidad del Servicio eléctrico.*

La calidad del servicio eléctrico se ha convertido en un objetivo estratégico para las compañías de electricidad, para el personal de explotación, de mantenimiento o de gestión de las instalaciones terciarias o industriales, y para los fabricantes de equipos, especialmente por estos motivos:

- La necesidad económica de aumentar la competitividad entre las empresas.
- La generalización de equipos sensibles a las perturbaciones de tensión, siendo, también ellos a su vez, perturbadores.
- La liberalización del mercado de la electricidad.
- La necesidad económica de aumentar la competitividad entre las empresas.
- La reducción de costes debidos a la pérdida de continuidad del servicio y a la falta de calidad.
- El costo de las perturbaciones (cortes, huecos de tensión, armónicos, sobretensiones atmosféricas) es elevado.

Estos costos deben tener en cuenta, entre otros, la falta de producción, las pérdidas de materias primas, el reinicio de las máquinas-herramientas, la falta de calidad de la producción, los retrasos de las entregas. El mal funcionamiento o la parada de receptores prioritarios, como los ordenadores, el alumbrado y sistemas de seguridad, pueden poner en entredicho la seguridad de las personas (hospitales, balizamiento de los aeropuertos, locales con mucha concurrencia de personas, edificios de gran altura).

Es determinante también la detección anticipada de los problemas mediante un mantenimiento preventivo, dirigido y optimizado. Se constata además una transferencia de responsabilidad del industrial-usuario hacia el constructor de los equipos para asegurar el mantenimiento de las instalaciones; el constructor se convierte en proveedor del producto.

Otras consecuencias más disimuladas pero adversas de la degradación de la Calidad de la Energía Eléctrica son:

- La disminución del rendimiento energético de la instalación, lo que hace más costosa la factura energética y conlleva a posibles penalizaciones.
- La sobrecarga de la instalación, que provoca un envejecimiento prematuro de cables, motores, capacitores, etc. aumentando el riesgo de averías, lo que a su vez obliga a un sobredimensionamiento o redundancia de las instalaciones de distribución.

Debido a sus múltiples ventajas técnico/económicas (flexibilidad de funcionamiento, excelente rendimiento, buenas prestaciones, compactos, y otros), se puede afirmar que hay un creciente desarrollo y en el uso de esta tecnología, tales como autómatas, variadores de velocidad y PLC, en la industria, y de sistemas informáticos y el incremento de lámparas de bajo consumo (fluorescente compactas y LEDs) en el sector servicios y en el doméstico. Estos equipos tienen la particularidad de ser a la vez sensibles a las perturbaciones de la tensión y también son generadores de perturbaciones.

Su abundancia dentro de un mismo emplazamiento exige una alimentación eléctrica cada vez mejor en términos de continuidad y de calidad. En efecto, la parada temporal de un elemento de la cadena puede provocar la detención del conjunto del sistema de producción (fábricas de semiconductores, de cemento, tratamiento del agua, logística de suministros, imprentas, industrias siderúrgicas o petroquímicas) o de servicios (telecomunicaciones, centros de cálculo, bancos).

En consecuencia, los trabajos de la calidad de la energía eléctrica (CEI) sobre compatibilidad electromagnética (CEM) concluyen en normas y recomendaciones cada vez más exigentes (en cuanto a las limitaciones de los niveles de emisión de perturbaciones).

La liberalización del mercado de la electricidad tiene incidencia en los conceptos de calidad de la energía eléctrica. Las reglas de juego del sector eléctrico tienen o van a tener una profunda evolución: la liberalización del sector, es decir, la competencia en la producción de electricidad, la producción descentralizada, y la posibilidad, para los grandes consumidores, de escoger su proveedor.

En 1985 la comisión europea determinó que la electricidad era un producto (directiva 85/374) lo que obliga a definir muy bien sus características esenciales. Por otra parte, en el contexto de la liberalización del mercado de la energía, la búsqueda de la competitividad entre compañías eléctricas hace que la calidad sea un factor diferencial. Precisamente, la garantía de calidad puede ser, para un industrial, un criterio determinante al elegir su proveedor de energía.

### *1.3. Fenómenos electromagnéticos relacionados con la calidad de la energía eléctrica.*

Si tan sólo ayer se prestaba atención a un grupo relativamente limitado de fenómenos, hoy es necesario tomar en consideración un conjunto más amplio de indicadores de calidad, debido a sus efectos sobre el confort, la confiabilidad, el costo, el consumo, la demanda y el diseño de los sistemas de suministro eléctrico.

Paradójicamente, hay más problemas y son escasas o no existen personas preparadas o dedicadas a enfrentarlos. Según la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995 los fenómenos electromagnéticos pueden ser de tres tipos:

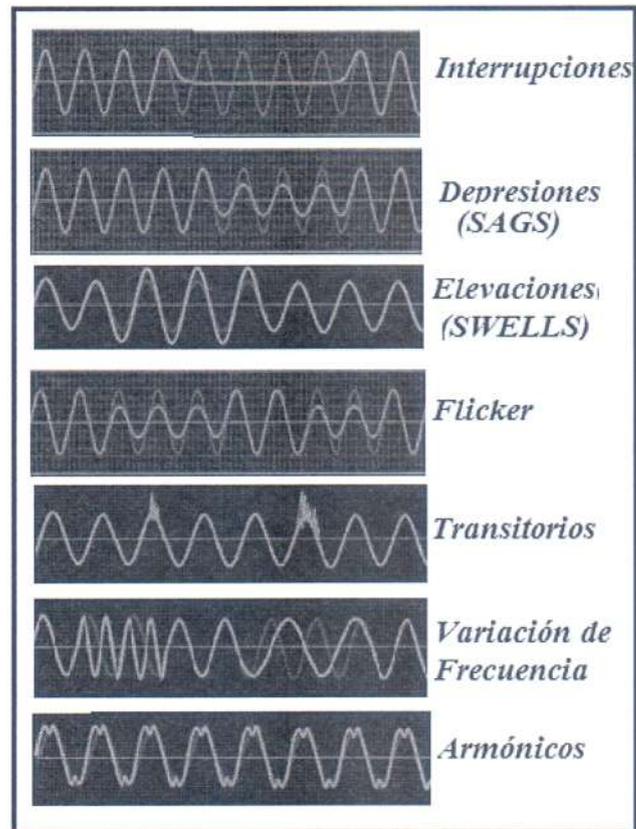
- Variaciones en el valor RMS de la tensión o la corriente.
- Perturbaciones de carácter transitorio.
- Deformaciones en la forma de onda.

Las perturbaciones se clasifican en siete categorías, las cuales son las siguientes:

1. TRANSITORIOS (Impulsos y oscilaciones).
2. VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN (Sags y Swells).
3. VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN.(Interrupciones, Sub y Sobretensiones).
4. DESBALANCES DE TENSIÓN (Simetría).
5. DISTORSIÓN EN LA FORMA DE ONDA.(Armónicos, Interarmónicos, ruidos, d.c. Offset).
6. FLUCTUACIONES DE TENSIÓN (Flicker).
7. VARIACIONES EN LA FRECUENCIA.

Tanto las interrupciones, como las elevaciones (SWELL) o las depresiones (SAG), pueden ser de larga duración o corta duración. La interrupción o los SAG, es una reducción o una pérdida total de la tensión eficaz (RMS) de alimentación de un sistema eléctrico durante un breve periodo de tiempo. Se describe de acuerdo con su duración y la tensión remanente que, por lo general, se expresa en porcentaje de la tensión eficaz (RMS) nominal en el momento en que dicha tensión remanente alcanza su valor más bajo. El flicker es una modulación de la onda de tensión. El transitorio impulsivo es un cambio súbito y unidireccional (positivo o negativo) en la condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambos y de frecuencia diferente a la frecuencia del sistema de potencia. Son de moderada y elevada magnitud pero de corta duración medida en microsegundos. Normalmente están caracterizados por sus tiempos de ascenso(1 a 10  $\mu\text{sec}$ ) y descenso (20 a 150  $\mu\text{sec}$ ) y por su contenido espectral.

Distorsión de la forma de onda, armónicos son provocados por las cargas no lineales, corrientes de magnetización de transformadores etc, conectadas al sistema eléctrico



*Figura 1.1-Forma de onda de las perturbaciones y deformaciones de la tensión*

<b>Categoría</b>	<b>Espectro Típico</b>	<b>Duración Típica</b>	<b>Magnitud de Tensión</b>
<b>1. Transitorio</b>			
1.1 Impulso	5 ns - 0.1 ms	<50 nS y >1 ms	
1.2 oscilaciones			
1.3 Frecuencia baja	<5 KHz	0.3 a 50 ms	0 – 4 pu
1.4 Frecuencia media	5 – 500 KHz	20µs	0 – 8 pu
1.5 Frecuencia alta	0.5 – 5 MHz	5 µs	0 – 4 pu
<b>2. Variaciones de corta duración</b>			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Depresiones (SAG)		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
2.1.2 Elevaciones (SWELL)		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
<b>2.2 Momentáneas</b>			
2.2.1 Interrupciones		0.5 ciclos– 3 s	< 0.1 pu
2.2.2 Depresiones		30 ciclos– 3 s	0.1 – 0.9 pu
2.2.3 Elevaciones		30 ciclos– 3 s	1.1 – 1.4 pu
<b>2.3 Temporales</b>			
2.3.1 Interrupciones		3 s – 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Depresiones		3 s – 1 min	0.1 – 0.9 pu
2.3.3 Elevaciones		3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
<b>3. Variaciones De Larga Duración</b>			
3.1 Interrupciones		>1 min	0.0 pu
3.2 Subtensiones		>1 min	0.8 – 0.9 pu
3.3 Sobretensiones		>1 min	1.1 – 1.2 pu
<b>4. Desbalance de Tensión</b>		Estado estable	0.5 – 2 %
<b>5. Deformación de la forma de onda</b>			
5.1 DC offset		Estado estable	0 – 0.1 %
5.2 Armónico		Estado estable	0 – 20 %
5.3 Interarmónico		Estado estable	0 – 2%
5.4 Ruido		Estado estable	0 – 1 %
<b>6. Fluctuaciones de tensión</b>		Intermitentes	0.1–7 %
<b>7. Fluctuaciones de frecuencia</b>		< 10 s	

La Tabla 1 muestra un resumen de las características típicas de los fenómenos electromagnéticos.

### 1.3.1. Indicadores de la calidad de la energía eléctrica.

Antes de analizar lo que se refiere a la calidad de la energía eléctrica, se realizara una breve definición de los diversos fenómenos que intervienen en lo que se refiere a la calidad de la energía eléctrica y los índices utilizados para cuantificarlo. Tales indicadores son:

- Factor de potencia.
- Factor de cresta.
- Potencia de distorsión.
- Espectro de frecuencia.
- Tasa de distorsión armónica.

#### *Factor de potencia (FP).*

El factor de potencia es un indicador de la eficiencia con la que se está aprovechando la energía suministrada a una carga determinada. Matemáticamente se calcula con la ecuación:

$$FP = \frac{\text{potencia activa}}{\text{potencia aparente}} = \cos(\theta - \varphi) \quad 1.1$$

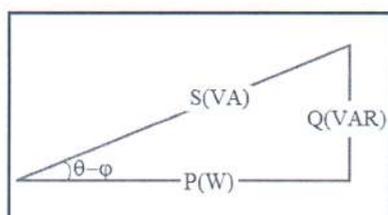
Debido a que  $\cos(\theta - \varphi)$  no puede tener una magnitud mayor que uno, la magnitud del factor de potencia no puede ser tampoco mayor que uno.

Solo para el caso en que las señales de tensión y corriente son senoidales puras el factor de potencia queda determinado con la siguiente ecuación:

$$FP = \cos(\theta - \varphi) \quad 1.2$$

El *FP* puede ser de dos tipos, en adelante o en atraso, donde estos dos tipos, se refiere a la fase de la corriente con respecto al voltaje. Así una carga inductiva tendrá un *FP* atrasado y una carga capacitiva un *FP* adelantado.

Hay una estrecha relación entre las tres potencias *S*, *Q* y *P* y el factor de potencia, llamada potencia compleja. La potencia activa (*P*) y la reactiva (*Q*) tienen diferente significado por lo tanto no se pueden sumar aritméticamente. Sin embargo, si se pueden representar apropiadamente en forma de magnitudes vectoriales denominada potencia compleja *S*, que se define como:



$$S = P + jQ \quad 1.3$$

El módulo de esta potencia es a lo que se denomina potencia aparente y su expresión es:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad 1.4$$

Figura 1.2- Triángulo de potencia.

De forma gráfica la relación entre las potencias y el factor de potencia puede ser vista como un triángulo, llamado triángulo de potencia, en la cual perfectamente se puede usar la trigonometría, en donde la hipotenusa es la potencia aparente, el cateto adyacente es la potencia activa y el cateto opuesto es la potencia reactiva y el  $FP = \cos(\theta - \varphi)$ . Cabe destacar que esta relación solo se cumple cuando las señales de tensión y corriente no tienen componente de armónicas, o sea son senoides puras.

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} ; |Q| = \sqrt{S^2 - P^2} ; |P| = \sqrt{S^2 - Q^2} ; FP = \cos(\theta - \varphi) = \frac{P}{S} \quad 1.5$$

### Factor de Cresta

Se define como la relación entre el valor de cresta de corriente o de tensión ( $I_{max}$  o  $V_{max}$ ) y el valor eficaz.

$$k = \frac{I_{max}}{I_{rms}} \qquad k = \frac{V_{max}}{V_{rms}} \qquad 1.6$$

Para una señal sinusoidal el factor de cresta es igual a  $\sqrt{2}$ , para una señal no sinusoidal el factor de cresta puede tener un valor superior o inferior a. Este factor es particularmente útil para detectar la presencia de valores de cresta excepcionales con respecto al valor eficaz.

El factor de cresta típico de corrientes absorbidas por cargas no lineales es mucho mayor que  $\sqrt{2}$ , puede tomar valores iguales a 1,5 o 2, llegando incluso a 5 en casos críticos.

Un factor de cresta muy elevado implica sobreintensidades puntuales importantes. Estas sobreintensidades, detectadas por los dispositivos de protección, pueden ser el origen de desconexiones indeseadas.

## *Armónicos.*

### *Contenido Armónico*

Los sistemas eléctricos cuentan actualmente con una gran cantidad de elementos llamados no lineales, los cuales generan a partir de formas de onda sinusoidales a la frecuencia de la red, otras ondas de diferentes frecuencias ocasionando el fenómeno conocido como generación de armónicos.

Los armónicos son un fenómeno que causa problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos nocivos en la red eléctrica y a los equipos conectados a ésta.

### *Definición*

En sistemas eléctricos la palabra Armónicos se utiliza para designar corrientes o tensiones de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de la alimentación, en nuestro país es de 50 Hz. Debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal, tales como lámparas fluorescentes compactas, fuentes conmutadas, hoy en día la mayoría de los equipos electrónicos usan dispositivos semiconductores, funcionando en modo conmutación, corte y saturación del elemento semiconductor y este modo de funcionamiento produce grandes dificultades en las instalaciones eléctricas.

Según Joseph Fourier, quien lo definió matemáticamente el armónico como: *“cualquier señal periódica por compleja que sea, se puede descomponer en suma de señales sinusoidales cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental”*

$$S(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_0 + A_n \sin(2\pi \cdot n f_1)) \quad 1.7$$

Donde:

$f_1$ : es la componente de la frecuencia fundamental.

$A_0, A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ : Amplitud de las distintas senoides.

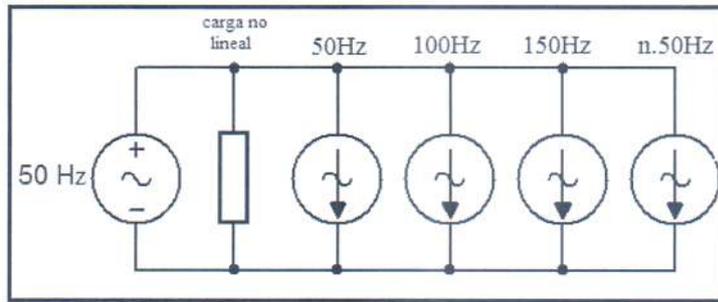


Figura 1.3-Modelo eléctrico de los armónicos.

En la figura 1.3 se muestra un modelo eléctrico de la ecuación 1.7, este modelo se explica de la siguiente manera, este circuito se comporta como una infinita cantidad de fuentes de corriente de valor  $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$ , dispuestas en paralelo y con una frecuencia múltiplo de la fundamental, 50Hz, 100Hz, 150Hz, 200 Hz, n.50, donde la suma de todas las intensidades es la corriente que alimenta la carga.

En la figura 1.4.se muestra la forma de onda de corriente deformada y susarmónicos en el dominio de la frecuencia. La medición de esta onda de corriente será fundamental para luego calcular los indicadores antes mencionados y así poder analizar los problemas de calidad de la energía eléctrica y plantear una posible solución.

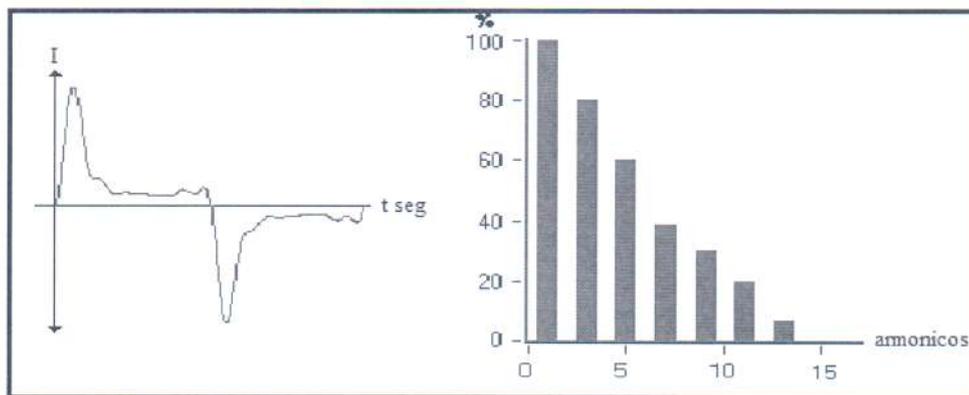


Figura 1.4-Armonicos de una carga no lineal.

Ahora que sea desarrollado el concepto de armónicos, ya podemos hablar de los demás indicadores: espectro de frecuencia, tasa de distorsión armónica y potencia de distorsión, también se introducirá el concepto de factor de potencia de desplazamiento.

### Potencia activa

La potencia activa  $P$  de una señal distorsionada por armónicos es la suma de las potencias activas correspondientes a las tensiones e intensidades del mismo orden. La descomposición de la tensión y la intensidad en sus componentes armónicos puede ser escrita como:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h \quad 1.8$$

Siendo  $\varphi_h$  el desfase entre la tensión y la intensidad del armónico de orden h. Se supone que la señal no contiene componente continua. En ausencia de armónicos, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$P = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad 1.9$$

Donde  $\cos \varphi_1$  es igual a “cos  $\varphi$ ”.

Si hay armónicos de corriente pero la tensión es sinusoidal pura, la expresión 1.3.8 se expresa como:

$$P = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad 1.10$$

### ***Potencia Reactiva***

La potencia reactiva se define únicamente para la fundamental y viene dada por la ecuación:

$$Q = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_h \quad 1.11$$

### ***Potencia de Distorsión***

Consideramos la potencia aparente S:

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad 1.12$$

En presencia de armónicos, se puede reescribir la ecuación como:

$$S^2 = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h \quad 1.13$$

Como consecuencia, en presencia de armónicos, la relación  $S^2 = P^2 + Q^2$  no es válida. Se define la potencia de distorsión D de tal forma que  $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ . Así pues:

$$S = \sqrt{P+Q+D} \quad 1.14$$

Es decir que en presencia de armónicos el triángulo de potencias deja de tener validez. El gráfico de las potencias pasa a ser de la siguiente manera:

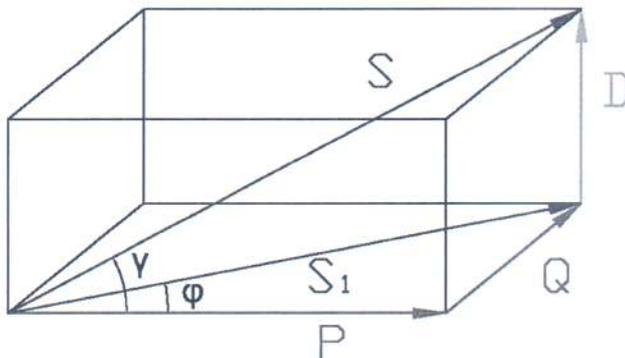


Figura 1.5 – Triángulo de potencias en presencia de armónicos.

### Factor de potencia de desplazamiento

Se define de la siguiente manera:

$$FP_{Disp} = \frac{P_1}{S_1} = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\theta_1 - \varphi_1)}{V_1 \cdot I_1} = \cos(\theta_1 - \varphi_1) \quad 1.15$$

Donde  $P_1$  es la potencia activa del armónico fundamental y  $S_1$  la potencia aparente de la armónica fundamental. Por ello el  $\cos \varphi$  es diferente al  $FP$  en presencia de armónicos.

### Factor de potencia de distorsión

Se define como  $FP = FP_{disp} \times FP_{dist}$

$$FP_{dist} = \frac{FP}{FP_{disp}} = \frac{P}{V \cdot I \cdot \cos(\theta_v - \theta_{I1})} = \frac{V \cdot I_1 \cos(\theta_v - \theta_{I1})}{V \cdot I \cdot \cos(\theta_v - \theta_{I1})} = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{I_1 \sqrt{1 + THDi^2}}$$

$$FP_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + THDi^2}} \quad 1.16$$

### *Tasas de distorsión armónica*

Antes de definir a las Tasas de Distorsión Armónica definiremos a una señal matemática en el dominio del tiempo.

Si la tensión y la corriente en una red eléctrica están definidos por:

$$v(t) = V \cdot \cos \omega_0 t \quad 1.17$$

$$i(t) = I \cdot \cos \omega_0 t \quad 1.18$$

En los sistemas eléctricos en estas señales podría darse la presencia de tensiones y corrientes con armónicos, entonces la tensión y la corriente se pueden representar por:

$$v(t) = V_1 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_1) + V_2 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_2) + V_3 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_3) + \dots \quad 1.19$$

$$i(t) = I_1 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_1) + I_2 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_2) + I_3 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_3) + \dots \quad 1.20$$

Que en forma compacta se podrían escribir como:

$$\text{Factor } K = \sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{I_h}{I_{rms}} \right)^2 \cdot h^2 \quad 1.21$$

$$v(t) = \sum_{n=1}^k V_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad 1.22$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^k I_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad 1.23$$

Donde a:

$V_n$  armónico de tensión de orden  $n$ .

$I_n$  armónico de corriente de orden  $n$ .

$\theta_n$  ángulo del armónico  $n$ .

Los valores de distorsión están definidos en porcentaje (%) de cantidades eléctricas, estos valores son muy utilizados para conocer el grado de contaminación de las redes eléctricas.

### *Distorsión armónica total*

Es uno de los índices más utilizados para determinar la denominada distorsión armónica total THD, y es aplicable tanto para corriente como para tensión. Este índice se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental. Este valor es usualmente expresado como un porcentaje de la onda fundamental.

Cuando se trata con armónicos de tensión, la expresión se expresa como:

$$THD_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \cdot 100\% \quad 1.24$$

Cuando se trata con armónicos de intensidad, la expresión se convierte en:

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \cdot 100\% \quad 1.25$$

Esta ecuación es equivalente a la mostrada a continuación, la cual es más directa y fácil de utilizar cuando se conoce el valor eficaz total:

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} \cdot 100\% \quad 1.26$$

Para armónicos individuales:

$$IHD_n = \frac{V_n}{V_1} \cdot 100 \quad 1.27$$

Para mostrar la forma de cómo se calcula el THD, se hará sobre la figura 1.4.3, que representa a la señal de corriente  $i(t)$ , de una carga no lineal como puede ser una lámpara fluorescente compacta, como primera medida se le aplica la transformada de Fourier para descomponerla en armónicos que se muestra en la tabla de abajo.

Armónicos	Valor rms ) [A]	(I <sub>k</sub> /I <sub>1</sub> ).100 [%]
I <sub>1</sub>	50	100
I <sub>2</sub>	0	0
I <sub>3</sub>	40	80
I <sub>4</sub>	0	0
I <sub>5</sub>	30	60
I <sub>6</sub>	0	0
I <sub>7</sub>	20	40
I <sub>8</sub>	0	0
I <sub>9</sub>	15	30
I <sub>10</sub>	0	0
I <sub>11</sub>	5	10
I <sub>12</sub>	0	0
I <sub>13</sub>	3.5	7

Tabla 1.2-Ejemplo de armónicos para calcular el THD<sub>I</sub>

Con los datos de la tabla 1.4 y la ecuación 3.25, entonces:

$$THD_I = \frac{\sqrt{40^2 + 30^2 + 20^2 + 15^2 + 5^2 + 3.5^2}}{50} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3162,5}}{50} = (1,1247) \cdot 100 = THD = 112,47\%$$

Este resultado nos dice que al ser una cantidad que sobrepasa el 100%, los valores rms de los armónicos, son mucho mayores que la onda senoidal fundamental.

### Factor K

En la gran mayoría de los casos cuando un transformador alimenta cargas no lineales, este transformador presenta sobrecalentamiento aun cuando no ha alcanzado sus kVA nominales. Se estima que el calentamiento de los transformadores debido a los armónicos es directamente proporcional al cuadrado de la armónica multiplicado por las pérdidas que esta produce, de esta manera aparece el factor K el cual es aplicado a transformadores.

Este factor K viene especificado en los datos de placa de algunos transformadores, indicando la capacidad del transformador para alimentar cargas no lineales sin exceder la temperatura de operación a la cual están diseñados, esto es:

$$Factor K = \sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{I_h}{I_{rms}} \right)^2 \cdot h^2$$

1.28

Donde la corriente de esta expresión es la corriente de la carga no lineal la cual será o es alimentada por el transformador. Los factores K más comunes de transformadores son de 4 y 13, los cuales son utilizados para alimentar cargas que utilizan rectificación principalmente.

