



Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo

Facultad De Ingeniería Eléctrica

Análisis de un Generador Síncrono-bus infinito Basado en la medición de su campo magnético.

TESIS PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTA:

Rodolfo Carlos Salto Díaz

ASESOR:

Dr. Gilberto González Avalos



Morelia, Michoacán Agosto 2012

GRACIAS SEÑOR:

Hoy gracias a ti, me encuentro aquí listo para iniciar un nuevo camino lleno de retos y obstáculos, avanzando hacia el futuro con paso firme, por que se que a donde quiera que yo vaya estarás iluminando mi camino acompañándome.

Porque con fe dentro de mi corazón sigo a delante con mi frente en alto.

Por darme salud y a todos los que me rodean. Pero sobre cualquier cosa, gracias por permitirme ser una mejor persona.

Llégo el momento el cual veía tan lejano, ahora... es momento de agradecer a quienes por mi camino me vieron caer y levantarme, apoyándome incondicionalmente.

Con mucho orgullo y respeto agradezco a mis Padres:

María Díaz González y Pedro Salto Alfaro y a mis hermanos Carolina, Maricela y Gerardo con los que estoy profundamente agradecido por creer en mí.

A quienes sin saber en dónde o cuando se convirtieron en parte importante de mi vida agradezco de todo corazón el enriquecer mi sendero con buenos momentos a todos ustedes gracias.

Hablo de ustedes Amigos y compañeros integrantes de nuestra facultad de Ingeniería Eléctrica como ustedes no hay dos gracias por hacerme parte de su historia.

A TODOS USTEDES
“MUCHAS GRACIAS”

Agradezco profundamente a mis profesores

Ya que sin ustedes no sería posible que esté yo aquí entregando y exponiendo los conocimientos transmitidos, es para mí muy gratificante poder agradecerles la paciencia y el apoyo que siempre me brindaron, siempre dispuestos y con gran entusiasmo.

Con la firme creencia que la formación se integra física y mentalmente, quiero agradecer a Jorge Bautista Martínez instructor de la Banda de Guerra de la U.M.S.N.H. por creer en mí. Gracias por formar individuos de éxito, gracias por hacerme parte de este grupo tan grande y exitoso.

Por su confianza y apoyo quiero agradecer a mi Asesor, Sinodales y todos aquellos que han tenido que ver con mi formación por confiar y hacer de mí una mejor persona.

INDICE

CAPÍTULO 1

Introducción:

1.1 Medición de campo magnético.....	1
1.2 Objetivo.....	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Contenido de la tesis.....	5

CAPÍTULO 2

Antecedentes de las variables magnéticas

2.1 Campo magnético.....	7
2.2 Fuerza magnética en una corriente.....	9
2.3 Las líneas de B.....	13
2.4 El campo magnético en un solenoide.....	14
2.5 Magnetización e intensidad de campo magnético.....	15
2.6 Ley de la inducción de faraday y ecuaciones de Maxwell.....	16
2.7 Fem inducida y campos magnéticos variables.....	18
2.7.1 Corrientes parásitas.....	20
2.7.2 Flujo magnético.....	20
2.7.3 Fem inducida sobre una espira rectangular en rotación.....	21

2.7.4 Ecuaciones de Maxwell.....	22
----------------------------------	----

CAPÍTULO 3

Conocimientos básicos de máquinas de C.A y software de instrumentación virtual.

3.1 Máquina Síncrona.....	24
3.1.1.-Relación entre la frecuencia eléctrica y velocidad de campo magnético giratorio.....	26
3.1.2.-La relación entre ángulo eléctrico y mecánico.....	27
3.1.3.-Voltaje inducido en máquinas C.A.....	28
3.1.4.- Par inducido en una máquina de C.A.....	28
3.1.5.- Pérdidas en máquinas de C.A.....	30
3.1.6.- Resumen de ecuaciones.....	32
3.2 Labview.....	33
3.2.1.-Características de <i>LabView</i>	34
3.2.2.-Instrumentos virtuales VI	34
3.2.3.-Elementos en el diagrama de bloques.....	36
3.2.4.-Creación de programas.....	38
3.2.5.-Paleta de funciones.....	39

CAPÍTULO 4

Instrumentación virtual propuesta.

4.1.-Programa para censado de campo magnético.....	40
4.2.-Programa de Sincronización del generador y monitoreo de campo magnético.....	54

CAPÍTULO 5

Monitoreo de campo magnético mediante la tarjeta de adquisición de datos vernier (LabPro) y NI 6008 (LabView).

5.1 Descripción y características del equipo utilizado para realizar la sincronización.....	72
5.2.- Obtención de parámetros.....	79
5.3.- Descripción del VI de sincronización.....	87
5.4.- Pruebas y desarrollo del funcionamiento del VI de sincronización.....	98

CAPÍTULO 6

Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones.-	104
Recomendaciones.....	105
Bibliografía.....	106

INDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 Campos magnéticos; a) No uniforme b) Uniforme.....	1
Figura 1.2 medición de campo magnético.....	2
Figura 1.3 Experimento de medición de campo magnético	2
Figura 1.4 Ley de Lorentz.....	3
Figura 1.5 fuerzas actuando sobre una partícula.....	3
Figura 1.6 Efecto Hall.....	4

Capítulo 2

Figura 2.1 Campos Magnéticos.	7
Figura 2.2 Campo magnético de circuitos cerrados.....	9
Figura 2.3 Líneas de campo magnético.	9
Figura 2.4 campo magnético en un conductor.	10
Figura 2.5 Dirección de un electrón en un campo magnético.....	10
Figura 2.6 Diagrama de fuerzas magnéticas en una corriente.	11
Figura 2.7 Dos conductores paralelos en un campo magnético.	12
Figura 2.8 Regla de la mano derecha.....	13
Figura 2.9 Campo magnético en un conductor.	13
Figura 2.10 Líneas de campo magnético de un conductor con corriente y campo externo.....	14
Figura 2.11 Campos magnéticos en solenoides.....	14
Figura 2.12 Líneas de campo en un solenoide.	15
Figura 2.13 Un toroide.....	16
Figura 2.14 Experimento de Faraday.	17
Figura 2.15 Segundo experimento de Faraday.	17
Figura 2.16 Ley de Lenz.	19
Figura 2.17 Interpretación de la Ley de Lenz.	19
Figura 2.18 Campo eléctrico inducido.....	21
Figura 2.19 Un generador básico.....	22

Capítulo 3

Figura 3.1 Campo magnético rotatorio.....	25
Figura 3.2 Posición del campo magnético en a) $\omega t=0^\circ$; b) $\omega t=90^\circ$	26
Figura 3.3 Esquema de un estator trifásico de dos polos.	26
Figura 3.4 Flujos magnéticos neto de la máquina.	29
Figura 3.5 Diagrama de flujo de potencia en un generador trifásico.....	32
Figura 3.6 Panel frontal con tipos de indicadores.	35
Figura 3.7 Diagrama de bloques de código gráfico G.....	35
Figura 3.8 Ventana de ayuda con información de entrada y salida de las funciones.....	37
Figura 3.9 Modo de ejecución.	37
Figura 3.10 Paleta de controles del Panel frontal.....	39
Figura 3.11 Paleta de Funciones del diagrama de bloques.....	39
Figura 3.12 Paleta de LabPro.....	39

Capítulo 4

Figura 4.1 Programa para censado de campo magnético.....	40
Figura 4.2 inicio de variables.....	40
Figura 4.3 Estructuras de secuencia.....	41
Figura 4.4 Estructura de secuencias apiladas.....	41
Figura 4.5 Ciclos while loop.....	41
Figura 4.6 Ciclo de control para el cuerpo general del programa de adquisición.....	42
Figura 4.7 Estructura de decisión Falso Verdadero.....	42
Figura 4.8 Caso para cuando el programa espera la introducción de datos.....	43
Figura 4.9 Caso para cuando no presenta ningún evento.....	43
Figura 4.10 Diagrama para configurar la tarjeta de adquisición de datos en tiempo real.....	44
Figura 4.11 Diagrama de bloques para la recolección de datos en tiempo real.....	44
Figura 4.12 Parámetros de la función de tiempo real.....	45
Figura 4.13 diagrama de bloques para la recolección de datos en tiempo real.....	45
Figura 4.14 Diagrama de bloques para guardar los datos del experimento.....	46
Figura 4.15 diagrama de bloques de reinicio por errores y versión del driver de la tarjeta de adquisición de datos.....	47

Figura 4.16 ajustes de prueba para preparar el sensor.....	47
Figura 4.17 Diagrama de bloques para limpiar graficas y información de tablas.....	48
Figura 4.18 Drivers de LabPro para realizar pruebas de funcionamiento correcto.....	48
Figura 4.19 Borra los datos mostrados en la tabla para una nueva adquisición.....	49
Figura 4.20 Presenta los ajustes y restablece la escala del grafico.....	49
Figura 4.21 Diagrama del proceso de sincronización y monitoreo de campo magnético ante diferentes tipos de carga.....	52
Figura 4.22 Descripción por partes del diagrama de bloques principal.....	53
Figura 4.23 Panel Frontal de VI de sincronización simulado.....	54
Figura 4.24 Programa para simular las señales adquiridas.....	55
Figura 4.25 Generador de señal.....	55
Figura 4.26 Diagrama de bloques para generador de señales adquiridas simuladas.....	57
Figura 4.27 Diagrama de bloques del SubVI para condiciones de sincronización.....	58
Figura 4.28 Configuraciones de bloque de comparación.....	58
Figura 4.29 Diagrama de bloques del SubVI para condicionar la sincronización y vista en diagrama principal.	59
Figura 4.30 Instrumentación de las señales adquiridas de voltaje.....	59
Figura 4.31 Toolkit utilizado para graficar Fasores.	60
Figura 4.32 Instrumentación grafica para las condiciones de sincronización.....	60
Figura 4.33 Panel frontal de VI para la sincronización del un generador síncrono a CFE.....	60
Figura 4.34 Retraso de tiempo en la señal.	62
Figura 4.35 Diagrama de bloques para determinar condiciones de disparo al relevador.....	62
Figura 4.36 diagrama de bloques del disparo para activar o desactivar el relevador.....	63
Figura 4.37 Diagrama de bloques para monitoreo de campo magnético.....	64
Figura 4.38 Configuración del rango de lectura de campo magnético.....	64
Figura 4.39 Monitoreo de campo magnético.....	65
Figura 4.40 Variable local para control de monitoreo de variables de sincronización.....	65
Figura 4.41 Simulación con parámetros en cero.	66
Figura 4.42 Prueba de indicadores de condiciones de sincronización.....	67

Figura 4.43 Prueba de indicador de igualdad de voltajes.	68
Figura 4.44 Prueba de indicador de igualdad de fases.....	68
Figura 4.45 Prueba de cumplimiento y disparo para la sincronización.	69
Figura 4.46 Monitoreo de campo magnético y exportación de datos a hoja de cálculo.....	70
Figura 4.47 diagrama de flujo del sistema.	71

Capítulo 5

Figura 5.1 Maquina síncrona modelo EMS 8241.....	72
Figura 5.2 Primo-motor modelo 8211-02.....	73
Figura 5.3 Transformadores para instrumentación.....	73
Figura 5.4 Transformadores de 127 V a 12V y 127V a 24V.....	74
Figura 5.5 Módulo de sincronización.....	74
Figura 5.6 Tarjeta de adquisición de datos NI6008.....	75
Figura 5.7 Tarjeta de adquisición LabPro de Vernier.....	75
Figura 5.8 Sensor de campo magnético.....	76
Figura 5.9 Módulo de amplificación del sensor de campo magnético.....	76
Figura 5.10 Relevador CRYDOM y sus características.	77
Figura 5.11 Contactor.....	77
Figura 5.12 Modulo de contactos para realizar conexión del generador a la red eléctrica.....	78
Figura 5.13 Multímetros utilizados.....	78
Figura 5.14 Descripción de LabVIEW.	79
Figura 5.15 ubicación del sensor de campo magnético.....	80
Figura 5.16 Prueba con el sensor en alta.	80
Figura 5.17 Prueba con el sensor en bajo.	81
Figura 5.18 Distribución de áreas para análisis del campo magnético.	81
Figura 5.19 Grafica del campo magnético en la zona A.	82
Figura 5.20 Análisis del campo magnético en la zona B.	82
Figura 5.21 Pruebas realizadas en el laboratorio de máquinas eléctricas.	83
Figura 5.22 Instrumentación para la adquisición de voltajes.	84
Figura 5.23 Diagrama de conexión para cada una de las fases del generador.....	84
Figura 5.24 diagrama de conexión para cada uno de las fases de la fuente de CFE.....	85

Figura 5.25 Diagrama de conexión entre los equipos, instrumentación, adquisición de datos y sincronización del generador a la red eléctrica.....	86
Figura 5.26 Equipo e instrumentación.	86
Figura 5.27 Orden de las señales adquiridas.	87
Figura 5.28 DAQ para salida a analógica.	88
Figura 5.29 select signal express y Tone VI.	88
Figura 5.30 Grafica de ahuja.	88
Figura 5.31 Bloques de operaciones matemáticas.....	89
Figura 5.32 Sub VI de módulo de sincronización.	90
Figura 5.33 Bloques del VI de sincronización.	91
Figura 5.34 Pantalla de sincronización.	91
Figura 5.35 Descripción de las etapas.	92
Figura 5.36 Recolección de Datos.	93
Figura 5.37 Aplicación de los parámetros de la recolección de datos.....	93
Figura 5.38 Generador sobrecargado.	94
Figura 5.39 Generador subcargado.	95
Figura 5.40 Diagrama de bloques del VI de sincronización	96
Figura 5.41 Panel frontal del VI de sincronización	97
Figura 5.42 Bloque de tiempo de retardo.	98
Figura 5.43 Sistema completo.	98
Figura 5.44 Panel frontal de medidores de voltaje y frecuencia.	99
Figura 5.45 Descripción final del sistema.	99
Figura 5.46 Pruebas de disparo y temporizador para garantizar el buen funcionamiento del sistema.....	100
Figura 5.47 Operación de sincronización.....	100
Figura 5.48 Proceso de monitoreo.....	101
Figura 5.49 Operación del sistema.....	101
Figura 5.50 Operación del generador.	102
Figura 5.51 Generador con protección.	102
Figura 5.52 indicador de restablecimiento.	103

CAPÍTULO 1

INTRODUCCION

1.1 La medición de campo magnético

Cuando hablo de un campo magnético lo primero que se viene a la mente es como está definido, por lo tanto, pienso enseguida en la *ley de Faraday*, ya que esta ley permite medir la intensidad del campo en una región definida en el espacio. Esta ley establece que la corriente inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético que lo atraviesa, en otras palabras la fem inducida en un circuito es igual la razón de cambio de flujo magnético a través del circuito.

La inducción electromagnética fue descubierta casi al mismo tiempo y de forma independiente por Michael Faraday y Joseph Henry en 1831. La inducción electromagnética es la base de los generadores eléctricos, transformadores y muchos otros dispositivos.

El campo magnético se presenta en dos formas: no uniforme y uniforme.

- La primera forma de medir un campo magnético no uniforme es mediante una bobina conectada a un galvanómetro balístico, este dispositivo ayuda a medir en un corto intervalo de tiempo la carga que fluye a través del galvanómetro, al sacarlo del campo magnético obtenemos así la medición de dicho campo, tal como se muestra en la figura 1.1 a).

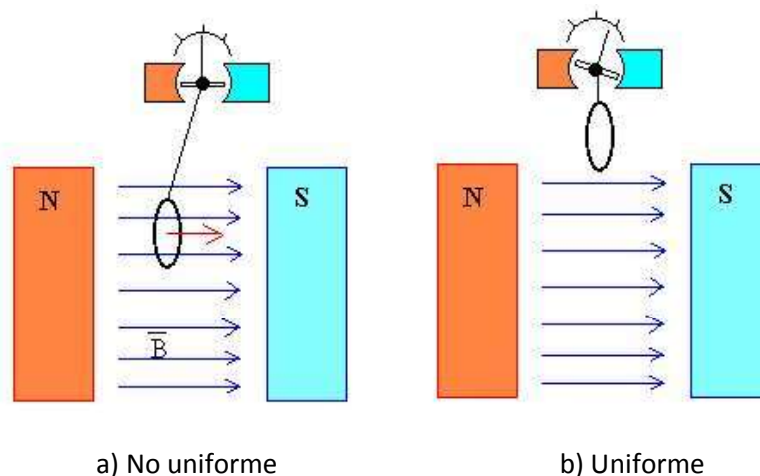


Figura 1.1 Campos magnéticos;

- Para medir un campo magnético uniforme usamos la misma bobina y el galvanómetro dando media vuelta a la bobina rápidamente, por lo tanto, la carga que pasa a través de la bobina es medida cuyo periodo de oscilación es mucho mayor que el tiempo que tarda la bobina en girar media vuelta, esto se ilustra en la figura 1.1 b).

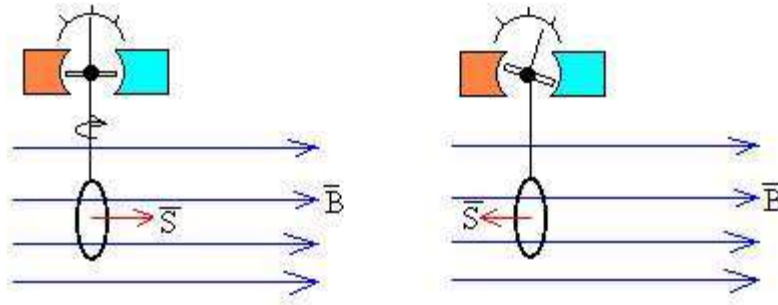


Figura 1.2 medición de campo magnético.

Para poder medir y calcular la intensidad de campo magnético lo que necesitamos saber sólo es “N” (número de vueltas en la bobina) y “S” (el área de la espira) ya que el galvanómetro sólo mide la carga, esto se ilustra en la figura 1.2.

Como ejemplo podemos hacer este experimento conectando la bobina rectangular a un osciloscopio observaremos el fenómeno de la inducción electromagnética en la figura 1.3.

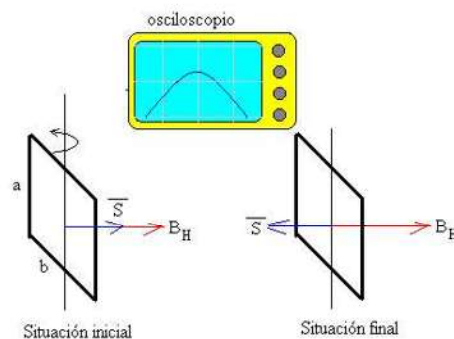


Figura 1.3 Experimento de medición de campo magnético

La imagen que se observa en la pantalla del osciloscopio es la representación gráfica de la fem en función del tiempo.

Otra forma conocida por medio de la cuál podemos medir la intensidad del campo magnético es por el efecto “Hall” llamado así por Edwin Herbert Hall este también es usado para medir corrientes y la determinación de la posición.

Para poder determinar y comprender el efecto Hall debemos conocer la ley de Lorentz esta ley indica que la fuerza de Lorentz es la fuerza ejercida por el campo electromagnético que recibe una partícula o una corriente eléctrica, como se muestra en la figura 1.4.

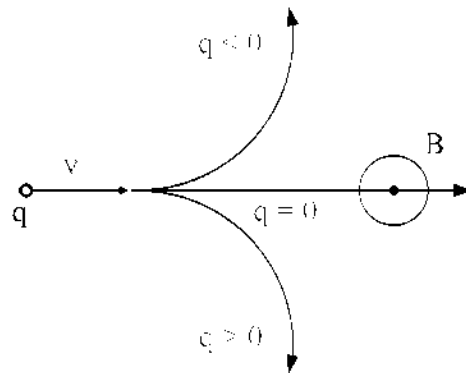


Figura 1.4 Ley de Lorentz

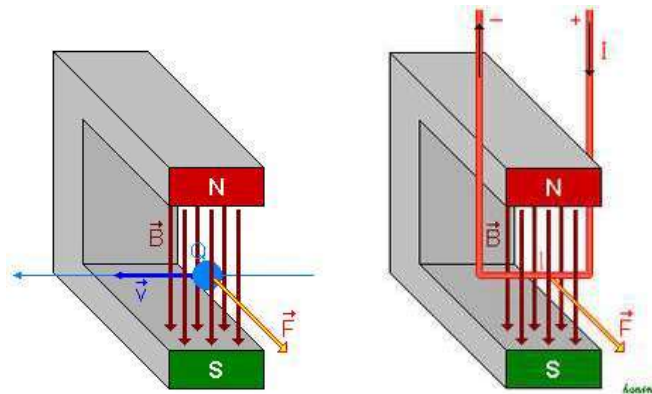


Figura 1.5 fuerzas actuando sobre una partícula.

En las figuras 1.5 se muestra las fuerzas que actúa sobre una partícula y sobre una corriente.

Para una partícula sometida a un campo eléctrico combinado con un campo magnético la fuerza electromagnética total o fuerzas de Lorentz sobre esas partículas vienen dadas por:

$$f = q(E + v * B) \quad (1.1)$$

v es la de la carga

E es la intensidad del campo eléctrico

B es el vector de inducción magnética

La ecuación 1.1 está relacionada con la fuerza de Laplace o también conocida como la fuerza de un hilo conductor por el que circula una corriente.

$$f = \int_L^0 I * dl * B$$

L es la longitud del conductor, I es la intensidad de la corriente y B es la inducción magnética.

Como podemos observar encontramos que para poder entender el concepto básico de cómo medir el campo magnético tenemos que remontarnos hacia las bases lo ya conocido como inducción magnética o densidad de flujo magnético cuya simbología usada es **B**, este es el flujo magnético por unidad de área de una sección normal a la dirección del flujo y en algunos textos modernos recibe el nombre de intensidad de flujo magnético ya que este es el campo real.

La unidad de la densidad en el Sistema Internacional de Unidades es el **tesla**, está dado por:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(q\vec{v}) * \hat{u}_r}{r^2} \quad \text{ó} \quad \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{(I d\vec{l}) \times \hat{u}_r}{r^2}$$

Donde:

B es la densidad de flujo magnético generado por un conductor por el cuál pasa una corriente I , a una distancia r .

Esa fórmula de esta definición es llamada Ley de Biot-Savart, esta es en magnetismo el equivalente de la Ley de Coulomb de la electrostática.

A continuación retomamos la demostración del efecto Hall el cual es nuestra base del funcionamiento de nuestro sensor.

El efecto Hall está definido como se muestra en la figura 1.6.

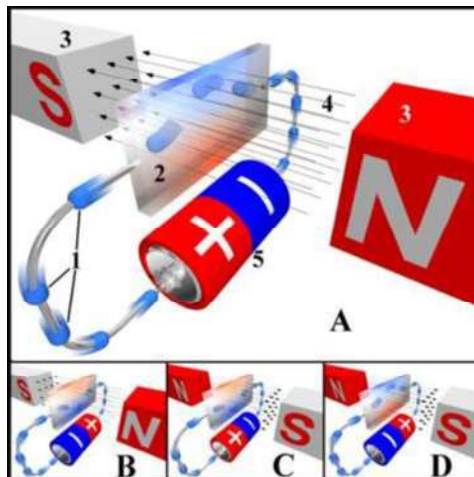


Figura 1.6 Efecto Hall.