#### *1.4. Perturbaciones de tensión*

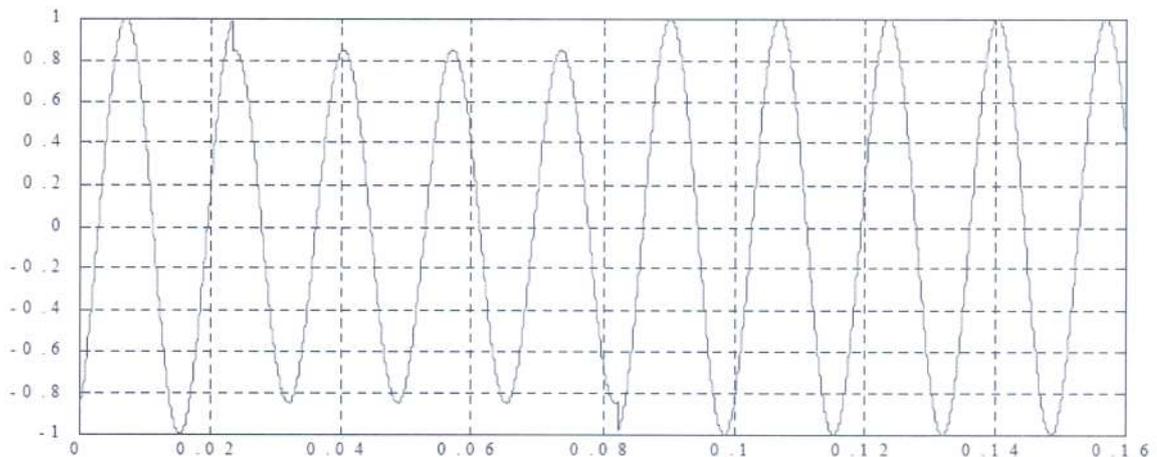
##### *1.4.1. Huecos de tensión (SAGS o DIPS)*

Un hueco de tensión, es una reducción o una pérdida total de la tensión eficaz (RMS) de alimentación de un sistema eléctrico durante un breve periodo de tiempo. Se describe de acuerdo con su duración y la tensión remanente que, por lo general, se expresa en porcentaje de la tensión eficaz (RMS) nominal en el momento en que dicha tensión remanente alcanza su valor más bajo. En un hueco de tensión se supone que a la carga no le llegará la energía necesaria para su funcionamiento, lo que puede acarrear graves consecuencias que dependerán del tipo de carga de que se trate. En otras palabras se denomina hueco de tensión a una disminución de entre 0,1 y 0,9 pu en la tensión o corriente, para duraciones entre 0,5 y 1 minuto.

Se utilizan dos denominaciones distintas en el idioma inglés para los huecos de tensión, ya que en EE.UU, que se rigen por Normas IEEE utilizan la palabra “sag”, mientras que los europeos (IEC) utilizan la palabra “dip”. Un microcorte es una reducción de la tensión eficaz (RMS) a cero durante un tiempo superior a 10 ms e inferior a un minuto.

Las principales causas de los huecos de tensión y los microcortes son:

- Fallas en los sistemas de potencia
- Descargas atmosféricas, cortocircuitos, contaminación de aisladores, contacto de animales o árboles, accidentes.
- Arranque de grandes motores de inducción.
- Cambios de carga.



*Figura 1.6 – Ejemplo de un hueco de tensión.*

### *Flicker*

El flicker o parpadeo de la luz (del inglés: to flicker = parpadear, titilar) se define como «impresión subjetiva de fluctuación de la luminancia» (CEI 555-1). Es un fenómeno de origen fisiológico visual que acusan los usuarios de lámparas alimentadas por una fuente común a una iluminación y a una carga perturbadora.

La molestia del parpadeo se pone de manifiesto en las lámparas de BT. Por contra, las cargas perturbadoras pueden encontrarse conectadas a cualquier nivel de tensión.[13]

En el origen de este fenómeno están las fluctuaciones bruscas de la tensión de red. En esta definición del flicker sólo se incluyen las fluctuaciones:

- n de amplitud < 10%,
- n de período < 1 hora.

Principalmente el flicker es el resultado de fluctuaciones rápidas de pequeña amplitud de la tensión de alimentación, provocadas:

- por la variación fluctuante de potencia que absorben diversos receptores: hornos de arco, máquinas de soldar, motores, etc.
- por la puesta en tensión o fuera de tensión, de cargas importantes: arranque de motores, maniobra de baterías de condensadores en escalones, etc.

Especialmente estudiado para las lámparas de incandescencia, el flicker es más o menos importante según el tipo de fuente luminosa. En todos los países industriales, los distribuidores de energía, así como los explotadores de instalaciones eléctricas, han de respetar unas tolerancias de variaciones de amplitud y de frecuencia en las redes, de lo

contrario no estaría garantizado el buen funcionamiento de los equipos. Así, la norma EN-50160 fija estas tolerancias:

- $\pm 10\%$  . Esta tolerancia es para las tensiones nominales BT (Baja Tensión:  $U_n < 1000$  V).
- de  $+ 6\%$  a  $-10\%$  específicamente para las tensiones BT 230/400 V, en el período 1996 y 2003, (armonización internacional).
- $\pm 1\%$  de la frecuencia nominal (**50 Hz**).

### *Explicación matemática del flicker*

Las fuentes de estas fluctuaciones son equipos eléctricos cuyo funcionamiento necesita importantes variaciones cíclicas de intensidad.

Éstas, al recorrer la impedancia de la red (R, X), provocan variaciones de tensión  $\Delta U$ .

Se define:

U = tensión nominal de la red (de funcionamiento).

E = tensión en vacío de la red.

$\Delta U = E - U$  caída de tensión.

P = potencia activa de la carga bajo la tensión nominal U.

Q = potencia reactiva de la carga bajo la tensión nominal U.

$\cos \varphi$  = factor de potencia de la carga,

I = corriente nominal de la carga,

$S_{CC}$  = potencia de cortocircuito de la red aguas arriba.

R = resistencia total de la red aguas arriba.

X = reactancia de la red aguas arriba.

Si se considera que el ángulo entre E y U es pequeño:

$$\Delta U = E - U \approx R \cdot I \cos \varphi + X \cdot I \sin \varphi$$

se puede escribir:

$$P = U \cdot I \cos \varphi \text{ y } Q = U \cdot I \sin \varphi ,$$

de donde resulta:

$$\Delta U = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U}$$

1.29

y en valor relativo:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U^2}$$

1.30

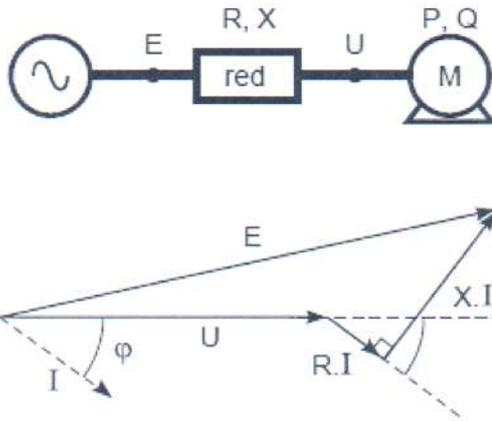


Figura 1.7 – Diagrama unifilar y vectorial de ejemplo de una carga genérica.

### Parámetros $P_{st}$ y $P_{lt}$

La evaluación final de la severidad del flicker según la CEI 868 se expresa por dos parámetros: el  $P_{st}$  (corta duración) y el  $P_{lt}$  (larga duración).

Mientras que el  $P_{st}$  se determina con un algoritmo multipunto utilizando los 5 puntos  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$  y  $P_{50}$  leídos sobre la FPC, el  $P_{lt}$  se calcula a partir de varios valores de  $P_{st}$ . Así, el  $P_{st}$  se calcula sobre un período de 10 minutos, y el  $P_{lt}$  se calcula para 12 valores de  $P_{st}$  en un período de 2 horas. Estos parámetros valoran las distintas formas de FPC.

Este método de cuantificación del flicker tiene la ventaja de ser universal, independiente del tipo de fluctuación (periódica, súbita, senoidal, con otras formas, etc.) y por tanto independiente del tipo de perturbación.

### Definición del $P_{st}$

El  $P_{st}$  se define por la ecuación:

$$P_{ST} = \sqrt{K_{0,1} \cdot P_{0,1} + K_1 \cdot P_1 + K_3 \cdot P_3 + K_{10} \cdot P_{10} + K_{50} \cdot P_{50}}$$

1.31

con:

$P_n$  = niveles en la curva FPC que tienen una probabilidad n% de que sean superados,

$K_n$  = coeficientes de ponderación dados por la norma y que permiten que la curva límite de la CEI (Fig. 5) se corresponda con un  $P_{st} = \text{constante} = 1$  (la curva CEI se determinó experimentalmente mucho antes de la definición del  $P_{st}$ ). Así, el  $P_{st}$  representa la curva CEI.

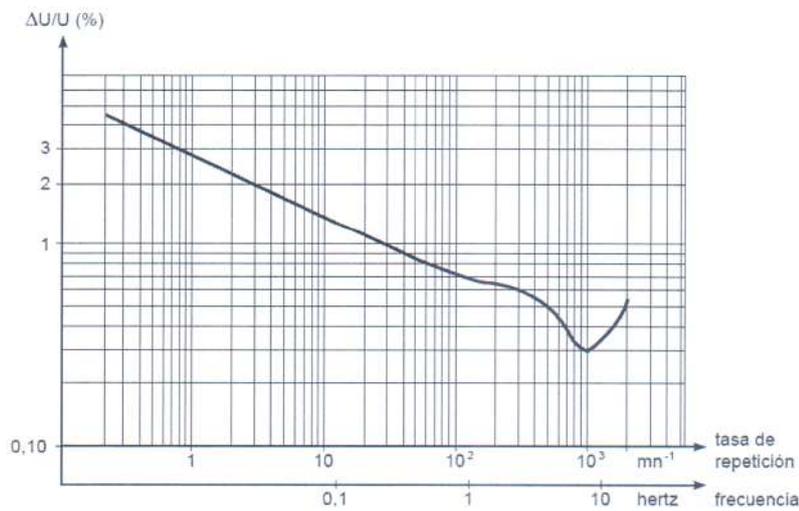
La severidad de corta duración del flicker, definida por la norma CEI 868-0, queda expresada por la ecuación:

$$P_{ST} = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_1 + 0,0657 \cdot P_3 + 0,28 \cdot P_{10} + 0,08 \cdot P_{50}} \quad 3.32$$

con:

$P_{0,1}$ : nivel superado solamente durante el 0,1% del período de observación.

$P_1$ : nivel superado solamente durante el 1% del período de observación.



*Figura 1.8 - Curva límite de la molestia del flicker. Indica la amplitud de las fluctuaciones de tensión, en función de su frecuencia de repetición, para una severidad del flicker  $P_{st} = 1$  (según CEI 868). Obsérvese que la frecuencia corresponde a dos fluctuaciones*

## ***Capítulo 2. Normativas***

### ***2.1. Evolución de las normativas locales en relación a la calidad de la energía eléctrica.***

Entre los años 1984 y 1986 se desarrolló en Argentina un proyecto financiado por el Banco Mundial denominado “Proyecto de Ingeniería”. En dicho proyecto participaron las seis empresas de distribución de energía eléctrica más grandes de ese momento: AyEE, DEBA, EMSE, EPE, EPEC y SEGBA. Entre todas cubrían más del 80 % de los usuarios del país.

El desarrollo de este proyecto fue el requisito para la obtención de créditos para inversión en infraestructura de distribución. Entre los múltiples temas que se desarrollaron, uno de ellos fue la Calidad de Distribución, que derivó en la creación de un software unificado para la obtención de indicadores globales, que las empresas implementaron en sus áreas de concesión.

Este software se denominó SIAIS (Sistema de Análisis de Interrupciones de Suministro), y es el germen desde el que se desarrollaron las distintas normativas actuales, vigentes en su mayoría desde la privatización de los servicios públicos.

En el año 1992 se privatiza la empresa SEGBA y se instrumenta el régimen de calidad bajo la jurisdicción del ENRE, aún vigente. En el año 1997 se privatiza la empresa que presta el servicio eléctrico en gran parte de la provincia de Buenos Aires, ESEBA (Ex DEBA), fragmentándose en tres empresas de Distribución, ya anteriormente se había independizado la Generación y la Transmisión, y se instrumenta el régimen de calidad bajo la jurisdicción del OCEBA.

#### ***2.1.1. Marco regulatorio de la calidad del producto.***

La reestructuración del Sector Eléctrico Argentino introdujo nuevos conceptos en lo que respecta a la Calidad del Servicio Suministrado, que si bien no resultaban técnicamente desconocidos con anterioridad, no eran de aplicación sistemática en las empresas distribuidoras estatales.

En general no existían límites admisibles para la prestación en lo que se refiere a la Calidad del Suministro y, de existir, no se desarrollaban metodologías precisas de control, ni se encontraban penalizados los apartamientos a los mismos, como tampoco se bonificaba a los usuarios por recibir una Calidad de Servicio inferior a la correspondiente a la tarifa abonada.

Como resultado de la mencionada reestructuración, los Contratos de Concesión del Servicio Público de Distribución de Energía Eléctrica prevén la existencia de un régimen de penalizaciones en los casos en que las concesionarias superen los límites establecidos de Calidad del Servicio, basados en el Costo de la Energía No Suministrada,

otorgando a las empresas una señal para que sus inversiones sean acordes a las previstas al momento de determinar las tarifas.

Por lo tanto, dado que son los usuarios afectados los destinatarios de las penalizaciones aplicadas a las empresas por superar los indicadores de la Calidad del Servicio, las mismas actúan como compensación, reflejando la valorización que la sociedad le ha dado a la energía eléctrica, y adecuando el costo (tarifa) que paga la sociedad a la calidad realmente suministrada por las distribuidoras.

La Calidad del Servicio suministrado por las empresas concesionadas por el Poder Ejecutivo Nacional es controlada por el ENRE. En el caso particular de la Provincia de Buenos Aires, el "Subanexo D" del pliego de concesión para empresas Distribuidoras del Servicio Eléctrico establece las "NORMAS DE CALIDAD DEL SERVICIO PUBLICO Y SANCIONES". Tales normas regulan la Calidad del Producto Técnico, la Calidad de Servicio Técnico y la Calidad del Servicio Comercial. [14]-[15]

El sistema de regulación y control propuesto por el ENRE se aplicó en tres etapas, de la siguiente manera:

- Etapa Preliminar, de un año de duración a partir de la fecha de toma de posesión (1° de setiembre de 1992 - 31 de agosto de 1993), en la cual se efectuó la revisión e implementación de las metodologías de control. No se previeron ni aplicaron penalizaciones, constituyéndose en un período destinado a la realización de inversiones para adecuar las instalaciones a las exigencias de Calidad de Servicio previstas en la Etapa siguiente.
- Etapa 1, de tres años de duración (1° de setiembre de 1993 - 31 de agosto de 1996), en la cual se establecieron controles de la Calidad del Servicio Técnico en función a indicadores de frecuencias y tiempo total de las interrupciones y de la Calidad del Producto Técnico sólo en lo que se refiere a los apartamientos del Nivel de Tensión. En esta etapa se aplicaron sanciones en los casos en que se registraron apartamientos a los límites establecidos.
- Etapa 2, se inició a partir del 1° de setiembre de 1996, efectuándose controles a nivel de usuario, tanto en lo que se refiere a la Calidad del Servicio Técnico como a la Calidad del Producto Técnico, contemplándose para esta última el control del Nivel de Tensión y de las Perturbaciones. Al igual que en la Etapa 1, se aplican sanciones en todos los casos en que se registren apartamientos a los límites establecidos.

## 2.2. Límites de emisión fijados por normativa.

### 2.2.1. Límite para variaciones lentas de tensión.

Se establecen bandas de tensión admisible en torno a la tensión nominal, que en caso de ser superadas durante más tiempo que el admitido, genera el cálculo de sanciones o compensaciones.

Se registran valores medios de tensión y potencia (o energía) cada 15 minutos durante un período típico de 7 días. Una forma típica de obtener valor medio de tensión de 15 minutos es tomando un valor cada segundo y promediándolo con los 59 tomados anteriormente guardando este valor medio de los 60 segundos. Un segundo después se repite el procedimiento descartando el valor más viejo y tomando uno nuevo. Tenemos entonces una ventana móvil de un minuto de ancho, que se desplaza segundo a segundo guardando al cabo de los 15 minutos 900 datos que se promedian y representan el valor medio de los 15 minutos, denominado período de integración. Se promedian así valores ya promediados, descartando valores extremos, ya que justamente lo que se quiere apreciar es la variación lenta de tensión.

En la provincia de Buenos Aires se establecieron bandas de tolerancia diferentes para cada nivel de tensión y para áreas urbanas y rurales.

*Tabla I. Límites de variación de tensión en la etapa de transición.*

ALTA TENSION	$\pm 7,0 \%$
MEDIA TENSION	$\pm 10,0 \%$
BAJA TENSION	$\pm 10,0 \%$
Para las zonas Rurales se admitirá, en el punto de suministro, hasta:	$\pm 13,0 \%$

*Tabla II. Límites de variación de tensión en la etapa de régimen.*

ALTA TENSION	$\pm 7,0 \%$
MEDIA TENSION	$\pm 8,0 \%$
BAJA TENSION	$\pm 8,0 \%$
Para las zonas Rurales se admitirá, en el punto de suministro, hasta:	$\pm 12,0 \%$

### 2.2.2 Perturbaciones

[La única referencia que hace el Subanexo D al tema perturbaciones, es la siguiente: “Las perturbaciones que se controlarán son las variaciones rápidas de tensión (*flicker*), las caídas lentas de tensión y las armónicas”.

La resolución del OCEBA 410/01 establece la cantidad de mediciones que debe realizar mensualmente cada distribuidora provincial.

*Tabla III. Cantidad de mediciones que debe realizar mensualmente cada distribuidora provincial*

Distribuidora	Flicker	Armónicos
EDEN S.A.	3	3
EDES S.A.	1	1
EDEA S.A.	3	3

El Oceba no fijó formalmente la metodología de control. En la práctica los niveles admitidos son los fijados por el ENRE para su jurisdicción. Las mediciones que se realizan son de nivel de perturbación (*flicker* o armónicas) en la tensión, cuyos límites son denominados Niveles de Referencia y se establecen en la Resolución ENRE 184/00. “Se define el Nivel de Referencia como aquel nivel de perturbación garantizado en un dado punto de suministro (definido para cada tipo de perturbación), que asegura que si no es sobrepasado en un tiempo mayor al 5% del período de medición, la calidad del producto técnico es adecuada y existe compatibilidad electromagnética satisfactoria entre las instalaciones y equipos del usuario con la red de suministro. Estos Niveles de Referencia son garantizados, lo que significa que en cualquier punto de suministro es exigible el Nivel de Referencia con la probabilidad especificada (95 %), y se corresponden a valores establecidos por normativa internacional.”

#### *Niveles de referencia para flicker*

*Tabla IV. Niveles de Referencia para fluctuaciones rápidas de tensión (Flicker) que no deben ser superados durante más del 5 % del período de medición.*

Nivel de tensión en el punto de suministro	Niveles de Referencia
AT ( $66 \text{ kV} \leq U \leq 220 \text{ kV}$ )	Pst=1,00
MT ( $1 \text{ kV} < U < 66 \text{ kV}$ )	Pst=1,00
BT ( $U \leq 1 \text{ kV}$ )	Pst=1,00

***Niveles de referencia para tensiones armónicas.***

Los niveles de Tensiones Armónicas presentes en los puntos de suministro (Tasas de distorsión individual y total de las tensiones Armónicas medidas en valor eficaz cada 10 minutos), no deberán sobrepasar los Niveles de Referencia indicados en la Tabla 2 para puntos de suministro en MT (1kV<U<66kV) y AT (U≥66kV) y en la Tabla 3 para puntos de suministro en BT (U ≤ 1kV), durante más de un 5 % del tiempo total del período de medición.

Los Niveles de Referencia de las Tablas 2 y 3 son obligatorios para las Armónicas hasta el orden 40 (inclusive). La Tasa de Distorsión Total se define así como:

$$TDT = \sqrt{\sum_{i=2}^{40} \left(\frac{U_i}{U_1}\right)^2} \quad 2-1$$

Dónde:

U<sub>i</sub> amplitud de la tensión de la armónica de orden i;

U<sub>1</sub> amplitud de la tensión fundamental.

***Tabla V. Niveles de Referencia para las Armónicas de tensión en MT y AT, que no deben ser superados durante más del 5 % del período de medición.***

Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamental)	
	MT (1 kV<U<66 kV)	AT 66 kV≤U≤220 kV
(impares no múltiplos de 3)		
5	6,0	2,0
7	5,0	2,0
11	3,5	1,5
13	3,0	1,5
17	2,0	1,0
19	1,5	1,0
23	1,5	0,7
25	1,5	0,7
>25	$0,2 + \frac{2}{5;n}$	$0,1 + \frac{2}{5;n}$

(impares múltiplos de 3)		
3	5,0	1,5
9	1,5	1,0
15	0,3	0,3
21	0,2	0,2
>21	0,2	0,2
(pares)		
2	2,0	1,5
4	1,0	1,0
6	0,5	0,5
8	0,5	0,2
10	0,5	0,2
12	0,2	0,2
>12	0,2	0,2
Tasa de Distorsión Total:	TDT 8 %	TDT 3 %

Para redes de EAT ( $U > 220$  kV) se considerarán como Niveles de Referencia para las Armónicas de tensión, valores mitad de los indicados en la Tabla V para redes de AT ( $66 \text{ kV} \leq U \leq 220 \text{ kV}$ ).

*Tabla VI. Niveles de Referencia para las Armónicas de tensión en BT ( $U \leq 1 \text{ kV}$ ), que no deben ser superados durante más del 5 % del período de medición.*

Nivel de Referencia de la armónica de tensión en BT ( $U \leq 1 \text{ kV}$ )					
Impares no múltiplos de 3		Impares múltiplos de 3		Pares	
Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % de la fundamental)	Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % de la fundamental)	Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % de la fundamental)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2 + \frac{0,5 \times 25}{n}$				
Tasa de Distorsión Total: TDT 8%					

***Límites de emisión para corrientes armónicas.***

El Límite de Emisión individual asignado a un usuario conectado a una red se obtiene para cada intensidad armónica y se determina en función de su potencia contratada y el nivel de tensión (BT, MT y AT).

Para el cálculo de la corriente de carga contratada se supondrá un factor de potencia de 0,85 para cada banda horaria según corresponda.

***Tabla VII. Límites de emisión de corrientes armónicas según el tipo de usuario.***

Orden de la armónica	Usuarios T1	Usuario T2 y T3 en BT y MT	Usuario T3 en AT
(n)	Intensidad armónica máxima en A	Intensidad armónica máxima, como % de la corriente de carga contratada	
<b>Impares no múltiplos de 3</b>			
5	2,28	12,0	6,0
7	1,54	8,5	5,1
11	0,66	4,3	2,9
13	0,42	3,0	2,2
17	0,26	2,7	1,8
19	0,24	1,9	1,7
23	0,20	1,6	1,1
25	0,18	1,6	1,1
> 25	4,5/n	0,2+0,8*25/n	0,4
<b>Impares múltiplos de 3</b>			
3	4,60	16,6	7,5
9	0,80	2,2	2,2
15	0,30	0,6	0,8
21	0,21	0,4	0,4
> 21	4,5/n	0,3	0,4
<b>Pares</b>			
2	2,16	10,0	10,0
4	0,86	2,5	3,8
6	0,60	1,0	1,5
8	0,46	0,8	0,5
10	0,37	0,8	0,5
12	0,31	0,4	0,5
> 12	3,68/n	0,3	0,5
TDTI (en %)		20,0	12,0

### *Límites de emisión de Flicker*

Se define al Límite de Emisión Individual de un usuario como aquel nivel de perturbación que puede inyectar en la red en su punto de suministro, y que no podrá ser superado en más de un 5% del tiempo total del período de medición.

El límite de emisión individual asignado a un usuario conectado a una red, se determina en función de su potencia contratada y su nivel de tensión (BT, MT o AT).

Límite de Emisión Individual para usuarios con tarifa T-1 ( $P < 10$  kW) conectados en BT ( $U \leq 1$  kV).

Se establece como Límite de Emisión Individual un  $P_{st}=1$ , medido en el punto de suministro sobre la impedancia de referencia fijada por Norma IEC 1000-3-3 para BT.

**Tabla VIII. Límite de Emisión Individual para usuarios con tarifa T-2 ( $10$  kW  $\leq P < 50$  kW) conectados en BT ( $U \leq 1$  kV).**

Potencia Contratada (kW)	Límites de Emisión Individuales ( $P_{st}$ )
$10 \leq P < 20$	1,00
$20 \leq P < 30$	1,26
$30 \leq P < 40$	1,58
$40 \leq P < 50$	1,86

**Tabla IX. Límite de Emisión Individual para usuarios con tarifa T-3 ( $P > 50$  kW) conectados en BT ( $U \leq 1$  kV) o MT ( $1$  kV  $< U < 66$  kV) y/o en AT ( $66$  kV  $\leq U \leq 220$  kV)**

Usuarios en BT ( $U \leq 1$ kV) $\frac{S_L}{S_{MT/ BT}} = K_1$	Usuarios en MT y AT ( $1$ kV $< U \leq 220$ kV) $\frac{S_L}{S_{CC}} = K_2$	Límites de Emisión Individuales ( $P_{st}$ )
$K_1 \leq 0,1$	$K_2 \leq 0,005$	0,37
$0,1 < K_1 \leq 0,2$	$0,005 < K_2 \leq 0,01$	0,46
$0,2 < K_1 \leq 0,4$	$0,01 < K_2 \leq 0,02$	0,58
$0,4 < K_1 \leq 0,6$	$0,02 < K_2 \leq 0,03$	0,67
$0,6 < K_1 \leq 0,8$	$0,03 < K_2 \leq 0,04$	0,74
$0,8 < K_1$	$0,04 < K_2$	0,79

Los puntos de control son las barras de Estaciones Transformadoras (AT/MT, o MT/MT), en todas las barras de todas las EETT una vez por semestre; Centros de Transformación MT/BT en el tres por ciento de los centros de transformación MT/BT por semestre.

En lo que respecta al control sobre clientes, se aplica de la siguiente manera:

- 0,005 % de los clientes de Pequeñas Demandas
- Uno por ciento (1%) de los clientes de las Tarifas T2, T3 y T5, no pudiendo resultar esta cantidad inferior a diez (10) registros mensuales.