En la figura 1.6 se muestra el diagrama del efecto Hall, mostrando el flujo de electrones (en vez de la corriente convencional).

- 1.-Electrones
- 2.-Sensor Hall
- 3.-Imanes
- 4.-Campo Magnético
- 5.-Fuente de energía

1.2 Objetivo

Realizar la instrumentación virtual para el monitoreo de campos magnéticos por medio del sensor de campo magnético y la tarjeta de adquisición de datos “LapPro” utilizando Labview en entorno grafico para sincronizar un generador a la compañía suministradora de energía eléctrica (CFE).

1.3 Justificación

La medición del campo magnético proporciona un parámetro de referencia para detectar fenómenos importantes al conectar un generador síncrono a CFE; de esta manera podemos conocer si el generador esta sobre excitado a sub excitado. De tal modo que podemos conocer el comportamiento del campo magnético de una manera diferente e innovadora utilizando nuevas tecnologías con software amigables con los usuarios ya que cuenta con interfaz grafica y una buena confiabilidad en la adquisición de datos.

1.4 Contenido de la tesis

El capítulo 1 plantea el objetivo principal de este trabajo de tesis que es sincronizar un generador de C.A. a la red eléctrica de CFE, así también la justificación para su realización. Se describe brevemente una reseña histórica y antecedentes de la manera que se media el campo magnético.

En el capítulo 2 se describe los antecedentes de las variables magnéticas de manera práctica desde la definición de campo magnético hasta la definición de la FEM inducidas y los campos magnéticos variables, y su desarrollo atreves del tiempo, enfocado en la aplicación de máquinas eléctricas.

En el capítulo 3 plantea los conocimientos básicos sobre máquinas eléctricas y el software utilizado para realizar la instrumentación virtual (LabVIEW), ya que utilice una maquina síncrona está enfocado en las ecuaciones que la definen así como sus características por ser una maquina de C.A. se describe también los conceptos básicos del uso del software LabVIEW para la comprensión de los términos utilizados.

En el capítulo 4 se describe el programa desarrollado en LabVIEW para el monitoreo de campo magnético así como el desarrollo para la comunicación con el programa principal para monitorear las variables de sincronización. En general en este capítulo se realiza la simulación del proceso de comunicación y adquisición de datos para llevar a cabo la sincronización y el control del proceso.

En el capítulo 5 con la experiencia obtenida en el capítulo anterior al simular los datos y la comunicación entre los programas fue motivante continuar con la implementación real del sistema; por lo que en este capítulo se describe las modificaciones y la creación de las nuevas versiones de los programas para llevarlo a la práctica. Obteniendo los resultados buscados.

En el capítulo 6 se establecen las conclusiones respecto a la experiencia adquirida al realizar esta tesis de manera simulada y en la práctica, así como las recomendaciones a partir de la experiencia obtenida al realizar instrumentación virtual con el software de LabVIEW. Finalmente, se muestra la bibliografía utilizada para fundamentar este trabajo de tesis.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES DE LAS VARIABLES MAGNÉTICAS

2.1 Campo magnético

La palabra magnetismo proviene del nombre de cierta región del Asia Menor “Magnesia” lugar donde se encontraron estas piedras, en la actualidad se le ha dado a este material un gran uso que va desde pequeños imanes hasta cintas magnéticas, discos de computadoras, motores etc.

Una carga móvil crea un campo magnético en el espacio que le rodea, para la determinación del campo magnético consideramos la observación opuesta, es decir, que un campo magnético ejerce una fuerza sobre una carga que se mueve a través de él.

Por lo tanto, decimos que si en un punto del espacio existe un campo magnético además de la fuerza electrostática se ejerce una fuerza sobre una carga móvil que pasa por dicho punto; por tal motivo se define el campo magnético como una magnitud vectorial con magnitud dirección y sentido, es decir,

$$\vec{B}$$

Campo magnético, inducción magnética o densidad de flujo magnético.

Se considera la siguiente figura 2.1 para determinar $\vec{B}$.

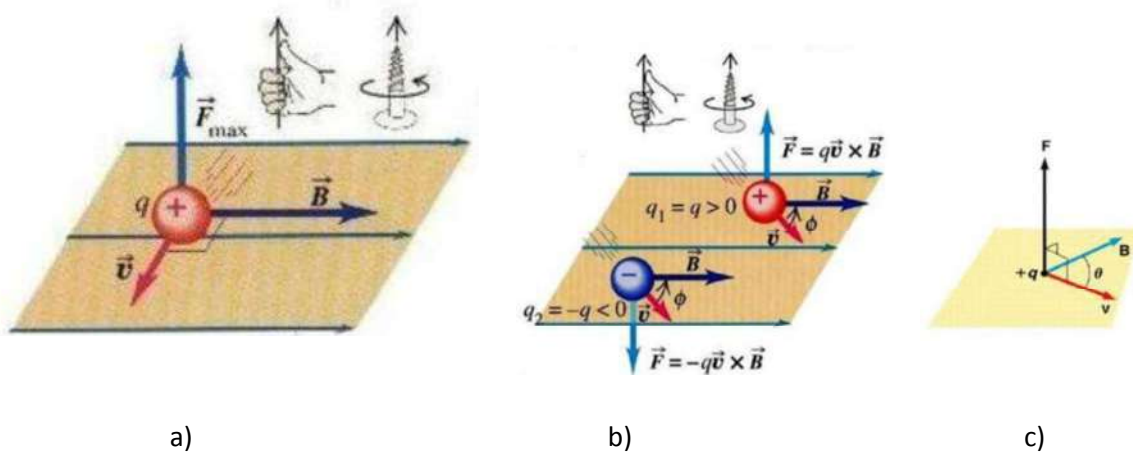


Figura 2.1 Campos Magnéticos.

Una partícula de carga $+q$ que se mueve con una velocidad v y por un campo magnético B experimenta una fuerza magnética F desviadora.

$\mathbf{F}$ de estar presente, actúa siempre lateralmente esto es, en ángulo recto a la dirección de $\mathbf{v}$ no importa cuál sea la dirección de $\mathbf{v}$ la fuerza magnética siempre está en ángulo recto con esa dirección.

Variando la dirección de $\mathbf{v}$ a través del punto P la magnitud de $\mathbf{F}$ cambia desde 0 cuando $\mathbf{v}$ está en paralelo o anti paralelo con $\mathbf{B}$. y es máxima cuando $\mathbf{v}$ forma un ángulo recto con $\mathbf{B}$ mostrado en la figura 2.1 c).

Al variar la magnitud de la velocidad se puede observar que la magnitud de $\mathbf{F}$ varía en proporción directa. $\mathbf{F}$ es proporcional a la magnitud de la carga de prueba q y $\mathbf{F}$ invierte su dirección cuando q cambia de signo como se muestra en la figura 2.1 b).

Por lo tanto, cuando la velocidad de la carga móvil es perpendicular al campo magnético, la fuerza que actúa sobre la carga es perpendicular a $\vec{v}$ y $\vec{B}$ tal como se muestra en la figura 2.1 a).

Se define como módulo de $\vec{B}$ a la constante de proporcionalidad entre $\mathbf{F}$ y $qv\sin\alpha$, es decir:

$$B = \frac{F}{qv\sin\alpha} \quad (2.1)$$

$$\text{Despejando } F = qvB\sin\alpha \quad (2.2)$$

La fuerza ejercida sobre una carga positiva es opuesta a la ejercida sobre una negativa para valores fijos de $\vec{v}$ y $\vec{B}$.

Dado que el sentido de $\vec{B}$ es inmedible (es un ente abstracto o inventado), definimos el sentido de $\vec{B}$ aquel que cumple la relación:

$$F = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.3)$$

Donde q viene afectada por su signo.

Del mismo modo que el campo eléctrico $\mathbf{E}$ puede representarse mediante líneas de campo eléctrico, también el campo magnético $\mathbf{B}$ puede ser representado por líneas de campo magnético. En ambos casos la dirección del campo bien indicada por la dirección de las líneas de campo, y la magnitud del campo por su densidad.

Las diferencias entre un campo eléctrico y un campo magnético son:

Sobre una carga positiva las líneas de campo eléctrico poseen la dirección de la fuerza eléctrica, mientras que en las líneas de campo magnético son perpendiculares a la fuerza magnética sobre la carga móvil.

Las líneas de campo eléctrico comienzan en las cargas positivas y terminan en las cargas negativas mientras que en el campo magnético forman circuitos cerrados; con los polos magnéticos aislados

aparentemente no existen no hay puntos donde las líneas de campo inicien o terminen, tal como se muestra en la figura 2.2.

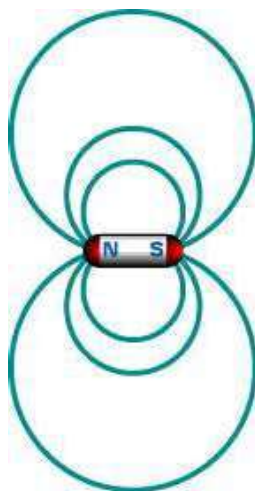


Figura 2.2 Campo magnético de circuitos cerrados.

Vemos las líneas de campo magnético dentro y fuera de una barra magnética como se muestra en la figura 2.3, las líneas emergerían del polo norte y entrarían al polo sur pero carecen de principio y fin. En su lugar forman circuitos cerrados.



Figura 2.3 Líneas de campo magnético.

Vemos las líneas de campo magnético que son exteriores a una barra imantada visualizada por limadura de hierro.

2.2 Fuerza magnética en una corriente

Recordando que un campo magnético ejerce una fuerza lateral sobre una carga en movimiento y que una corriente es un conjunto de cargas en movimiento. Por este motivo en un conductor que circula corriente también se ejercen fuerzas laterales sobre cada uno de los electrones que circulan por el conductor.

Analizando que si se tiene un conductor que pasa por una región en donde existe un campo magnético $\vec{B}$, no experimenta ninguna desviación si por el no circula ninguna corriente. En cambio en la figura 2.4 a) se ve que circula corriente por el conductor y este se desvía y en la figura 2.4 b) se invierte la corriente por lo tanto se invierte la desviación; la desviación también ocurre cuando se invierte $\vec{B}$.

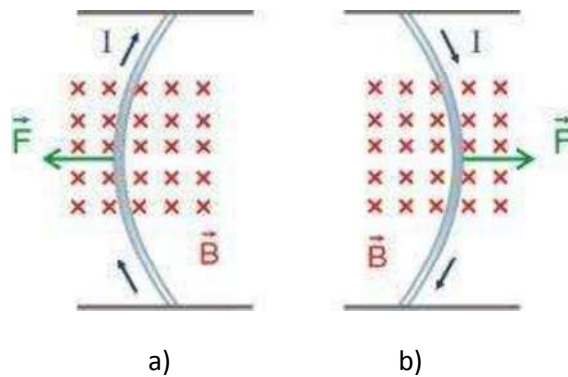


Figura 2.4 campo magnético en un conductor.

Para comprender este efecto se analiza un solo electrón de la corriente que pasa por el conductor. Suponiendo que los electrones se mueven a una velocidad constante una velocidad v_d , y que la dirección de los electrones es opuesta a la de la corriente i como se observa en la figura 2.5.

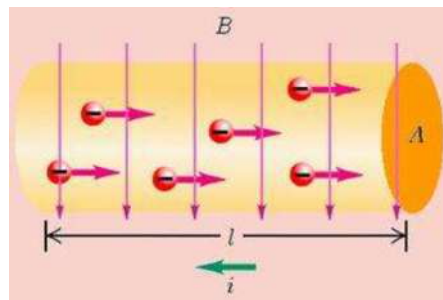


Figura 2.5 Dirección de un electrón en un campo magnético.

La fuerza total F sobre el segmento es igual al número N de electrones multiplicado por la fuerza sobre cada electrón.

Si la fuerza lateral sobre cada electrón es: $q = -e$

$$F = -Nev_d * B$$

Donde $N = nAL$

n = número de electrones por unidad de volumen

A = área transversal del alambre

L = longitud del alambre.

Por lo tanto, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$F = -nAlev_dxB \quad (2.4)$$

Si sabemos que $v = \frac{d}{t}$ tenemos que $v_d = \frac{L}{t}$ y la corriente es $i = \frac{q}{t}$

Si consideramos q en un conductor $q = Ne$ por lo tanto, $q = nALe$ ahora podemos conocer la corriente en esos términos $i = \frac{nALe}{L/v_d} = nAev_d$ como se puede observar la ecuación (2.4) se encuentra el término de corriente, por lo tanto, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$F = iLxB \quad (2.5)$$

El signo negativo de la expresión anterior, ya no se coloca por que este sólo indica que la corriente está en el sentido apuesta al flujo de electrones.

Si el segmento es perpendicular a la dirección del campo la magnitud de la fuerza puede escribirse como se indica en la siguiente ecuación.

$$F = iLB \quad (2.6)$$

En forma vectorial esta expresión se representa como se muestra en la figura 2.6.

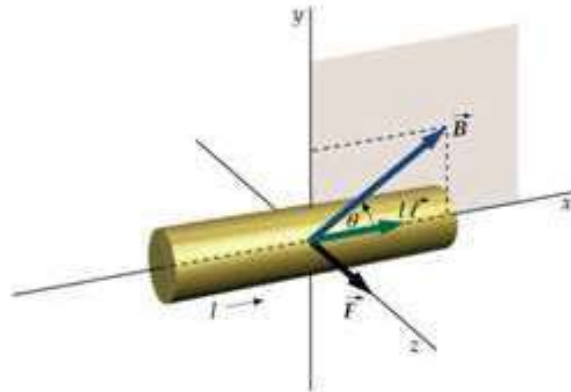


Figura 2.6 Diagrama de fuerzas magnéticas en una corriente.

Si el alambre no es recto o el campo no es uniforme, para su análisis, hacemos segmentos muy pequeños como para que sean aproximadamente rectos y el campo sea aproximadamente uniforme. Las fuerzas sobre cada segmento pueden escribirse.

$$dF = ids \times B \quad (2.7)$$

La fuerza total sobre el segmento de longitud L se encuentra llevando a cabo una integración apropiada.

Es importante mencionar que sucede con dos conductores paralelos, por lo tanto, analizamos la interacción magnética de dos corrientes, de manera que una corriente genera un campo magnético, y la otra corriente interactúa con ese campo.

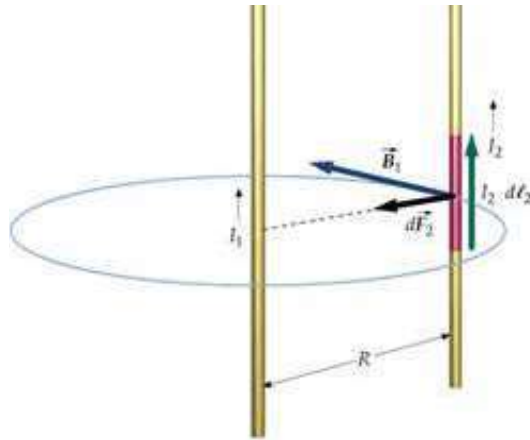


Figura 2.7 Dos conductores paralelos en un campo magnético.

Como se puede observar en la figura 2.7 el alambre 1 que conduce una corriente i_1 produce un campo magnético B_1 cuya magnitud está dada por:

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi R} = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi d}$$

Donde $R=d$ aplicando la regla de la mano derecha se determina que B_1 va hacia abajo.

Considerando que el alambre 2 está inmerso en un campo magnético externo B_1 . Una longitud L de este alambre experimenta una fuerza magnética lateral.

$$F_{2-1} = i_1 L B_1 = \frac{\mu_0 L i_1 i_2}{2\pi d}$$

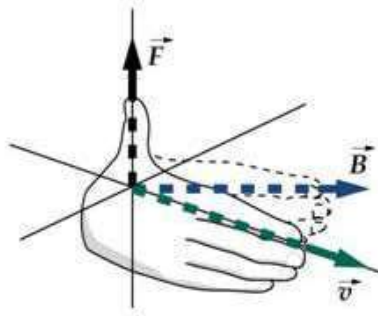


Figura 2.8 Regla de la mano derecha.

Para determinar la dirección de la fuerza magnética ejercida sobre una carga que se mueve en un campo magnético. (a) La fuerza es perpendicular a ambos $\mathbf{v}$ y $\mathbf{B}$ y su sentido es el que corresponde a un tornillo que avanza cuando gira en el mismo sentido $\mathbf{v}$ hacia $\mathbf{B}$. (b) Si los dedos de la mano derecha señalan la dirección de $\mathbf{v}$ de tal modo que pueden curvarse hacia $\mathbf{B}$, el pulgar señala la dirección de $\mathbf{F}$.

Aplicando la regla de la mano derecha F_{2-1} se encuentra en el plano de los alambres y apunta hacia el alambre 1. Si analizamos el alambre 2 que genere un campo B_2 y éste a su vez este sumergido en B_1 el alambre 1, sucede lo mismo. Pero si analizamos el caso que tengamos corrientes opuestas las expresiones quedan de manera similar lo único que cambia es el sentido F_{2-1} y B_2 .

Analizando los dos casos podemos determinar que las corrientes paralelas se atraen y las anti-paralelas se repelen.

Lo que nos lleva a la definición de de “Ampere” la que indica si dos alambre paralelos a un metro de distancia conducen una corriente y I fuerza por unidad de longitud de cada cable es $2 \times 10^{-7} \text{ N/m}$ entonces la corriente se define como 1 Ampere.

2.3 Las líneas de B



Figura 2.9 Campo magnético en un conductor.

Para analizar las líneas de campo magnético analizamos la figura 2.9 a donde vemos un alambre largo donde en el centro están concentradas y a medida que va aun mentando el radio estas se separan en la figura 2.10.

Ahora observemos las líneas de campo magnético de un conductor con corriente, bajo la influencia de un campo magnético externo.

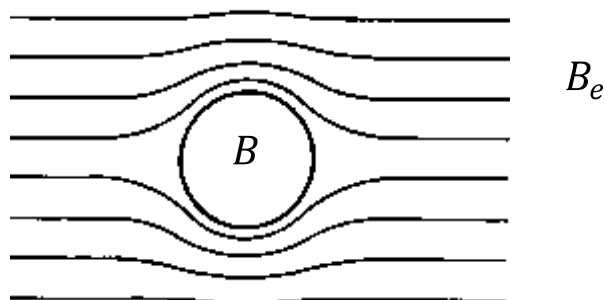


Figura 2.10 Líneas de campo magnético de un conductor con corriente y campo externo.

Podemos decir que la fuerza magnética sobre el alambre es causado por el campo externo en el que está inmerso, por lo tanto para calcular F :

$$F = iLB_e$$

Sólo se toma en cuenta este campo B_e ya que el campo magnético B no puede ejercer ninguna fuerza sobre el alambre, por ejemplo el campo gravitacional de la tierra no puede ejercer una fuerza sobre la tierra misma si no sobre otro cuerpo.

2.4 El campo magnético en un solenoide

Un solenoide es un alambre largo enrollado, las líneas de campo magnético de un solenoide poco enrollado son casi paralelas y están distribuidas de modo uniforme y próximas entre si lo que indica que el campo en este espacio es uniforme. Las líneas de campo entre las vueltas tiende a cancelarse una a otra, y el campo en el punto exterior es débil como se muestra en las figura 2.11.

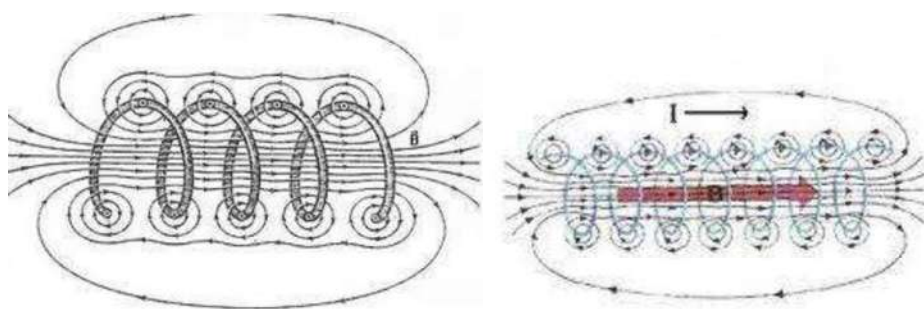


Figura 2.11 Campos magnéticos en solenoides.

Un solenoide con vueltas que están muy próximas, las líneas de campo magnético divergen de un extremo y convergen en otro extremo opuesto. Una inspección de esta distribución muestra una similitud con el campo de un imán de barra. A medida que aumenta la longitud del solenoide el campo en el espacio encerrado por las bobinas se vuelve más y más uniforme como se muestra en la figura 2.12.

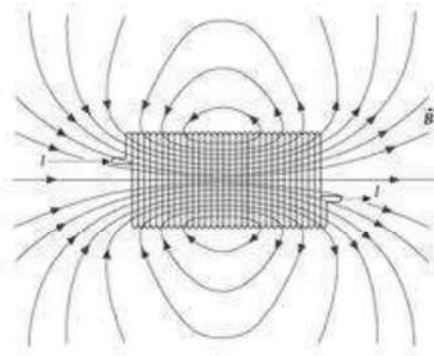


Figura 2.12 Líneas de campo en un solenoide.

Utilizando la ley de ampere para obtener una expresión para el campo magnético en el espacio rodeado por un solenoide normal analizando una sección transversal que conduce una corriente “I” un campo magnético B en el espacio interior uniforme y paralelo al eje, por lo tanto el campo magnético en el espacio que rodea a la bobina es cero.

La corriente total que pasa a través de la trayectoria rectangular es igual a la corriente multiplicada por el numero de de vueltas de el solenoide.

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \frac{\mu_0 n I}{l}$$

Donde $n = \frac{N}{l}$ es el número de vueltas por unidad de longitud.

2.5 Magnetización e intensidad de campo magnético

El estado magnético de una sustancia se describe por medio de una cantidad denominada cantidad de Magnetización “M”. *La magnitud del vector de magnetización es igual del momento magnético por unidad de volumen de la sustancia.*

El campo magnético total en una sustancia es el campo externo aplicado B_0 y la magnetización de la sustancia, la cual se denota como $B_m = \mu_0 M$ que es el campo producido por la sustancia magnética, por lo tanto el campo magnético total es:

$$B = B_0 + \mu_0 M$$

En este proceso interfiere otra cantidad llamada intensidad de campo magnético y se define como $H = \left(\frac{B}{\mu_0}\right) - M$, de la cual sus unidades en el sistema internacional (SI) son los amperes por metro. Al igual que las del vector M, por lo que nuestra expresión se dedujo de $B = \mu_0(H + M)$.

Consideremos la región dentro del espacio encerrado por un toroide que conduce una corriente “I” como se muestra en la figura 2.13.