En etapa de régimen se agrega por resolución 499/01 y 500/01 el control en puntas de línea de BT, que consiste en lo siguiente:

- Se realizarán mediciones en puntos de la red de BT en una cantidad equivalente al 10 % de las realizadas para Centros de Transformación para el semestre de control.
- Las mediciones en dichos puntos de red estarán asociadas a algunas de las de Centros de Transformación y se realizarán en forma simultánea con las mismas.
- La ubicación de tales puntos se determinará sobre la base de la información suministrada por el sistema geo-referencial, analizando el área de influencia del Centro de Transformación elegido, a partir del cual y sobre una de sus salidas, se procederá a medir inmediatamente antes del último usuario ubicado sobre la derivación considerada.
- De cotejar ambas mediciones puede resultar lo siguiente:

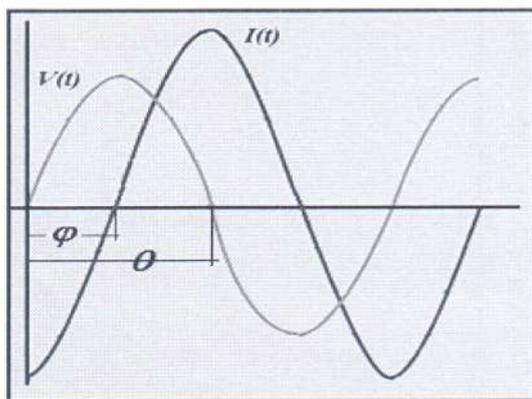
	Centro de Transformación	Punto de red	Resultado
a)	Alta tensión	Alta tensión	Penalizan todos los usuarios
b)	Alta tensión	Normal	Penalizan todos los usuarios
c)	Normal	Baja Tensión	Ver nota 1
d)	Normal	Normal	Medición No penalizada
e)	Baja Tensión	Baja Tensión	Penalizan todos los usuarios

*Nota 1:* En el supuesto indicado en el punto c), se deberá determinar el punto de corte aguas arriba sobre la red de BT hasta el cual se propagarán los resarcimientos a usuarios, ya sea mediante sucesivas remediciones o analíticamente a partir de la información resultante de la campaña de curvas de carga y de factores horarios "Ki"

### Capítulo 3. Desarrollo del instrumento virtual.

#### 3.1 ¿Por qué se realiza este instrumento?

En la energía eléctrica se encuentran involucradas dos señales, corriente y tensión; antes de alimentar a una carga, ambas son señales sinusoidales, con frecuencias y fase iguales pero con diferente amplitud, la amplitud y la fase de la corriente es función de la carga y el voltaje es por lo general constante, esto puede ser considerado como un caso ideal, ya que en la realidad por un lado los elementos que integran a las cargas de los sistemas eléctricos no son lineales, contribuyen por sí solas una degradación de las formas de onda de tensión.



$$I(t) = I_m \cos(\omega t \pm \varphi)$$

$$V(t) = V_m \cos(\omega t \pm \theta)$$

Figura 3.1-Señal sinusoidal (CA)

Al analizar la calidad de la energía eléctrica, uno de los fenómenos que produce una disminución de la calidad es la presencia de componentes armónicos en la corriente, producidos por cargas no lineales. Estas cargas pueden estar ubicadas tanto en los hogares como en los comercios o industrias.

Entre las cargas no lineales más comunes, con posibilidades de inyectar una alta cantidad de armónicos a la red, se encuentran las computadoras personales (PC's), las lámparas fluorescentes de bajo consumo (LFCs) y las LEDs, los variadores de velocidad y arrancadores suaves, y todos aquellos dispositivos que incluyan componentes electrónicos en su diseño.

Muchos son los problemas que pueden provocar los armónicos en una red. Entre ellos, que los índices máximos de distorsión de corriente y tensión sean excedidos, provocando riesgos en equipos sensibles (computadoras personales, dispositivos de protección, banco de capacitores, motores, etc.).

Entre otras de las consecuencias que acarrea la presencia de armónicos en la red, se encuentra el impacto provocado en la corriente de neutro.

La literatura técnica advierte que es probable encontrar como máximo una corriente de neutro igual a  $\sqrt{3}$  veces la corriente de línea, conclusión demostrable desde el punto de vista teórico. Es evidente que si las fases de un sistema trifásico alimentan cargas con alto contenido de armónicos (computadoras, monitores, lámparas fluorescentes, etc.), se tendrá que sobredimensionar la sección del conductor de neutro de la instalación eléctrica.

Cada día es mayor el número de cargas que generan este tipo de corrientes y, además, cada vez mayor el número de usuarios que requieren mejor calidad en el suministro eléctrico. Es por esto que la problemática de la calidad del producto está siendo objeto de un interés creciente en cuanto a su análisis, medición y compensación. Por lo expuesto anteriormente, queda clara la necesidad de contar con instrumentos de medición capaces de evaluar los índices de calidad del producto eléctrico en algún punto de la red, y que esta información es de utilidad para las empresas prestadores del servicio y también para los usuarios, ya que a partir de estas mediciones pueden establecerse estrategias para resolver o mitigar los problemas que se han comentado resumidamente.

Hay varios tipos de equipos en el mercado que se pueden utilizar para monitorear la calidad de la energía eléctrica, o para realizar estudios del consumo de energía. Sin embargo, son generalmente muy costosos. Estos equipos permiten además programar y almacenar los parámetros clásicos de evaluación de una red para su posterior análisis: distorsión armónica de tensión y corriente, potencias (activa, reactiva, aparente), factor de desplazamiento, factor de potencia verdadero, valores eficaces de tensión, corriente, con sus respectivas formas de ondas, acompañadas con los componentes armónicos en valores de amplitud y fase, etc.

El HIOKI no deja de ser un instrumento muy completo para el análisis de redes eléctricas, sin embargo, no es posible ampliar sus capacidades de medición, o actualizarlo, por ejemplo, cuando el disco de 3 1/2" se llena los datos hay que transferirlos a una PC y no tiene la posibilidad de guardar los datos en otro medio. A este tipo de instrumentos se le conoce como instrumentos tradicionales.

Cuando se requiere tener un instrumento de medición a la medida, es decir, que las capacidades de medición sean modificadas por el usuario, surge una alternativa la cual es la instrumentación virtual.

Otra razón por la cual surge la inquietud de diseñar y construir un instrumento virtual que mida la calidad de la energía eléctrica, no solo es que el equipo existente sea obsoleto, sino que es el único con el que se cuenta y recientes exigencias de mediciones fueron detectadas en varios edificios de la Facultad de Ingeniería y externamente en los Anexos de la Facultad, en laboratorios pertenecientes a Ciencias Exactas, que padece problemas de caídas de tensión, etc. Por lo anteriormente comentado el estudio, proyecto y diseño, de un analizador flexible, versátil y de bajo costo viene a cubrir una

necesidad institucional y académica.

### 3.2. *¿Por qué utilizar un instrumento virtual?*

La rápida adopción de la PC en los últimos 20 años generó una revolución en la instrumentación de ensayos, mediciones y automatización. Un importante desarrollo resultante de la ubicuidad de la PC es el concepto de instrumentación virtual, el cual ofrece variados beneficios a ingenieros y científicos que requieran mayor productividad, precisión y rendimiento.

Un instrumento virtual consiste de una computadora del tipo personal PC, notebook, un software de programación en G como el que se utilizara en este proyecto llamado LabVIEW, hardware económico en lo posible de código abierto o comercial, tales como placas adquisidora de datos, con sus respectivos controladores, (drivers), que cumplen, en conjunto, las funciones de instrumentos tradicionales. Los instrumentos virtuales puede utilizar todos los recursos que ofrece las PCs actuales, tales como velocidad de procesamiento y cálculo y además capacidad de comunicación con el hardware y almacenamiento de los datos en la memoria de la PC, digamos que el instrumento virtual y la tecnología de circuitos integrados han experimentado avances significativos en las últimas dos décadas, es el software el que realmente provee la ventaja para construir sobre esta potente base de hardware para crear los instrumentos virtuales, proveyendo mejores maneras de innovar y de reducir los costos y los tiempos de desarrollo significativamente. Con los instrumentos virtuales, los ingenieros y científicos construyen sistemas de medición y automatización que se ajustan exactamente a sus necesidades (definidos por el usuario) en lugar de estar limitados por los instrumentos tradicionales de funciones fijas (definidos por el fabricante).

Los instrumentos autónomos tradicionales, tales como osciloscopios y generadores de ondas, son muy poderosos, caros y diseñados para llevar a cabo una o más tareas específicas definidos por el fabricante. Sin embargo, el usuario por lo general no puede extender o personalizar esas tareas. Las perillas y botones del instrumento, sus circuitos electrónicos y las funciones disponibles para el usuario son todas específicas a la naturaleza del instrumento. Además, deben desarrollarse una tecnología especial y costosos componentes para construirlos, lo cual los hace muy caros y lentos para adaptarlos.

Debido a que están basados en la PC, los instrumentos virtuales aprovechan inherentemente los beneficios de la última tecnología de las computadoras personales corrientes.

Además de incorporar características poderosas, esas plataformas también ofrecen un acceso sencillo a herramientas también poderosas tales como la Internet. Los instrumentos tradicionales también adolecen frecuentemente de falta de portabilidad, en tanto que los *instrumentos* virtuales que corren en las computadoras portátiles automáticamente incorporan esta particularidad.

---

Los ingenieros cuyas necesidades, aplicaciones y requerimientos varían muy rápidamente, necesitan flexibilidad para crear sus propias soluciones.

Un instrumento virtual puede adecuarse a sus necesidades particulares sin necesidad de reemplazar todo el instrumento dado que posee el software de aplicación instalado en la computadora y al amplio rango disponible de hardware para instalar en ella.

A excepción de los componentes especializados y los circuitos hallados en los instrumentos tradicionales, la arquitectura general de los instrumentos autónomos es muy similar a la hallada en un instrumento virtual basado en computadora.

Ambos requieren uno o más microprocesadores, puertos de comunicación (por ejemplo: serie y GPIB) y capacidad de mostrar resultados así como también módulos de adquisición de datos. Lo que diferencia uno del otro es su flexibilidad y el hecho de que se puede modificar y adaptar el instrumento a sus necesidades particulares. Un instrumento tradicional podría contener un circuito integrado para llevar a cabo un conjunto particular de instrucciones de procesamiento de datos; en un instrumento virtual estas funciones podrían llevarse a cabo por el programa que corre en el procesador de la computadora.

Existe una amplia variedad disponible de hardware que se puede insertar en una computadora o bien acceder a través de una red. Estos dispositivos ofrecen un amplio rango de capacidades de adquisición de datos a un costo significativamente inferior que el correspondiente a dispositivos dedicados. A medida que la tecnología de circuitos integrados avanza y los componentes comunes se vuelven más baratos y poderosos, también lo hacen las placas que ellos utilizan. Junto con estos avances tecnológicos viene un incremento en las velocidades de adquisición de datos, precisión de las mediciones y mejor aislamiento de las señales.

El software es el componente más importante de un instrumento virtual. Con la herramienta de software apropiada los ingenieros pueden crear eficientemente sus propias aplicaciones, diseñando e integrando las rutinas que requiere un proceso en particular. También pueden crear las interfaces de usuario que mejor satisfagan el objetivo de la aplicación y de aquéllos que van a interactuar con ellas.

Pueden definir cómo y cuándo la aplicación adquiere datos desde el dispositivo, cómo los procesa, manipula y almacena los datos y cómo se presentan los resultados al usuario.

Contando con un software poderoso, se puede dotar a los instrumentos con capacidades de inteligencia y de toma de decisiones de manera tal que se adapten cuando las señales medidas varíen inadvertidamente o cuando se requiera mayor o menor potencia de procesamiento.

Un instrumento virtual no está limitado a estar confinado en una computadora autónoma. En realidad, con los recientes desarrollos en tecnologías de redes y la Internet, es más común utilizar la potencia de conectividad de los instrumentos con el fin de compartir tareas. Ejemplos típicos incluyen supercomputadoras, monitoreo distribuido y dispositivos de control, así como también datos o visualización de

resultados desde múltiples sitio

El instrumento virtual lo constituye el conjunto de *software y hardware* que agregado a una PC, permite a los usuarios interactuar con el instrumento virtual como si se estuviera utilizando un instrumento electrónico hecho a medida de los requerimientos del cliente. Las mediciones se realizan sobre el campo real, pero los sistemas de medida, control, mecanismos, registradores, y otros dispositivos serán adquiridos e interconectados en el campo virtual. La idea es sustituir un equipo comercial, el cual es diseñado para una determinada cantidad de funciones, por uno virtual, que tiene como ventaja principal que se puede adaptar mediante programación del software a las necesidades del momento. La instrumentación virtual tiene una amplia gama de aplicaciones, una de sus principales aplicaciones es en la industria para sistemas de medición, monitoreo de procesos, y aplicaciones de control. También pueden ser utilizados en laboratorios de universidades en carreras de ingenierías orientadas a procesos de control industrial. También es muy utilizado en procesamiento digital de señales, procesamiento en tiempo real, para aplicaciones biomédicas, manipulación de imágenes y audio, diseño de filtros digitales, generación de señales, automatización de hogares y edificios inteligentes, (domotica), entre otras. La Figura 3.1 muestra el diagrama general de un sistema de instrumentación virtual basado en la adquisición de datos por PC.



Figura 3.2-Esquema general de un Instrumento Virtual

Puede decirse que un sistema de este tipo está formado básicamente por: sensor o transductor, mas, placa acondicionadora de la señal de entrada, placa de adquisición de datos(DAQ), hasta aquí es lo que se llama hardware del Instrumento virtual (V.I). Luego lo sigue el Software en este caso LabVIEW, que corre en una pc tradicional.

Las variables eléctricas que puede medir el instrumento virtual, pueden ser del tipo digital o del tipo analógico. En forma muy sintética, una variable es del tipo digital cuando solo se reconocen dos estados posibles, 0 o 1, mientras que una variable es analógica cuando se reconocen múltiples estados entre un valor mínimo y uno máximo.

Los sensores o transductores se encargan de convertir una señal física (temperatura, luz, sonido, ondas de tensión y corriente, etc.) en una señal eléctrica de corriente o voltaje que luego serán acondicionadas en forma electrónica, para que pueda ser aceptada por la placa adquisidora de datos, la cual se encarga de digitalizar la señales de entrada, que luego son transmitidas a la PC, para ser procesadas por un

software y visualizadas por el usuario.

### 3.3. Diseño del instrumento virtual propio

#### 3.3.1. Descripción general

El instrumento virtual consta de cuatro bloques funcionales, como se muestra en la figura. Estos son bloque (a) transductores de medida, bloque (b) acondicionamiento de la señal, bloque (c) Placa de adquisición de datos, (d) computadora personal, software LabVIEW.

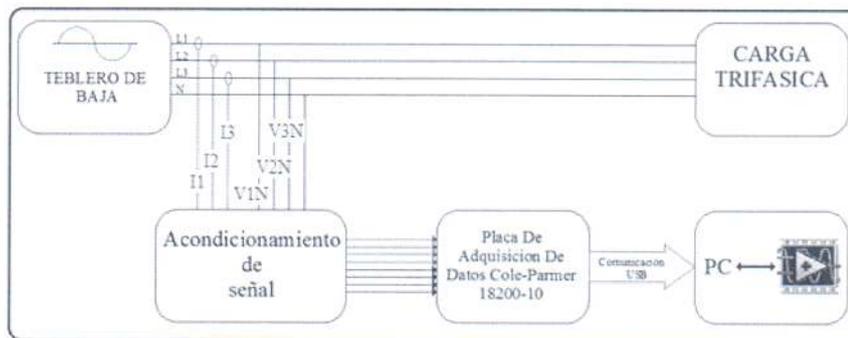


Figura 3.3-Esquema del conexionado del Instrumento Virtual.

- a) **Transductores de medida:** El transductor ideal sería aquel en que la relación entre la magnitud de entrada y la magnitud de salida fuesen proporcionales, es decir lo más lineal posible a lo largo del rango de medida y de respuesta instantánea e idéntica para todos los elementos de un mismo tipo. Sin embargo, la respuesta real de los transductores nunca es del todo lineal, tienen un rango limitado y suelen estar afectada por perturbaciones del entorno exterior y tiene un cierto retardo en la respuesta.
- b) **Acondicionamiento de la señal:** La función principal que realiza este bloque es el de transformar las corrientes y voltajes a valores más seguros para la medición, de tal manera que puedan ser procesados por la tarjeta de adquisición de datos, debido a que en la entrada se van a tener corrientes y voltajes elevados, que son riesgosas para la persona que opere el instrumento y para la entrada de la placa, es por ello que se debe adecuar las señales de tensión y corriente a niveles más bajos, para que puedan ser admitidas por las entradas de la placa adquisidora de datos (DAQ).
- c) **Placa adquisidora de datos (DAQ):** La función de este bloque es tomar la señal

del bloque de acondicionamiento de las señales de entrada y digitalizarla, para su posterior procesamiento. La velocidad de muestreo es uno de los parámetros más importantes que tiene que cumplir junto con la cantidad de entradas analógicas que posee y su portabilidad. También una de las características a tener en cuenta es el protocolo de comunicación entre la PC y la placa. Todas estas características hacen a una de las primeras decisiones que se tomarán a la hora de elegir la placa adecuada para una medición satisfactoria de las variables eléctricas.

- d) **Computadora personal:** dado que una de las premisas de este proyecto es que el instrumento virtual sea portátil se optó por una notebook, hoy en día cualquier notebook tiene la capacidad necesaria para soportar el software LabVIEW y el protocolo de comunicación entre la PLACA DAQ y la PC en este caso USB.
- e) **LabVIEW:** Es el software de programación en G, bajo el cual se va a desarrollar el programa que analiza y procesa los datos para después visualizar las mediciones obtenidas por los transductores, y digitalizada por la placa, haciendo posible la interfaz con el usuario.

### 3.3.2 Descripción del Hardware

Las características del hardware que tendrá el medidor son:

- Medición indirecta de la onda de tensión.
- Medición indirecta de la onda de corriente, se utilizara un transductor de corriente.
- Acondicionamiento de la onda de tensión y corriente para ser soportada por la placa adquisidora de datos DAQ.
- Digitalización de las señales de corriente y voltaje a través de la placa de adquisición de datos 18200 de la marca Cole-Palmer.
- Por medio del software LabVIEW se analizarán y procesarán los datos tomados por la placa, para determinar los diferentes parámetros eléctricos, que tienen que ver con la calidad de la energía eléctrica.

Cuando se diseña un sistema, el primer paso es el identificar los requerimientos del mismo y con base a ellos seleccionar o diseñar el hardware que cumpla con ellos. Sin embargo para este caso se tiene que acoplar el diseño del equipo teniendo en cuenta los materiales con los que dispone el Departamento de Ingeniería Eléctrica, y una de las premisas del proyecto que es que sea un instrumento versátil, accesible económicamente y portátil.

En todo momento a lo largo de este proyecto se evaluaron elecciones de

compromiso, entre costo, calidad del instrumento de medida ya sea sensores, transductores de corriente y voltaje, disponibilidad entre las distintas placas de adquisición con las que se cuenta, para así tratar de llegar a cumplir con los objetivos impuestos por este Proyecto Final.

### ***3.3.2.1. Transductores de corriente.***

Cualquiera que sea el sistema de medición de energía, debe tener elementos sensores de corriente adecuados, que convierta la magnitud de corriente original de una línea de distribución, a un nivel de corriente proporcional a ésta, para que pueda ser aceptada por la placa DAQ. Además se requiere también un rango dinámico extenso de medición, y también un amplio rango en el espectro en el dominio de la frecuencia.

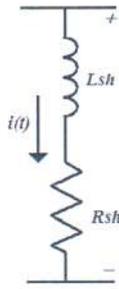
Para este proyecto lo que se va a medir es la corriente y las tensiones, en cada fase, con un alcance de 0.1 - 400[A] eficaz, con una componente de frecuencia fundamental igual a 50 Hz. El sensor debe además poseer linealidad y una respuesta en frecuencia adecuada para la medición de las componentes armónicas, por lo menos, de orden 51.

En base a lo anterior, se analizaron diferentes propuestas:

- ***Resistivos***: Shunt. Una resistencia provoca una caída de tensión proporcional a la corriente que circula por dicha resistencia Shunt.
- ***Inductivos***: Transformadores de Corriente. Una de las topologías existentes es la de un transformador convencional diseñado para tal fin, y otro es el llamado pinza aperométrica, en la cual, El cable a medir pasa por medio de un núcleo magnético que tiene un bobinado secundario que proporciona una tensión proporcional a la corriente que circula por el cable.
- ***Magnéticos(Efecto Hall)***: El sensor mide el campo magnético de un núcleo, generado por la corriente que circula por el cable a medir, que bobina al núcleo.
- ***Bobina Rogowsky***: Miden los cambios de campo magnético alrededor de un hilo por el que circula una corriente para producir una señal de voltaje que es proporcional a la derivada de la corriente ( $di/dt$ ).

### ***Sensor de corriente resistivo.***

Las resistencias “shunt” proporcionan una medición precisa y directa de la corriente, pero no ofrecen ningún aislamiento galvánico. La corriente shunt es la solución menos costosa disponible hoy día para la medición de corriente. Un modelo simple para la medición de corriente esmostrado en la figura.



El voltaje que cae sobre la resistencia shunt es proporcional a la corriente y a su frecuencia.

*Figura 3.4-Modelo simple de Shunt con inductancia parasita.*

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

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

La resistencia de Shunt es una opción bastante confiable y barata. Es una opción popular para medidores de energía. Sin embargo, al ser la corriente de shunt generada por un elemento resistivo, el calor generado en la resistencia es proporcional al cuadrado de la corriente que pasa a través de ella. Este problema de calentamiento hace que el shunt rara vez sea utilizado para la medición altas corrientes. Además de no poseer aislación galvánica, con el riesgo que trae a la seguridad de las personas que lo manipulen. Otro inconveniente, por el cual se descartara la resistencia shunt es que para conectarla a la red eléctrica hay que abrir el circuito eléctrico.

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

### *Sensores de corriente inductivos*

“Transformadores de corriente (TI)”. Es un transformador como se muestra en la figura 3.3.2. Utiliza el principio de un transformador el cual convierte la corriente primaria a una corriente secundaria de bajo nivel. La función de un transformador de corriente es la de reducir la corriente de un sistema eléctrico a valores normales y no peligrosos para el contacto directo con el usuario, además, aísla galvánicamente a la

placa de la tensión de línea, con el fin de estar protegidos ante una sobretensión y al tener un bajo nivel de tensión, el usuario puede manipular el equipo con toda seguridad y sin peligro para su salud.

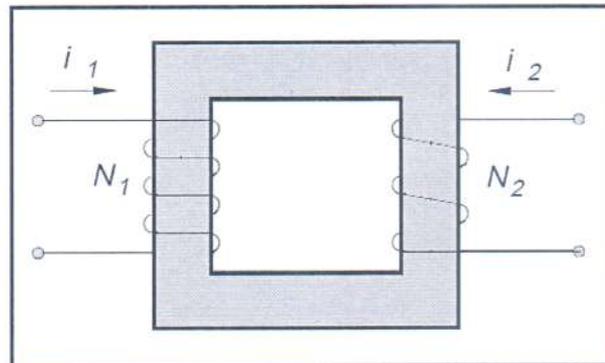


Figura 3.5-Modelo de transformador de corriente

Un transformador de corriente es un transformador de medida, donde la corriente secundaria está dentro de un valor de corriente normalizado proporcional a la corriente primaria, y desfasada de ella un ángulo cercano a cero. El TI es el sensor más común hoy en día entre los medidores de energía de gran potencia. El transformador de corriente puede medir con alta precisión y consume poca energía. Adicionalmente, el material de ferrita usado en el núcleo puede saturarse a altas corrientes. Recién en ese punto el T.I pierde su linealidad, cuando este llegue al punto de saturación de núcleo del TI. La saturación del TI puede ocurrir cuando la corriente aumenta más allá de la corriente que puede medir el transformador de corriente, o cuando hay una componente cuantiosa de DC en la corriente. Hoy día la solución para los problemas de saturación está en usar en el núcleo un material de ferrita con alta permeabilidad o incluso núcleo de aire.

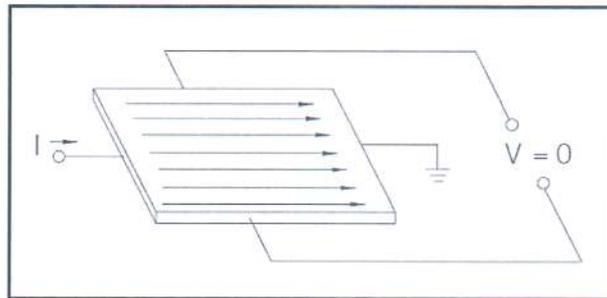
### *Sensores de corriente por campo magnético “Efecto Hall”*

El efecto Hall fue descubierto por el Doctor Edwin Hall en 1879. Hall estudio y desarrollo, la teoría del flujo de electrones propuesta por Kelvin unos 30 años antes. El Doctor Hall encontró que cuando un campo magnético es colocado de modo que su campo era perpendicular a una cara de un rectángulo delgado de oro por el cual fluía corriente, una diferencia de potencial aparecía en los extremos del material. Él encontró que este voltaje era proporcional a la corriente que fluye por el conductor y a la densidad de flujo o la inducción magnética perpendicular al conductor.

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

intensidad de este campo magnético con un sensor magneto-resistivo, se puede determinar exactamente la corriente.

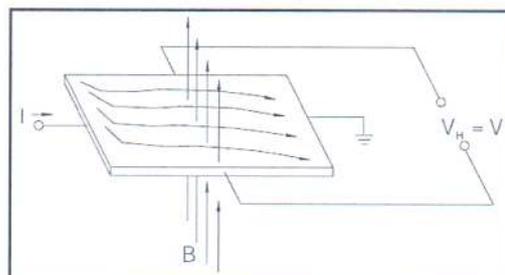
Cuando un conductor lleva una corriente, esta produce un campo magnético, y se genera un voltaje que es perpendicular tanto para la corriente como para el campo. Este principio es conocido como el efecto Hall.



*Figura 3.6- Principio de efecto Hall, sin campo magnético.*

En la **figura 3.6** se ilustra el principio básico del efecto Hall. Este muestra un material semiconductor (Elemento Hall) por el cual le atraviesa una corriente. La conexión de salida es perpendicular a la dirección de la corriente. Cuando no hay un campo magnético presente, la distribución de la corriente es uniforme y no hay diferencia de potencial vista en la salida.

Cuando un campo perpendicular está presente, como se muestra en la figura 3.3.4, una fuerza de Lorenz es ejercida sobre la corriente. Esta fuerza perturba la distribución de la corriente, resultando una diferencia de potencial a través de la salida. Este voltaje es el voltaje de Hall ( $V_H$ ).



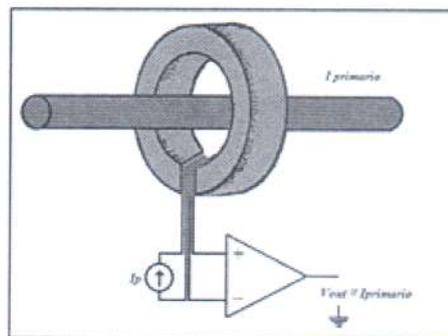
*Figura. 3.7- Principio de efecto Hall, con campo magnético presente.*

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

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

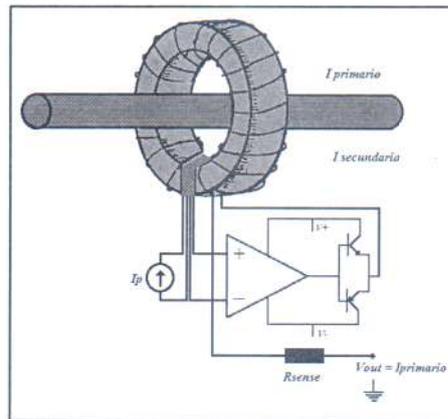
Existen dos tipos principales de sensores de Efecto Hall: de lazo abierto (open-loop) y de lazo cerrado (Close-loop). El segundo ofrece mejor precisión pero a un mayor costo, y la mayoría de los sensores de efecto hall que se encuentran en medidores de energía usan el diseño de anillo abierto para lograr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

En una topología de lazo abierto (open-loop), el elemento Hall de salida es simplemente un amplificador y la salida es leída por un voltaje que representa la medición de corriente a través de un factor de escala. Este es mostrado en la figura 3.8.