Figura 2.13 Un toroide

Si este espacio es un vacío, entonces $M=0$ y $B = B_0 = \mu_0 H$ si $B = \mu_0 nI$ en el núcleo, donde n es el número de vueltas por unidad de longitud del toroide, por lo tanto:

$$H = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{\mu_0 nI}{\mu_0} = nI$$

Por lo cual, se determina que la intensidad del campo magnético en el núcleo del toroide se debe a la corriente en sus devanados.

Ahora si consideramos que el toroide con alguna sustancia y la corriente " I " se mantiene constante, entonces H dentro de la sustancia se mantiene invariable y tiene la magnitud nI . Esto se debe a que la intensidad del campo magnético H es consecuencia exclusivamente de la corriente del toroide, en cambio el campo magnético total cambia cuando se varía la corriente o la magnetización de la sustancia.

2.6 Ley de la inducción de Faraday y Ecuaciones de Maxwell

El primer experimento se basa en una bobina de alambre como parte de un circuito que contiene un amperímetro, en el cual si desplazamos un imán de barra hacia abajo con su polo norte encarando a la bobina al moverse el imán, el indicador del amperímetro se mueve, demostrando con ello que pasa corriente por la bobina.

Si mantenemos el imán estacionario con respecto a la bobina, el amperímetro no marca, si movemos el imán alejándose de la bobina el amperímetro se vuelve a desviar pero en dirección opuesta, lo que significa que la corriente está en sentido contrario.

Si usamos el extremo del polo sur de un imán en lugar del norte, pasa lo mismo que en el caso anterior nada más que las corrientes están invertidas. Entre más a prisa se mueva el imán, mayor será la lectura registrada ya que lo que importa es el movimiento relativo entre el imán y la bobina.

La corriente que aparece en este experimento se llama corriente inducida y se dice que ese produce por una fuerza electromotriz inducida.

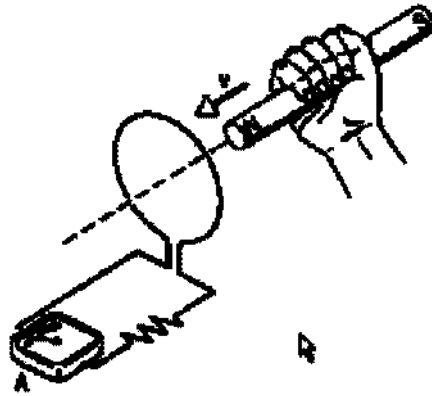


Figura 2.14 Experimento de Faraday.

El segundo experimento se basa en dos bobinas que se colocan una cerca de la otra pero en reposo, cuando se cierra un interruptor S , creando así una corriente estacionaria en la bobina de la derecha, el medidor marca momentáneamente cuando se abre el interruptor se interrumpe la corriente y el medidor marca de nuevo momentáneamente pero en dirección opuesta lo cual se muestra en la figura 2.15.

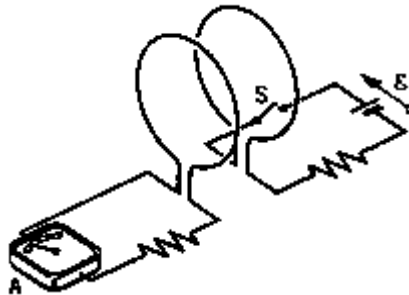


Figura 2.15 Segundo experimento de Faraday.

El experimento indica que existe una fem inducida en la bobina izquierda siempre que la corriente de la bobina derecha esté cambiando. Lo interesante es la velocidad de cambio de la corriente y no la intensidad de la misma. Lo importante de estos experimentos es el origen de la fem inducida en el imán en movimiento o la corriente cambiante.

Por lo que aparece la ley de Inducción de Faraday. Analizando los dos experimentos anteriores cuando se mueve el imán en el primer experimento, o cuando se abre o se cierra el interruptor en el segundo experimento el número de líneas de campo magnético que pasan a través de la bobina de la izquierda cambia.

Por lo tanto, lo que induce la fem en el anillo es el cambio en el número de líneas de campo que pasan a través de un circuito cerrado. Específicamente, lo que determina la fem inducida es la velocidad de cambio en el número de líneas de campo que pasan a través del anillo.

Para poder cuantificar, introducimos el término de flujo magnético ϕ_B donde este es una medida del número de líneas de campo magnético que pasan a través de una superficie y se define como:

$$\phi_B = \int B \, dA$$

Donde dA es un elemento del área de la superficie y la integral se lleva a cabo sobre toda la superficie a través de la cual deseamos calcular el flujo.

Si el campo magnético tiene una magnitud y dirección constante en una área plana A el flujo puede escribirse de la siguiente manera:

$$\phi_B = B A \cos \phi$$

Donde ϕ es el ángulo entre la normal a la superficie y la dirección del campo.

La unidad del flujo magnético en el (SI) es:

$$1 \text{ weber} = 1 \text{ tesla} \cdot \text{m}^2$$

En términos de del flujo magnético la fem inducida es un circuito y está dada por la ley de inducción de Faraday.

“La fem inducida en un circuito es igual al negativo de la velocidad con que cambia con el tiempo el flujo magnético a través del circuito cerrado.”, en términos matemáticos la ley de Faraday es:

$$\varepsilon = \frac{-d\phi_B}{dt}$$

Donde ε es la fem inducida. En el caso de bobina la fem inducida total es:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

2.7 Fem inducida y campos magnéticos variables

Ahora analizaremos la ley de Lenz ya que a partir del principio de conversión de energía se determina la dirección de la fem inducida, donde la regla para determinar la dirección de la corriente inducida fue propuesta en 1834 por Heinrich Friedrich Lenz (1804-1865) y se conoce como la ley de Lenz. La cuál nos dice que:

“En un circuito conductor cerrado, la corriente inducida aparece en una dirección tal que ésta se opone al cambio que la produce.” El signo menos en la ley de Faraday indica esta oposición.

Una espira de corriente crea un campo magnético en un punto equidistante como el de un dipolo magnético, siendo una cara del anillo un polo norte y la cara opuesta un polo sur, si el anillo va a

oponerse al movimiento del imán hacia él, la cara del anillo hacia el imán debe resultar ser un polo norte, los dos polos norte se repelen entre sí. La regla de la mano derecha aplicada al anillo demuestra que para que el campo magnético creado por el anillo al salir de la cara derecha de la espira la corriente inducida debe ser la mostrada en la figura 2.16.

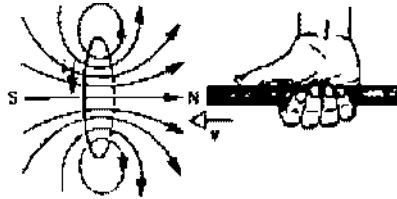


Figura 2.16 Ley de Lenz.

Cuando empujamos el imán hacia anillo aparece una corriente inducida, en términos de la ley de Lenz esta acción de empujar es el cambio que produce la corriente inducida se opone al empuje.

Si jalamos el imán alejando de la bobina, la corriente inducida se opone al jalón creando un polo sur en la cara derecha del anillo y la corriente debe ser opuesta a la mostrada en la figura 2.16, hacia arriba.

Aplicando la ley de Lenz de manera diferente, desde este punto de vista el cambio es al aumento del Φ_B a través del anillo provocando el acercar el imán. La corriente inducida se opone a este cambio creando un campo que tiende a oponerse al aumento del flujo causado por el imán en movimiento, tal como se muestra en la figura 2.17.

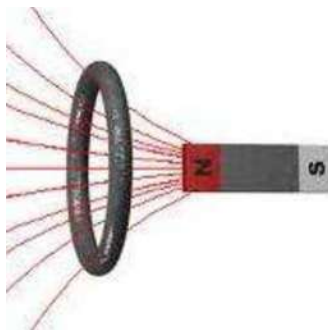


Figura 2.17 Interpretación de la Ley de Lenz.

2.7.1 Corrientes parasitas

Ahora hablaremos de las corrientes parasitas, son corrientes reales y producen los mismos efectos ya que ejercen una fuerza $F = iLxB$ en la trayectoria de la corriente que pasa a través del campo. Esta fuerza se transmite al material y se opone al movimiento con esto se genera una fuerza de frenado magnético.

Los campos magnéticos aplicados a una rueda que gira producen una fuerza que desaceleran el movimiento. Un frenado total no tiene partes móviles o mecánicas, por lo tanto, no se somete al desgaste por fricción de los frenos y son más eficientes a altas velocidades ya que la fuerza magnética aumenta con la velocidad. Una ventaja de estas corrientes es que se puede utilizar en un horno de inducción, en el cual una muestra de material puede calentarse usando un campo magnético cambiante.

2.7.2 Flujo magnético

Un flujo magnético variable induce una fem y una corriente en un lazo de conducción. Por consecuencia se crea un campo eléctrico en el conductor como resultado del flujo magnético variable. La ley de inducción electromagnética muestra que “un campo eléctrico siempre se genera por medio de un flujo magnético variable”, incluso en el espacio libre donde no hay cargas presentes. Sin embargo, este campo eléctrico inducido tiene propiedades que son bastantes diferentes de las correspondientes a la de un campo electrostático producido por carga estacionarias.

Si consideramos un lazo de conducción de radio r situado en un campo magnético uniforme que está perpendicular al plano del lazo como se observa en la figura 2.18. Si el campo magnético cambia con el tiempo entonces la ley de Faraday indica que una fem dada por $\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ se induce en el lazo. La corriente inducida que se produce implica la presencia de un campo eléctrico inducido E , el cual debe estar tangente al lazo pues todos los puntos en el mismo son equivalentes.

El trabajo hecho al mover una carga q una vez alrededor del lazo es igual a qE . Puesto que la fuerza eléctrica sobre la carga es qE , es trabajo realizado por esta fuerza al mover la carga una vez alrededor del lazo, está dado por $qE = (2\pi r)$, donde $2\pi r$ es la circunferencia del lazo.

$$q\varepsilon_{inducido} = qE2\pi r$$

$$\varepsilon = E(2\pi r) \text{ Por lo tanto el campo eléctrico inducido es } E = \frac{\varepsilon}{2\pi r}$$

Con este resultado la ley de Faraday y el hecho de que $\Phi_B = BA = \pi r^2 B$ para un lazo circular, este campo inducido también se puede representar como:

$$E = -\frac{1}{2\pi r} \frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{1}{2\pi r} \frac{d(\pi r^2)}{dx} = -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt}$$

Si la variación en el tiempo del campo magnético se especifica, el campo eléctrico inducido se puede calcular con facilidad a partir de la ecuación anterior. El signo menos indica que el campo eléctrico inducido ε se opone al cambio en el campo magnético. Es importante entender este resultado es válido en ausencia de un conductor. Es decir una carga libre colocada en un campo magnético variable también puede experimentar el mismo campo E. La fem para cualquier trayectoria cerrada puede expresarse como la integral de línea $E \cdot ds$ sobre esa trayectoria, en un caso más general, E no puede ser constante y la trayectoria no puede ser un círculo. Por lo tanto, la ley de inducción de Faraday, $\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}$ puede escribirse:

$$\oint E ds = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

Es importante reconocer que el campo eléctrico inducido E que aparece en la expresión anterior es uno no conservativo y variable en el tiempo que se genera a partir de un campo magnético variable. El campo E que satisface esta ecuación podría no ser un campo electrostático por la siguiente razón, si lo fuera y consecuentemente fuera conservativo, la integración de línea de $E \cdot ds$ a lo largo de un lazo cerrado sería cero, contrariamente a la ecuación anterior.

$$\oint E ds = 0$$

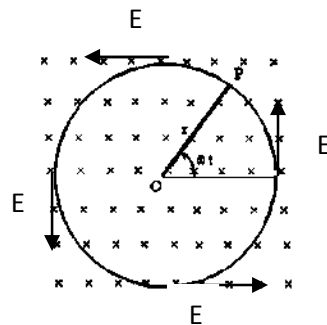


Figura 2.18 Campo eléctrico inducido

2.7.3 Fem inducida sobre una espira rectangular en rotación

Para comprender de manera más sencilla, lo relacionamos con un generador y como motor los cuales tiene este principio. Para ella primero analizaremos un generador de CA.

El generador es un dispositivo que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. El generador de CA se compone de una espira rectangular de alambre que rota por medios externos en un campo magnético. Este movimiento lo ocasiona un agente externo el cual hace que la espira gire, y el flujo magnético a través de él cambia con el tiempo, induciendo una fem y una corriente en un circuito externo. Los extremos de la espira se conectan a anillos deslizantes que rotan con la

espira, las conexiones al circuito externo se hacen por medio de escobillas estacionarias en contacto con los anillos deslizantes, como se muestra en la siguiente figura 2.19.

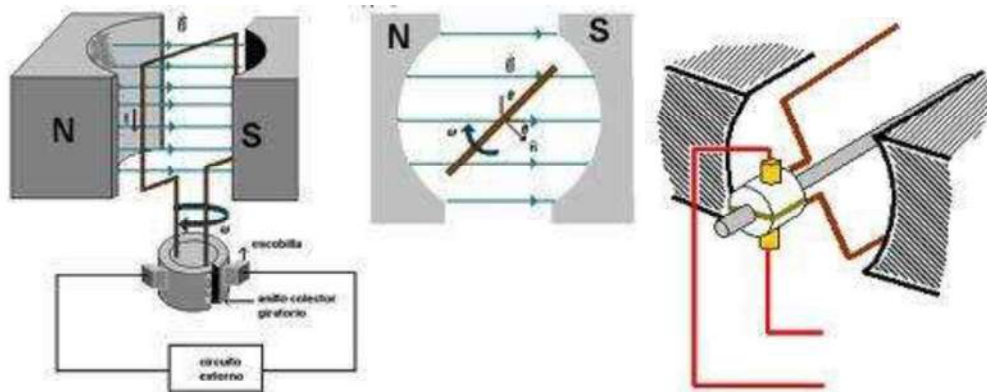


Figura 2.19 Un generador básico.

Para analizar el generador de forma cuantitativa, se tiene una espira de N vueltas todas de la misma área, se considera que la espira gira a una velocidad angular constante.

Si τ es el ángulo entre el campo magnético y la normal al plano de la espira como se muestra en la figura 2.19 donde el flujo magnético a través de la espira en cualquier tiempo t es:

$$\phi_B = B A \cos \phi = B A \cos \omega t$$

Por lo tanto, la fem inducida en la bobina es:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} = -NAB \frac{d}{dt} \cos \omega t = NAB \omega \sin \omega t$$

Este resultado indica que la fem varía sinusoidalmente con el tiempo.

Por lo tanto, la fem máxima tiene el valor $\varepsilon_{max} = NAB\omega$ como podemos observar en la figura cuando $\omega t = 90^\circ$ o 270° se tiene $fem = \varepsilon_{max}$ cuando el campo magnético está el plano de la bobina, la fem es cero y $\omega t = 0^\circ$ o 180° es decir, cuando B es perpendicular al plano de la bobina.

2.7.4 Ecuaciones de Maxwell

Estas ecuaciones conocidas como ecuaciones de Maxwell, en honor a James Clerk Maxwell son tan fundamentales para los fenómenos electromagnéticos como las leyes de Newton lo son para el estudio de los fenómenos mecánicos.

Las leyes de Maxwell representan las leyes de la electricidad y el magnetismo que ya hemos estudiado. Por simplicidad se presentan las ecuaciones de Maxwell como se aplican en el espacio libre, es decir en ausencia de cualquier material dieléctrico o magnético.

$$\oint E \cdot dA = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

$$\oint B \cdot dA = 0 \quad (2.9)$$

$$\oint E \cdot ds = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (2.10)$$

$$\oint B \cdot ds = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad (2.11)$$

La ecuación (2.8) es la ley de Gauss, la cual establece que el flujo eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta dentro de esa superficie dividida por ϵ_0 . Esta ley relaciona el campo eléctrico con la distribución de carga, donde las líneas de campo eléctrico se originan en cargas positivas y terminan en cargas negativas.

La ecuación (2.9) la ley de Gauss en el magnetismo establece que el flujo magnético neto a través de una superficie cerrada es cero. Esto significa que el número de líneas de campo magnético que entra a un volumen cerrado debe de ser igual al número que sale de ese volumen. Esto implica que las líneas de campo magnético no pueden empezar o terminar en cualquier punto. Si eso pasara esto significaría que hubo monopolos magnéticos aislados en ese punto. El hecho de que no se hayan observado en la naturaleza monopolos magnéticos aislados puede tomarse como una confirmación de la ecuación (2.9).

Ecuación (2.10) es la ley de inducción de Faraday, la cual describe la relación entre un campo eléctrico y un flujo magnético variable. Esta ley establece que la integral de línea del campo eléctrico alrededor de cualquier trayectoria cerrada (la cual es igual a la fem) es igual a la tasa de cambio del flujo magnético a través de cualquier área de la superficie delimitada por esa trayectoria. Una consecuencia de la ley de Faraday es la corriente inducida en una espira conductora situada en un campo que cambia en el tiempo.

La ecuación (2.11) es la forma generalizada de la ley de ampere, la cual describe una relación entre campos magnéticos, eléctricos y corrientes eléctricas. Esto es, la integral de línea del campo magnético alrededor de cualquier trayectoria cerrada; está determinada por la suma de la corriente de conducción neta a través de esa trayectoria y por la tasa de cambio del flujo eléctrico a través de cualquier superficie delimitada por esa trayectoria.

CAPÍTULO 3

Conocimientos básicos de máquinas de C.A. y software de instrumentación virtual

3.1 Máquina Síncrona

La máquina síncrona deriva su nombre del término velocidad síncrona, siendo la velocidad natural del campo magnético giratorio del estator. La velocidad natural de rotación está determinada por el número de pares de polos y la frecuencia de la potencia aplicada. La máquina síncrona utiliza un campo magnético giratorio pero el par desarrollado no depende de las corrientes de inducción del rotor. En resumen el principio de operación de un motor síncrono es el siguiente:

Se aplica una fuente trifásica de C.A. a los devanados del estator y se produce un campo magnético rotatorio; se aplica una corriente directa a los devanados del rotor y se produce un campo magnético fijo. El motor está construido de tal forma que cuando estos dos campos magnéticos reaccionan entre sí, el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético giratorio. Si se aplica una carga al eje del rotor este tendrá un atraso momentáneo con respecto al campo magnético giratorio; pero seguirá girando a la misma velocidad síncrona. Si una carga es demasiado grande el rotor se saldrá de sincronismo con el campo magnético giratorio y como resultado se detiene, en este caso se dice que el motor está sobrecargado.

El motor síncrono no tiene par de arranque propio en su rotor de modo que, una vez parado el motor, no habría manera de hacer que el rotor entre en acoplamiento magnético con el campo magnético giratorio. Por esta razón, todos los motores síncronos tienen algún medio de arranque.

Este tipo de máquinas está ubicado en la categoría de las máquinas de C.A. son motores y generadores cuya corriente de campo es suministrada por una fuente de potencia de C.D. separada.

Una de los principios más importantes de la operación de una máquina de C.A. es lo que llamamos "*campo magnético giratorio*" para lo cual lo definimos como un grupo de corrientes que tienen la misma magnitud entre ellas pero están desfasadas 120° eléctricos, fluyen en el devanado de armadura, por lo tanto, se produce un campo magnético giratorio.

De forma que tenemos un estator trifásico simple, la corriente en este estator se asumen positivas si fluyen hacia adentro de la bobina por el extremo no sobresaliente y salen de el por el extremo sobresaliente, tal como se muestra en la figura 3.1.

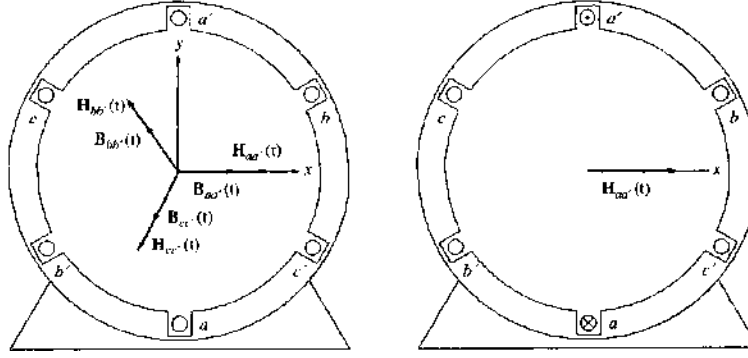


Figura 3.1 Campo magnético rotatorio.

La figura 3.1 muestra un estator trifásico sencillo, Un vector de intensidad de campo magnético $H_{aa'}(t)$ producido por la corriente que fluye en la bobina aa' .

Las corrientes en las bobinas están dadas por:

$$i_{aa'}(t) = I_M \text{Sen} \omega t$$

$$i_{bb'}(t) = I_M \text{Sen}(\omega t - 120)$$

$$i_{cc'}(t) = I_M \text{Sen}(\omega t - 240)$$

Entonces las densidades de flujo magnético son:

Si $B = \mu H$, entonces tenemos:

$$B_{aa'}(t) = B_M \text{Sen} \omega t \angle 0^\circ \text{ Teslas}$$

$$B_{bb'}(t) = B_M \text{Sen}(\omega t - 120) \angle 120^\circ \text{ Teslas}$$

$$B_{cc'}(t) = B_M \text{Sen}(\omega t - 240) \angle 240^\circ \text{ Teslas}$$

Donde $B_M = \mu H_M$. Las corrientes y sus densidades de flujos correspondientes pueden ser examinadas en determinados momentos, para determinar el campo magnético resultante en el estator. Las direcciones de estos campos están dados por la regla de la mano derecha.

En cualquier momento tendremos una misma magnitud del flujo de campo magnético $B = 1.5B_M$ y también rotará a una velocidad ω .

$$B_{net}(t) = B_{aa'}(t) + B_{bb'}(t) + B_{cc'}(t)$$

$$B_{net}(t) = (B_M \text{Sen} \omega t \angle 0^\circ + B_M \text{Sen}(\omega t - 120) \angle 120^\circ + B_M \text{Sen}(\omega t - 240) \angle 240^\circ)$$

Separando en las componentes X y Y la ecuación anterior y aplicado identidades trigonométricas se llena al resultado de la densidad del flujo magnético total:

$$B_{net}(t) = 1.5B_M \text{Sen}(\omega t) \hat{x} - 1.5B_M \text{Cos}(\omega t) \hat{y}$$

Por ejemplo si $\omega t = 0^\circ$ y $\omega t = 90^\circ$ observemos la figura 3.2 el B_{neto} .

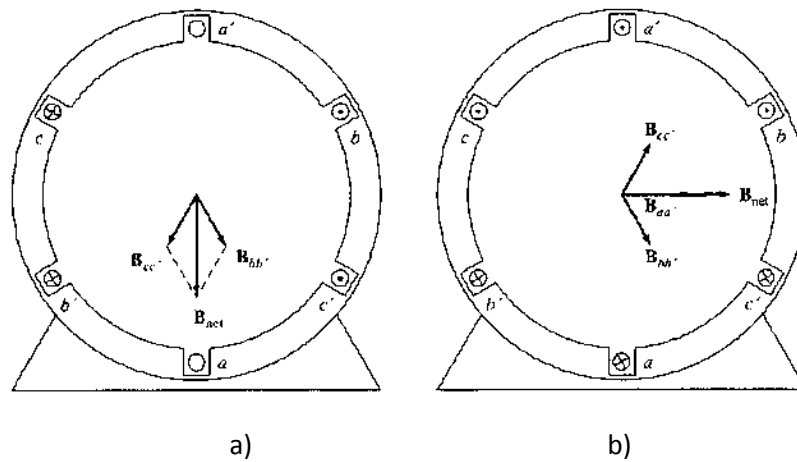


Figura 3.2 Posición del campo magnético en a) $\omega t = 0^\circ$; b) $\omega t = 90^\circ$.