*Figura. 3.8.- Topología básica de un sensor de corriente de efecto Hall de lazo abierto.  
Sensor de corriente aislado de lazo abierto utilizando el efecto Hall.*

En una topología de lazo cerrado, la salida del elemento Hall maneja una bobina secundaria que generará un campo magnético para cancelar el campo de la corriente primaria. La corriente secundaria, es proporcional en escala a la corriente primaria por la proporción de la bobina secundaria. Que puede medirse a través de un voltaje en la resistencia de salida del sensor, tal como se muestra en la figura 3.9.



*Figura. 3.9- Topología básica de un sensor de corriente de efecto Hall de lazo cerrado. Sensor de corriente aislado de lazo abierto utilizando el efecto Hall.*

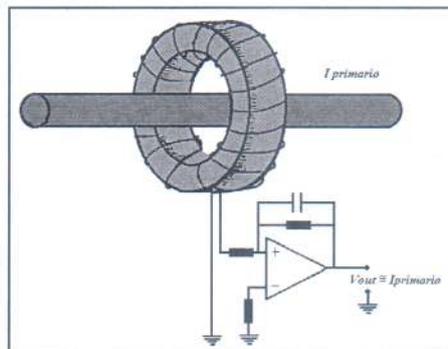
Para mantener el campo resultante en cero, los errores asociados con el flujo de compensación o niveles de voltaje por la temperatura, el flujo de sensibilidad y la saturación del corazón magnético también serán eficientemente cancelados. El sensor de corriente de efecto hall de lazo cerrado también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

### *Sensores de corriente de Bobina Rogowsky*

Una bobina Rogowski es un inductor el cual tiene inductancia mutua con el conductor que lleva la corriente primaria (Figura 3.3.7). La bobina Rogowski es normalmente hecha por una bobina con núcleo de aire de forma que no haya histéresis, saturación y que hace que la señal de salida del este sensor no sea igual a la señal de la línea.

La bobina de Rogowski es usada para la medición de corriente alterna. Ella trabaja midiendo el campo magnético ( $B$ ) causado por la corriente ( $i(t)$ ) sin necesidad de hacer contacto eléctrico con el conductor. Esta bobina ha sido usada en varias formas para detectar y medir corrientes eléctricas por décadas pero sólo hasta años recientes, está siendo potencialmente hecha a escala comercial. Este sensor opera bajo un principio simple. En una bobina de núcleo de aire con forma toroidal y  $N$  vueltas, es colocado alrededor de un conductor. Cuando una corriente pasa a través del conductor, este induce un campo magnético alterno que produce un voltaje en los bordes de la

bobina de núcleo de aire. La bobina es eficazmente una inductancia mutua acoplada al conductor medido y el voltaje de salida es proporcional a la velocidad de cambio de la corriente. El voltaje de salida de la bobina son solamente valores  $di/dt$  que cambian de acuerdo a la corriente primaria, por eso a este transductor se le debe integrar el voltaje de salida, para proveer una salida que pueda reproducir la forma de onda de la corriente. Para proveer una salida del sensor que reproduzca la forma de onda de la corriente, la combinación de bobina e integrador en la figura 3.3.7 provee un sistema donde la salida es independiente de la frecuencia, el cual permite tener exactitud



*Figura. 3.10- Topología básica de una bobina de Rogowski conectada a un integrador.*

Luego de mencionar las diversas tecnologías que se conocen para la medición de la corriente eléctrica, se eligió como transductor de la corriente eléctrica, una pinza amperométrica.

El criterio de selección, como antes se mencionó, se iba a hacer, haciendo elecciones de compromiso entre costos, prestaciones y disponibilidad de las partes que compongan este equipo. Por ello en la siguiente página se detalló cómo se realizó el proceso de selección del sensor de corriente.

Como lo que se debe medir es una corriente, en cada fase, del rango 0-400[A] eficaz de componente fundamental de frecuencia igual a 50 Hz. El sensor debe además poseer linealidad para componentes armónicas de orden 15, por lo menos. En base a lo anterior, se analizaron diferentes alternativas:

- La opción más simple es recurrir al uso de transformadores de medición TI, y realizar un conexionado en el secundario **Figura 3.3.2**, y así reducir la corriente. Luego, con una resistencia de valor conocido obtenemos una caída de tensión que puede ser admitida por la DAQ. Esta alternativa posee ventajas de linealidad, bajo error y aislación eléctrica del circuito de medición con el circuito de medida, pero para un instrumento portátil como el que se quiere construir presenta la desventaja de su tamaño y peso. Además, salvo que se utilicen transformadores de núcleo partido, que son más costosos, obliga a desmontar el conductor que transporta la corriente a medir para colocar el transformador de medida, por lo que esta opción fue descartada para un equipo

portátil.

- Una opción analizada fue la de utilizar sensores de corriente basados en el principio de una bobina de Rowosky.

Las ventajas de una bobina de Rogowski para la medida de pulsos de corriente, respecto a los transformadores de corriente, son:

- **Linealidad.** La medida es lineal debido a que el núcleo es de un material no ferromagnético y, por tanto, no se producen fenómenos de saturación o histéresis. Esto significa que la misma bobina se puede utilizar para medir un amplio rango de corrientes.
- **Aislamiento galvánico.** Por tanto, el circuito de medida está aislado del circuito de potencia. Esto constituye una gran ventaja cuando se quieren medir grandes intensidades.
- **Buen ancho de banda.** Este tipo bobinas pueden medir corrientes de frecuencias de algunos Hz hasta cientos de KHz.
- **Facilidad de uso,** ya que no requieren un montaje especial.

Por motivos de disponibilidad y fondos no fue posible contar con estos transductores. Luego de analizar distintas alternativas, se llegó a la conclusión de que ésta es la mejor opción para un dispositivo portátil. Sería importante adquirirlos para emplearlos en proyectos futuros o en la mejora del equipo construido.

Por lo tanto, la opción más conveniente dentro de las estudiadas, es recurrir a pinzas amperométricas ya sea de efecto Hall o basadas en el principio del transformador. En nuestro caso utilizaremos una pinza MASTECH, MS3302, que es la que se suele utilizar en registradores y testers comerciales.



Características generales de la Pinza amperométrica:

Rango de corriente: 0,1 – 400 [A] a.c RMS.

Rango de salida:

- para 10mV:1mV: equivale a 0,1 amp a.c RMS
- para 1mV: 1mV; equivale a 1 amp a.c RMS

Tensión de trabajo: 600V; CAT II; para IEC: 1010-1

*Figura 3.11-Pinza Amperométrica*

### 3.3.2.2. Transductores de tensión.

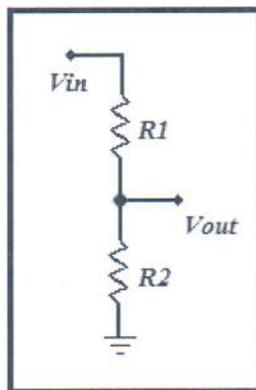
La principal función del sensor de tensión es reducir en nivel de tensión para proteger el equipo y a los usuarios, sin perder las siguientes características:

1. Bajo error.
2. Medición lineal.
3. Que posea aislación galvánica entre el circuito de medición y el circuito de medida.
4. Pequeño (para poder lograr un instrumento portátil).
5. Económico

Lo que se debe medir es una tensión, en cada fase, del rango 0-260[V] eficaz de componente fundamental de frecuencia igual a 50 Hz. El sensor debe además poseer linealidad para componentes armónicos de orden 10, por lo menos.

En base a lo anterior, se analizaron varias propuestas:

1. La opción más simple es realizar un **divisor resistivo**, que consiste en colocar dos resistencias de valor conocido con el fin de lograr que en una de ellas caiga la mayor parte de la tensión, de esta forma se obtiene en la salida ( $V_{out}$ ) una tensión proporcional a la de la entrada, que junto con el valor de las resistencias se obtiene, la tensión a la entrada ( $V_{in}$ ).



$$V_{out} = \frac{R1}{R1 + R2} \cdot V_{in}$$

Figura 3.12-Topología Divisor resistivo

Este sistema posee el inconveniente de que no existe aislación eléctrica entre el circuito de medición y el circuito de medida, por lo que esta alternativa se rechazó por obvias razones de seguridad.

2. Otra opción analizada fue recurrir al uso de **transformadores de medición** de tensión. Esta posibilidad posee ventajas de linealidad, bajo error y aislación eléctrica del circuito de medición con el circuito de medida, pero un transformador con estas características es muy pesado y voluminoso para un

instrumento portátil como el que se quiere construir, por lo tanto su tamaño y peso representa una importante desventaja, por ello, se descarta esta opción.



Figura 3.13– Transformador de medida.

Luego de hacer un estudio técnico-económico según costos tamaño y peso: se opto por utilizar unos transformadores comerciales de 220volts a 12 volts 300 mA.



Figura 3.14– Transformadores de medida utilizados.

### 3.3.2.3. Acondicionamiento de la señal de corriente.

Lo que se realizó en esta placa es el acondicionamiento de las tres corrientes de fases a medir, ya que al utilizar una pinza amperométrica, la tensión que entrega a la salida de sus terminales es de entre 1[mV/A] hasta 10[mV/A]. Esos niveles de tensión son muy pequeños para tener una buena resolución. Para amplificar la señal se utilizo amplificadores operacionales, con un esquema de amplificador no-inversor, en la siguiente. Figura 3.3.10 se muestra el conexionado.

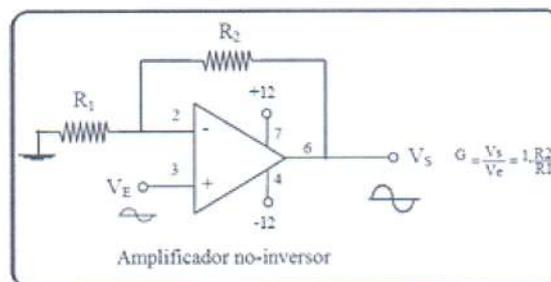


Figura 3.15- amplificador operacional no inversor

Para el diseño, simulación y construcción de la placa acondicionadora de corriente se utilizó el software *ELECTRONICS WORKBENCH*, el cual es un programa de diseño y simulación de circuitos electrónicos. Entonces para llevar la tensión alterna de los *mV* a los *volts*, que es el nivel de tensión que maneja la placa adquisidora de datos, hay que amplificar la señal de salida de las pinzas amperométricas. También hay que tener en cuenta que para que se pueda amplificar la señal completa, o sea, los semiciclos negativos, se debe alimentar los amplificadores con una fuente dual de  $\pm 12$  Volts. Entonces lo primero que hay que construir es la fuente de alimentación de los amplificadores, dicha fuente se puede realizar con un banco de baterías, que la ventaja que tiene es independiente de la red, pero, las baterías ocuparían un espacio que no disponemos, entonces, se optó por la fuente dual de  $\pm 12$  Volts. Y luego la etapa amplificadora de la placa.

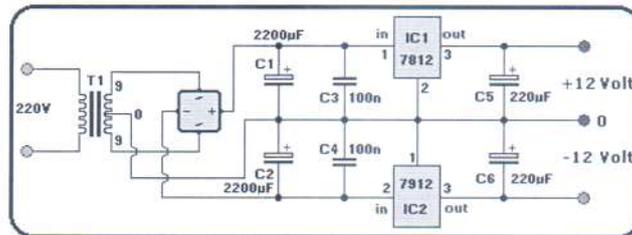


Figura 3.16-Fuente de alimentación de la placa acondicionadora de corriente.

Para amplificar las señales de corrientes se utilizó el circuito integrado (CI) TL 084, el cual tiene en su interior cuatro OP, que serán los encargados de amplificar la señal que entregan las pinzas, como la pinzas tienen dos escalas de medición, el amplificador tendrá que tener dos ganancias, una para 1mV y otra para los 10mV.

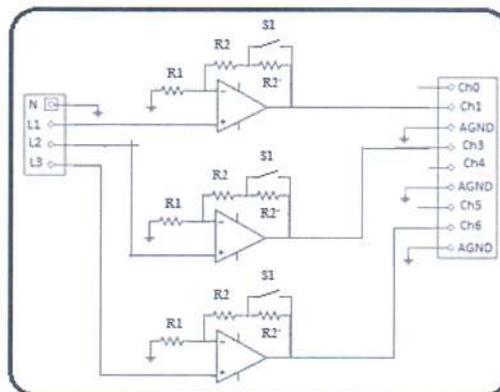


Figura 3.17- Placa acondicionadora de corriente construida.

Finalmente la placa quedó terminada como muestra la figura 3.18

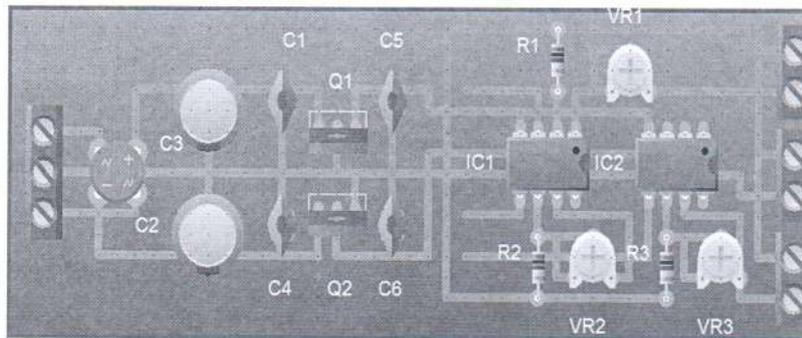


Figura 3.18- Placa acondicionadora de corriente construida.

### 3.3.2.4 .Acondicionamiento de la señal de tensión.

Lo que se realizó en esta placa es el acondicionamiento de las tres tensiones de fases a medir. La tensión del secundario de cada transformador, los cuales redujeron la tensión a 12 Vrms, luego ingresará a un bloque, que no es otra cosa que un divisor resistivo.

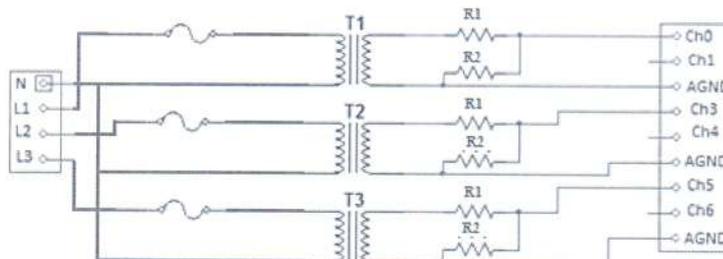
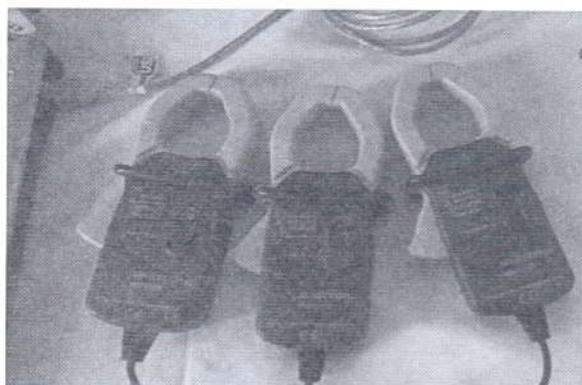
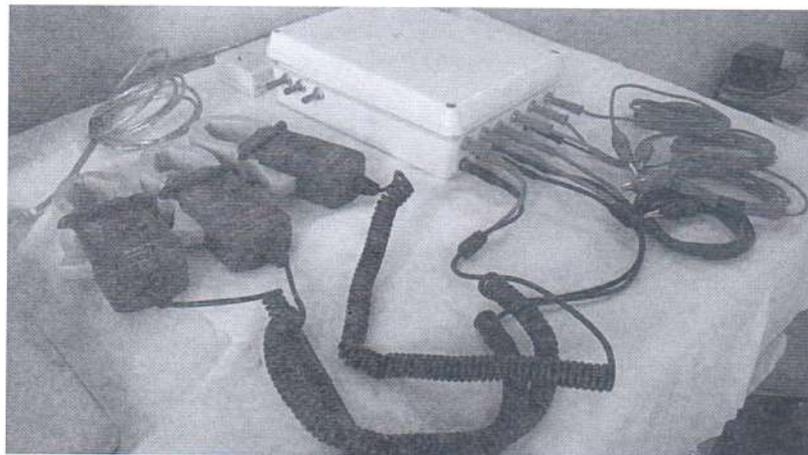
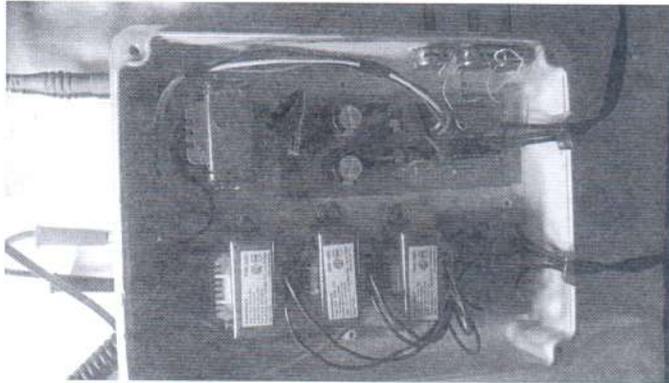


Figura 3.19 – Placa acondicionadora de tensión construida.

Luego de analizar por separado cada componente del dispositivo, se procedió con la construcción del equipo portátil, el cual se muestra en las siguientes imágenes:





Para la construcción del mismo se utilizó un gabinete plástico de los que se usan en instalaciones eléctricas, dividiéndolo en dos niveles para poder aprovechar mejor el lugar disponible. En el nivel inferior se colocaron los transformadores de medida, y la fuente para obtener  $\pm 12$  V y en las placas acondicionadoras de corriente y la placa acondicionadora de tensión. Y en el segundo nivel se colocó la placa de adquisición de datos.

### 3.3.2.5. Descripción de la placa de adquisición de datos (DAQ)

#### *Generalidades.*

También conocidas como DAQ es el dispositivo electrónico que recibe la información del mundo exterior y la envía a la PC o bien se envía desde la PC para dar órdenes a las salidas de la placa. Existe gran cantidad de modelos de DAQ diseñadas para las distintas interfaces que posee una computadora personal (puerto serie, puerto paralelo, bus ISA, bus PCI o bus USB).

#### *Especificaciones más importantes de una placa de adquisición:*

- ***Rango de una entrada analógica:***

El rango de una entrada analógica define los niveles de tensión o de corriente, máximos y mínimos que el convertor analógico a digital de la placa de adquisición puede cuantificar. Así es común encontrar rangos de 0 a 10V o de -10 a 10V, muchas veces seleccionables de manera que el usuario elija la opción que mejor se adapta a sus necesidades.

- ***Resolución de una entrada analógica:***

Resolución es el número de bits que el convertor analógico a digital usa para representar la señal analógica. La resolución de entrada de un sistema de adquisición se especifica comúnmente en "**N° de bits**". La mayoría de las placas de adquisición comerciales ofrecen 12 bits de resolución y en menores cantidades existen otras de 8, 10, 14 y 16 bits. La conversión desde bits de resolución a la verdadera resolución de describe como:

$$\text{Resolución} = \frac{1}{2^N}; \text{ donde } N = \text{N}^\circ \text{ de bits}$$

Para determinar la resolución en volts por ejemplo, debemos tomar el rango total de tensión de entrada (denominado a veces fondo de escala FE) y dividirlo por la resolución especificada. Por ejemplo para una resolución de 12 bits y un fondo de escala de 5V la resolución será:

$$\begin{aligned} \text{Resolución} &= 1 / 4096 = 0,0244 \%, \text{ o bien} \\ \text{Resolución (en volts)} &= 5V / 4096 = 1,22 \text{ mV} \end{aligned}$$

Como resulta evidente, a mayor resolución mayor número de divisiones en las cuales el rango se divide, y por lo tanto, más pequeño el cambio en la tensión de entrada que puede ser detectado.

Como la cantidad de bits con los cuales trabaja el conversor analógico-digital (A/D) de la placa de adquisición es un valor fijado por el fabricante, la clave para encontrar la resolución más apropiada para una aplicación es trabajar con el valor de fondo de escala (FE) que generalmente sí es ajustable por usuario.

En general los conversores A/D de alta resolución son más costosos que los de baja resolución y por lo tanto deberá utilizarse un conversor A/D que por lo menos tenga 1 bit más de resolución que la requerida por la aplicación.

- **Exactitud:**

La exactitud o nivel de error de entrada puede especificarse de diferentes formas en una placa de adquisición, tres de los métodos más comunes se describen a continuación. Para los cálculos mostrados se parte de un conversor A/D de 12 bits y un fondo de escala de 5V (0 a 5V).

Ejemplos:

1- Exactitud: 0,024 % de lectura  $\pm$  1 bit  
 $5V * (0,024/100 + 1/4096) = 2,42 \text{ mV}$

2- Exactitud:  $\pm$  2 bits  
 $2 * (5V/4096) = 2,42 \text{ mV}$

3- Exactitud: 0,048 % del FSR (Full Scale Range)

$5V * (0,048/100) = 2,42 \text{ mV}$

En estos ejemplos, la exactitud del conversor A/D es especificada en diferentes formas, pero significan lo mismo: 2,42 mV.

- **Velocidad de muestreo:**

La velocidad de muestreo representa cada cuanto tiempo la conversión analógica a digital ocurre. La máxima velocidad de muestreo también es una especificación muy importante. Comúnmente está dada en muestras/segundo (sample/sec; Ksample/sec ó sample/sec) en vez de utilizar el Hz. Por otro lado la mayoría de las placas de adquisición multicanal consisten de un solo conversor A/D y un multiplexor de entrada que actúa como llave para seleccionar a alguno de los canales de entrada del cual se toman muestras. Pero cuando la adquisición se hace sobre varios canales de entrada, la máxima velocidad de muestreo por canal se obtiene dividiendo la máxima velocidad de conversión del A/D dividida por el número de canales

---

muestreados. Por ejemplo, en una plaqueta de 8 canales de entrada que tiene una especificación de 100Ksamples/sec, si seleccionamos un solo canal de entrada este será muestreado a una frecuencia de hasta 100 Ksample /sec, si en cambio muestreamos 4 canales, la velocidad bajará a 25Ksamples/sec por canal.

La teoría de muestreo establece que la mínima velocidad de muestreo que deberá utilizarse en una aplicación debiera ser:

*Frecuencia de muestreo (para medida de una frecuencia) = 2 \* frecuencia mayor.*

*Frecuencia de muestreo (para ver el detalle de forma de onda) = 10 \* frecuencia mayor.*

De no cumplirse con el teorema de muestreo se produce un error denominado aliasing que consiste en tener una señal digitalizada de menor frecuencia que la real.

Entradas diferencial o desbalanceada y número de canales. En muchas plaquetas de adquisición se ofrece la posibilidad de configurar las entradas analógicas en forma diferencial o en forma desbalanceada. El modo diferencial consiste en que la tensión que se mide es la diferencia entre las tensiones aplicadas a dos entradas. Esto es conveniente especialmente en sistemas que toman datos desde dispositivos que están localizados a mucha distancia, ya que provee mejor inmunidad al ruido.

Las entradas desbalanceadas (single-ended) en cambio están referidas a un punto de masa común. Generalmente se usa esta configuración cuando el nivel de la tensión de entrada es superior a 1V y la distancia entre la fuente de la señal (el sensor) y la placa de adquisición es corta (menos de unos 4-5 metros).

El número de canales de una placa está determinado por el multiplexor de entrada y es especificado para las dos configuraciones mencionadas, de esta forma es común una especificación de 16 canales si se usa la placa en modo desbalanceado y 8 canales si se usa en modo diferencial.

### ***Software utilizado en instrumentación virtual: Generalidades.***

Los datos adquiridos se visualizan, analizan, y almacenan en una computadora utilizando software específico. Los controles y visualizaciones se pueden desarrollar utilizando varios lenguajes de programación de propósito general como Visual Basic, C++, Fortran, Java, Lisp, Pascal.

Los lenguajes especializados de programación utilizados para la adquisición de datos son LabVIEW, que ofrece un entorno gráfico de programación optimizado, y MATLAB. Estos entornos de adquisición proporcionan un lenguaje de programación además de bibliotecas y herramientas para la adquisición y posterior análisis.

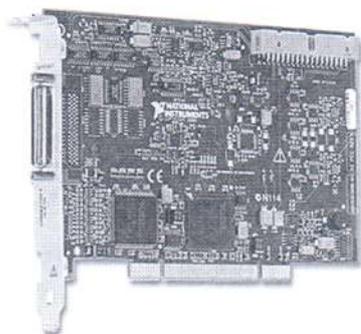
### ***3.3.2.6. Elección de la placa de adquisición de datos "DAQ" y del software que se usarán en este proyecto.***

LabVIEW fue creado en 1976 por le empresa National Instruments (NI) con el propósito de funcionar sobre máquinas Apple Macintosh (MAC). Actualmente está disponible en los principales sistemas operativos utilizados en el mundo, como es Windows y Linux y actualmente ya hay una versión del programa para el sistema operativo Android.

#### ***Elección de la placa de adquisición.***

El laboratorio de medidas cuenta con varias propuestas de DAQ, y otras que no están disponibles pero se podría llegar a comprar, en esta sección determinaremos cual de todas las opciones, es la que cumpla con nuestros objetivos, tales como costo, disponibilidad y tecnología, etc.

1. La primera opción es la placa DAQ de NI- PCI 6221 de la empresa NATIONAL INSTRUMENTS, la cual el laboratorio de medida tiene una, pero el gran problema que tiene es que es para instalar en una PC de escritorio, por lo tanto queda descartada ya que en nuestro proyecto usaremos una notebook, con protocolo de comunicación USB.



16 Bit, 250KS/s, 16 entradas analógicas.  
Costo aproximado de 1000 US\$.

***Figura 3.20 Placa DAQ NI-PCI 6221***

2. La segunda opción es la placa DAQ, USB- 6002, también de la empresa NATIONAL INSTRUMENTS, la cual, si cumple con nuestras necesidades, pero, no se cuenta con ella, asique hay que comprarla a un costo bastante alto para nuestro presupuesto, por lo tanto queda descartada ya que en nuestro proyecto buscaremos usar lo que dispone el laboratorio de medidas o la opción que tenga más bajo costo.



Resolución de 16 Bit, 50 KS/s, 8 entradas analógicas, Alimentación y transmisión de datos a través de cable USB.

*Figura 3.21 Placa DAQ NI-USB-6002.*

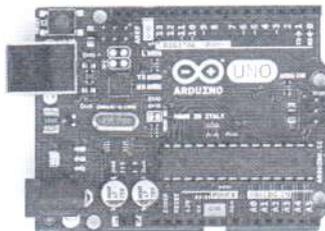
3. La siguiente opción es la placa DAQ, Cole-Parmer 18200-10, de la empresa Measuring Computer, la cual, si disponemos de varias de ella en el laboratorio de medidas y es la siguiente:



Resolución de 12 Bit, 50 KS/s, 8 entradas analógicas, Alimentación y transmisión de datos a través de cable USB.

*Figura 3.22- Placa DAQ Cole-Parmer 18200-10*

4. Otra opción que se viene utilizando cada vez más por su bajo costo y fácil de utilizar, es la placa arduino, la cual es una plataforma de hardware y software de código abierto, esta plataforma consta de una placa con un microprocesador que permite conectar sensores y actuadores mediante entradas y salidas, que pueden ser analógicas o digitales, también en la familia arduino poseen varios protocolos de comunicación. Ya se está utilizando con es software LabVIEW, incluso ya tiene su correspondiente librería desarrollada.