3.1.1 Relación entre la frecuencia eléctrica y velocidad de campo magnético giratorio

La relación entre la frecuencia eléctrica y velocidad de campo magnético giratorio el campo magnético giratorio puede ser representado como un polo norte cuyo flujo sale del estator y un polo sur cuyo flujo entra al estator. Estos polos magnéticos completan un giro mecánico alrededor de la superficie del estator por cada ciclo eléctrico aplicado a la corriente. La velocidad mecánica del giro del flujo magnético en rpm es igual a la frecuencia eléctrica en Hz.

$$f_e = f_m \quad 2 \text{ polos}$$

$$\omega_e = \omega_m \quad 2 \text{ polos}$$

f_m y ω_m son las frecuencias mecánicas.

f_m y ω_m son la frecuencias eléctricas.

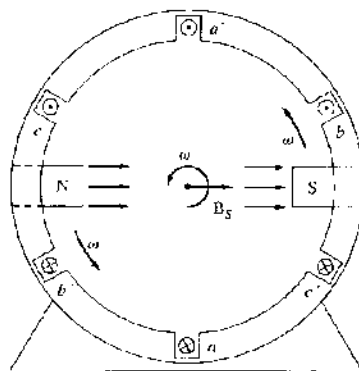


Figura 3.3 Esquema de un estator trifásico de dos polos.

En la figura 3.3 se muestra el orden de los devanados en la siguiente secuencia: a-c'-b-a'-c-b'. Si el modelo anterior se repitiera dos veces dentro de este y el modelo de los devanados en sentido contrario a las manecillas del reloj también se repetiría dos veces; en este caso se producen dos polos norte y dos polos sur, debido a esto un polo recorre sólo la mitad de la superficie del estator en un ciclo eléctrico.

3.1.2 La relación entre ángulo eléctrico y mecánico

La relación entre ángulo eléctrico (θ_e) y ángulo mecánico (θ_m) en el estator es:

$$\theta_e = \theta_m \quad 4 \text{ polos}$$

La frecuencia también se ven afectadas, en este caso siendo la frecuencia mecánica dos veces la frecuencia eléctrica.

$$f_e = 2f_m \quad 4 \text{ polos}$$

$$\omega_e = 2\omega_m \quad 4 \text{ polos}$$

Si llamamos a los polos del estator "P" entonces tenemos que hay P/2 repeticiones de la frecuencia de los devanados: a-c'-b-a'-c-b' alrededor de la superficie inferior y las cantidades y eléctricas en el estator se relacionan de la siguiente manera:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m, \quad f_e = \frac{P}{2} f_m, \quad \omega_e = \frac{P}{2} \omega_m$$

Como $f_m = n_m/60$ entonces es posible relacionar la frecuencia eléctrica en hertz con la velocidad mecánica resultante de los campos magnéticos en rpm:

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

La inversión de la dirección de la rotación de un campo magnético giratorio. Si se intercambia la corriente en dos de las tres bobinas se invertirá la dirección de rotación del campo magnético. Esto se logra conmutando las conexiones de dos de las tres bobinas.

Si se intercambian las fases bb' y cc' y se cálculo la densidad del flujo resultante tenemos:

$$B_{net}(t) = B_{aa'}(t) + B_{bb'}(t) + B_{cc'}(t)$$

$$B_{net}(t) = (B_M \text{Sen} \omega t \angle 0^\circ + B_M \text{Sen}(\omega t - 240^\circ) \angle 120^\circ + B_M \text{Sen}(\omega t - 120^\circ) \angle 240^\circ)$$

En este caso el campo magnético gira en sentido de las manecillas del reloj.

3.1.3 Voltaje inducido en máquinas C.A.

Un campo magnético giratorio puede producir un conjunto de voltajes trifásicos en las bobinas de un estator trifásico. Si se colocan 3 bobinas cada una con N_c vueltas alrededor del campo magnético del rotor, entonces los voltajes inducidos en cada una de ellas serán igual en magnitud pero la diferencia de fase será de 120° :

$$e_{aa'} = N_c \phi \omega \text{Sen} \omega t$$

$$e_{bb'} = N_c \phi \omega \text{Sen}(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_{cc'} = N_c \phi \omega \text{Sen}(\omega t - 240^\circ)$$

Esto indica que un conjunto de bobinas trifásico puede generar un campo magnético giratorio uniforme en el estator de una máquina, y un campo magnético giratorio puede generar un conjunto de voltajes trifásicos en ese estator.

El voltaje pico en cualquier fase del estator trifásico es:

$$E_{max} = N_c \phi \omega$$

Debido que $\omega = 2\pi f$ esta ecuación se puede escribir de la siguiente manera:

$$E_{max} = 2\pi N_c \phi f$$

Por esto el voltaje rms en cualquier fase de un estator trifásico es:

$$E_A = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_c \phi f$$

$$E_A = \sqrt{2} N_c \phi f$$

El voltaje en las terminales depende de la conexión que tenga el estator, es decir, si es en estrella o delta.

Si es Y entonces: el voltaje en las terminales será $\sqrt{3}E_A$

Si es en Δ entonces: el voltaje en las terminales será igual a E_A

3.1.4.- Par inducido en una máquina de C.A.

Bajo condiciones normales de operación, en las máquinas de C.A. hay dos campos magnéticos debidos a:

- El circuito del rotor
- El circuito del estator.

La interacción entre estos dos produce un par en la máquina. El rotor produce una densidad de flujo magnético B_R y la corriente del estator produce una densidad de flujo magnético B_s . El par inducido en una máquina que contiene estos dos campos magnéticos está dado por la ecuación:

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_s \quad (3.1)$$

$$\tau_{ind} = k B_R B_s \text{ Sen } \gamma \quad (3.2)$$

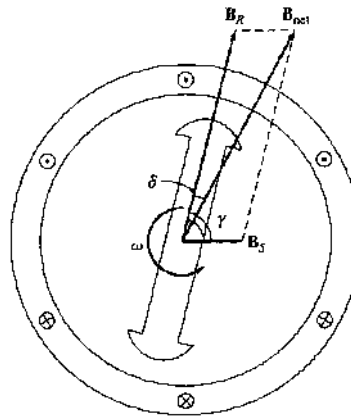


Figura 3.4 Flujos magnéticos neto de la máquina.

La ecuación 3.1 solamente será usada para estudios cualitativos del par en máquinas C.A, el valor de k no es importante para nuestros propósitos. El flujo magnético neto en esta máquina es la suma vectorial del campo del rotor y el estator, tal como se muestra en la figura 3.4.

$$B_{net} = B_R + B_s$$

Podemos entonces deducir otra expresión que será más útil en el estudio del par inducido en una máquina C.A.

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_s$$

$$\tau_{ind} = k B_R \times (B_{net} - B_s)$$

$$\tau_{ind} = k(B_R \times B_{net}) - k(B_s \times B_s)$$

Finalmente:

$$\tau_{ind} = k(B_R \times B_{net}) = k B_R B_{net} \text{ Sen } \delta$$

Estas últimas ecuaciones ayudarán a desarrollar un entendimiento cualitativo del par en máquinas de C.A.

3.1.5 Pérdidas en máquinas de C.A.

Existen 4 tipos de pérdidas:

- Pérdidas eléctricas o pérdidas en el cobre (pérdidas $I^2 R$)
- Pérdidas en el núcleo
- Pérdidas mecánicas
- Pérdidas dispersas o adicionales.

a) Pérdidas eléctricas ($I^2 R$)

Son pérdidas por el calentamiento resistivo que se presentan en los devanados del estator (inducido) y del rotor (campo) de la máquina. Estas pérdidas están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$P_{PCE} = 3I_A^2 R_A$$

$$P_{PCR} = I_F^2 R_F$$

b) Pérdidas en el núcleo:

Las pérdidas en el núcleo son causadas por histéresis y corrientes parasitas que se presentan en el metal del motor. Estas pérdidas varían conforme al cuadro de la densidad de flujo B^2 y en el estator, conforme a la 1.5 av de la potencia de la velocidad de rotación de los campos magnéticos $n^{1.5}$.

c) Pérdidas mecánicas:

Son las pérdidas asociadas con los efectos mecánicos. Existen dos tipos y se deben a la forma en que estas son causadas las cuales son:

Por fricción: causados por la fricción de los cojinetes de las máquinas.

Por rozamiento con el aire: son causadas por la fricción entre partes móviles de la máquina y el aire dentro de la caja del motor. Estas pérdidas varían conforme al cubo de la velocidad de rotación de la máquina. Las pérdidas mecánicas junto con las pérdidas en el núcleo son muchas veces llamadas “pérdidas rotacionales” sin carga de la máquina.

A medida que la potencia de entrada de una máquina al estator al vacío representa el valor aproximado de estas pérdidas.

d) Pérdidas dispersas:

Son pérdidas que no se pueden ubicar en ninguna de las categorías mencionadas anteriormente. Aun que se tenga una precisión muy extrema siempre se escapan algunas pérdidas; convencionalmente, en la mayoría de las máquinas, las pérdidas dispersas se toman como 1% de la plena carga.

e) Regulación de voltaje y regulación de velocidad:

Con frecuencia los generadores se comparan entre sí utilizando una cifra o factor de merito llamado *regulación de voltaje (VR)*. Es la medida de la capacidad de un generador para mantener un voltaje constante en sus terminales cuando la carga varía se define por la ecuación:

$$VR = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100\%$$

Donde:

V_{nl} Es el voltaje de vacío (sin carga) en las terminales del generador.

V_{fl} Es el voltaje a plena carga en las terminales del generador.

Esta es una medida aproximada de la forma característica voltaje-corriente del generador; una regulación de voltaje positiva significa una característica descendente, una regulación negativa significa una característica creciente. Una VR pequeña es “mejor” puesto que el voltaje en las terminales del generador es más constante ante las variaciones de la carga.

De igual manera, los motores se comparan entre sí con el nombre de “*regulación de velocidad*” (SR). La regulación de velocidad es la medida de la capacidad de un motor para mantener constante la velocidad del eje cuando varía la carga. Se define por la ecuación:

$$SR = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\%$$

Ó

$$SR = \frac{\omega_{nl} - \omega_{fl}}{\omega_{fl}} \times 100\%$$

Una regulación de velocidad positiva significa que la velocidad del motor baja cuando se incrementa la carga, y una regulación de velocidad negativa significa que la velocidad del motor aumenta cuando se incrementa la carga. La magnitud de la regulación de velocidad dice aproximadamente que tan alta es la pendiente de la curva par-velocidad.

En la figura 3.5 se ilustra el diagrama de flujo de potencia de un generador síncrono.

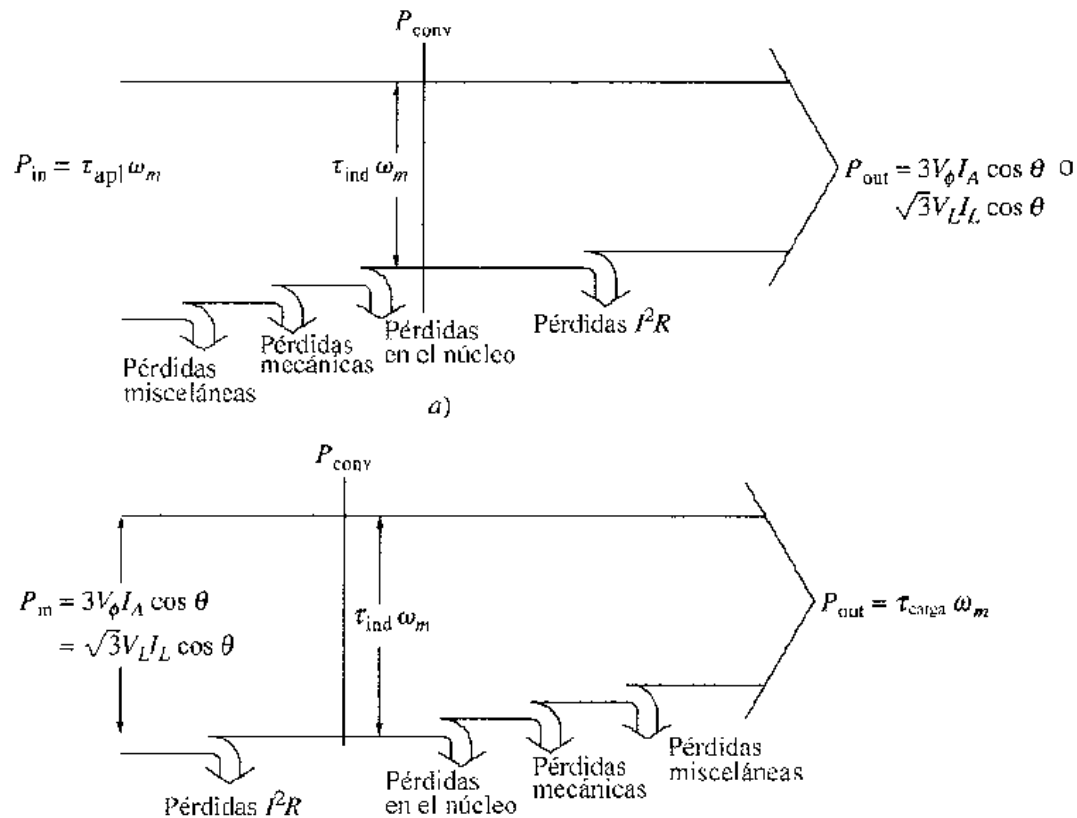


Figura 3.5 Diagrama de flujo de potencia en un generador trifásico.

3.1.6 Resumiendo

Un sistema trifásico de corrientes suministrado a un sistema de tres bobinas espaciadas 120° eléctricos en un estator produce un campo magnético giratorio uniforme dentro del estator. La *dirección de rotación* del campo magnético se puede *invertir* conmutando simplemente las conexiones de dos de las tres fases. Por el contrario, un campo magnético rotacional producirá un conjunto trifásico de voltajes dentro de tal grupo de bobinas.

En los estatores de más de 2 polos, una rotación mecánica completa del campo magnético produce más de un ciclo eléctrico completo. Para tal estator, una rotación mecánica produce $P/2$ ciclos eléctricos. En consecuencia, el ángulo eléctrico de voltajes y corrientes en esta máquina está relacionado con el ángulo mecánico de los campos magnéticos por:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m$$

La relacion entre la frecuencia eléctrica del estator y la tasa mecánica de giro del campo magnético es:

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

Los tipos de pérdidas que ocurren en las máquinas de C.A. son pérdidas eléctricas o pérdidas en el cobre (IR^2), pérdidas en el núcleo, pérdidas mecánicas y dispersas. Finalmente, la regulación de voltaje para los generadores se define como:

$$VR = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100\%$$

y la regulación de velocidad para los motores se definió como:

$$SR = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\%$$

3.2 Labview

LabView es un lenguaje de programación de alto nivel de tipo gráfico y enfocado al uso en instrumentación. Es un entorno de desarrollo gráfico con funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de medida y presentaciones de datos. Cuenta con todas las estructuras y puede ser usado para elaborar cualquier algoritmo que se desee en cualquier aplicación, cada programa que se realiza en *LabView* es llamado Instrumento Virtual (VI). Usted puede diseñar especificando su sistema funcional, su diagrama de bloques o una notación de diseño de ingeniería.

LabView es a la vez compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otra área de aplicación, como por ejemplo *Matlab*. Tiene la ventaja de que permite una fácil integración con *hardware* específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos.

LabView es una herramienta gráfica para pruebas de control y diseño mediante la programación. El lenguaje que usa se llama lenguaje G. Este programa fue creado por *National Instruments* (1976) para funcionar sobre máquinas *MAC*, salió al mercado por primera vez en 1986. Ahora está disponible para las plataformas *Windows*, *UNIX*, *MAC* y *Linux*.

Los programas desarrollados con *LabView* se llaman Instrumentos Virtuales o *Vis*, lo que da una idea de su uso en origen: el control de instrumentos. El lema de *LabView* es: "La potencia está en el Software".

Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo (no sólo en ámbitos de pruebas, Control y Diseño) y el permitir la entrada a la informática a programadores no expertos. Esto no significa que la empresa haga únicamente *software* sino que busca combinar este *software* con todo tipo de *hardware*, tanto propio -tarjetas de adquisición de datos, *PAC*, Visión, y otro *Hardware*- como de terceras empresas.

3.2.1 Características de *LabView*

Su principal característica es la facilidad de uso, programadores profesionales como inexpertos en programación pueden hacer (programas llamados VI) relativamente complejos..

Para los amantes de lo complejo con *LabView* pueden crearse programas de miles de VIs (equivalente a millones de páginas de código texto) para aplicaciones complejas, programas de automatizaciones de decenas de miles de puntos de entradas/salidas, etc. Incluso existen buenas prácticas de programación para optimizar el rendimiento y la calidad de la programación.

Labview tiene su mayor aplicación en sistemas de medición como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, un ejemplo de esto pueden ser sistemas de monitoreo en transportación, Laboratorios para clases en universidades, procesos de control. *LabView* es muy utilizado en procesamiento digital de señales (*wavelets*, *FFT*, *Total Distorsion Harmonic THD*), procesamiento en tiempo real de aplicaciones biomédicas, manipulación de imágenes y audio, automatización, diseño de filtros digitales, generación de señales, entre otras, etc. Ingenieros, científicos y técnicos de todo el mundo utilizan *LabView* para desarrollar soluciones que respondan a sus exigentes aplicaciones. *LabView* es un revolucionario entorno gráfico de desarrollo para adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de medidas y presentación de datos. *LabView* le da la flexibilidad de un potente lenguaje de programación sin la complejidad típicamente asociada a estos lenguajes.

A continuación se muestra la los conceptos básicos del entrono *LabView* versión (versión 2010):

3.2.2 Instrumentos virtuales VI

Un programa creado en *LabView* es llamado como Instrumento Virtual y consta de tres partes a considerar:

- El Panel frontal, donde estarán ubicados todos los indicadores y controles que el usuario podrá ver cuando el programa este en funcionamiento. Por ejemplo botones, perillas, gráficas, este panel se muestra en la figura 3.6.

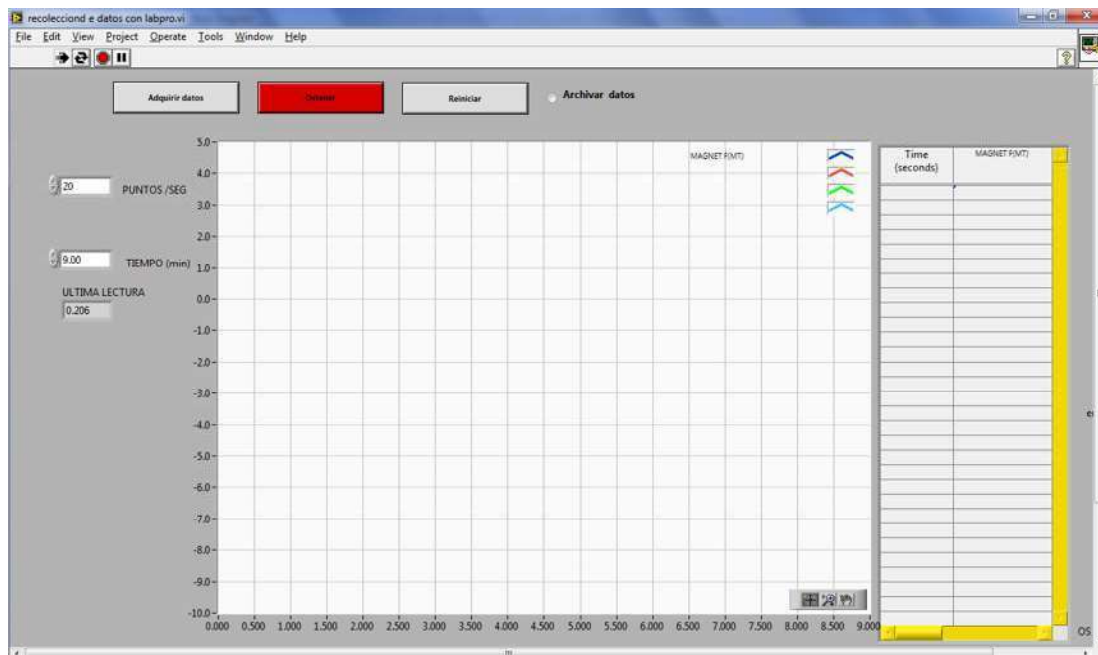


Figura 3.6 Panel frontal con tipos de indicadores.

El diagrama de bloques muestra el programa en código gráfico G, el cual es el objetivo de aprendizaje en un nivel básico, en este trabajo se usan diagramas, estructuras de programación y flujo de datos entre las diferentes entradas y salidas a través de líneas. Las subrutinas son mostradas como iconos de cajas negras, con unas entradas y unas salidas determinadas, donde en el interior se cumplen una función específica. Todos los indicadores y controles ubicados en el panel frontal están respaldados por un terminal de conexión en el diagrama de bloques tal como si se tuviera un tablero de control de una máquina o un avión, donde por el frente se ven los indicadores y por el lado posterior se aprecian todos los cables y terminales de conexión. En la figura 3.7 se ilustra los diagramas de bloques.

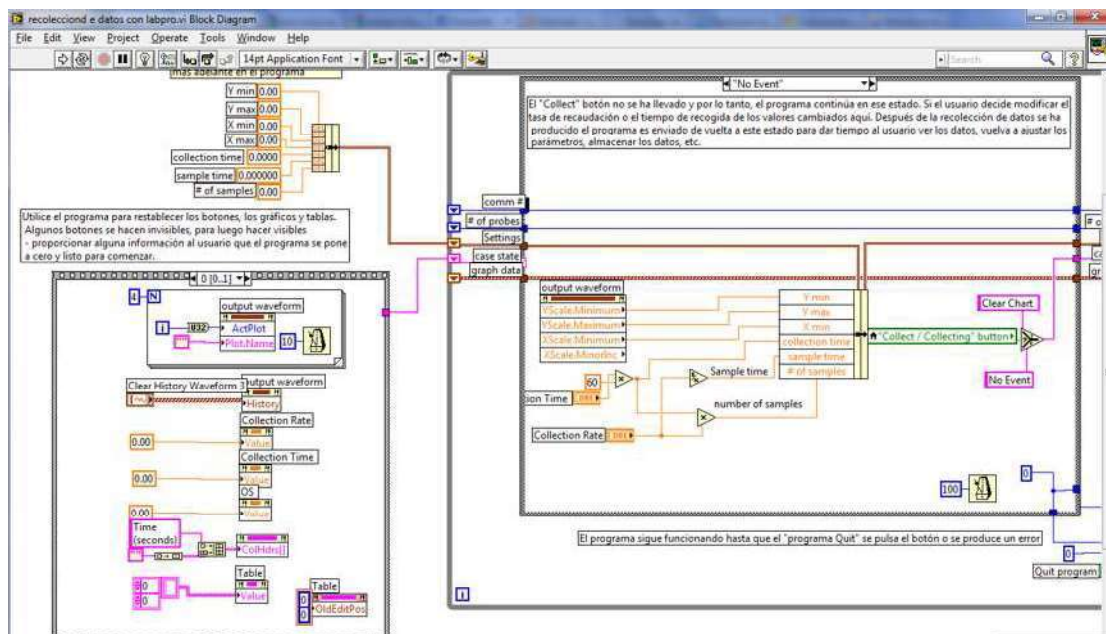


Figura 3.7 Diagrama de bloques de código gráfico G

Los cables son las conexiones entre los diferentes terminales y nodos del diagrama de bloques. Cada cable contiene un único dato que puede ser leído por diferentes nodos o VIs. El aspecto del cable (grosor, color, etc.) indica el tipo de dato que está presente en el mismo. Cuando un cable se presenta como trazo discontinuo, por ejemplo, esto indica que se ha producido algún error en el diseño del diagrama de bloques (conexiones erróneas, etc.).

3.2.3 Elementos en el diagrama de bloques

En el diagrama de bloques (Figura 3.7) se ve el flujo del programa que se compone de cinco tipos de elementos.

- Las terminales de conexión de los indicadores y de los controles del panel frontal. Se nota que las líneas del dibujo de la conexión de los controles son más gruesas que la de los indicadores, para diferenciarlos.
- Las constantes.
- Las funciones y cajas negras, donde se procesan las señales.
- Las estructuras de programación.
- Los cables que conducen las diferentes señales los cuales varían, según la señal que conducen.

Para realizar el diagrama de bloques se buscan las estructuras necesarias en el menú de funciones, estructuras y constantes, donde se encuentra el ciclo Mientras (*While*). Posteriormente, se ubican las funciones necesarias en el menú de funciones como en este caso el sumador y el negador en el submenú *arithmetic*, y el cuadro de diálogo en el submenú *Time & Dialog*.

Los terminales aparecen automáticamente en el diagrama de bloques al armar el panel frontal. Por último, se hacen las conexiones con ayuda de la herramienta de alambrado.

El ícono de conexión utiliza el programa creado como subrutina en otro programa donde el ícono será la caja negra, las entradas son las conexiones a los controles del programa subrutina y las salidas son las conexiones a los indicadores del mismo subprograma.

Al seleccionar el ícono este se conecta a los indicadores y controles en la forma deseada para que se distribuyan las entradas y salidas en la caja negra, tal como sucede en un circuito integrado. La idea es crear un sistema de programación modular donde cada rutina abra otras rutinas y estas a su vez otras de menor nivel dentro de una cadena jerárquica con cualquier límite deseado.

Así cuando se use un módulo no se requiere saber cómo funciona interiormente, simplemente basta con conocer sus entradas y salidas para ser así usado.

Para saber el uso de los sub-vis, la ventana de "*help*" ofrece la información pertinente a las entradas y salidas. Esta ventana se puede obtener presionando Ctrl-h o por medio del menú "*Windows*", la cual se muestra en la siguiente figura 3.8.

Actualmente existe una asociación de usuarios de *LabView* donde los miembros están creando cajas negras de diferentes funciones, las cuales pueden ser usadas para utilidades propias.

Los ficheros generados con *LabView* se llaman Instrumentos Virtuales (*Vis*), llamados así porque en su apariencia y comportamiento son similares a instrumentos físicos tales como multímetros y osciloscopios. Los *Vis* utilizan funciones que manipulan las entradas del usuario o datos provenientes de otras fuentes y muestran la información procesada o la pasan a ficheros u otros ordenadores.

Cada VI se compone de las siguientes partes:

- Panel frontal (*front panel*) o interface con el usuario.
- Diagrama de bloques (*block diagram*) o código fuente que define el comportamiento del VI.
- Icono y conector (*icon and connector*). Identifica al propio VI puesto que se pueden utilizar VIs en otros VIs. A un VI llamado por otro se le denomina subVI y esto es el equivalente a las subrutinas en la programación basada en texto.

El panel frontal es el interfaz de usuario con el VI en el que tendremos controles de entrada, visualizadores de salida, cuadros de diálogo, etc. Se construye mediante controles e indicadores los cuales corresponden a las entradas y salidas del VI respectivamente.

Los controles están constituidos por diales, conmutadores, potenciómetros deslizantes y otros dispositivos de entrada, que suministran los datos de entrada al VI. Los indicadores son gráficos, leds y otros tipos de *displays* que simulan los dispositivos de salida y visualizan los datos adquiridos o generados por el VI.

3.2.4 Creación de programas

Al desarrollar una aplicación o una subrutina, primero se debe tener un claro conocimiento de qué valores se van a utilizar y cuáles van a ser las entradas y las salidas.

Por ejemplo, si simplemente se desea realizar un programa que tome dos números y que entregue como resultado la suma de estos hasta que se pulse un botón de stop y al final diga que terminó, se sabe que debe haber un instrumento de control para la entrada de cada valor y un indicador que muestre el resultado.

Cuando se crean controles e indicadores se puede hacer que estos cambien su configuración durante el curso del programa para efectos de visualización, también se puede obtener datos del estado de los controles. Por ejemplo, que al oprimir un botón aparezca un panel adicional de controles sin necesidad de llamar una subrutina, o que con un botón se tenga el *zoom* de una gráfica.

Los atributos de nodos pueden controlar muchos factores en los controles. Para cambiar entre los posibles factores a variar o leer en el nodo y hacerlo por medio del *pop-up* del menú del nodo a través de la opción *Select Item*. A través de estos nodos es posible leer la posición de un cursor dentro del graficador, y mucho más.

Para tener una mejor idea de los Nodos de Atributos, mirar los ejemplos en el directorio de ejemplos, General, atributos de *LabView*.

3.2.5 Paleta de funciones

La paleta de funciones presenta todos los elementos y herramientas para la elaboración de nuestros VI. Esta nos presenta dividida por bloques todas las funciones como las conocemos en muchos lenguajes de programación.

Esta paleta se presenta tanto en el panel frontal como en el diagrama de bloques con sus funciones correspondientes como se muestra en las figuras 3.10, 3.11, 3.12.

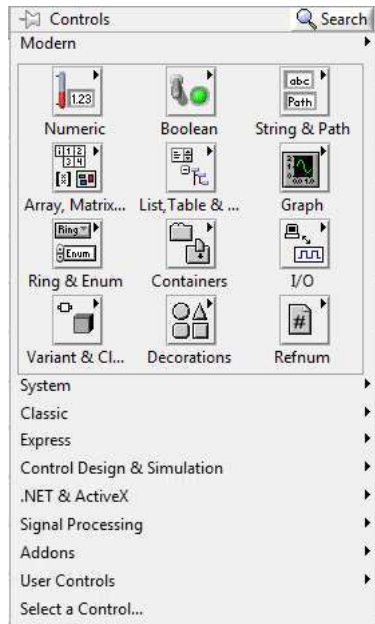


Figura 3.10 Paleta de controles del Panel frontal

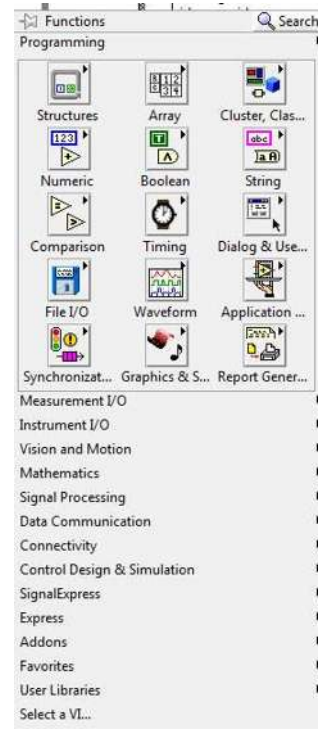


Figura 3.11 Paleta de Funciones del diagrama de bloques

Es importante mencionar que algunos de los bloques son VI exclusivos de la paleta de herramientas y funciones de la misma tarjeta de adquisición de datos (Labpro) la cual mostramos a continuación:

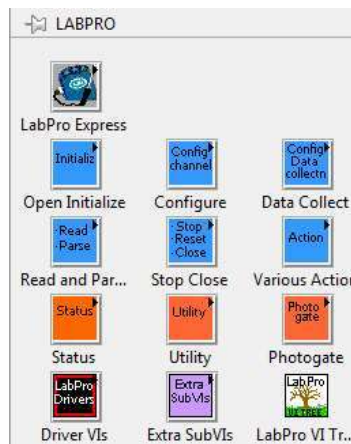


Figura 3.12 Paleta de LabPro.

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTACION VIRTUAL PROPUESTO

4.1 Programa para monitoreo de campo magnético

En este capítulo se describe el diagrama de bloques elaborado para la obtención de datos del sensor de campo magnético. Inicialmente se establecen los parámetros iniciales en cero para asegurar que se inicie correctamente.

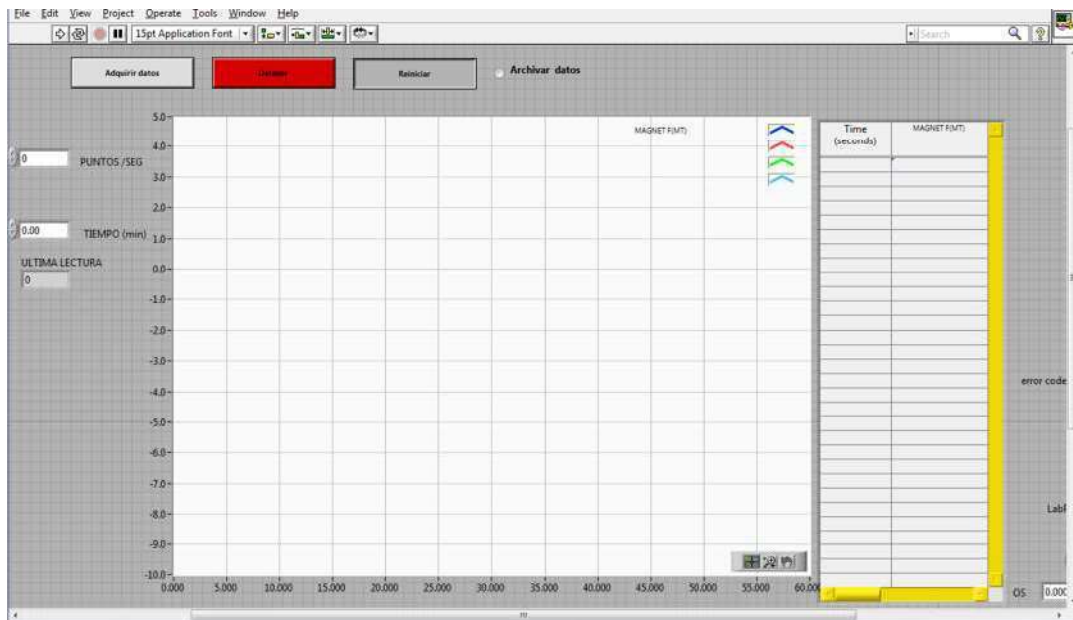


Figura 4.1 Panel frontal del programa para el monitoreo de campo magnético.

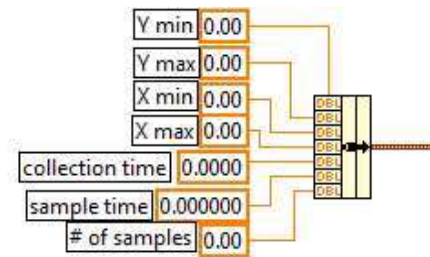


Figura 4.2 Inicio de variables.

Se reúnen un conjunto de valores inicializados en cero para garantizar los parámetros de la gráfica y la toma de datos de entrada.

A continuación se muestra una estructura de secuencia apilada esta se usa para ahorrar espacio en el diagrama de bloques.

Estructura de secuencia.

La estructura de secuencia de apilado no inicia la ejecución hasta que todos los datos que entran a la estructura lleguen. Los datos por cable desde cada diagrama pasan sólo cuando todos los cuadros están completos.

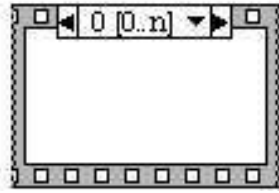


Figura 4.3 Estructura de secuencia.

Estas estructuras nos sirven para restablecer los botones, las graficas y las tablas presentadas en el panel frontal. Algunos botones se hacen invisibles para después hacerse visibles además de proporcionarle al usuario que el programa está listo para comenzar.

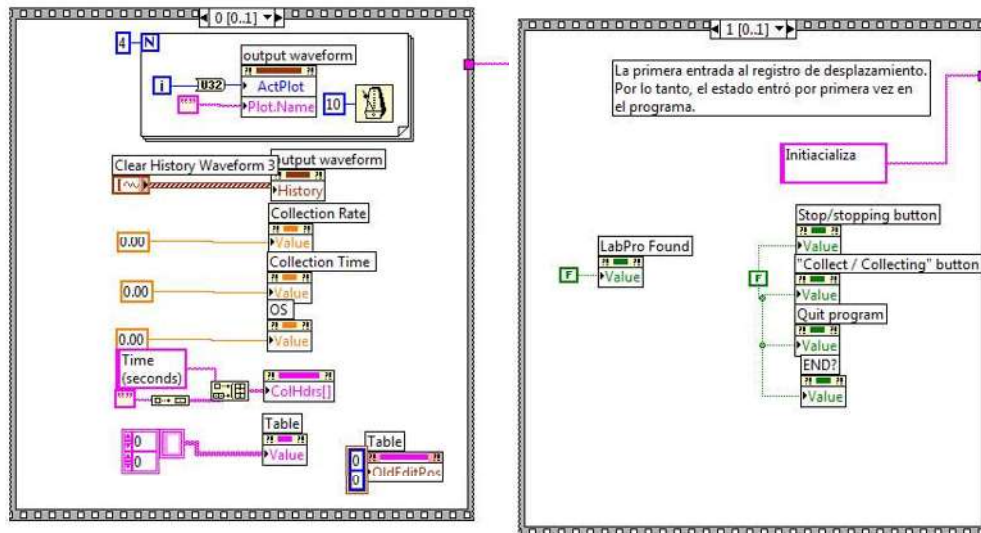


Figura 4.4 Estructuras de secuencia apiladas para inicializar las variables del programa.

Enseguida mostramos la estructura principal del programa en el cual se encuentran subdiagramas que se ejecutan dentro del ciclo. Repite el subdiagrama interior hasta que la terminal dependiente (terminal de entrada), recibe un valor booleano en particular. El valor booleano depende del comportamiento de la continuación del bucle while.



Figura 4.5 Ciclo while loop.

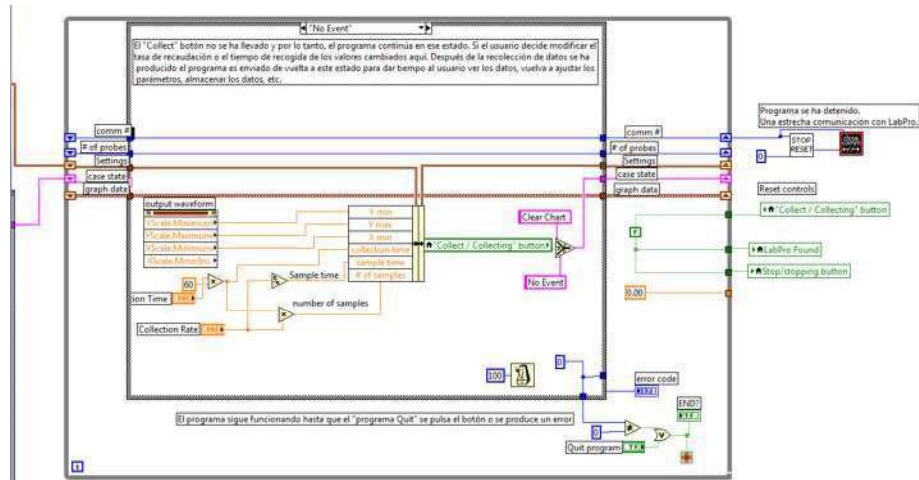


Figura 4.6 Ciclo de control para la el cuerpo general del programa de adquisición.

En la figura 4.6 se muestra de manera general el ciclo de trabajo con el cual tenemos el control de colección de datos el arranque, paro, ajustes de presentación por lo cual tenemos incluidos dentro del ciclo los siguientes subdiagramas que están dentro de otro tipo de estructura como se muestra a continuación. Tiene uno o más subdiagramas, uno de los cuales se ejecuta cuando la estructura es iniciada. El valor por el cable a la terminal de selección determina cual de los casos se ejecuta, la forma de selección puede ser booleano, cadena, un entero o tipo enumerado. Haciendo clic derecho en la frontera de la estructura podemos agregar o eliminar los diferentes casos.

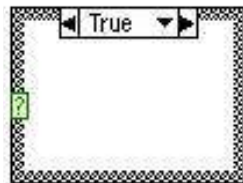


Figura 4.7 Bloque de elección falso o verdadero.

De manera que dentro de nuestra estructura tenemos diferentes casos:

- No hay eventos
- Configuración de recolección de datos en tiempo real
- Colección de datos en tiempo real
- Almacenamiento de datos
- Inicializar por defecto
- Ajustes de prueba
- Limpiar graficas
- Mostrar tablas de información

Mostraremos como están estructurados cada caso de manera que podamos comprender el funcionamiento de cada uno de ellos para la recolección de datos, primeramente tenemos:

No hay eventos:

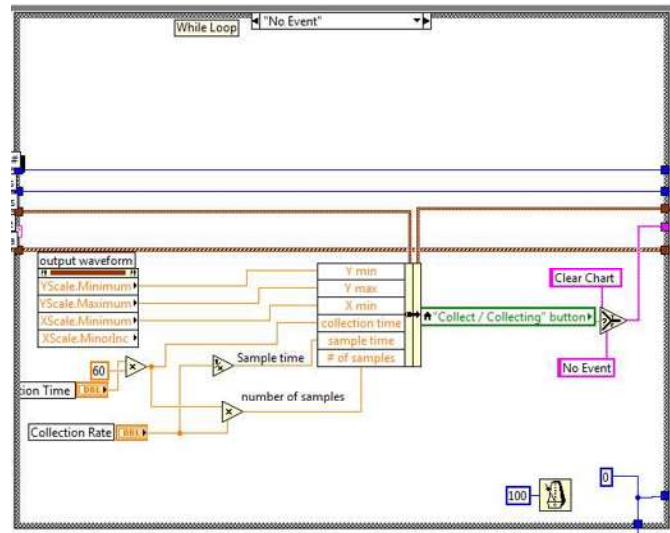


Figura 4.8 Caso para cuando el programa espera la introducción de datos.

El botón de adquirir datos no se ha ejecutado por lo tanto, el programa continúa en ese estado. Si el usuario decide modificar la tasa de recaudación o el tiempo de adquisición lo hace en este caso. Después de la recolección de datos, da un tiempo al usuario para verlos y vuelve a ajustar los parámetros de almacenamiento.

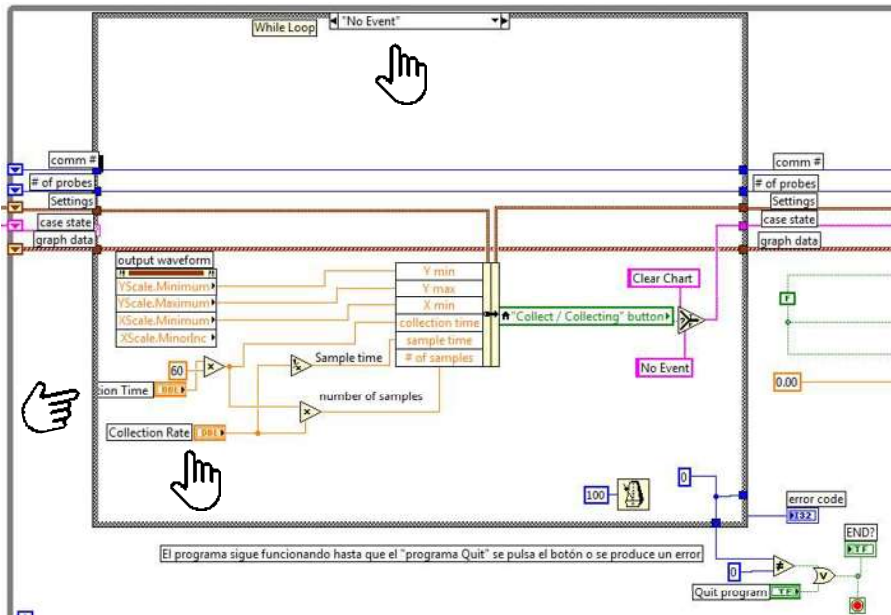
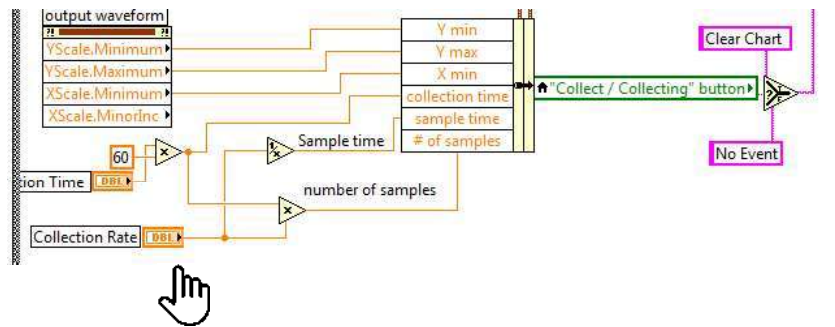
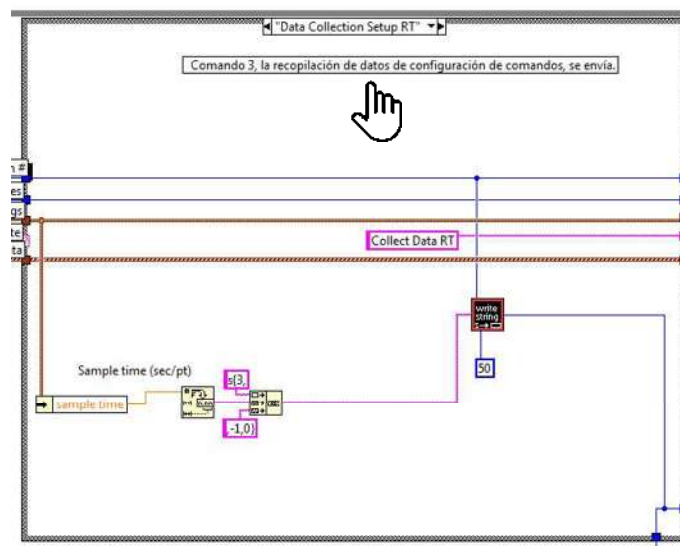


Figura 4.9 Caso para cuando no presenta ningún evento.