*Figura 3.23 Placa Arduino*

Luego de analizar las opciones que se tenían, se eligió la placa DAQ Cole-Palmer 18200-10 de Measurement Computing. Porque primero está disponible, es compacta, no necesita alimentación externa ya que se alimenta a través del cable USB por el cual se comunica con la notebook, además tiene las entradas analógicas necesarias para la aplicación que se desarrollará.

### *Generalidades de la placa DAQ.*

National Instruments en el año 2006 se expandió al adquirir a **Measurement Computing** que es una empresa que desarrolla tarjetas de adquisición de datos de bajo costo para interfaces ISA, PCI y USB para computadoras personales. De este modo, como NI es una empresa que desarrolla tecnología en instrumentación virtual, el software NI LabVIEW ya funciona con los productos de esta compañía con sus respectivos Drivers.



*Figura 3.24 Placa DAQ Cole-Parmer 18200-10*

El Laboratorio de Mediciones Eléctricas cuenta con el dispositivo 18200-10 de la Fig. 3.24, la cual se me facilitó para realizar este proyecto. Ésta cuenta con 8 canales de entrada analógica en modo desbalanceado o 4 para el modo diferencial seleccionable por software. Tiene una resolución de 12 bit, 50 kilomuestras/segundo, dos salidas de D/A y 16 Digital I/O. Todas las señales son accesibles con tornillos en los terminales laterales. La conexión de la Placa de adquisición a la PC es por cable USB. Dicha placa posee 40 pines de conexión. (ver Fig 3.25).

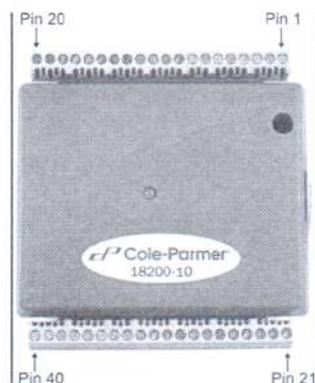


Figura 3.25 - Vista de los terminales de placa de adquisición.

#### **Pines 1 a 20:**

Los terminales 1 a 20 de la placa de adquisición disponible en el Laboratorio cumplen las siguientes funciones:

- ❖ Ocho entradas analógicas (**CH0 IN** a **CH7 IN**)
- ❖ Dos salidas analógicas (**D/A OUT 0** a **D/A OUT 1**)
- ❖ Una fuente de trigger externa (**TRIG\_IN**)
- ❖ Un terminal SYNC para la conexión de una señal de clock externa y la sincronización de múltiples unidades (**SYNC**)
- ❖ Un terminal de calibración (**CAL**)
- ❖ Cinco conexiones a masa analógica (**AGND**)
- ❖ Una conexión a masa digital (**GND**)
- ❖ Un terminal para el conteo externo de eventos de alta velocidad (**CTR**)

#### **Pines 21 a 40:**

Los terminales 21 a 40 de la placa de adquisición disponibles en el Laboratorio cumplen las siguientes funciones:

- ❖ 16 terminales de conexión de in/out digital (**PortA0** a **Port A7**, y **Port B0** a **Port B7**)
- ❖ Un terminal de alimentación +5V (**PC+5 V**)
- ❖ Tres terminales de conexión a masa digital (**GND**)

Esta placa de adquisición puede ser configurada en 8 canales single-ended o en 4 canales diferenciales, en cada caso la distribución de bornes de conexión se muestra en la siguiente Figura 3.26.

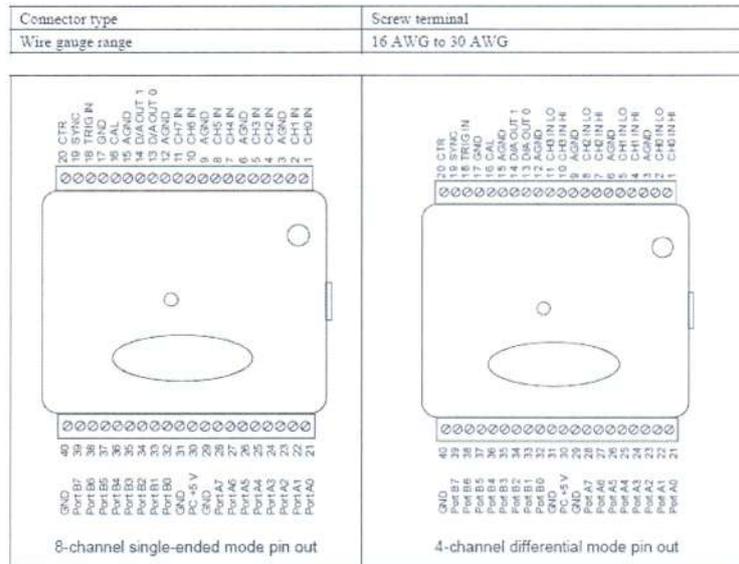


Figura 3.26 - Esquema de bornes de la placa de adquisición en modo diferencial y desbalanceado.

Para dar funcionamiento a esta placa de adquisición en este proyecto es necesario instalar además de LabVIEW 8.2, dos utilidades más:

- InstaCal v5.82
- Drivers UL for LabVIEW 7.11a

InstaCal es un pequeño software (15,84 MB) de la empresa *Measurement Computing Corporation* (MCC) que maneja completamente el hardware de la 18200-10. Por ejemplo cuando uno instala un dispositivo USB, PCI o PCMCIA, InstaCal detecta el hardware y asigna los recursos automáticamente. También existe la opción de que el usuario pueda ajustar las características del hardware según sea su necesidad.

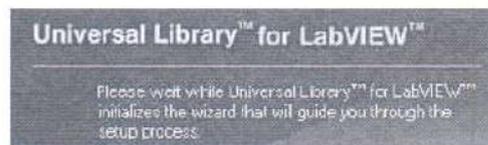


Figura 3.27—Software InstaCal y Librería con las herramientas de la placa para LabVIEW.

ULforLabVIEW711a es un archivo que contiene distintos drivers para la utilización de dispositivos de adquisición de datos en LabVIEW. Este software instala en LabVIEW una librería llamada *MCC Data Acquisition* necesaria para incorporar sub-

vi específicos para nuestro proyecto, a fin de poder utilizar la placa 18200-10 desde este software.

Una vez instalado estos dos programas en la PC en la que está el LabVIEW aparecieron en la paleta de herramientas, en la librería un nuevo toolkit llamado MCC, que son todos los subVI que necesita el LabVIEW para comunicarse con la placa DAQ y poder controlarla. En la siguiente figura 3.28 se muestra la librería como aparece en la paleta de funciones del diagrama en bloques.

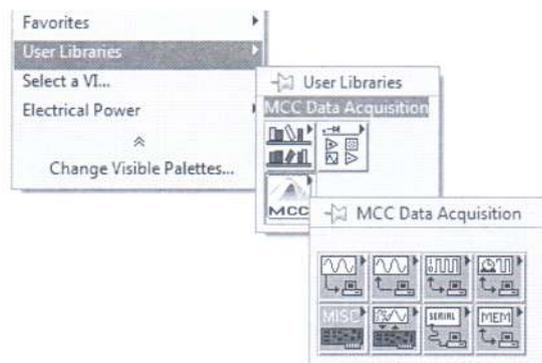


Figura 3.28—Librería de herramientas de la placa para LabVIEW.

### 3.3.3. Descripción del Software.

#### 3.3.3.1. Introducción.

El objetivo principal de este apartado es explicar los conceptos básicos de un VI (instrumento virtual), la terminología utilizada, los métodos básicos y las interfaces que utiliza un VI, así como sus protocolos de comunicación, tales como: GPIB, RS232 o RS485 con tarjetas de adquisición de datos. Comunicación en redes TCP/IP, UDP o para los software bajo Windows tales como COM, DDE, DLL y active X. Además familiarizarse con el modo de programación. Se explicará también las razones por la cual se eligió este software y sus ventajas y desventajas.

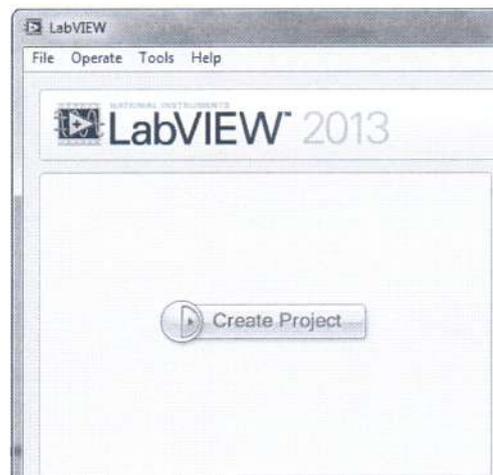


¿Qué es LabVIEW? LabVIEW, (Laboratory Virtual InstrumentEngineeringWorkbench), por sus siglas en inglés, es un software de desarrollo basado en programación gráfica en “G” por la empresa National Instruments, destinado a desarrollar aplicaciones parainstrumentación, ingeniería, ciencias, aplicaciones médicas, etc., que tiene una serie de

opciones para conectarse a instrumentos electrónicos, con tarjetas de adquisición de datos (DAQ) que al ser el software LabVIEW un programa abierto la placa DAQ pueden ser de otros fabricantes como en este proyecto que se utilizara una placa DAQ de la firma cole-palmer o incluso admite microprocesadores con su correspondiente programación, también, con sistemas de acondicionamiento de las señales de entrada y control y otros tipos de software como pueden ser Microsoft Excel y Matlab. La versión utilizada para este proyecto es la LabVIEW13.0.

Los programas desarrollados en LabVIEW se les llaman instrumentos virtuales “VI’s”, porque aun siendo virtuales tienen las mismas funciones y programación de instrumentos reales, sin dejar de lado la ya conocida programación tradicional.

Al arrancar el software a través del acceso directo o del menú de Inicio» Programas» National Instruments LabVIEW13.0, se nos presenta la ventana, ver Figura 3.29 en donde se da inicio a la construcción del VI.



*Figura3.29 – Pantalla de Ingreso al Software LabVIEW.*

*Blank VI = VI en blanco*

Al hacer clic en “Blank VI”, automáticamente se abren 2 ventanas. Una contiene al **Panel Frontal** y la otra al **Diagrama de bloque**, los cuales son mostrados en la siguiente figura 3.30.

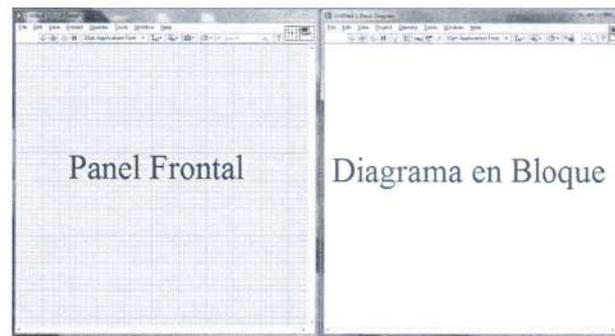


Figura 3.30-Panel frontal y diagrama en bloque

### 3.3.3.2. Panel frontal

Interface interactiva, los VI's contienen una interface grafica en la cual interactúa el usuario, la cual es llamada **panel frontal**, ya que simula el panel de instrumento, donde realmente se va colocando los instrumentos virtuales necesarios para el programa que se está diseñando y es esa interface con la que el usuario interactúa. Esos instrumentos necesitan datos de entrada que pueden ser introducidos usando el teclado o pueden ser adquiridos de una placa **DAQ**, para ser luego procesados por el programa y visualizados los resultados en la pantalla de la computadora. Un ejemplo de cómo se ve el panel frontal se muestra en la figura 3.31.

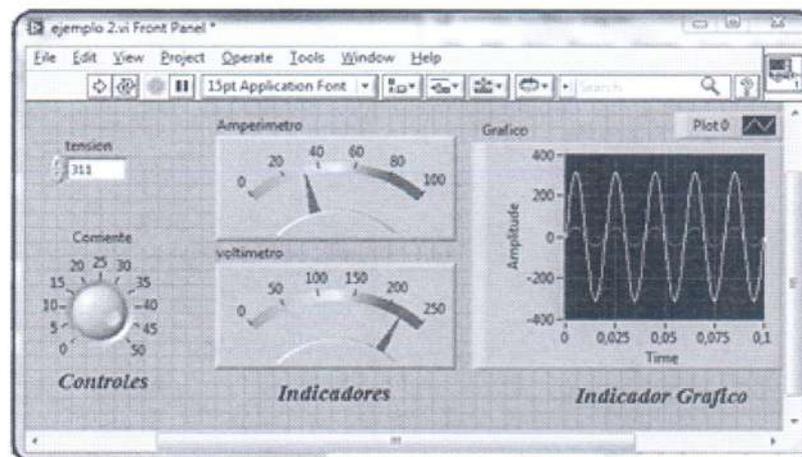


Figura 3.31- Ejemplo de aplicación en el panel frontal

### 3.3.3.3. Diagrama de bloques

El diagrama de bloques contiene el código fuente gráfico del VI, posee funciones y estructuras que relacionan las entradas con las salidas creadas en el panel frontal. En un diagrama de bloques típico se distinguen terminales que representan los controles e indicadores que se colocaron en el panel frontal. También se encuentran las funciones y los subVIs, que realizan tareas específicas, estructuras tales como while, for, case, entre otras y cableado determinan el flujo de los datos en el programa. Luego los instrumentos virtuales en el Panel frontal mostrarán los resultados del problema planteado en el diagrama de bloques. Los dos paneles se pueden llegar a ver simultáneamente en la pantalla de la PC, si se lo requiere. El usuario interactúa con el panel frontal mientras que el programador con el diagrama de bloques. En la figura 3.32 se ve un diagrama en bloques típico que le corresponde al panel frontal de la figura 3.31. En el cual se plantea un problema sencillo, en el cual, se pide mostrar una señal de tensión y una de corriente en un indicador gráfico y en otro indicador los valores eficaces de cada señal que en este caso son simuladas por un subVI.

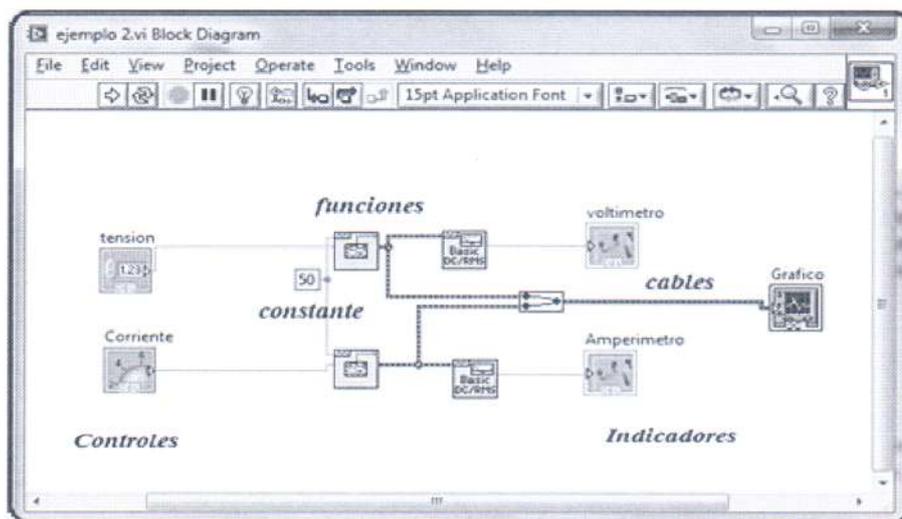


Figura 3.32- Ejemplo de aplicación en el diagrama en bloque

La programación en LabVIEW es mucho más rápida en comparación con las formas de programación o conexiones físicas tradicionales, los que en programación tradicional nos llevaría, varias horas hasta días, en LabVIEW podríamos tener el programa completamente desarrollado en un par de horas, claro dependiendo del grado de complejidad del programa a desarrollar, pero sin lugar a duda, hay un mejor aprovechamiento del tiempo.

Una gran ventaja de LabVIEW es que puede ser usado con muy poca experiencia en programación de cualquier tipo, pues utiliza métodos que llevan de la mano en el buen funcionamiento del programa y con los que están familiarizados la

mayoría de los técnicos, ingenieros, científicos, etc. Por lo anterior descrito podemos ya deducir que un VI's está compuesto por un panel frontal, que es para el usuario y un diagrama de bloques, donde trabaja el programador. Éstas a su vez cuentan con barra de herramientas que muestran los objetos e instrumentos, estructuras, variables, controles e indicadores necesarios para implementar y desarrollar el programa, que serán explicados más adelante en este capítulo. Mucha gente que habitualmente no intentaría diseñar una aplicación puede conseguirlo con relativa facilidad en LabVIEW.

Extendiéndonos un poco más sobre la manera de programar que se utilizan en LabVIEW, al ser la estructura de los VI's modulares interconectados entre sí, para llevar a cabo la función indicada que permite realizar programas por niveles, en un orden estrictamente jerárquico, además todos los VI's se pueden convertir en sub-VI's.

Si se va a desarrollar un programa relativamente complicado, tal vez sea conveniente trabajar de esta manera, para facilitar la manipulación del programa y en el caso de tener que modificar algo, solo sea en el sub programa y así no cometer equivocaciones graves y a la hora de hacer una modificación en el programa, estas no se tornen engorrosas.

### 3.3.4 Paleta de herramientas.

Dentro del panel frontal se desprenden dos tipos de paletas: *ControlsPalette* (paleta de controles) y *Tools Palette* (paleta de herramientas). Ver figura 3.33.

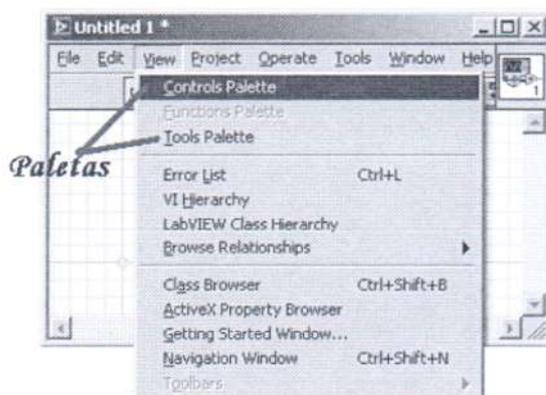


Figura 1 – Ubicación de las paletas de herramientas.

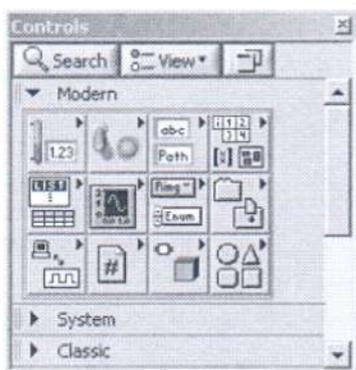


Figura 3.34.a – Paleta de controles.



Figura 3.34.b – Paleta de herramientas.

La paleta de controles (ver Figura 3.34.a) está habilitada solamente en el panel frontal y posee los controles e indicadores que se necesitan para crear el mismo. La paleta también aparece haciendo clic con el botón derecho del mouse sobre el área de trabajo del panel frontal.

La paleta de herramientas (ver Figura 3.34.b) está habilitada en el panel frontal y en el diagrama de bloques y es necesaria para trabajar o modificar los objetos.

### *Tipos de datos*

Existen 3 tipos o clases de datos en LabVIEW (ver Figura 3.35):

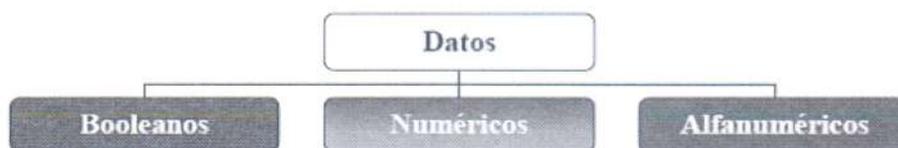


Figura 3.35 – Esquema Tipos de datos.

Dependiendo de nuestra aplicación, utilizamos estos datos en el diagrama de bloques existiendo un color para cada uno que se asigna automáticamente. (Booleanos: verde claro, Numéricos: azules-naranjas y los Alfanuméricos: rosados). Esto con la finalidad de familiarizarse tempranamente con ellos.

#### **Boolean(Booleano)**

Definidos por enteros de 16 bits. El bit más significativo contiene al valor booleano. Si el bit 15 se pone a 1, el valor del control o indicador es true (verdadero) y si se pone a 0, toma el valor false (falso). Al dar un clic con el botón derecho del mouse sobre el área de trabajo del panel frontal nos aparecerá la paleta de controles (ver Figura

3.36) allí podemos hallar los diferentes controles e indicadores booleanos que posee LabVIEW.



Figura 3.36 – Controles e Indicadores booleanos

### Numeric(Numérico)

Los datos numéricos se clasifican en 12 representaciones para los controles e indicadores, señalados por su respectivo color:

### Strings(Alfanuméricos)

LabVIEW almacena los “strings” como si fuera un “array” uni-dimensional de bytes enteros (caracteres de 8 bits). Sus principales aplicaciones van definidas a crear mensajes de texto, pasar los datos numéricos a caracteres de datos para instrumentos y luego convertirlos nuevamente de “strings” a datos numéricos, guardar datos numéricos en el disco, etc.

Como mencionamos anteriormente, los datos alfanuméricos se visualizan en el diagrama de bloques con el color rosado, mientras que en el panel frontal estos datos aparecen como etiquetas, tablas y entradas de texto (ver Figura 3.37.a y Figura 3.37.b).

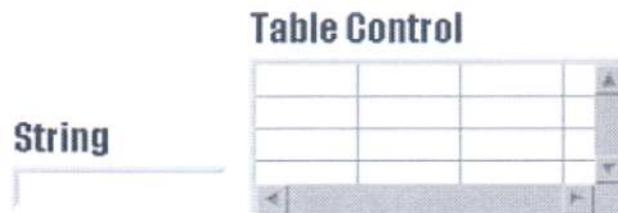


Figura 2 – Datos alfanuméricos Panel de control



Figura 3.37.b – Datos alfanuméricos Diagrama de bloque

En el diagrama de bloques existen muchas funciones donde se ven involucrados los datos alfanuméricos, para verlas hacemos clic con el botón derecho del mouse sobre el área de trabajo para ver la paleta de funciones (ver Figura 3.3.10), nos dirigimos al

icono *string* y se desplegará una ventana con las distintas funciones, como por ejemplo la más simple, *stringlength* que indica la longitud de la cadena de datos alfanuméricos.

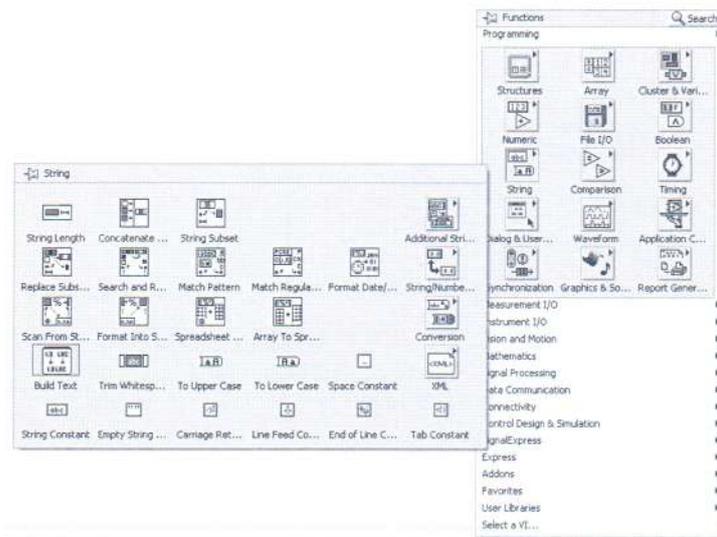


Figura 3.38 – Paleta de Funciones con las opciones String activada.

	Tipo de dato	Bits de almacenamiento	Dígitos decimales (Aprox.)	Límites	Color
	Precisión extendida Coma flotante	128	33/15 (20)	8,48e-4966 a 1,19e+4932 -8,48e-4966 a -1,19e+4932	Naranja
	Precisión doble Coma flotante	64	15	4,04e-324 a 1,79e+308 -4,04e-324 a -1,79e+308	Naranja
	Precisión simple coma flotante	32	6	1,40e-45 a 3,40e+38 -1,40e-45 a -3,40e+38	Naranja
	Largo Entero con signo	32	9	-2.147.483.648 a 2.147.483.647	Azul
	Palabra Entero con signo	16	4	-32.768 a 32.767	Azul
	Byte Entero con signo	8	2	-128 a 127	Azul
	Largo Entero sin signo	32	9	0 a 4.294.967.295	Azul
	Palabra Entero sin signo	16	4	0 a 65.535	Azul
	Byte Entero sin signo	8	2	0 a 255	Azul
	Precisión Extendida Complejo	256	33/15	Igual que EXT para cada parte (real e imaginario)	Naranja
	Precisión doble Complejo	128	15	Igual que DBL para cada parte (real e imaginario)	Naranja
	Precisión simple Complejo	64	6	Igual que SGL para cada parte (real e imaginario)	Naranja

Figura 3 – Resumen de los tipos de datos en LabVIEW.

## Estructuras

## Estructuras

En la *paleta de funciones* la primera opción es la de las *estructuras*. Éstas controlan el flujo del programa, bien sea mediante la secuenciación de acciones, ejecución de bucles, etc.

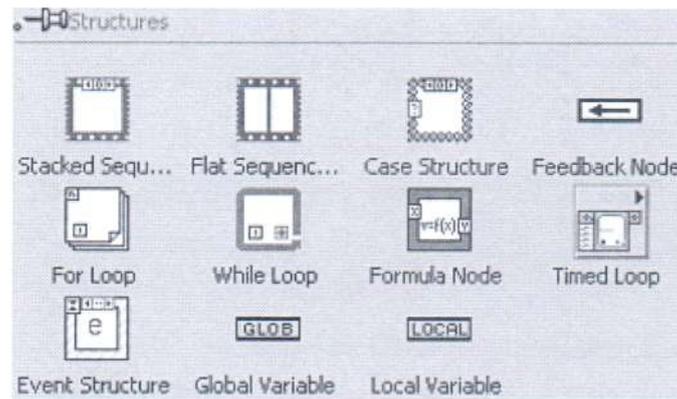


Figura 3.40 – Paleta de Structure.

Las estructuras se comportan como cualquier otro nodo en el diagrama de bloques, ejecutando automáticamente lo que está programado en su interior una vez tiene disponibles los datos de entrada, y una vez ejecutadas las instrucciones requeridas, suministran los correspondientes valores a los cables unidos a sus salidas. Sin embargo, cada estructura ejecuta su *subdiagrama* de acuerdo con las reglas específicas que rigen su comportamiento, y que se especifican a continuación.

Un *subdiagrama* es una colección de nodos, cables y terminales situados en el interior del rectángulo que constituye la estructura. El *ForLoop* y el *WhilLoop* únicamente tienen un subdiagrama. El "*CaseStructure*" y el "*SequenceStructure*", sin embargo, pueden tener múltiples subdiagramas superpuestos como si se tratara de cartas en una baraja, por lo que en el diagrama de bloques únicamente será posible visualizar uno a la vez. Los subdiagramas se construyen del mismo modo que el resto del programa. Las siguientes estructuras se hallan disponibles en el *lenguaje G*.