Collected



de da
etros

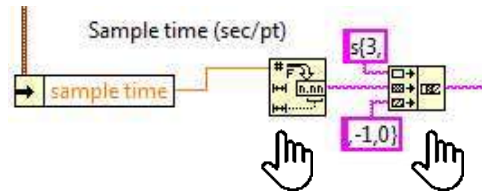


Figura 4.12 Parámetros de la función de tiempo real.

samptime - Tiempo entre muestras.

numpoints - Al establecer este valor a -1 pone LabPro a modo de tiempo real de recopilación de datos.

trigtype - Poniendo valor a 0 indica que el tipo de disparo es inmediato.

Los bloques señalados son convertidores de datos del diagrama el primero convierte el número a un F-formato (notación fraccionaria), de punto flotante, es una cadena de caracteres que se ajusta más corta o más larga si es necesario. El segundo bloque concatena cadenas de entrada y matrices de 1 dimensión con cadenas en una sola salida. Esta función concatena cada elemento de la matriz.

Una vez configurada la tarjeta para adquirir en tiempo real vamos a la parte interesante, como se realiza la adquisición, lo cual se muestra el diagrama de bloques siguiente:

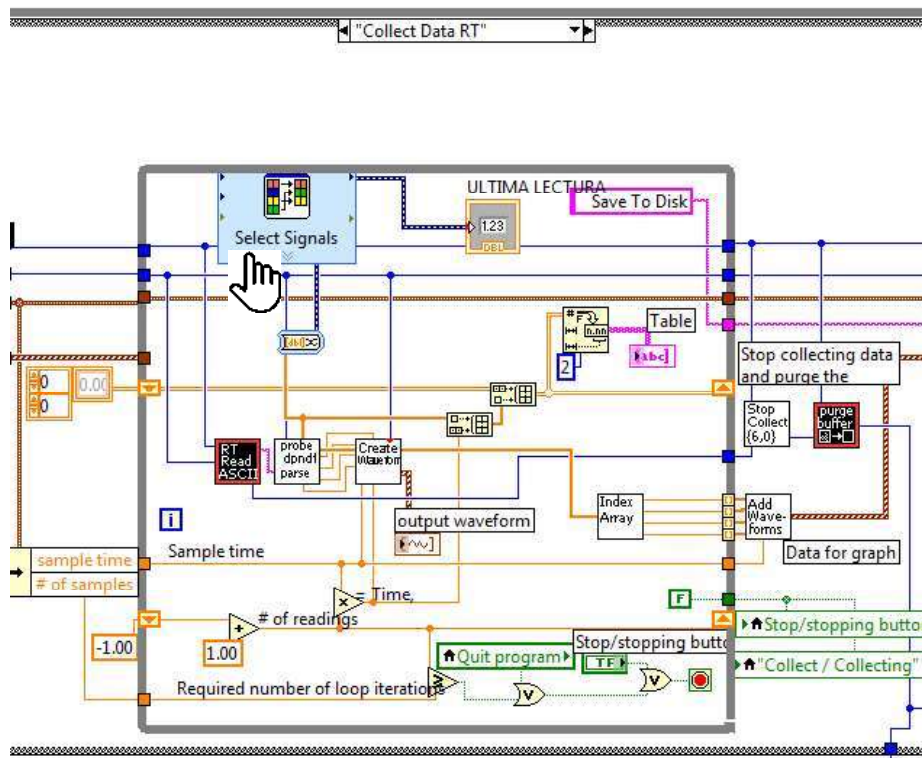


Figura 4.13 Diagrama de bloques para la recolección de datos en tiempo real.

Se recogen los datos (lectura) y es enviado al panel frontal hasta que el número requerido de muestras han sido recogidos, o el usuario ha interrumpido la colección. Una vez que el ciclo ha terminado de enviar los datos en el gráfico de datos el usuario puede guardar los datos en formatos de Excel o archivos de texto.

El bloque llamado Select Signals nos ayuda para poder seleccionar la señal la cual queremos utilizar para el control del sistema de sincronización de la maquina síncrona a CFE.

Unas de las partes interesantes de la adquisición de datos es poder guardar los datos obtenidos con el fin de poder hacer análisis del comportamiento del fenómeno por lo cual la figura 4.14 muestra el diagrama de bloques en el cual se realiza esa función.

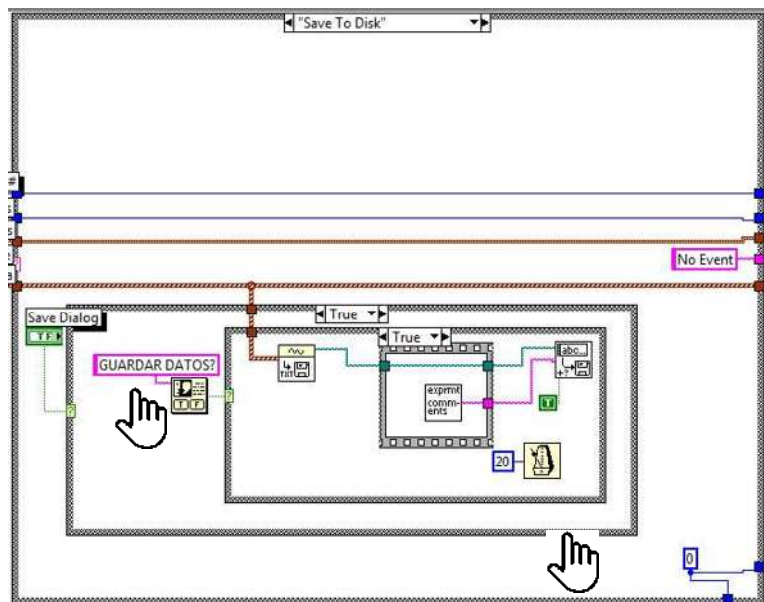


Figura 4.14 Diagrama de bloques para guardar los datos del experimento.

Como se puede observar tenemos dos estructuras anidadas por lo cual realiza la función cuando seleccionemos la opción de guardar datos en el panel frontal ejecutando el programa, por lo tanto nos despliega un aviso en pantalla, "¿GUARDAR DATOS?", el cual da la opción de donde y en que formato.

En el caso de que de que no queramos guardar, el programa vuelve a el estado de no evento hasta ser iniciado de nuevo o en adquirir datos nuevamente.

Como ya mencione anteriormente cuando termina la adquisición datos y el proceso de guardado término, si por alguna razón ocurre un error el programa cuenta con un caso dentro de la estructura el cual evalúa y reinicia automáticamente el programa, (también si tiene fallas de conexión con la tarjeta de adquisición), su diagrama de bloques se muestra en la figura 4.15.

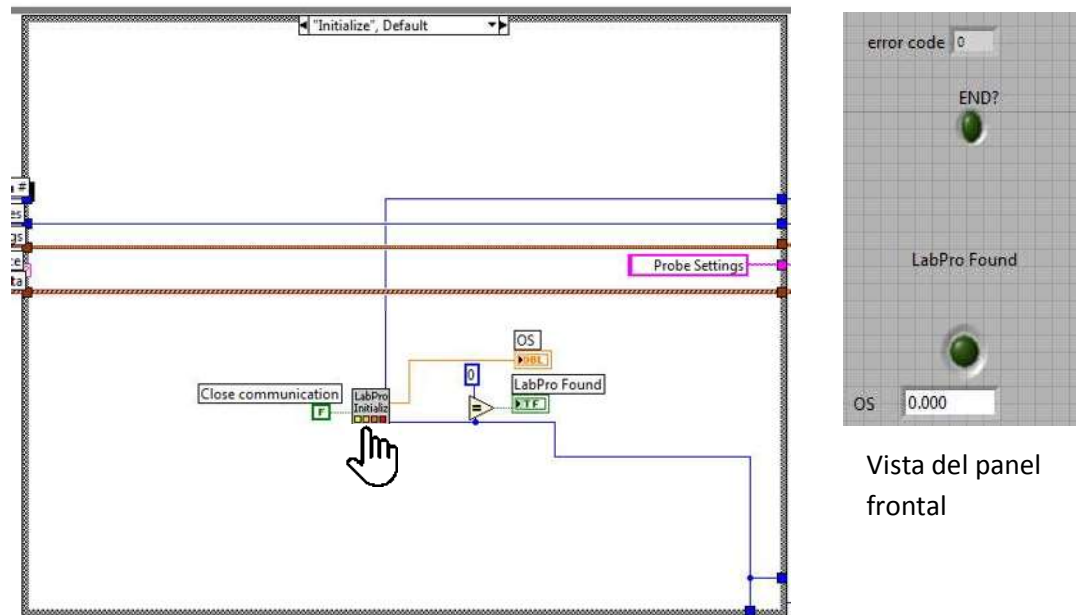


Figura 4.15 Diagrama de bloques de reinicio por errores y versión del driver de la tarjeta de adquisición de datos.

El diagrama de bloques de la figura 4.16 realiza los ajustes de prueba, el cual realiza las siguientes pruebas:

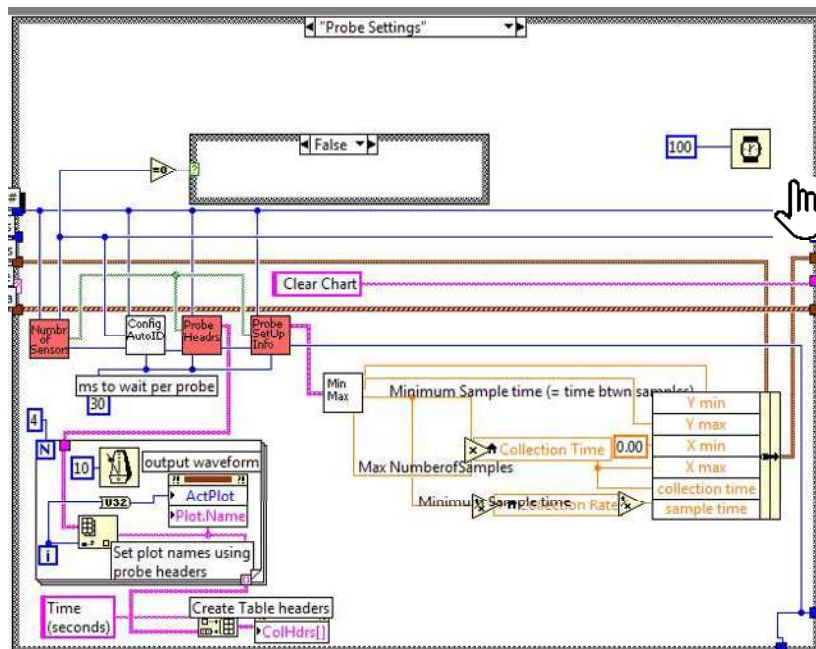


Figura 4.16 Ajustes de prueba para preparar el sensor.

Este contador espera el número en milisegundos y devuelve el valor del contador de tiempo. Hasta que pasa ese tiempo realiza las actividades es un tiempo de respuesta.

Pruebas:

- Determina el número de sensores conectados y configurarlos.
- Obtiene ID de Auto-títulos de la sonda (sensor), los coeficientes de la sonda y la configuración de la sonda.
- Configuración de la sonda incluyen:
 - sugiere "y"-min-max para su representación gráfica, el tiempo de muestra típica y el número típico de muestras a recoger.
- El tiempo y la tasa adquisición se calcula y estos valores se presentan al usuario en el panel frontal.
- Los valores máximo y mínimo de "ajustes de prueba" de las sondas se determinan.
- Estos valores se utilizarán para crear la escala del gráfico (el usuario puede modificar) y se utiliza para la recolección de datos.
- Limpiar gráficas
- Mostrar tablas de información.

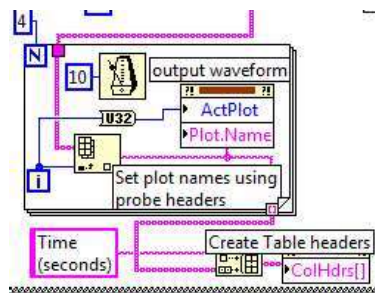


Figura 4.17 Diagrama de bloques para limpiar graficas y información de tablas.

Estas pruebas son predeterminadas por los drivers de la tarjeta como podemos ver en la figura 4.18.

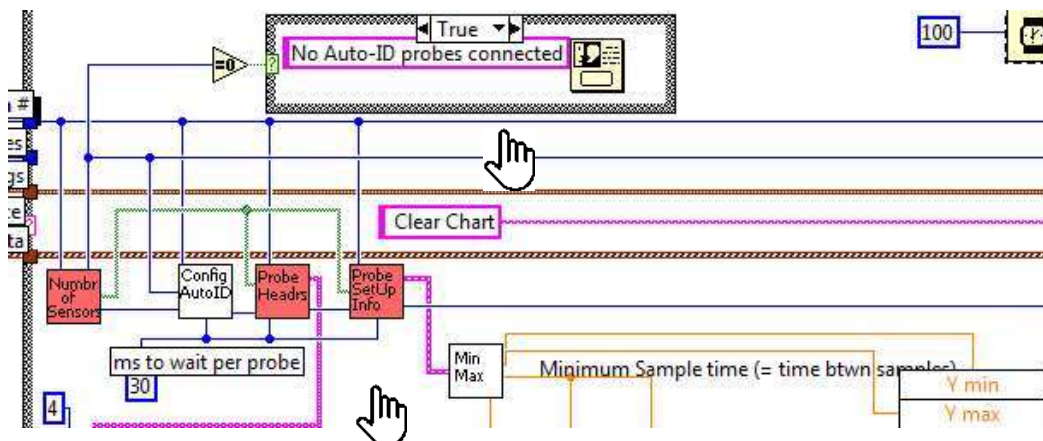


Figura 4.18 Drivers de LabPro para realizar pruebas de funcionamiento correcto.

Mostramos las figuras 4.19 y 4.20 los casos dentro de la estructura donde se realiza limpieza de graficas y de las tablas de información:

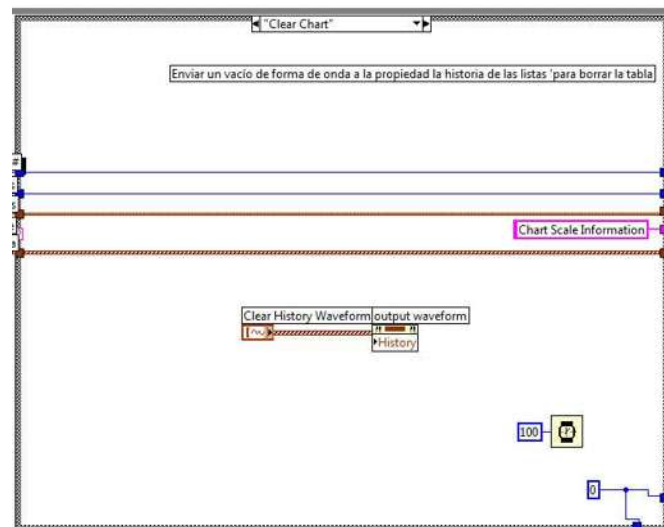


Figura 4.19 Borra los datos mostrados en la tabla para una nueva adquisición.

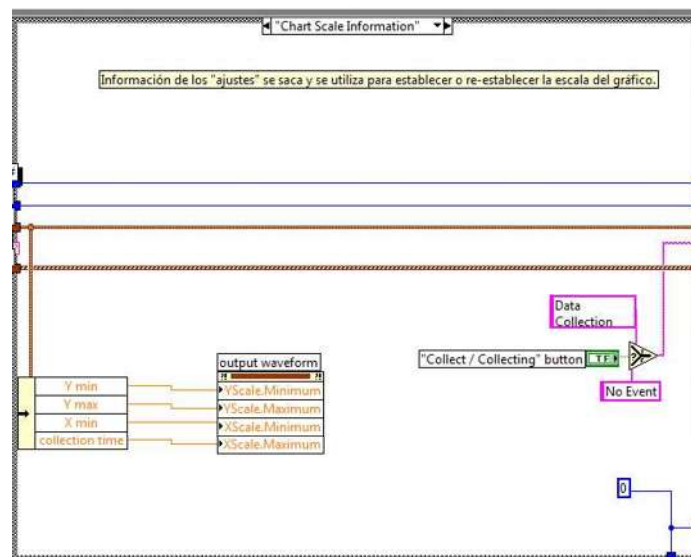


Figura 4.20 Presenta los ajustes y restablece la escala del grafico.

En conclusión nuestro programa está estructurado de tal forma que la adquisición de datos es en tiempo real presentada en una gráfica y al mismo tiempo en una tabla; de manera que tenemos un sistema de monitoreo del campo magnético.

La parte importante de esta tesis es llevar a cabo la sincronización a CFE por lo que necesitamos mostrar el diagrama de bloques del VI que utilicé para hacer este proceso.

A continuación se muestran los diagramas de bloques del proceso y del VI de LabVIEW para la sincronización del generador y monitoreo del campo magnético.

4.2 Programa de Sincronización del generador y monitoreo de campo magnético

En la figura 4.21 se muestra el diagrama, el cual realiza el proceso y condiciones para la sincronización de manera simulada, a continuación se describe cada una de las etapas.

- FUENTE.- Muestra una fuente donde simulamos las señales adquiridas.
 - Voltaje de la fuente
 - Voltaje del generador
 - Corriente de la fuente
 - Corriente del generador

- SELECCIÓN DE SEÑALES.- Nos sirve para elegir cada una de las señales que estamos adquiriendo ya que en la adquisición de datos tenemos todas las señales un solo canal de datos.

- INSTRUMENTACIÓN DE SEÑALES.- En esta etapa se muestra la instrumentación para la medición del voltaje, frecuencia y fases de las señales adquiridas así como su acondicionamiento.

- COMPARACIÓN GRAFICA DE SEÑALES.- La siguiente etapa es importante, además de la instrumentación de medición la perspectiva grafica es necesaria para comparar los parámetros de sincronización.

- CONDICIONANTES PARA LA SINCRONIZACIÓN.- En esta etapa del proceso acondicionamos los parámetros requeridos por CFE para sincronizar al bus de la compañía, ya antes mencionado en la metodología.

- INDICADORES DE CONDICIÓN.- Este bloque muestra lámparas que nos indican si cada una de las condiciones se cumple; necesario para poder sincronizar.

- CONDICIONES DE DISPARO PARA SINCRONIZAR.- En esta parte del proceso es donde se decide si estamos en condiciones de sincronizar el generador al bus infinito, dependiendo de los indicadores de condición.

- CIERRE DEL RELEVADOR.-Para poder entrar a esta etapa es necesario a ver cumplido todas las condiciones de sincronización, etapa de indicadores y las condiciones de disparo, por lo cual accionara el cierre de relevador.
- SINCRONIZACIÓN.-Se muestra una lámpara con la cual simulamos el disparo hacia el relevador para accionar el modulo de sincronización.
- MONITOREO DE CAMPO MAGNÉTICO Y VARIABLES DE SINCRONIZACIÓN.- En este parte del proceso al encontrarse en sincronización, es importante monitorear las condiciones de sincronización así como también el campo magnético el cual está continuamente monitoreado el cual actúa como un parámetro mas para asegurar el optimo funcionamiento de generador al presentar cargas no soportadas.
- COMPARACIÓN DE TIPO DE CARGA.-Se simula los parámetros del comportamiento del generador en condiciones de diferentes tipos de carga utilizando el sensor de campo magnético.
- APERTURA DEL RELEVADOR.- Finalmente se tendrá una etapa de desconexión del modulo de sincronización en caso de requerirse a razón del comportamiento del sensor de campo y sus condiciones de sincronización.

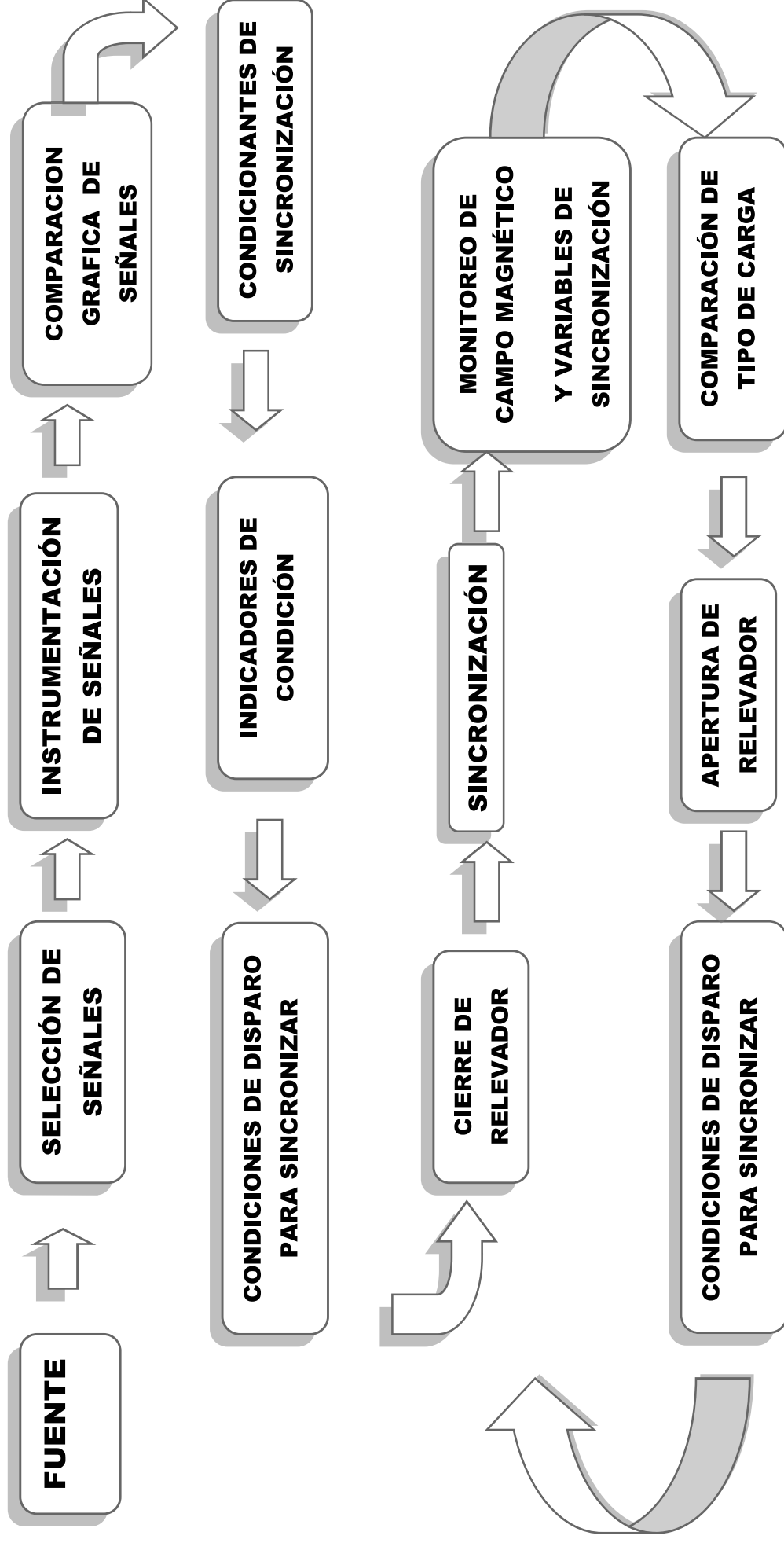


Figura 4.21 Diagrama del proceso de sincronización y monitoreo de campo magnético ante diferentes tipos de carga.