### Case Structure

Al igual que otras estructuras posee varios *subdiagramas*, que se superponen como si de una baraja de cartas se tratara. En la parte superior del subdiagrama aparece el identificador del que se está representando en pantalla. A ambos lados de este identificador aparecen unas flechas que permiten pasar de un *subdiagrama* otro.

En este caso el identificador es un valor que selecciona el subdiagrama que se debe ejecutar en cada momento.

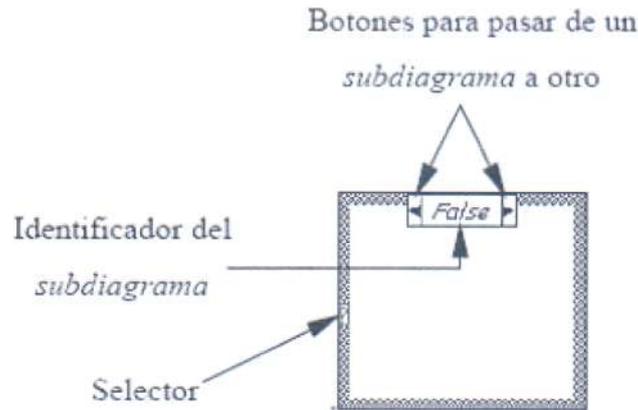


Figura 3.41– Case Structure.

La estructura *Case* tiene al menos dos *subdiagramas* (*True* y *False*). Únicamente se ejecutará el contenido de uno de ellos, dependiendo del valor de lo que se conecte al *selector*.

### SequenceStructure

Este tipo de estructuras presenta varios subdiagramas, superpuestos como en una baraja de cartas, de modo que únicamente se puede visualizar una en pantalla.

También poseen un identificador del subdiagrama mostrado en su parte superior, con posibilidad de avanzar o retroceder a otros subdiagramas gracias a las flechas situadas a ambos lados del mismo. Estos subdiagramas se insertan pulsando el botón derecho del ratón sobre el borde de la estructura, seleccionando la opción *AddFrameAfter*.

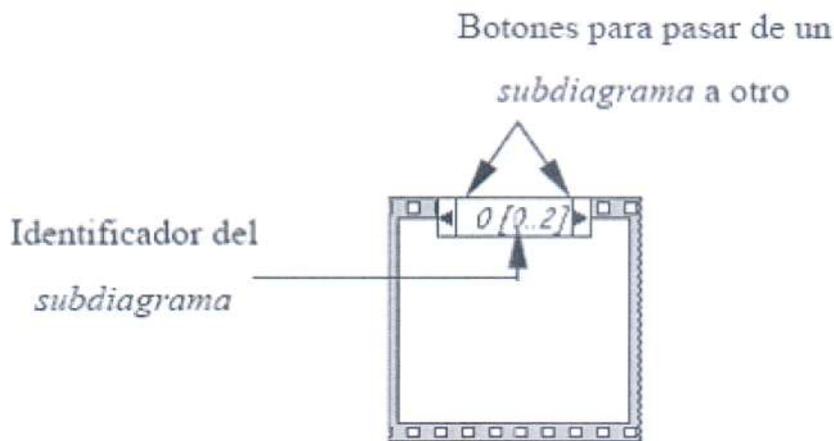


Figura 3.42 – SequenceStructure.

Esta estructura secuencia la ejecución del programa. Primero ejecutará el *subdiagrama* del *framen*°0 (círculo rojo) que ejecutará valores aleatorios entre 0 y 1, después se ejecutará el *framen*° 1 que entregará el resultado (salida), y así sucesivamente. Para pasar datos de una hoja a otra se pulsará el botón derecho del ratón sobre el borde de la estructura, seleccionando la opción *Addsequence local*, se agregaran etiquetas similares a las encerradas en los círculos azules.

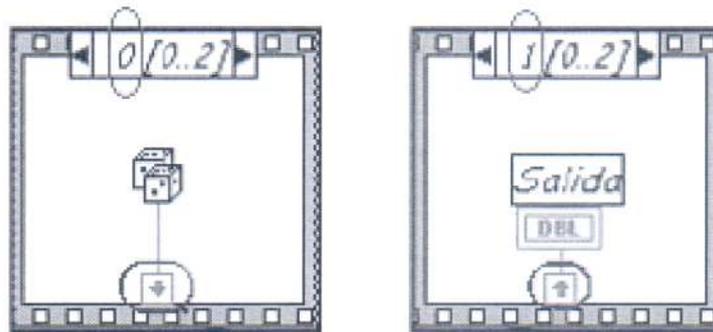


Figura 3.43 - Paso del frame 0 a la 1.

Las dos *Sequence Structure* mostradas arriba en realidad son solo una pero que posee dos frame (0 y 1 encerrados en un círculo rojo).

### ForLoop

Es el equivalente al bucle “FOR” en los lenguajes de programación convencionales. Ejecuta el código dispuesto en su interior un número determinado de veces.

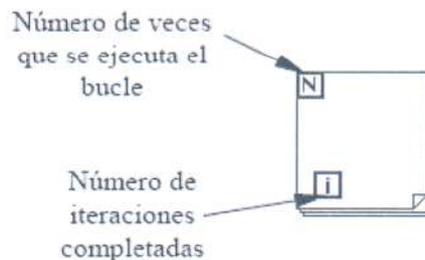


Figura 3.44 – For Loop.

Para pasar valores de una iteración a otra se emplean los llamados “*ShiftRegisters*” (*registros de desplazamiento*). Para crear uno, se pulsará el botón derecho del ratón mientras éste se halla situado sobre el borde del bucle, seleccionando la opción “*AddShifRegister*”. El “*ShiftRegister*” consta de dos terminales, situados en los bordes laterales del bloque. El terminal izquierdo almacena el valor obtenido en la iteración anterior.

El terminal derecho guardará el dato correspondiente a la iteración en ejecución. Dicho dato aparecerá, por tanto, en el terminal izquierdo durante la iteración posterior. La siguiente figura esquematiza lo anterior.

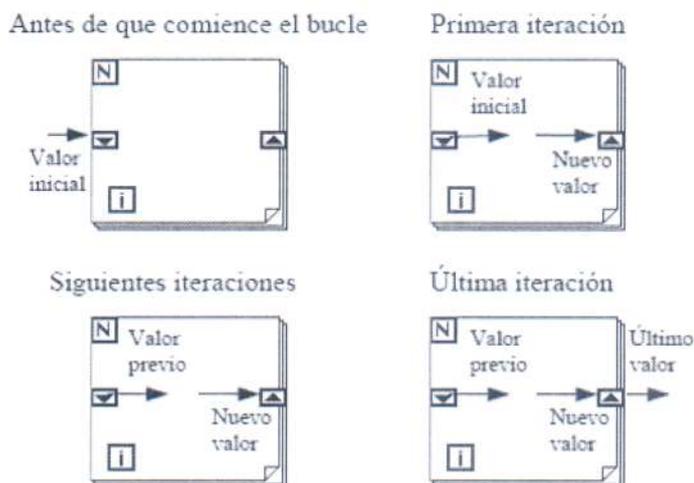


Figura 3.45 - Secuencia de Iteraciones, de la inicial a la última.

Se puede configurar un shiftregister para memorizar valores de varias iteraciones previas. Para ello, con el ratón situado sobre el terminal izquierdo del shiftregisterse pulsará el botón derecho, seleccionando a continuación la opción AddElement.

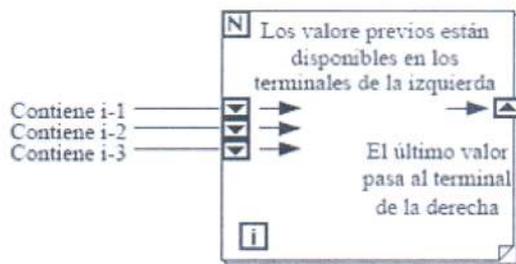


Figura 3.46- ForLoop que permite memorizar tres iteraciones.

### WhileLoop.

Es el equivalente al bucle *while* empleado en los lenguajes convencionales de programación. Su funcionamiento es similar al del bucle *for*.

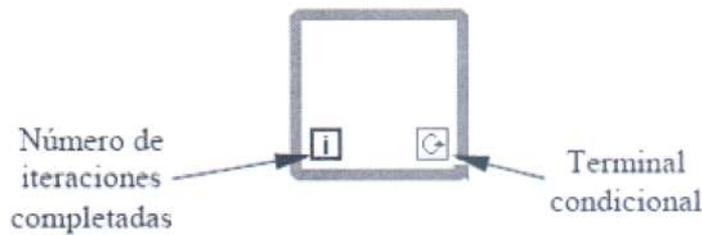


Figura 3.47 - WhileLoop.

El programa comprueba el valor de lo que se halle conectado al terminal condicional para finalizar el bucle. Por lo tanto, el bucle siempre se ejecuta al menos una vez. Con esta estructura también se pueden emplear los *shiftregisters* para tener disponibles los datos obtenidos en iteraciones anteriores (es decir, para memorizar valores obtenidos), su empleo es análogo al de los bucles *for*, por lo que se omitirá su explicación.

### Formula Node

La estructura denominada *Formula Node* se emplea para introducir en el diagrama de bloques fórmulas de un modo directo. Resulta de gran utilidad cuando la ecuación tiene muchas variables o es relativamente compleja. Por ejemplo, se desea implementar la ecuación:

$$y = x^2 + x + 1$$

Mediante esta función se puede escribir directamente la ecuación a calcular, como se puede observar en la figura siguiente.

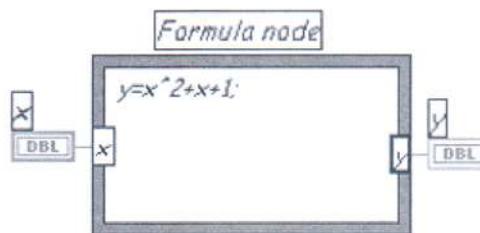


Figura 3.48 – Aplicación de la Formula Node.

*X* es un *Numeric Control*, que básicamente permite cambiar a voluntad el dato ingresado, en este caso este dato es un entero. *Y* es un *NumericIndicator*, este muestra el resultado del cálculo. Ambos se visualizan en el panel frontal, y se encuentran ingresando al menú *Numeric*.

## SubVI

Como se comentó anteriormente, los programas creados en LabVIEW se llaman VIs (Virtual Instrument). En muchas ocasiones un programa será de un tamaño tal que habrá que separarlo en varios VI's o habrá alguna sección de código que convenga reutilizarla varias veces. Un VI puede contener a otro de forma que el segundo sería un sub VI del primero, el concepto es equivalente a las funciones de un lenguaje tradicional. Por ejemplo, el siguiente programa es posible reducirlo notablemente, basta con solamente crear sub VI.

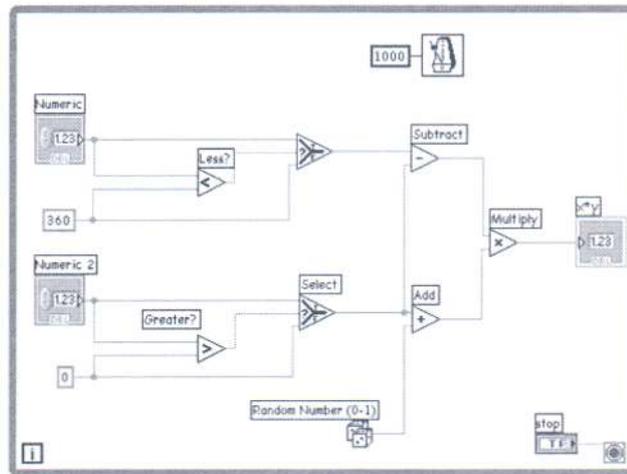


Figura 4 - Programa que utiliza diferentes funciones.

En el ejemplo de la figura 3.49 se puede ver un programa que tiene como entradas Límite superior y Límite inferior, estas entradas se limitan de forma programada a 360 y 0 respectivamente mediante las funciones de comparación *Less?*, *Greater?* y *Select*. A las salidas de las funciones de comparación se obtendrá un valor *true* si la comparación es cierta y *false* en caso contrario. *Select* funciona como un multiplexor: a su salida estará el valor de la entrada superior (T) si la señal de selección (?) es cierta y el de la entrada inferior (F) si es falsa. Por otra parte, *RandomNumber(0-1)* genera un número aleatorio entre cero y uno. *Less?*, *Greater?* y *Select* se encuentran en el menú *Comparison*, ubicable en la paleta de funciones, en el diagrama de bloques. *RandomNumber(0-1)* es ubicable en el menú *Numeric*.

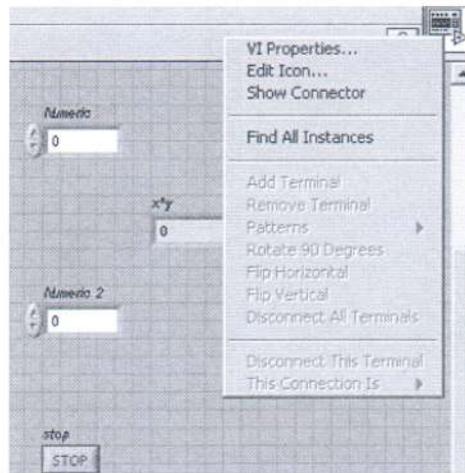
La parte central del programa resta las dos entradas y el resultado lo multiplica por la suma del límite inferior y el número aleatorio. Con esto se consigue generar un número aleatorio que será visto en el *Indicador Numeric*.

En el ejemplo anterior puede ser deseable hacer una función para la generación del número aleatorio entre dos límites, es decir, hacer que esa parte del código sea un VI distinto, de esta forma podrá ser usado en otras ocasiones. La forma más sencilla de conseguir esto es seleccionando la parte deseada del Diagrama de Bloques e ir a

*Edit* → *Create Sub VI*. Al hacerlo el código seleccionado será sustituido por el icono de un VI, con un doble clic sobre este icono se accederá al código de este sub VI.

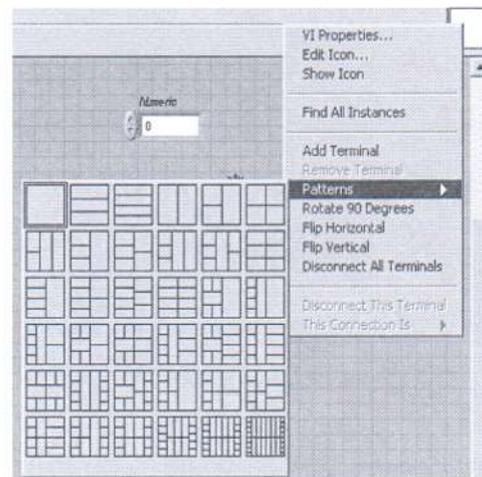
Otra forma de crear un Sub VI es definiendo de forma manual su interfaz, es decir, la forma en que se realizarán las conexiones cuando se use como sub VI dentro de otro VI.

El primer paso será guardar el VI, después situarse en su Panel Frontal y hacer clic con el botón secundario del ratón sobre el icono del VI (parte superior derecha) para desplegar su menú contextual, como se puede ver en la Figura 3.50.



**Figura 3.50-** Otra opción para crear un VI en subVI.

En *EditIcon* es utilizado para cambiar la presentación original del icono de cualquier VI. *Show Connectores* utilizado para agregar o eliminar terminales, los terminales son los lugares donde se conectarán los cables cuando se use como sub VI. Al presionar la opción *Show Connector* se muestra el icono en blanco indicando que no tiene ningún conector de entrada o salida asignado, para asignarle contactos se pincha sobre el icono con el botón derecho del Mouse, se selecciona la opción *Patterns*, según muestra la Figura 3.51.



**Figura 5 - Selección de contactos, según sea necesario.**

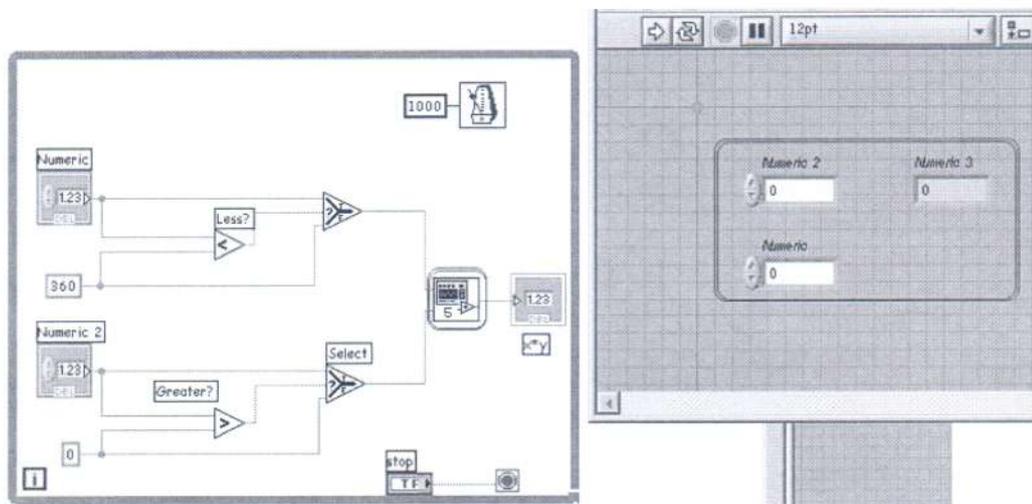
La rejilla de conexión define las entradas y salidas que se pueden conectar al VI al usarlo como sub VI. La rejilla de conexión recibe datos en los terminales de entrada y los pasa al código del diagrama de bloques a través de los controles del panel frontal y recibe los resultados en sus salidas a través de los indicadores del panel frontal.

La rejilla de conexión se presenta como un modelo de conectores, se puede elegir otro modelo si es necesario. Cuenta con un terminal por cada control o indicador del panel frontal, se pueden asignar hasta 28 terminales. Si se piensa que van a haber cambios que requieran entradas o salidas, se pueden colocar terminales extra sin asignar.

*Nota: no es aconsejable asignar más de 16 terminales, ya que se reduce mucho su funcionalidad y conectividad.*

Finalmente, en este punto, para asignar un control o indicador a un terminal se debe seleccionar la herramienta ConnectWire y hacer clic en el terminal y en el control o indicador asociado del Panel Frontal, en ese momento el terminal se coloreará indicando el tipo de datos.

En la figura 3.50 se presentó un VI en el que se seleccionó cierta parte para crearlo como un subVI, veamos entonces como queda el diagrama de bloques (marco rojo) según figura 3.52. Se presenta además el Panel frontal del subVI.



*Figura 3.52 - Presentación final del diagrama de bloques, con el subVI.*

Para editar el icono se selecciona con el botón derecho del mouse en el icono del panel frontal y se selecciona 'EditIcon'. En este editor se puede dibujar el ícono deseado.

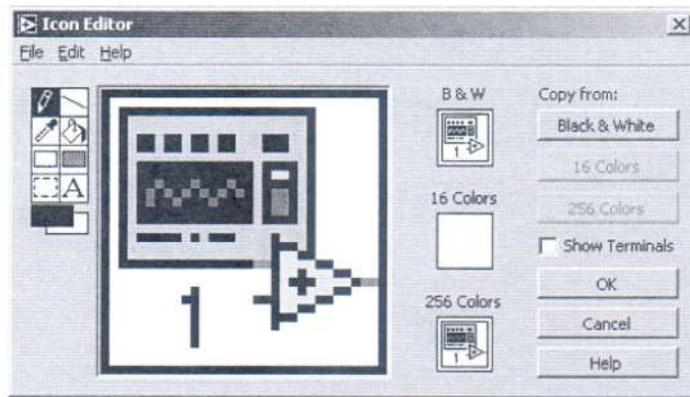


Figura 3.53 - Opciones de edición de íconos.

### ¿Cómo ejecutar un VI?

Al haber finalizado la programación del VI y viendo que no existe error, se puede ejecutar. Para ello, debemos situarnos en el panel frontal y pulsar el botón Run ubicado en la barra de herramientas.

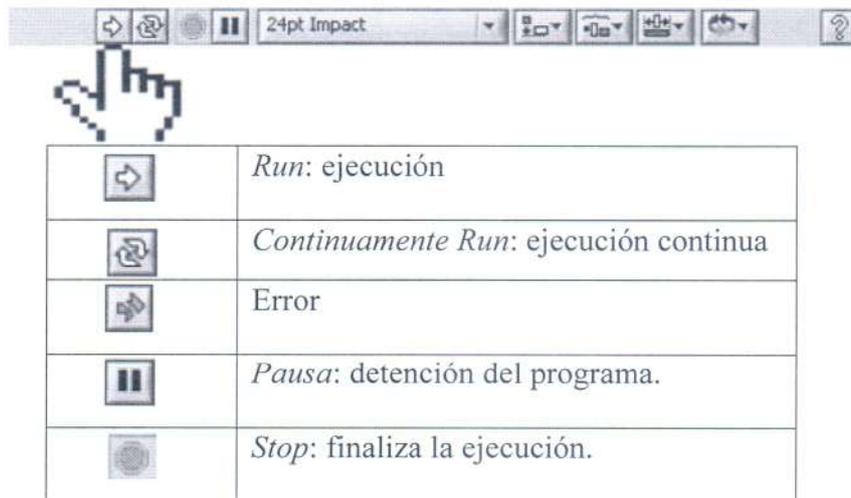


Figura 3.54 – comandos de ejecución de un VI.

Si existe error, se puede pulsar el mismo botón de Run y nos muestra el tipo de error que se está cometiendo (líneas rotas, conexiones malas, etc.).

Según la necesidad del programador, este puede colocar un botón de stop en el panel frontal de su VI, cuya pulsación provoque una interrupción en el bucle de ejecución de la aplicación.

Con todo lo anterior se procede a dar un pequeño ejemplo sobre la operatividad de funciones, en este caso funciones lógicas.

**Ejemplo:**

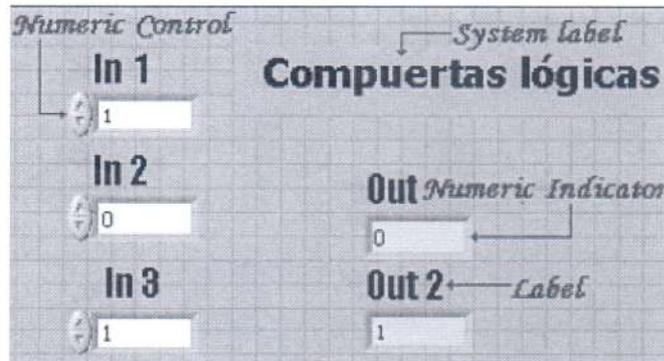


Figura 6 – Panel control Compuertas Lógicas.

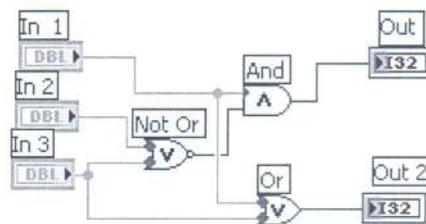


Figura 3.56 – Diagrama de bloques Compuertas Lógicas.

*Observación 1:* Los controles e indicadores numéricos y etiqueta del sistema (ver Figura 3.55) los encontramos en la paleta de controles. Las compuertas lógicas (ver Figura 3.56) las encontramos en la paleta de funciones. Para insertar los controles e indicadores en el panel frontal o diagrama de bloques se selecciona el elemento y se arrastra con el mouse hasta su posición final.

Dependiendo de la aplicación procedemos a unir los elementos con ayuda de la paleta herramientas (ver Figura 57), en particular hacemos uso de la herramienta *ConnectWire* cuyo icono es un carretel.

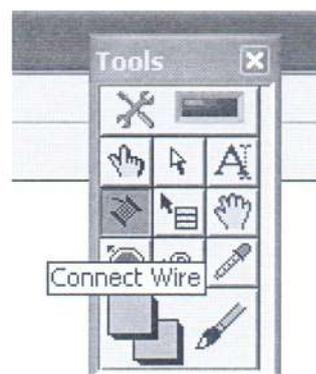


Figura 3.57 – paleta de herramientas en el diagrama de bloques.

*Observación 2:* Al presionar el botón de *Run Continuously* el programa se ejecuta continuamente, y así el usuario puede cambiar los valores de los controles para realizar otras combinaciones lógicas sin parar el programa. Para detenerlo se debe volver a presionar el botón *Run Continuously* o presionando el botón de *stop*.

*Observación 3:* Para guardar el programa, nos dirigimos a la barra de herramientas **File»Save**, aparecerá un cuadro de diálogo donde se debe especificar la dirección donde se desea guardar el programa, el nombre del programa y la extensión (si no se especifica la extensión LabVIEW automáticamente le agrega la extensión *.VI*)

## Capítulo 4. Aplicación en LabVIEW

### 4.1. Configuración de la placa DAQ

Como primer paso hay que configurar la placa DAQ. Para realizar nuestra aplicación en LabVIEW, vamos a necesitar 3(tres) entradas analógicas para el censado de la tensión y otras 3(tres) para el censado de la corriente. La placa tiene dos modos de configuración de sus entradas analógicas, modo diferencial o modo desbalanceada. En muchas plaquetas de adquisición se ofrece la posibilidad de configurar las entradas analógicas en forma diferencial o en forma desbalanceada.

- **El modo diferencial** consiste en que la tensión que se mide es la diferencia entre las tensiones aplicadas a dos entradas. Esto es conveniente especialmente en sistemas que toman datos desde dispositivos que están localizados a mucha distancia, ya que provee mejor inmunidad al ruido.
- **Las entradas desbalanceadas (single-ended)** en cambio están referidas a un punto de masa común. Generalmente se usa esta configuración cuando el nivel de la tensión de entrada es superior a 1V y la distancia entre la fuente de la señal (el sensor) y la placa de adquisición es corta (menos de unos 4-5 metros).

El número de canales de una placa está determinado por el multiplexor de entrada y es especificado para las dos configuraciones mencionadas.



*Figura 4.1-Placa DAQ Cole-Parmer 18200-10*

Posee 8 canales de entrada analógica en modo desbalanceado o 4 para el modo diferencial seleccionable por software. Tiene una resolución de 12 bit, 50 kilomuestras/segundo, dos salidas de D/A y 16 Digital I/O. Todas las señales son accesibles con tornillos en los terminales laterales. La conexión de la Placa de adquisición a la PC es por cable USB. Dicha placa posee 40 pines de conexión. Ver Figura 4.2.