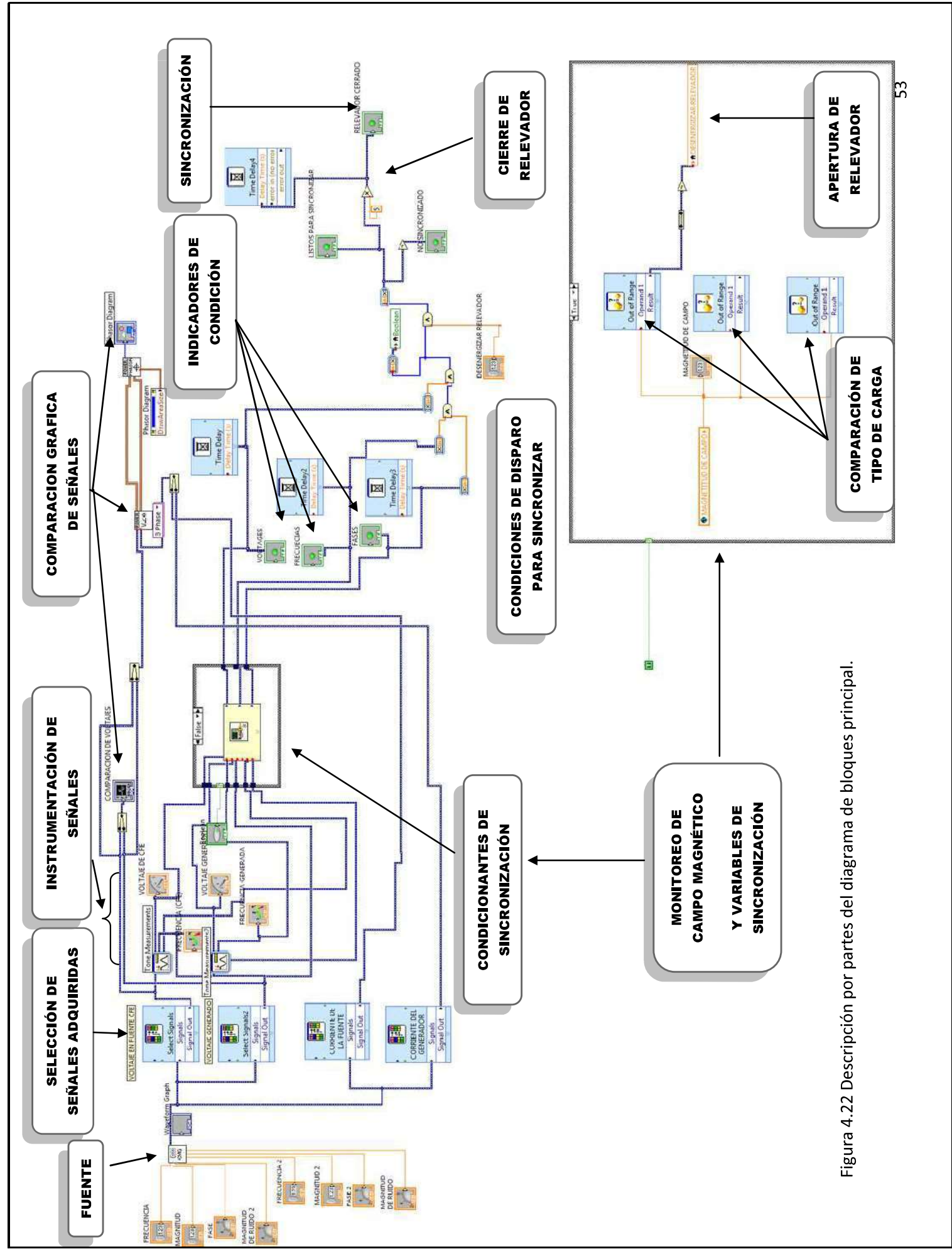


Figura 4.22 Descripción por partes del diagrama de bloques principal.

4.2.-Programa de Sincronización del generador y monitoreo de campo magnético.

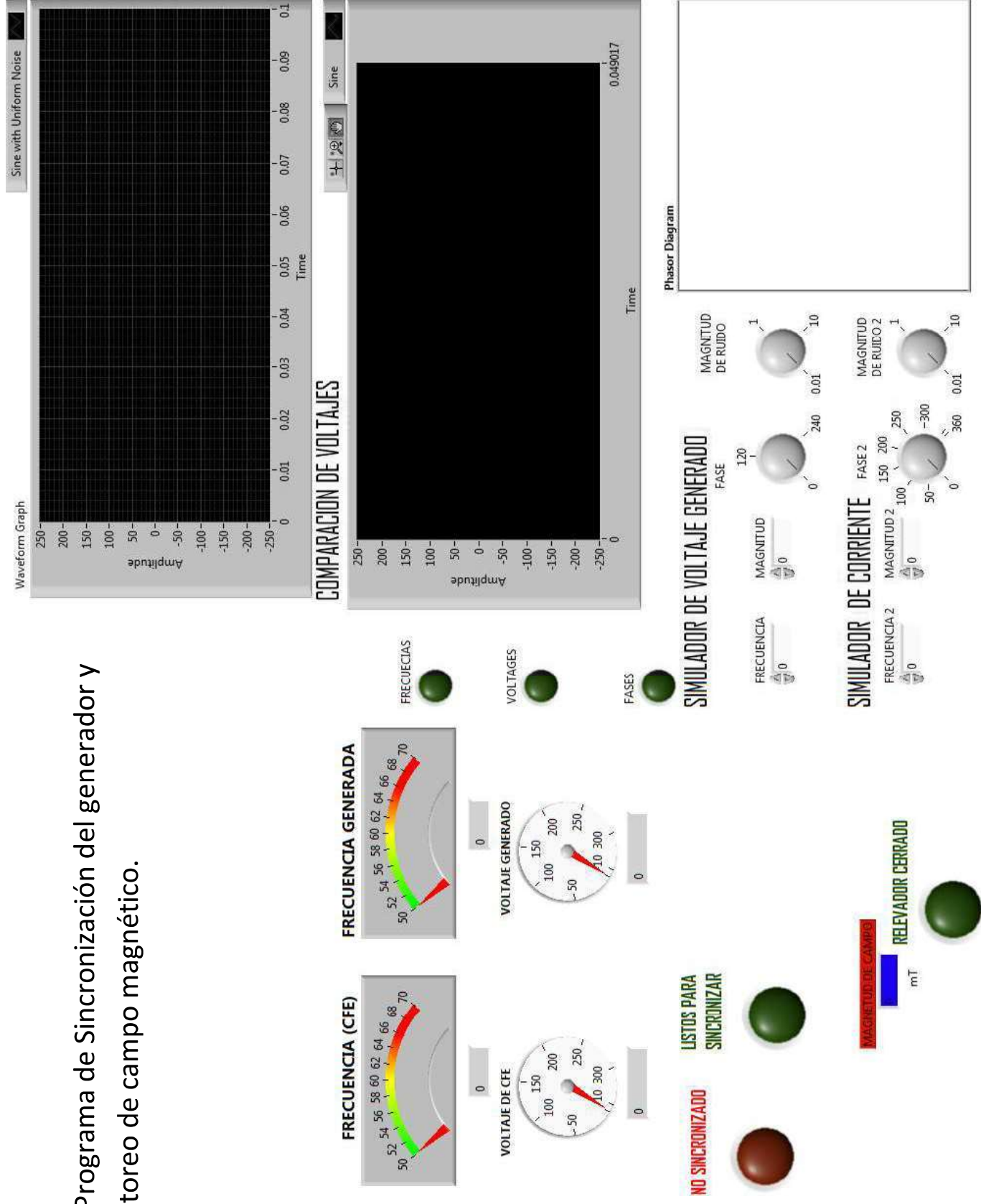


Figura 4.23 Panel frontal del programa de sincronización.

En la figura 4.24 se muestra el VI realizado para la simulación de las señales adquiridas.

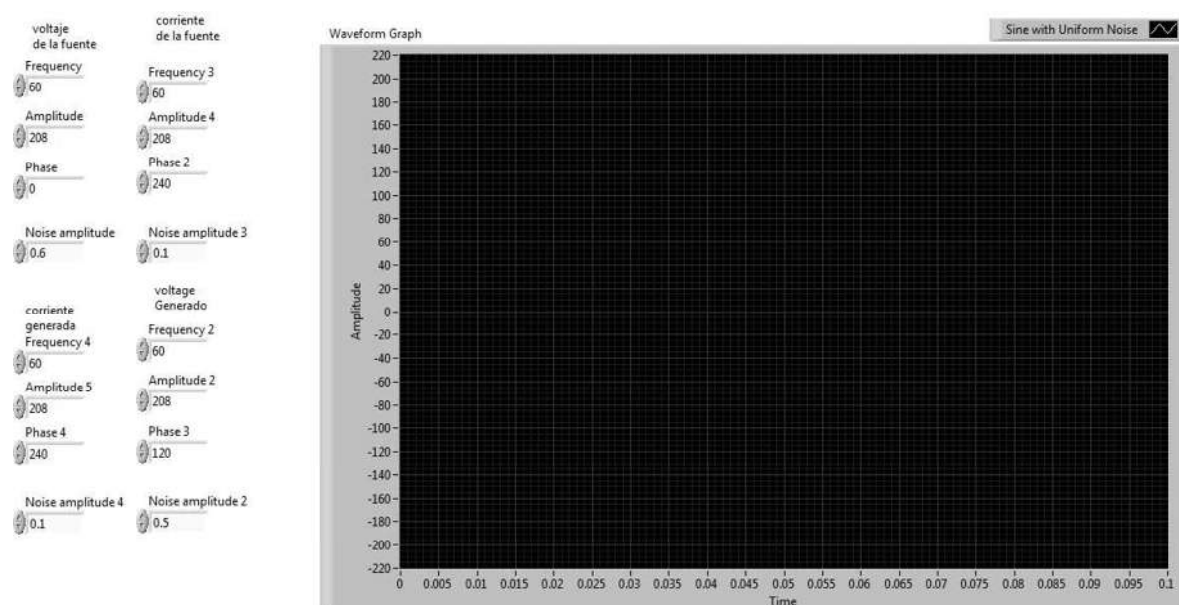


Figura 4.24 Programa para simular las señales adquiridas.

Es importante mencionar que LabVIEW solo cuenta con la herramienta de un generador de señal una sola por cada bloque, por lo cual resultaría tener 4 generadores con sus respectivos controles para la manipulación de la señal generada, por lo tanto es necesario construir un VI para reducir el diagrama de bloques principal. Esto facilita la visualización de las interconexiones de nuestro diagrama; se utilizó este como un SubVI el cual sólo tiene como entradas, los datos necesarios para controlar la señal de voltaje y corriente del generador y la salida de las señales generadas. Con el propósito de simular lo más real posible a la señal adquirida, mostraremos las características que nos ofrece el bloque generador.

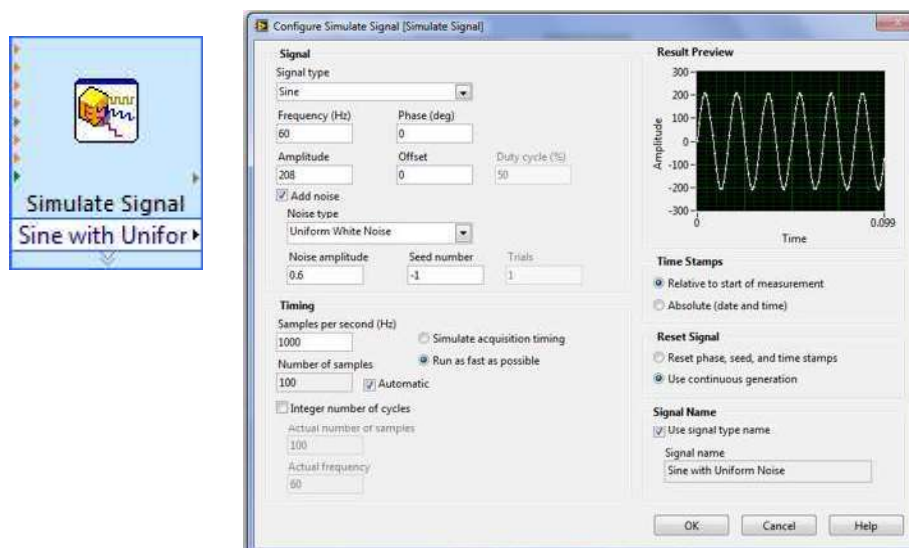


Figura 4.25 Generador de señal.

Podemos escoger que tipo de señal queremos simular en nuestro caso escogí una señal senoidal para cada una de las señales adquiridas simuladas las cuales tienen las siguientes características:

- Voltaje de la fuente:
 - Frecuencia de 60 Hz
 - Amplitud de 208 V
 - Fase de 0°
 - Con un nivel de ruido 0.6 cercano a cero.
- Corriente de la fuente:
 - Frecuencia de 60 Hz
 - Amplitud de 0.2 V
 - Fase de 280°
 - Con un nivel de ruido 0.1 cercano a cero.
- Voltaje del Generador:
 - Frecuencia de 60 Hz
 - Amplitud de 208 V
 - Fase de 0°
 - Con un nivel de ruido 0.6 cercano a cero.
- Corriente del Generador:
 - Frecuencia de 60 Hz
 - Amplitud de 0.2 V
 - Fase de 280°
 - Con un nivel de ruido 0.1 cercano a cero.

En la figura 4.26 muestro el diagrama de bloques creado para este subVI creado para nuestra simulación.

Los parámetros de la fuente sólo pueden ser modificados desde el VI creado. Los parámetros para el generador síncrono son modificados desde el diagrama principal de sincronización para una manipulación más eficiente de la simulación.

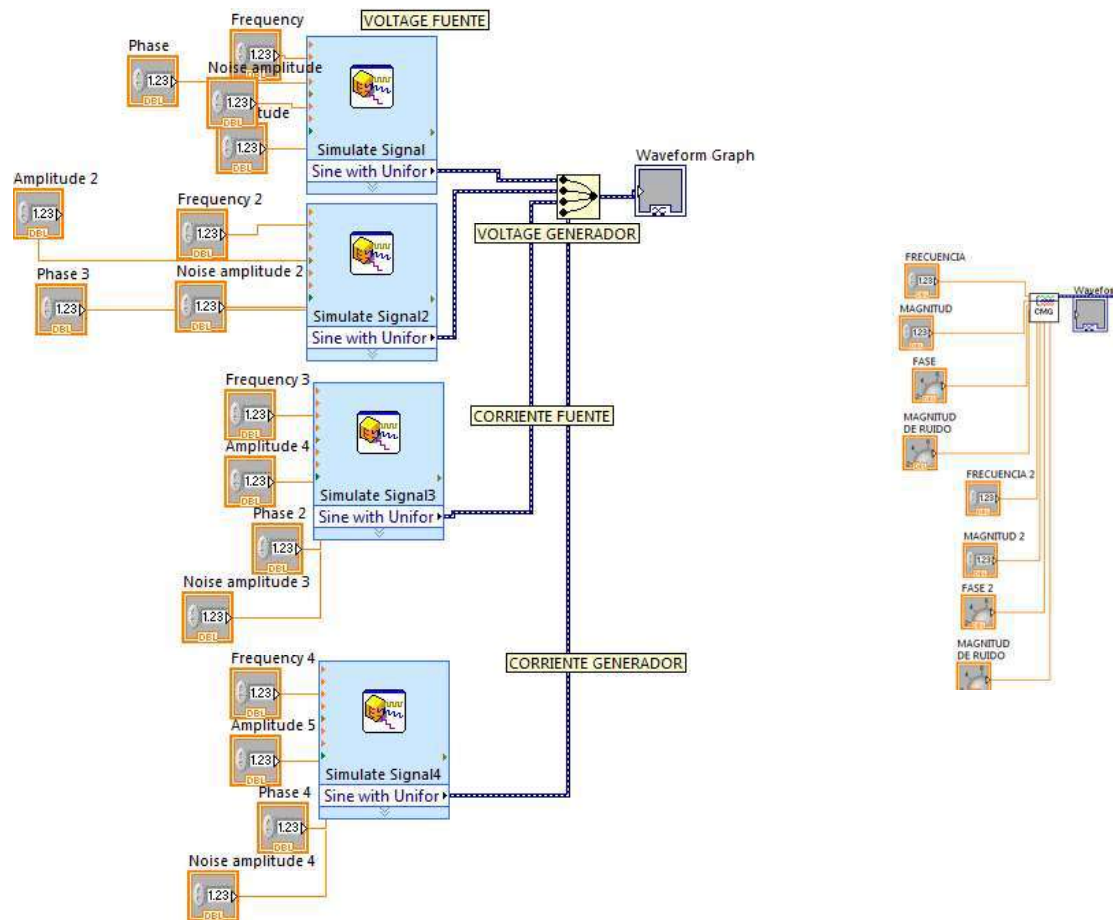


Figura 4.26 Diagrama de bloques para el generador de señales adquiridas simuladas.

Parte importante de la creación de los SubVI es mejorar la visualización del diagrama de bloques principal, por lo cual tuve que realizar el siguiente SubVI para realizar el proceso de condiciones para la sincronización.

Se muestra a continuación el panel frontal de este SubVI el cual muestra las entradas de control, y su señal de salida la cual es necesaria para conectar a los indicadores de condiciones cumplidas.

Estas señales son recibidas después de la etapa de instrumentación la cual mostraremos enseguida.

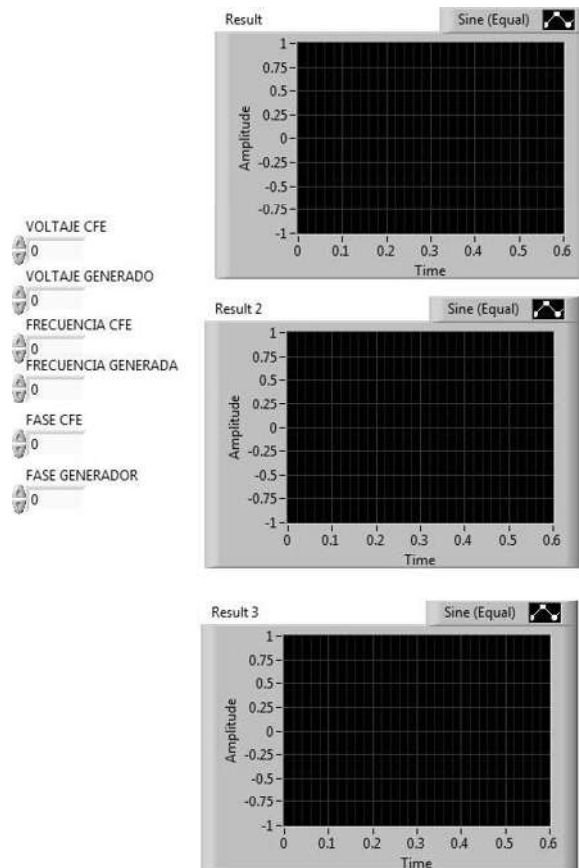


Figura 4.27 Diagrama de bloques del SubVI para condiciones de sincronización.

Este bloque es utilizado para realizar diferentes comparaciones entre dos señales, utilicé la opción de “igual que (=)” con una tolerancia de igualdad, esta característica me fue muy útil para realizar una condición confiable ya que las señales reales no son del todo puras. Para la simulación la tolerancia es pequeña ya que la señal esta simulada.

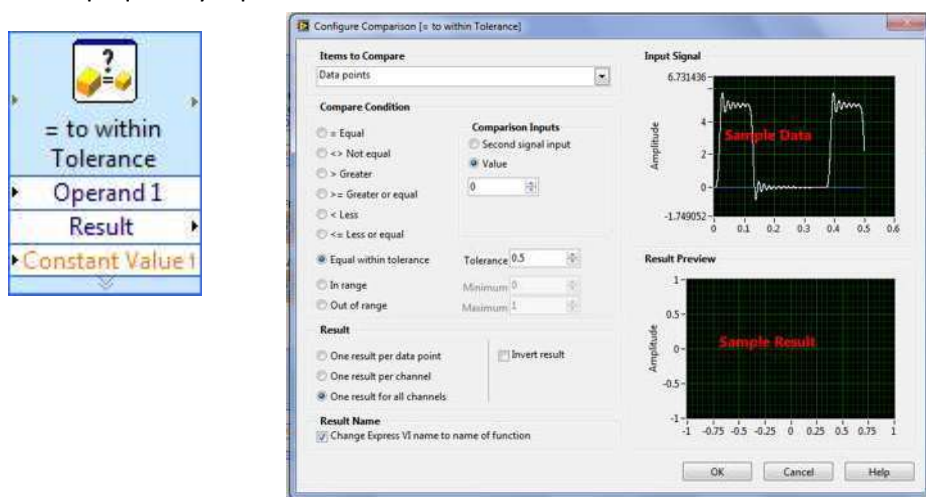


Figura 4.28 Configuraciones del bloque de comparación.

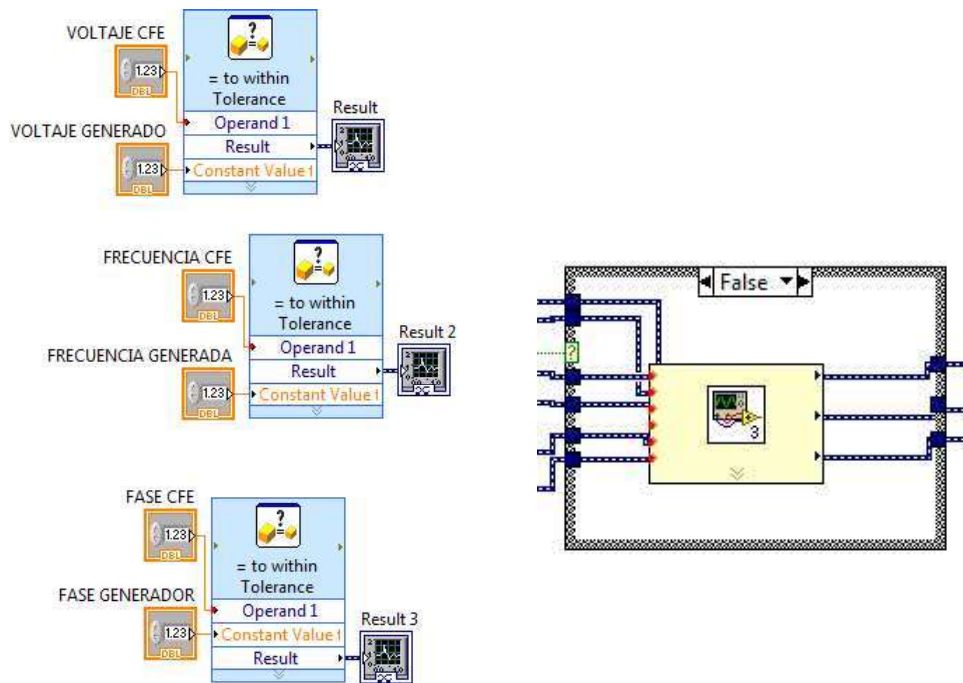


Figura 4.29 Diagrama de bloques del SubVI para condicionar la sincronización y vista en diagrama principal.