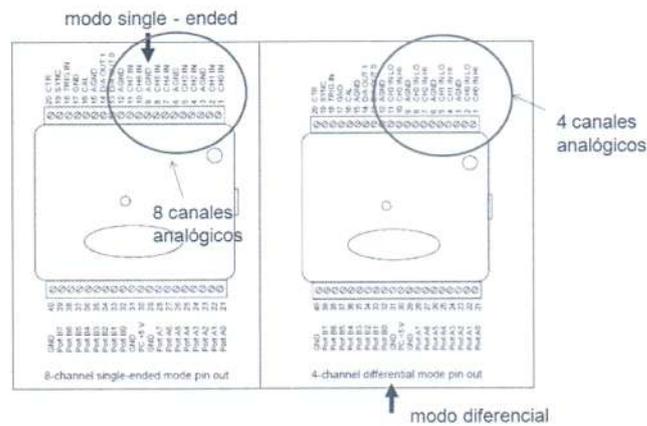


Fig 4.2- Vista DAQ con sus borneras con los modos de configuración

Luego con esta información, se ejecuta el programa InstalCal para configurar la placa, en la solapa instal; config, elegimos el modo 8 Single-Ended, como se muestra en la figura 4.3.

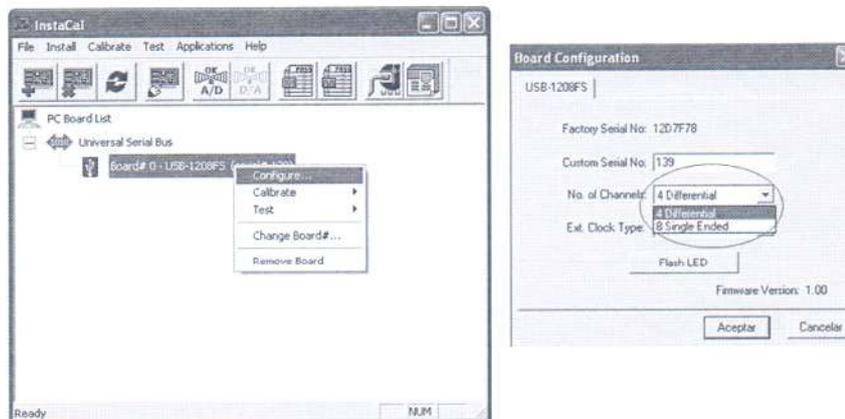


Figura 4.3 configuración de la placa

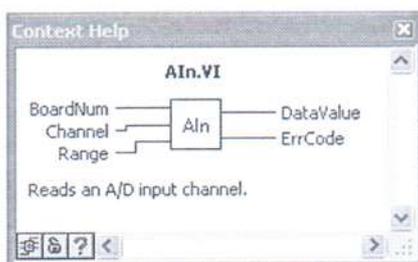
Parameter	Conditions	Specification
A/D converter type		Successive approximation type
Input voltage range for linear operation, single-ended mode	CHx to GND	±10 volts (V) max
Input common-mode voltage range for linear operation, differential mode	CHx to GND	-10 V min, +20 V max
Absolute maximum input voltage	CHx to GND	±25 V max
Input impedance		122KOhm
Input current (Note 1)	V <sub>in</sub> = +10 V	70 microamperes (µA) typ
	V <sub>in</sub> = 0 V	-12 µA typ
	V <sub>in</sub> = -10 V	-94 µA typ
Number of channels		8 single-ended / 4 differential, software selectable
Input ranges, single-ended mode		±10 V, G=2
Input ranges, differential mode		±20 V, G=1
		±10 V, G=2
		±5 V, G=4
		±4 V, G=5
		±2.5 V, G=8
		±2.0 V, G=10
		±1.25 V, G=16
	±1.0 V, G=20	
	Software selectable	

Tabla 4.1 especificaciones de las entradas analógicas.

La tabla 4.1 nos dice que el nivel de tensión que soportan las entradas analógicas son:

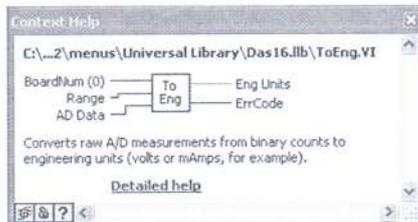
- para el **modo diferencial** el rango que soporta es entre +/- 1V a +/- 20V seleccionable por software
- para modo **desbalanceado** solo +/- 10V

Con todos estos datos se procede a ejecutar el LabVIEW, nos posicionaremos en el diagrama de bloques, se irá a la paleta de funciones y se seleccionara de la paleta MCC, las herramientas de entrada analógicas, las mas usadas son las que se muestran en la figura 4.4.



Lee un valor analógico de un canal (retorna el estado actual del convertor A/D).

(Un número entero entre 0 y  $2^{12}-1$ )



Convierte un valor del convertor A/D a unidades de Volt de acuerdo al rango empleado

Figura 4.4 herramientas de MCC, entradas analógicas AIn.vi y ToEng.vi

Una vez familiarizado con las entradas analógicas de la placa, se procedió a confeccionar dos subVI, para los modos de funcionamiento que tiene la placa, modo diferencial y modo desbalanceado:

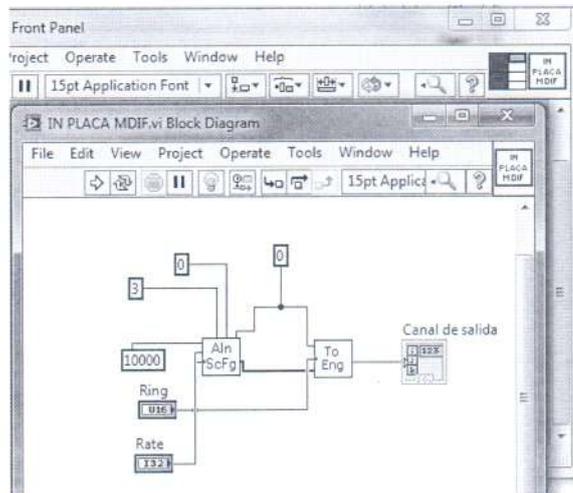


Figura 4.5 - Creación de subVI entrada placa modo diferencial

Una vez creado el subVI abrimos nuevamente el LabVIEW, no vamos al diagrama de bloques y vamos **Select a VI** y allí buscamos el VI creado, el cual se muestra en la figura 4.6.

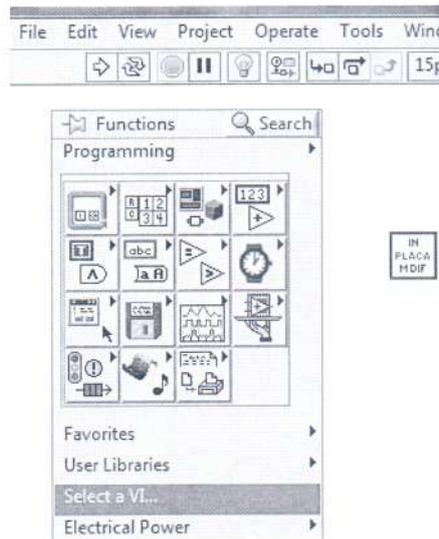


Figura 4.6 – subVI creado, llamado IN placa MDIF

De la misma manera se creó el SubVI INplacaMdesb, el cual se muestra en la figura 4.7<sup>a</sup> y 4.7<sup>b</sup>.

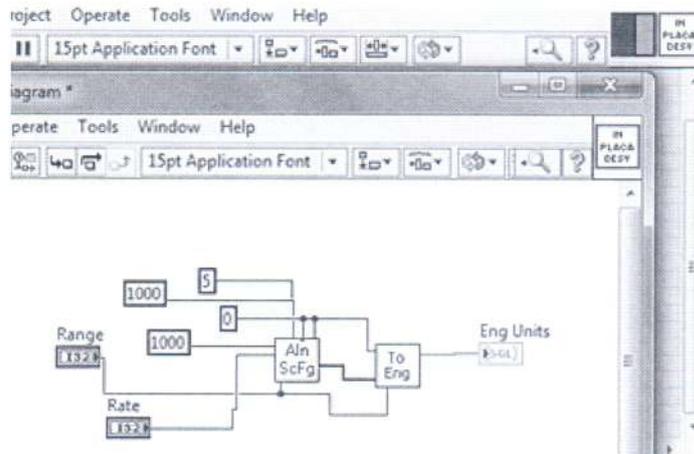


Figura 4.7a – creación subVI, IN placa Mdesv



Figura 4.7b – subVI creado, llamado IN placa Mdesv

## 4.2. Diseño de la aplicación en LabVIEW

Para el diseño de la aplicación en LabVIEW se analizaron los diferentes modos de funcionamiento que debe tener el equipo. En base a dichos modos de funcionamiento

se creó en LabVIEW un menú de opciones donde seleccionándolo accederemos a la pantalla principal del programa. Este tipo de funcionamiento es similar a la del analizador de redes marca Hioki.

Los modos de funcionamiento que se realizaron son:

- Osciloscopio.
- Registrador.
- Analizador de variaciones lentas de tensión.

El menú principal de selección es el siguiente:



*Figura 4.8 – Menú principal de selección de modo de funcionamiento.*

#### **4.2.1. Osciloscopio**

##### **4.2.1.1 Desarrollo del Programa**

El programa realizado en LabVIEW se enfocó en desarrollar el código de programación necesario para simular un osciloscopio digital comercial, dotándolo además de características distintas con el fin de flexibilizar el equipo. Las siguientes capacidades con las que cuenta este modo de funcionamiento son:

---

- 3 canales para adquisición de corriente (velocidad de 5ksampe/segundo).
- 3 canales para adquisición de tensión (velocidad de 5ksampe/segundo).
- Rango de amplificación de corriente.
- Modo osciloscopio: la aplicación tomara los datos de las tres tensiones y corrientes de fase.
- Espectro de amplitud de corrientes.
- THD de tensión.
- THD de corriente.
- Potencia activa total y por fases.
- Potencia reactiva total y por fases.
- Potencia aparente total y por fases.
- Factor de potencia.
- Frecuencia de la señal.

A continuación, en la Figura 4.9 se puede observar el diagrama en bloques de la aplicación construida.

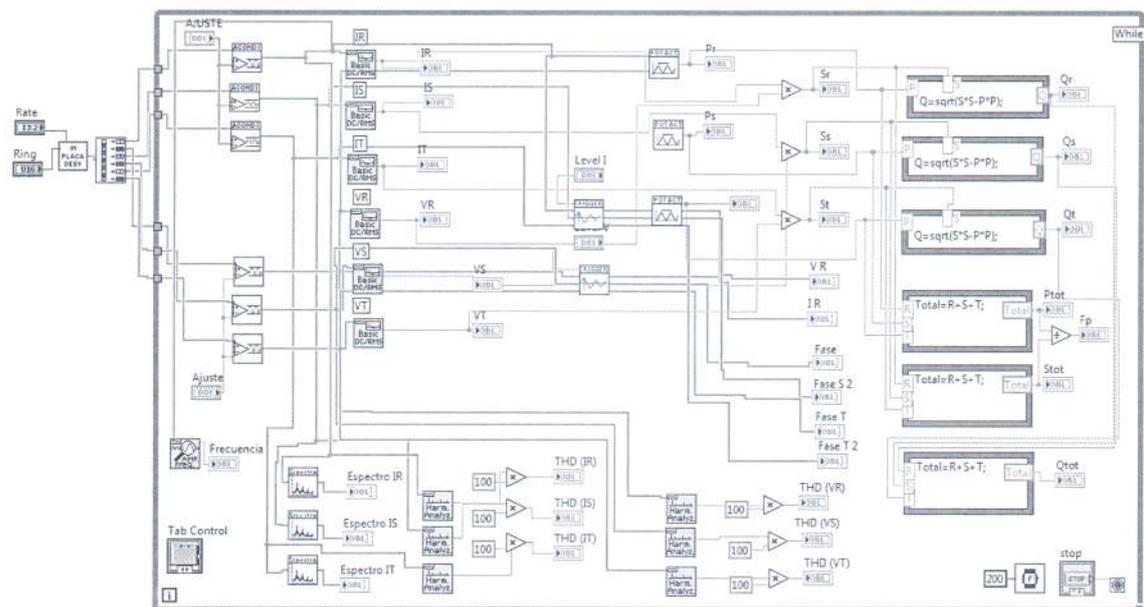


Figura 4.9-aplicación LabVIEW Modo Osciloscopio.

#### 4.2.1.2. Bloque Trigger

Para poder calcular el desfase que existe entre tensión y corriente se construyó un subVI que se lo llamó Trigger, el cual utilizando el bloque “Trigger” con el que cuenta LabVIEW, el cual recorta las señales de tensión y corriente de modo de que las mismas se vean más nítidas y estáticas en pantalla. La forma de recortarlas es a partir de una de ellas, es decir, se recorta la fase R en “n” valores, y esos mismos “n” valores se recortan el resto para mantener el desfase correcto.

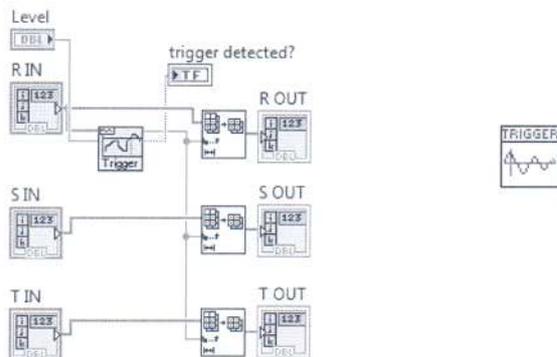


Figura 4.10 – Diagrama en bloques realizado para recortar la señal.

#### 4.2.1.3. Bloque Espectro

En este SubVI se obtiene el espectro de amplitud de cualquier señal a partir de dicha señal. Mediante el bloque “Distortion Measurements” se obtienen los armónicos impares múltiplos de 50 Hz. Una vez obtenidos se construye un vector mediante la el bloque “build array” para ser luego graficado.

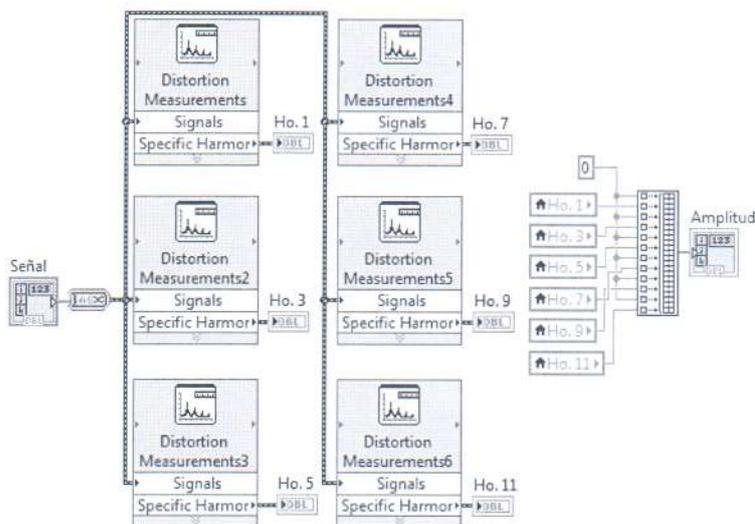


Figura 4.11 – Diagrama en bloques realizado para obtener el espectro de amplitud de una señal.

#### 4.2.1.4. Calibración de los sensores de tensión

El subVI utilizado para calibrar los sensores de tensión y corriente es el mismo utilizado en el programa de análisis de variaciones lentas de tensión.

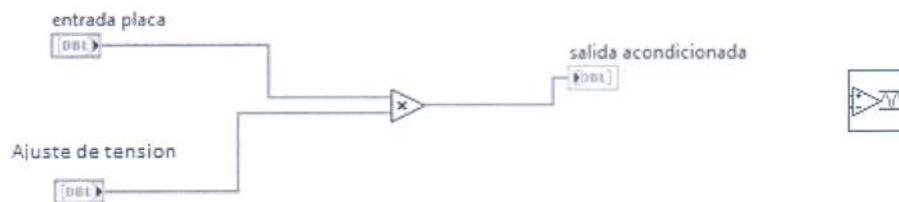


Figura 4.12– Diagrama en bloques realizado para calibrar las señales de tensión.

#### 4.2.1.5 Calibración de los sensores de corriente

Para la calibración de los sensores de corriente se partió del mismo subVI utilizado para calibrar los sensores de tensión, la diferencia es que además de la relación de transformación, hay una etapa de amplificación que hay que tener en cuenta.

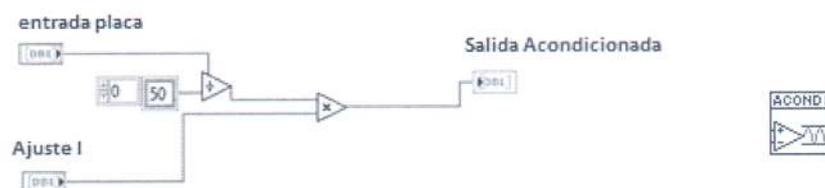


Figura 7 – Diagrama en bloques realizado para calibrar las señales de corriente.

#### 4.2.1.6 Panel frontal del programa

El panel frontal del programa cuenta con cuatro pestañas, una llamada “Pantalla Principal” donde se muestra la forma de el factor de potencia, las potencias totales, frecuencia, además de el ajuste de el nivel de trigger y el ajuste de la etapa que calibra las señales de tensión y corriente. Y las otras tres pestañas le corresponden una fase a cada una, ósea, fase R, fase S y fase T, en donde se encuentra las ondas de las tensiones y las corrientes y “Espectro de Amplitud” de la corriente, valores RMS de tensión y corriente, potencia activa reactiva y aparente, todo de cada fase, también se calcula el  $THD_I$  y  $THD_V$

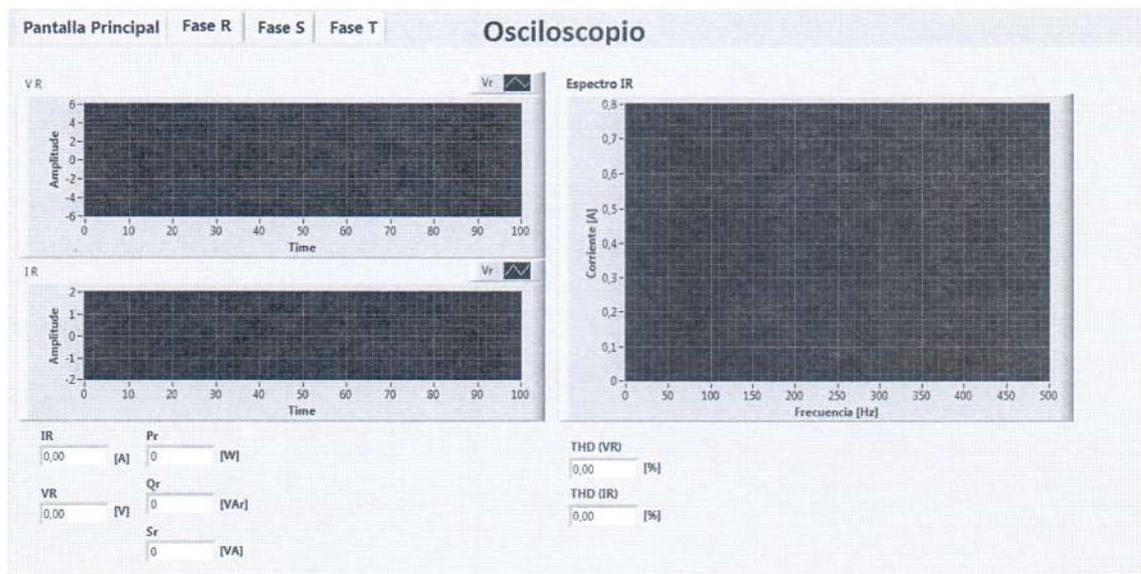


Figura 8 – Panel frontal del osciloscopio.

## 4.2.2. Registrador

### 4.2.2.1. Desarrollo del Programa

El programa realizado en LabVIEW se enfocó en desarrollar el código de programación necesario para que trabaje en modo registrador, dotándolo además de las mismas funciones que el programa explicado anteriormente (osciloscopio). Las siguientes capacidades con las que cuenta este modo de funcionamiento son:

- 3 canales para adquisición de corriente (velocidad de 5ksampe/segundo).
- 3 canales para adquisición de tensión (velocidad de 5ksampe/segundo).
- Modo osciloscopio. (Se puede observar las tres tensiones de fase y las tres corrientes de fase).
- THD de tensión.
- THD de corriente.
- Potencia activa total y por fases.
- Potencia reactiva total y por fases.
- Potencia aparente total y por fases.
- Factor de potencia.
- Frecuencia de la señal.
- Selección de directorio donde guardar el archivo de datos.
- Historial de tensiones y corrientes.
- Selección de intervalo de grabación.
- Registro de tensiones, corrientes, potencias, THD.
- Registro de máximos y mínimos en tensiones y corrientes.
- Registro de las fechas de los máximos y mínimos.

- Cálculo y registro de energías.

A continuación, en la Figura 4.15 se puede observar el diagrama en bloques de la aplicación construida.

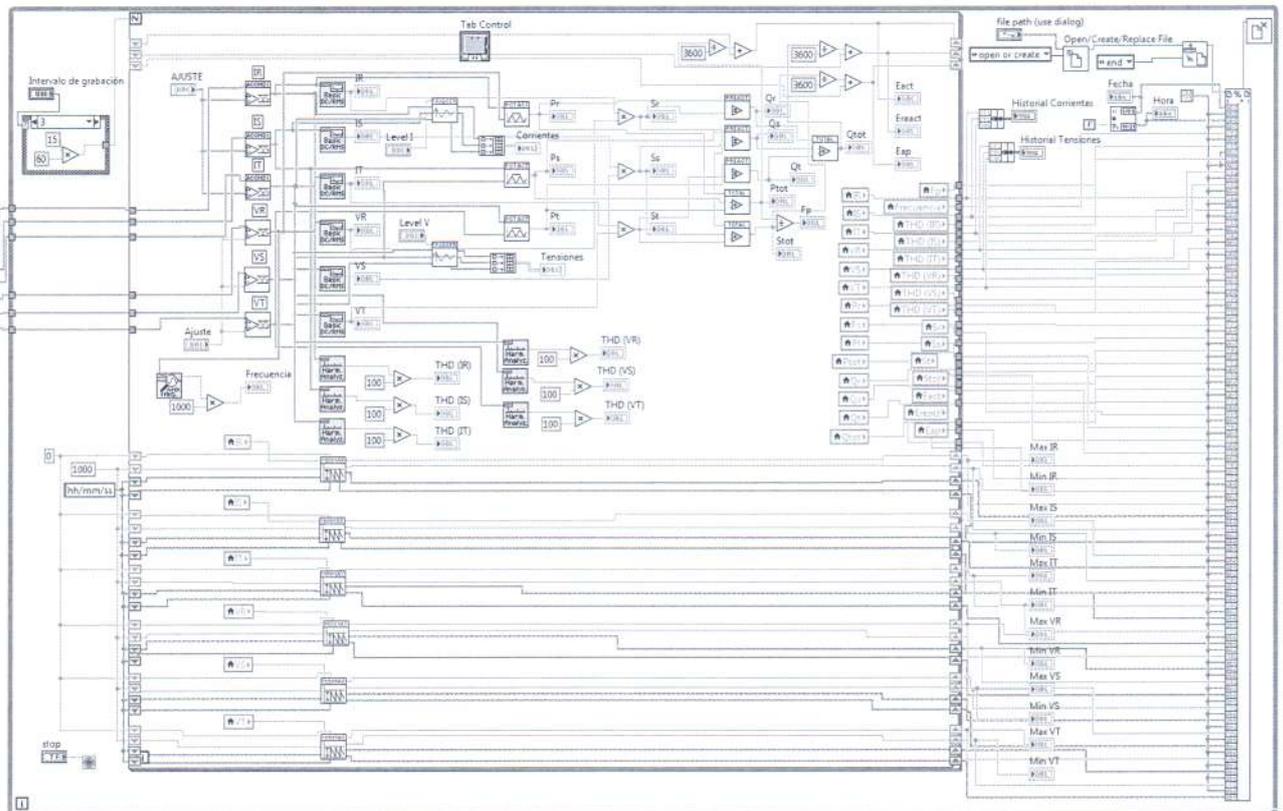


Figura 4.15-Diagrama de bloques de la aplicación, registrador.

#### 4.2.2.2. Archivo de salida de datos

Para realizar la grabación en un archivo de texto se utilizó el bloque “file path” para seleccionar el directorio donde guardarlo. Luego se utilizó el bloque “Open/Create/Replace File” para abrir el archivo donde se desea guardar, de lo contrario se crea o reemplaza. Mediante el bloque “file set position” el programa se ubica en el final del archivo, de esta forma nunca se sobrescribe un valor. Las variables que se deben guardar fueron conectadas al bloque “Forma into File” y finalmente mediante el bloque “Close file” se cerró el archivo. Esta secuencia se realiza en cada intervalo de grabación. A continuación se puede observar la forma del archivo de texto que se obtiene.



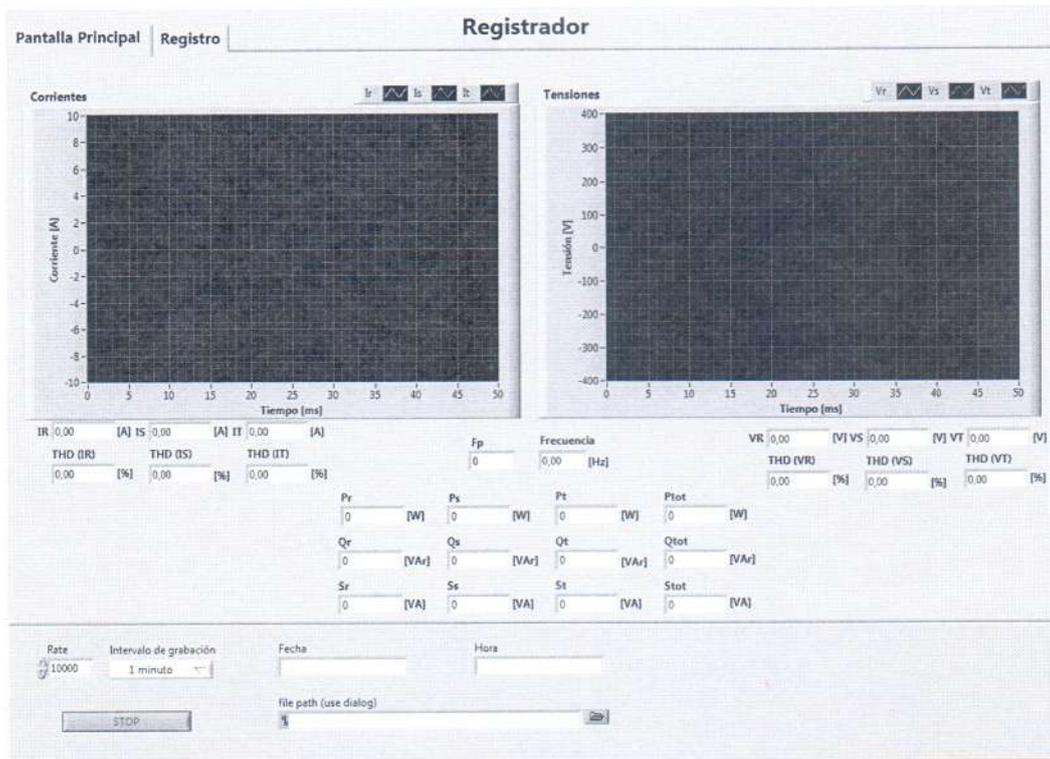


Figura 4.18- Panel frontal de la aplicación registrador, solapa pantalla principal.

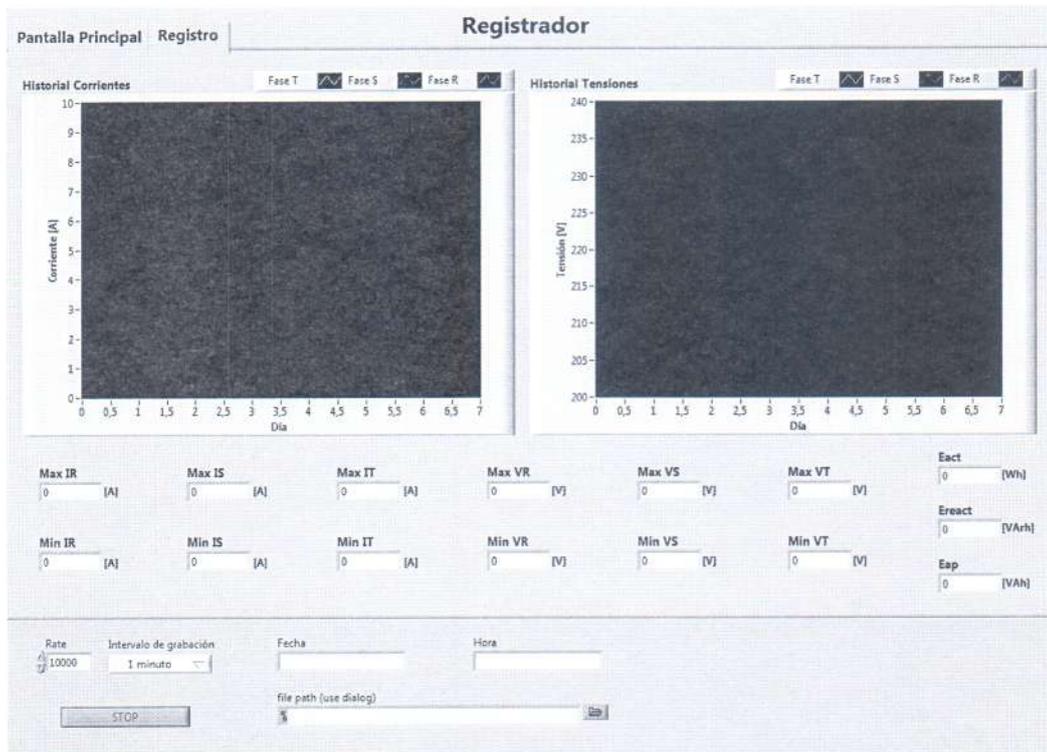


Figura 4.19- Panel frontal de la aplicación registrador, solapa registro.

### 4.2.3. *Analizador de Variaciones Lentas de Tensión*

#### 4.2.3.1. *Análisis del Subanexo D*

Analizando las distintas normativas y tomando como base el Subanexo de D del pliego de concesión para empresas Distribuidoras del Servicio Eléctrico, se extrajeron los requerimientos de diseño del programa, que se resumen a continuación:

- a) El equipo debe ser capaz de funcionar por un período no inferior a siete (7) días corridos.
- b) La variable a medir es el valor eficaz verdadero, con armónicos incluidas o valor eficaz de la onda de frecuencia industrial indistintamente, de la tensión de las tres fases. Solo si la instalación a medir es monofásica se medirá esa sola fase.
- c) El rango de medición de los valores de tensión es (110/1.73) V +20/-30% en los casos de utilizar transformadores de tensión, y 220V +20/-30% para mediciones directas.
- d) Para realizar el registro de estas mediciones durante el lapso que corresponda se promediarán mediciones obtenidas cada segundo en intervalos de 15 minutos.
- e) Las variaciones porcentuales de la tensión que se asumirán como valores normales, medidas en los puntos de suministro, para baja tensión es  $\pm 8,0 \%$  del valor nominal. Para las zonas Rurales se admitirá, en el punto de suministro, hasta: 12,0 %.

Para nuestro cálculo tomando como lugar de medición un tablero de baja tensión, las variaciones permitidas de la tensión nominal son de 220 Volts  $\pm 8,0 \%$ .

#### 4.2.3.2. *Desarrollo del Programa.*

El programa realizado en LabVIEW se enfocó a desarrollar una aplicación capaz de monitorear tres canales de tensión y tres de corriente con las siguientes capacidades:

- 6 canales disponibles (velocidad de 5ksampe/segundo)
- Análisis de la calidad de señal medida.
- Modo osciloscopio. (Se puede observar la forma de onda de la tensión trifásica)
- Gráfico de historial de tensiones.
- Diagrama fasorial de tensiones.
- Opción de grabación de datos cada 1, 5, 10 o 15 minutos. Genera un archivo "txt" de salida, con el promedio de los valores eficaces de tensión del intervalo de grabación, desviación de los valores, máximos y mínimos y hora a la que se produjeron junto con la fecha y hora del intervalo.

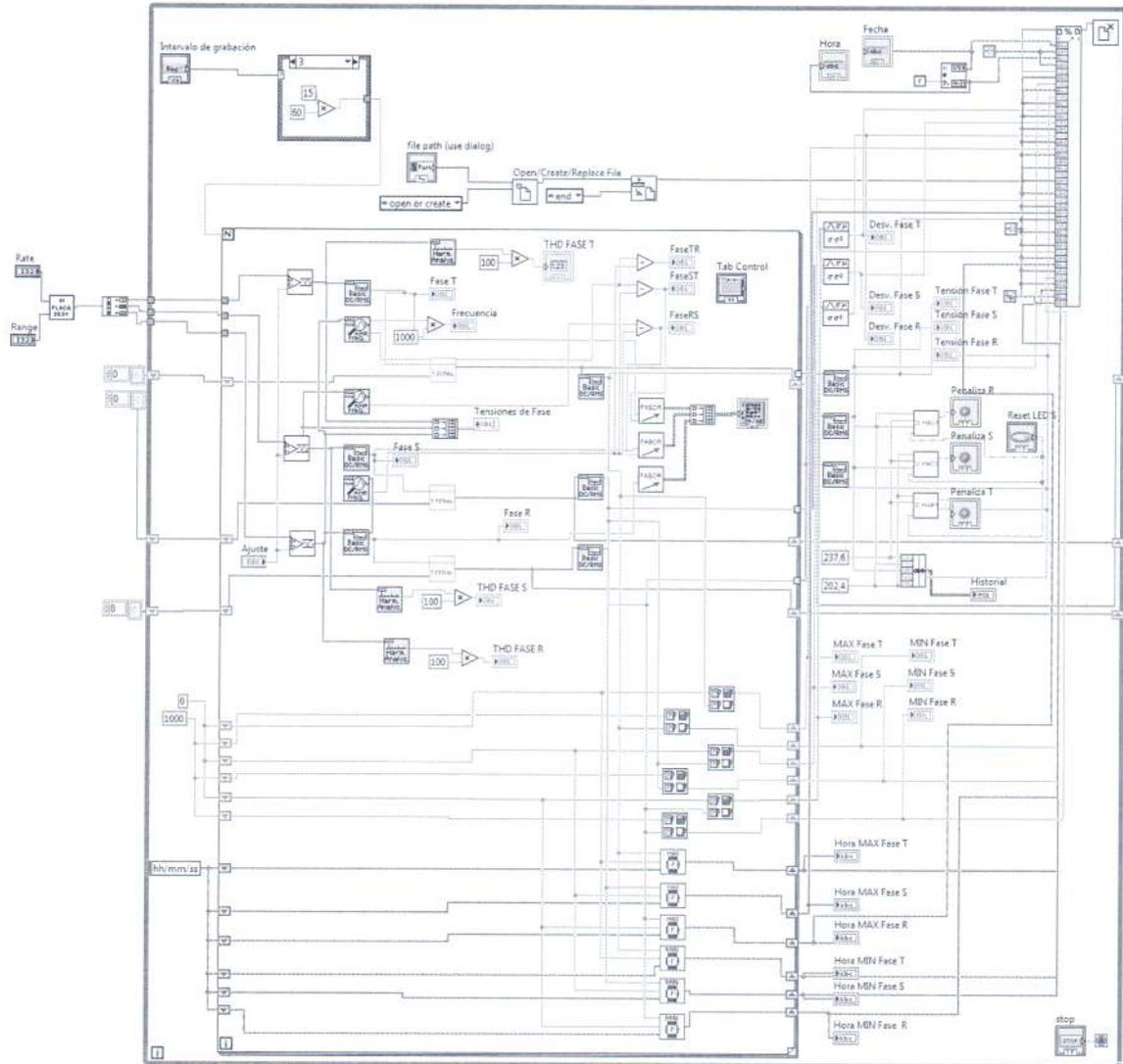


Figura 4.20-Diagrama de bloque de la aplicación V.L:D:T:.

#### 4.2.3.3. Algoritmo de cálculo propuesto

En este SubVI se desarrolló un algoritmo de ventana móvil de 60 segundos que elimina de un vector de 60 datos el último e inserta al inicio un nuevo valor. Los datos corresponden al valor eficaz de la tensión. Con esos 60 datos se calcula el promedio y se obtiene el valor de la tensión con una ventana móvil de 1 minuto.

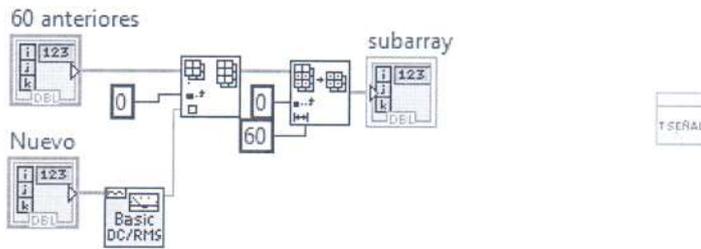


Figura 4.20 – Diagrama en bloques del algoritmo de cálculo.

#### 4.2.3.4.1 Selección de las opciones de grabación

Como se explicó anteriormente las opciones de grabación son 1, 5, 10 y 15 minutos por lo tanto se utilizó un “ring” junto con un “case” para poder obtener así el valor “n” del “for” necesario para que se obtengan los datos en los intervalos anteriormente dichos. Si se desea grabar cada 1 minutos, el “n” del “for” será de 60, si es de 5 será 300, si es de 10 será de 600 y si es de 15 el “n” será de 900. Aunque el Subanexo D establece el intervalo de grabación en 15 minutos, se decidió flexibilizarlo a fin de mejorar el programa.

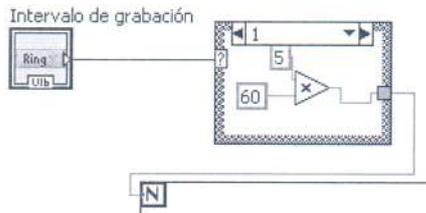
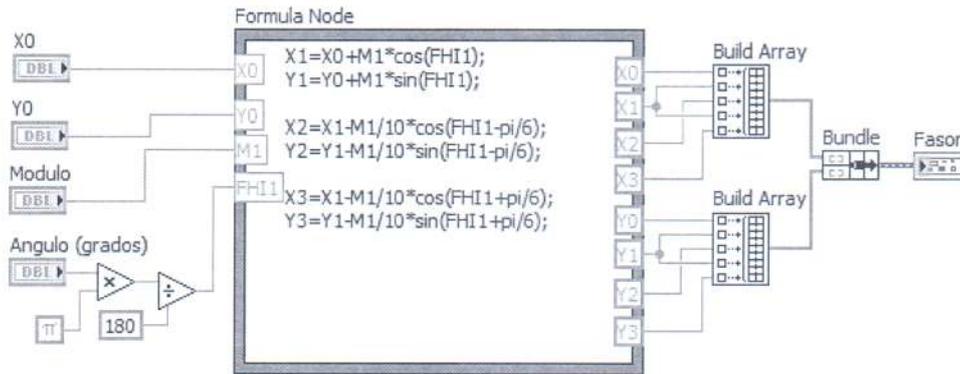


Figura 4.2111 – Diagrama en bloques para la selección de las opciones de grabación.

#### 4.2.3.5 Diagrama fasorial de tensiones.

Para realizar el gráfico fasorial se utilizó la estructura “Formula Node” donde, ingresando las coordenadas del punto de origen del fasor (X0,Y0), su módulo y su ángulo (en grados), se genera un “Cluster” que contiene las coordenadas necesarias para representar un vector en un “XY Graph”. Junto con la función “Build Array” permite la representación de distintos fasores en el mismo gráfico.



Figura

4.22 – Diagrama en bloques construido para realizar el diagrama fasorial de tensiones.

#### 4.2.3.6 Registro de la fecha de máximos y mínimos de las tensiones

El programa realizado registra y guarda los máximos y los mínimos de las tensiones de cada intervalo de grabación, junto con la hora en la que se produjo. Para poder guardar el valor de las tensiones se utilizó el bloque “Max & Mín” y se lo guardó en un registro, el cual pisa el valor anterior si este es un máximo o un mínimo según corresponda. Para poder guardar las fechas se construyó un SubVI el cual compara el valor actual con el anterior y si éste es un máximo o mínimo según corresponda lo guarda un registro, de lo contrario mantiene la fecha anterior. Esto se realizó como una estructura “Case como se puede observar en las figuras de abajo.

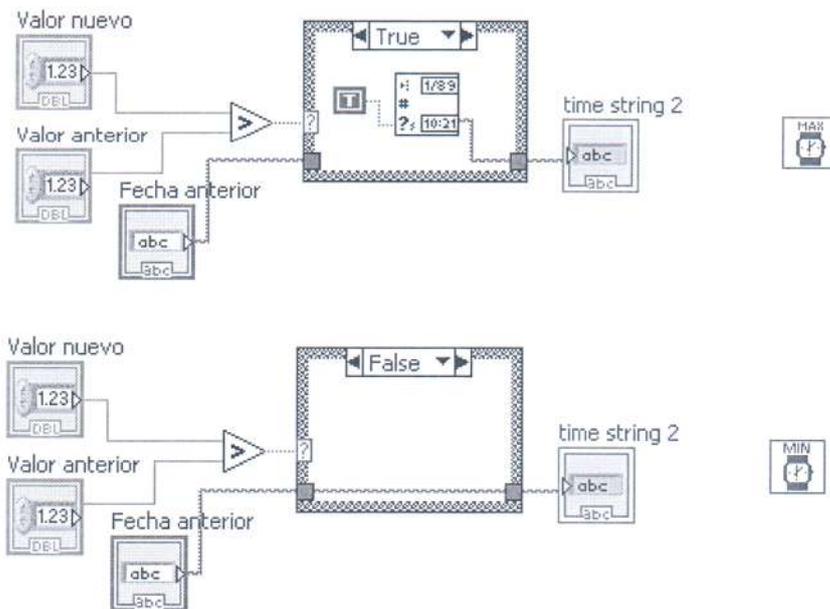


Figura 4.23 – Diagrama en bloques para registrar las fechas de los máximos o mínimos.

#### 4.2.3.7. Indicación de penalización

El SubVI que se muestra, básicamente consiste en un circuito secuencial del tipo Flip-Flop, que enciende el indicador luminoso “Penaliza” cuando la variable se encuentra fuera de los valores “Máximo” y “Mínimo”. Este indicador luminoso permanece encendido aunque la variable vuelva estar en el rango, y solo se apaga con el control “Reset”.

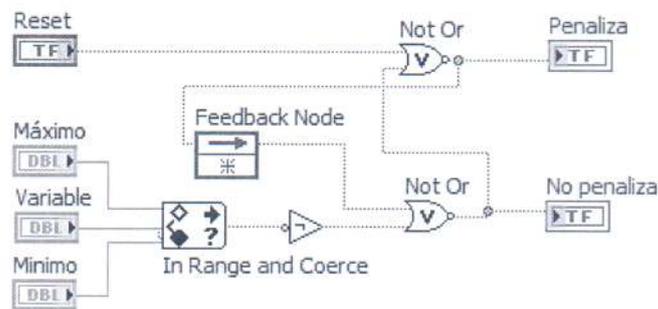


Figura 4.24 – Diagrama en bloques tipo Flip-Flop para indicar penalización.

#### 4.2.3.8 Archivos de texto de salida.

Para realizar la grabación en un archivo de texto se utilizó el bloque “file path” para seleccionar el directorio donde guardarlo. Luego se utilizó el bloque “Open/Create/Replace File” para abrir el archivo donde se desee guardar, de lo contrario se crea o reemplaza. Mediante el bloque “file set position” el programa se ubica en el final del archivo, de esta forma nunca se sobrescribe un valor.

Las variables que se deben guardar fueron conectadas al bloque “Format into File” y finalmente mediante el bloque “Close file” se cerró el archivo. Esta secuencia se realiza en cada intervalo de grabación. A continuación se puede observar la forma del archivo de texto que se obtiene.

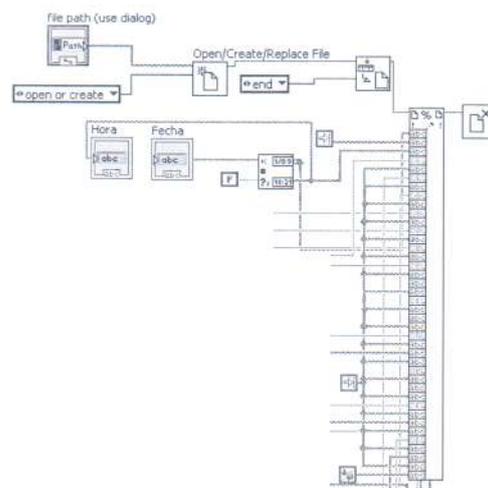


Figura 4.25- Diagrama en bloques construido para generar un archivo de texto con las variables a registrar.

MAX FASE T	HORA	MIN FASE T	HORA	MAX FASE S	HORA	MIX FASE S	HORA
234,576125	17:51:03	234,421156	17:51:00	231,351891	17:50:10	230,838188	17:51:03
234,601646	17:51:06	234,241597	17:52:03	230,829682	17:51:04	230,481407	17:52:03
234,643621	17:52:35	234,292435	17:53:03	231,046075	17:52:28	230,734787	17:53:03
234,593516	17:53:07	234,120168	17:54:03	230,842132	17:53:04	230,478239	17:54:03
234,156233	17:55:04	233,976014	17:55:00	230,987771	17:53:00	230,483585	17:55:04
234,666413	17:56:04	234,169786	17:56:02	231,631907	17:56:04	230,992487	17:56:03
235,677753	17:59:58	235,190226	18:00:00	232,944234	17:59:41	232,042493	18:00:00
235,596587	18:00:01	234,356940	18:01:00	232,021606	18:01:00	231,039156	18:00:58
235,115890	18:01:34	234,376041	18:02:00	231,838844	18:01:59	231,142704	18:02:00
235,269161	18:02:59	234,837168	18:03:00	231,799007	18:03:00	231,526179	18:02:57
235,603732	18:07:19	235,179330	18:06:53	231,665225	18:07:19	230,967118	18:07:17
235,734190	18:08:18	235,452316	18:08:17	231,283407	18:08:19	231,151335	18:08:18
236,882325	18:09:02	235,494209	18:13:28	232,488373	18:14:00	231,258800	18:11:27

Figura 4.26 – Archivo txt de salida de datos

#### 4.2.3.9. Panel Frontal del programa.

El panel frontal del programa cuenta con dos pestañas, una llamada “osciloscopio” donde se muestra la forma de onda de las tensiones y el diagrama fasorial y otra llamada “Registrador” en la cual se puede observar el oscilograma de tensiones y los últimos valores guardados, es decir valor de la tensión, desviación, máximos y mínimos y horas de los mismos.

Además el panel frontal cuenta con una interface en la cual se selecciona el directorio donde guardar las mediciones, se selecciona el puerto COM, se elige el intervalo de grabación y se pueden observar los valores eficaces en tiempo real de las tensiones, la frecuencia y el THD.

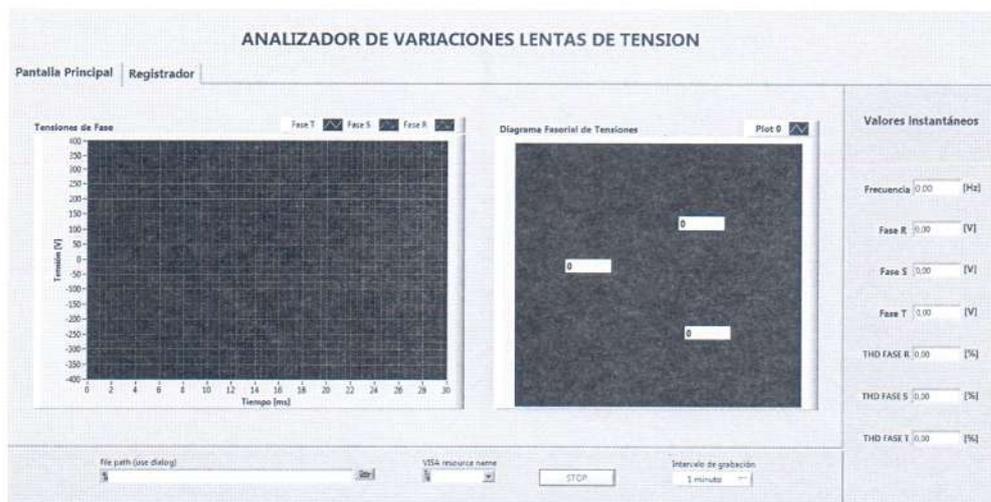


Figura 4.27- Panel frontal de la aplicación Analizador de V.L.D.T, solapa principal.



Figura 4.28- Panel frontal de la aplicación analizador de V.L.D.T, solapa registrador.

## *Capítulo 5. Conclusión y perspectivas.*

En el presente trabajo, luego de haber investigado la problemática de la calidad de la energía eléctrica, de sus indicadores y demás parámetros eléctricos que la definen, se llegó a identificar la necesidad de determinar sus valores a través de una medición eficiente y periódica.

Para ello existen, equipos de medida comerciales que miden estos parámetros, pero son muy costosos y tienen funciones específicas finitas que pueden quedar obsoletas en poco tiempo debido a la constante evolución de las tecnologías de las cargas eléctricas que se conectan a la red.

Tal es el caso de la obsolescencia que ocurre con la tecnología de las luminarias; que van cambiando muy rápidamente, por ejemplo, en muy poco tiempo pasamos de utilizar lámparas incandescentes pasando por las lámparas fluorescentes compactas, hasta llegar a la actualidad a la utilización de la tecnología LED. Estos cambios acarrearán el problema de la afectación de los índices de calidad de la energía eléctrica. La necesidad de que las cargas sean más eficientes en cuanto al consumo, pero acarrearán el problema de que la tecnología utilizada deforma las ondas de tensión y corriente, debido a su característica de no linealidad, provocando un descenso de la calidad de la energía eléctrica.

La preocupación por mantener índices de calidad aceptables hace que se requieran, cada vez con más frecuencia, instrumentos de medición capaces de registrar todas las variables eléctricas que pueda ir evolucionando y adaptándose a la tecnología de las cargas eléctricas. En este sentido, la instrumentación virtual puede aportar soluciones tecnológicas a un costo relativamente bajo, ofreciendo además la versatilidad de poder adaptar el procesamiento de las mediciones a las necesidades del que opera el sistema. Por otra parte, el uso de esta tecnología permite emplear no solo la computadora personal, sino también una variedad de dispositivos como smartphones o tablets que incrementan la conectividad y portabilidad de estos sistemas.

Por lo expresado en el párrafo anterior, se presenta en este trabajo el desarrollo de un dispositivo virtual para el análisis del producto eléctrico en instalaciones de baja tensión. Este dispositivo es un medidor trifásico de potencia y calidad de la energía eléctrica en el cual se propuso utilizar el software de programación en G, LabVIEW. Dicho sistema es una herramienta poderosa y versátil para el análisis de señales eléctricas, que junto con una placa de adquisición de datos y transductores de medida adecuados nos permite medir, tensiones y corrientes, para luego calcular todos los parámetros necesarios referidos a la calidad de la energía eléctrica, tales como potencia, energía, factor de potencia, armónicos, etc. Cuenta con dos modos de trabajo, como medidor de parámetros eléctricos y como registrador de estos parámetros; como

medidor, los datos son mostrados en pantalla en tiempo real y como registrador, los datos son guardados en archivos o enviados vía e-mail para su posterior análisis.

El dispositivo desarrollado utiliza una placa de adquisición de datos disponible en el laboratorio de medidas eléctricas de la Facultad, junto con transductores de tensión y de corriente caracterizados por su bajo costo, disponibles en el mercado, hace que sea accesible realizar este prototipo de forma sencilla y económica.

Si bien este desarrollo no ha sido finalizado, se cuenta con un prototipo que permitirá el estudio de los fenómenos armónicos, perturbaciones electromagnéticas, comportamientos erráticos en la red eléctricas, etc., en asignaturas como Instrumentación avanzada, transformándose en un recurso didáctico importante para la enseñanza de la Ingeniería Eléctrica, al ser amigable con el usuario y adaptable a las necesidades de la aplicación que se requiera en ese momento. Con el objetivo de mejorar los recursos didácticos que tiene el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería (UNMDP) donando el prototipo construido en este proyecto a la cátedra de Instrumentación Avanzada, para que se siga desarrollando esta tecnología de medición y para que se siga difundiendo la potencialidad que posee la instrumentación virtual.

## Referencias

**IEC 61000-2-2**, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - **Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems**. Second edition. Geneva-Switzerland : International Electrotechnical Commission, 2002-2003.

**IEEE 1159.1**, *Guide For Recorder and Data Acquisition Requirements For Characterization of Power Quality Events*". En : **IEEE Standards association : working group site & liaison index**. Disponible en [http://grouper.ieee.org/groups/1159/1/IE1159\\_95e.pdf](http://grouper.ieee.org/groups/1159/1/IE1159_95e.pdf). (consultado el 20/2/15)

Ferracc, Philippe, "La calidad de la energía eléctrica" Octubre 2004.

WAGNER, V. E. (y otros). "*Effects of harmonics on equipment*". p. 672-680. En : **IEEE Transactions on Power Systems**. Vol. 8 , Issue 2 (1993). S.I. IEEE, 1993. ISSN 0885-8977.

SUÁREZ, J.A. ; DI MAURO, G. ; ANAUT, D. ; AGÜERO, C. "*Parámetros que afectan la corriente de neutro en presencia de armónicos*". P. 77-89. En : **Información Tecnológica**. Vol. 21(1), (2010). La Serena-Chile : CIT, Centro de Información Tecnológica, 2010. ISSN 0718-0764.

**CALIDAD Del Servicio en la Distribución de Energía Eléctrica**. EN : ENRE, Ente nacional regulador de la Electricidad [Página web]. Disponible en: [http://www.enre.gov.ar/web/web.nsf/Files/97p04.pdf/\\$FILE/97p04.pdf](http://www.enre.gov.ar/web/web.nsf/Files/97p04.pdf/$FILE/97p04.pdf) (consultado el 20/2/15)

LAJARA VIZCAÍNO, J.R. ; PELEGRI SEBASTIA, J . **LabVIEW : entorno gráfico de programación**. Barcelona : Marcombo, 470 p. México: Alfaomega, 2007. 372 p. + 1 CD-ROM. ISBN 9788426716965