Esta figura 4.30 se muestra la instrumentación realizada a las señales de voltaje de la fuente y la del generador síncrono. Básicamente utilice el bloque llamado medición de tonos el cual nos proporciona la facilidad de entregarnos la señal de entrada en todos sus parámetros básicos como son magnitud, frecuencia y fase. Facilitando así el manejo de los datos para acondicionar las condiciones para la sincronización. Las cuales son:

- Igualdad de voltajes o fuerzas magneto-motrices numéricamente igual a la del sistema en bornes.
- Igualdad de frecuencia (correspondencia de velocidad con la frecuencia del sistema.
- Coincidencia de fases.

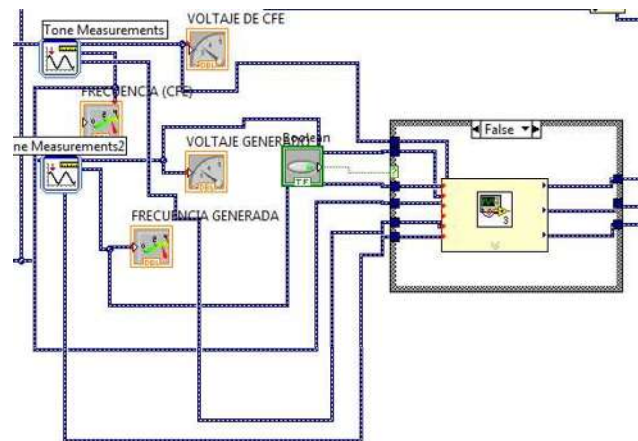


Figura 4.30 Instrumentación de las señales adquiridas de voltaje.

Para obtener una mejor referencia de que estas condiciones se han cumplido realice la siguiente instrumentación grafica.

Para poder ver la coincidencia de fase fue necesario investigar sobre VI's hechos por otros usuarios del Software LabView ya que existe un foro en el cual podemos publicar nuestros proyectos y son compartidos. Encontré un toolkit el cual contiene las herramientas graficas necesarias para poder ver los fasores, en cual es mostrado a continuación en la figura 4.31.

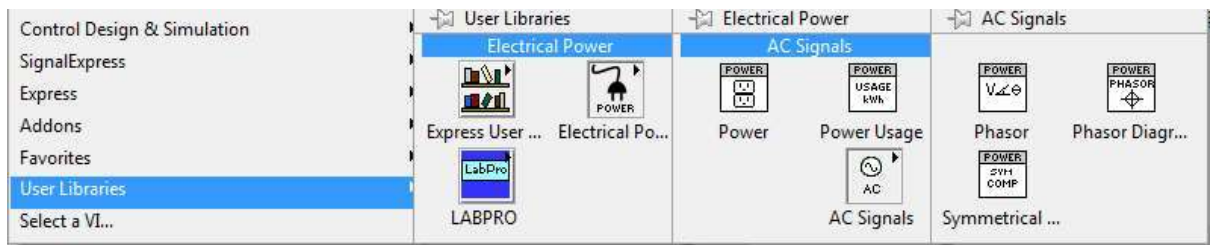


Figura 4.31 Toolkit utilizado para graficar Fasores.

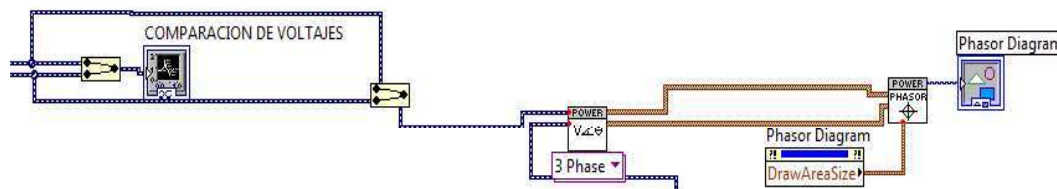


Figura 4.32 Instrumentación grafica para las condiciones de sincronización.

Como podemos notar en la figura 4.33, así se muestra en el panel frontal la instrumentación final.

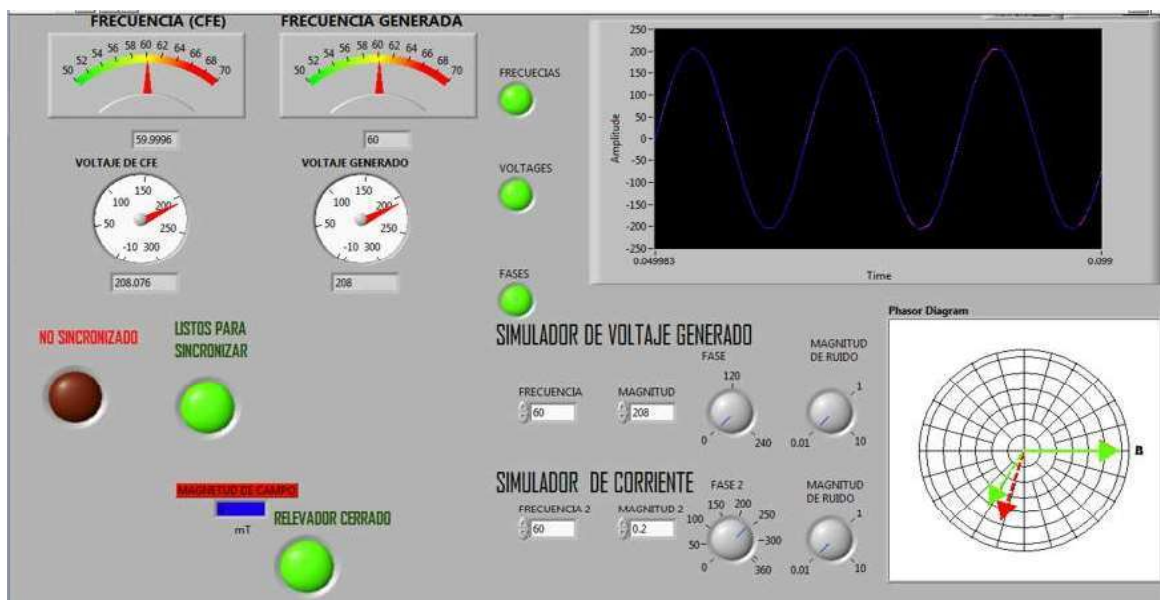


Figura 4.33 Panel frontal de VI para la sincronización del generador síncrono a CFE.

Como podemos notar en la figura 4.33 tenemos voltímetros, indicadores de frecuencia gráficas que dan una referencia del valor que estamos comparando, por lo que es difícil saber en qué momento estamos listos para sincronizar el generador, por lo cual tenemos los indicadores tipo lámpara el cual se enciende cuando la condición se ha cumplido; lo que facilita la tomar decisiones para sincronizar.

De acuerdo a las condiciones de funcionamiento del modulo de sincronización el cual determina físicamente cuando podemos sincronizar las condiciones del mismo son las siguientes:

- a) Lámparas que se encienden y apagan aleatoriamente.
- b) Lámparas que se encienden y se apagan simultáneamente.
- c) Lámparas que están encendidas permanentemente y con máximo brillo.
- d) Lámparas obscurecidas totalmente.

La razón del comportamiento de las lámparas se debe a que cambian las fases de los dos sistemas, para el primer punto a), parte de la solución es intercambiar cualquiera de las dos fases de la salida del generador, y que se presente como resultado de encendido-apagado el punto b) ó c)

Si se da el punto b) los sistemas tienen igual secuencia de fase, encendido (gran diferencia de fase) apagado (poca o nula diferencia de fase), por lo tanto se recomienda aumentar la velocidad del primotor según sea la lectura del tacómetro e igualar el voltaje generado con el del bus, variando la corriente de excitación.

Si se da el punto c) los sistemas tienen la misma secuencia de fases de encendido, esto se debe a :

- Mayor velocidad del primotor y/o
- Mayor voltaje generado

Si se presenta uno o varios casos conviene reducirlos hasta igualarlos con los parámetros establecidos.

El último punto es cuando se llega al sincronismo y es aquí donde los interruptores del módulo de sincronización se deben cerrar.

Nota: Por lo tanto en la simulación podemos notar que sustituimos el modulo de sincronización por la etapa de indicadores de condicionantes de sincronización. Pero es necesario tener el

modulo de sincronización ya que es necesario para la conexión física al bus infinito y determinar qué cambios realizar para cumplir con las condiciones de sincronización.

En la figura 4.34 utilizamos el bloque de time delay, el cual adecuamos para simular que hay un retraso en la señal real y garanticemos un buen funcionamiento del VI sin ser este un tiempo muy largo ya que tratamos que la adquisición sea lo más cercano al tiempo real.

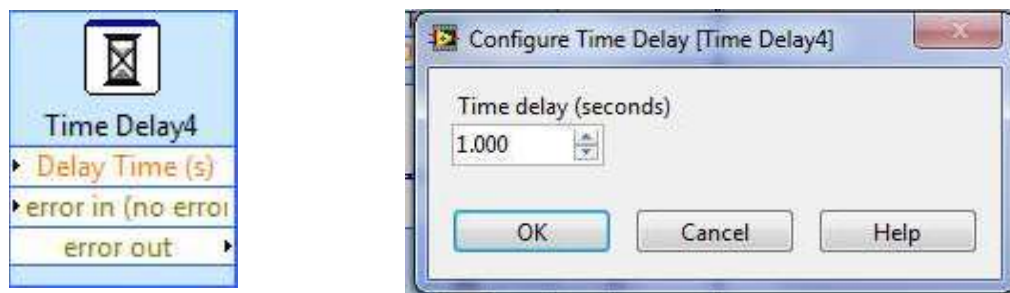


Figura 4.34 Retraso de tiempo en la señal.

Las condiciones para sincronizar se realizaron de la siguiente manera. Tenemos los indicadores de comparación de señales, los cuales al cumplirse las condiciones de igualdad pasa a la condición de disparo al relevador que activara el modulo de sincronización.

Al unir cada una de las señales de comparación con un arreglo de compuertas lógicas “Y” determine la condición de disparo al relevador como se muestra en la figura 4.35.

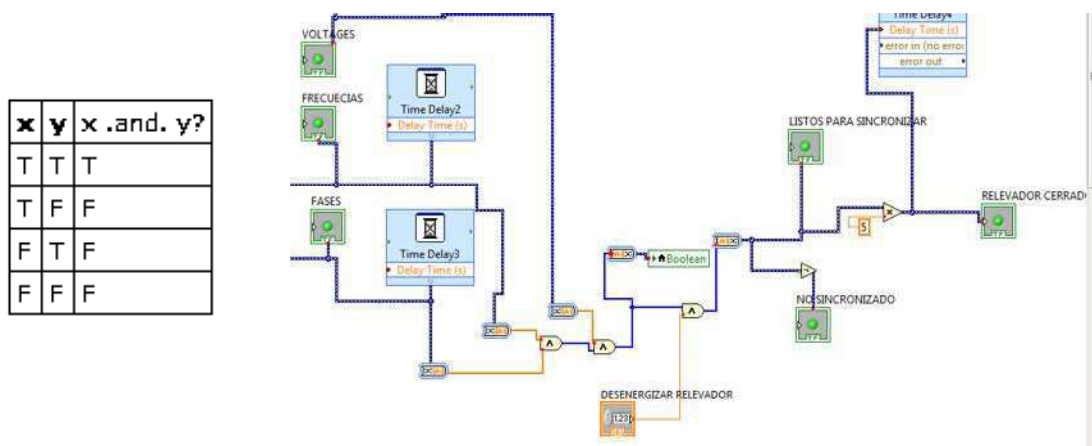


Figura 4.35 Diagrama de bloques para determinar condiciones de disparo al relevador.

En la figura 4.35 podemos ver que se adicionó una condición más después de los indicadores de sincronización el cual es el sensor de campo magnético el cual nos servirá para el disparo de apertura del relevador y sacar a la maquina del bus infinito a razón del comportamiento de carga reflejado en el campo magnético y su variación ante diferentes cargas.

Para realizar el disparo en la simulación utilizamos indicadores llamados relevadores cerrado, listo para sincronizar y no sincronizado. El objetivo es mandar una señal de 5 volts a la tarjeta de adquisición de datos por esa razón tenemos una multiplicación por 5 antes de activar el indicador de relevador cerrado.

En la figura 4.36 podemos ver que el indicador de no sincronizado tiene conectado una compuesta lógica negada lo que significa que manda el inverso de la señal de listo para sincronizar así tenemos los indicadores de manera correcta.

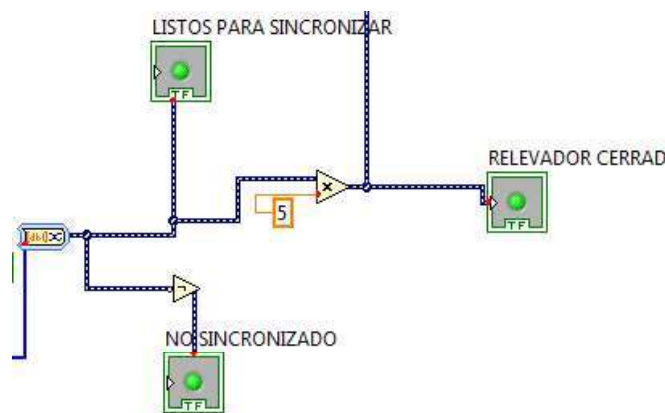


Figura 4.36 Diagrama de bloques del disparo para activar o desactivar el relevador.

Ahora para abrir el relevador para desconectar el generador por cambios en el tipo de carga, utilice el monitoreo del campo magnético. Para la simulación use sólo un imán donde tenemos solo dos puntos de lectura los cuales producirán un cambio de positivo a negativo esta lectura esta milítelas (mT), por lo que producirá un cambio el cual controlará la apertura o cierre del relevador simulando así un cambio el campo magnético actuando como si una carga variara.

El bloque utilizado para poder realizar esta acción es el ya anteriormente mencionado llamado comparador de señales, para este proceso utilicé la función “fuera de rango” la cual monitorea la señal de entrada de tal forma que manda una señal booleanas esta dentro o fuera del rango especificado se mantiene apagado el indicador si sale del rango se enciende el indicador. Con esta

configuración controlamos los disparos de tal forma que si algo cambia en el campo magnético y lo programamos dentro de un rango tenemos un control de desconexión a razón de fallas por diferentes tipos de carga.

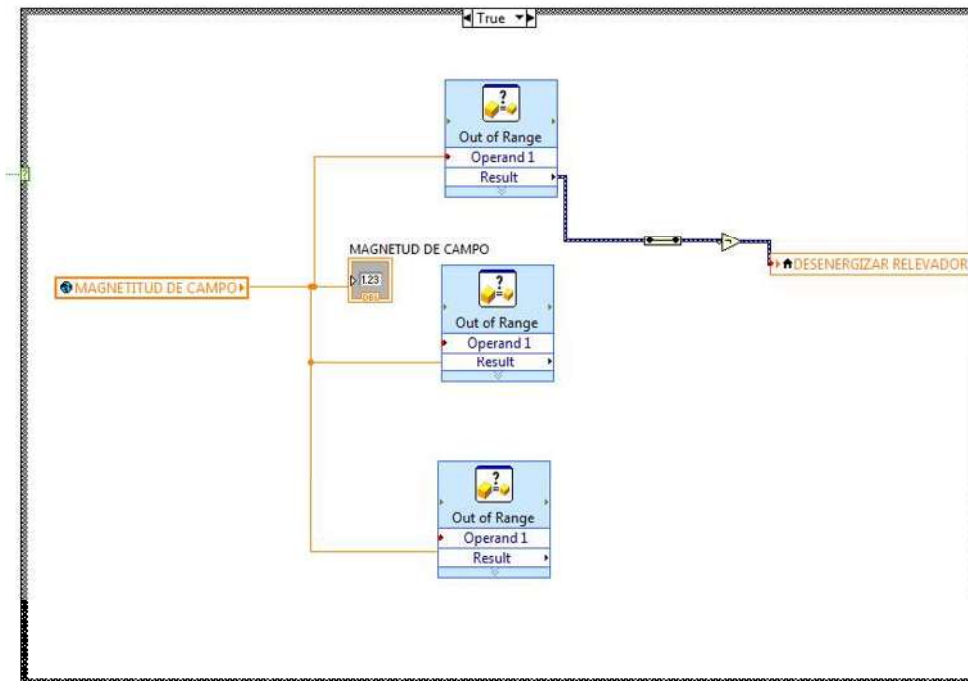


Figura 4.37 Diagrama de bloques para monitoreo de campo magnético.

Para poder utilizar el sensor de campo magnético fue necesario declarar una variable global la cual tuvimos que declarar en el VI de lectura del campo magnético y utilizada en este diagrama para obtener la lectura en tiempo real. Esta variable nos proporciona la última lectura obtenida del sensor con lo podemos monitorear el campo magnético del generador síncrono. Esto convierte a este proceso en una condición independiente del sistema de sincronización permitiéndome tener un control más confiable.

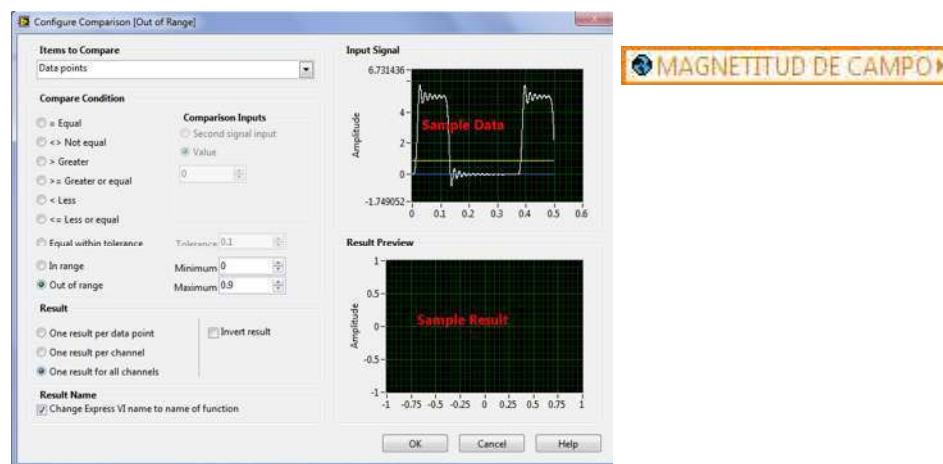


Figura 4.38 Configuración del rango de lectura de campo magnético.

Para poder leer la variable local incluí un control de datos el cual es un control numérico que recibe el valor de la variable global llamada “MAGNITUD DE CAMPO”.

Al acondicionar esta señal de control fue necesario crear una variable local llamada “DESENERGIZAR RELEVADOR”. Para que esta cumpliera con el arreglo de compuertas “Y” negué la salida del bloque “fuera de rango” después determiné la variable loca como se muestra en l figura 4.39.

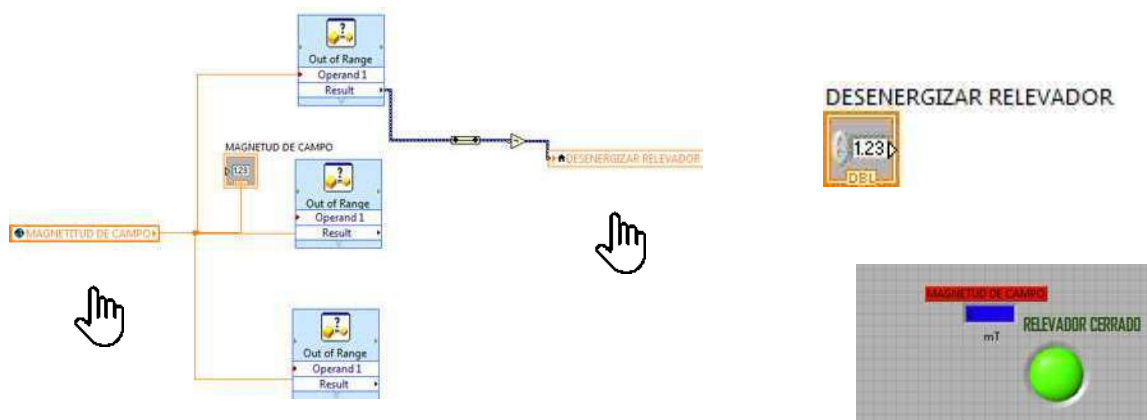


Figura 4.39 Variable de monitoreo de campo magnético.

Es necesario tener un control sobre la ejecución de los programas (VI's) ya que crea conflictos en el procesador de la computadora, por lo que recurrí a utilizar un ESTRUCTURE CASE (caso) para ejecutar el monitoreo del campo magnético, por lo tanto se ejecuta cuando yo lo desee.

Ya que simulo las señales de adquisición de datos es necesario crear otra “estructure case” para estar monitoreando los cambios en las señales de entrada para las condiciones de sincronización, por esta razón declare otra variable local llamada “MONITOREO DE VARIABLES DE SINCRONIZACION” lo cual fue muy útil y se muestra en la figura 4.40.

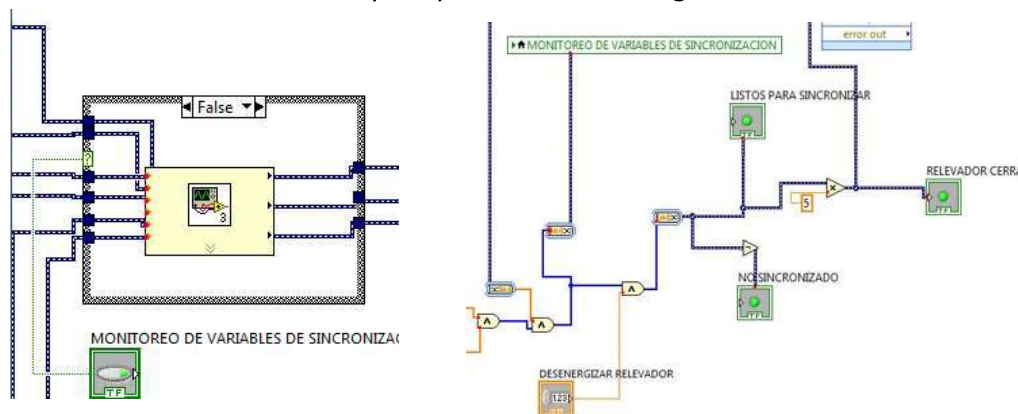


Figura 4.40 Variable local para control de monitoreo de variables de sincronización.

Aquí termina la descripción del diagrama de bloques para sincronizar el generador al bus infinito de CFE, a continuación mostraremos las imágenes de las simulaciones en el proceso de condicionamiento para la sincronización.

Al ejecutar el VI notemos en la figura 4.41 que los parámetros de la simulación del voltaje generado están en cero por lo tanto ningún indicador esta encendido más que el indicador de “no sincronizado” indicado en rojo. En las graficas y indicadores numéricos notamos que sólo aparece el voltaje y la corriente de la fuente así también sus fasores.

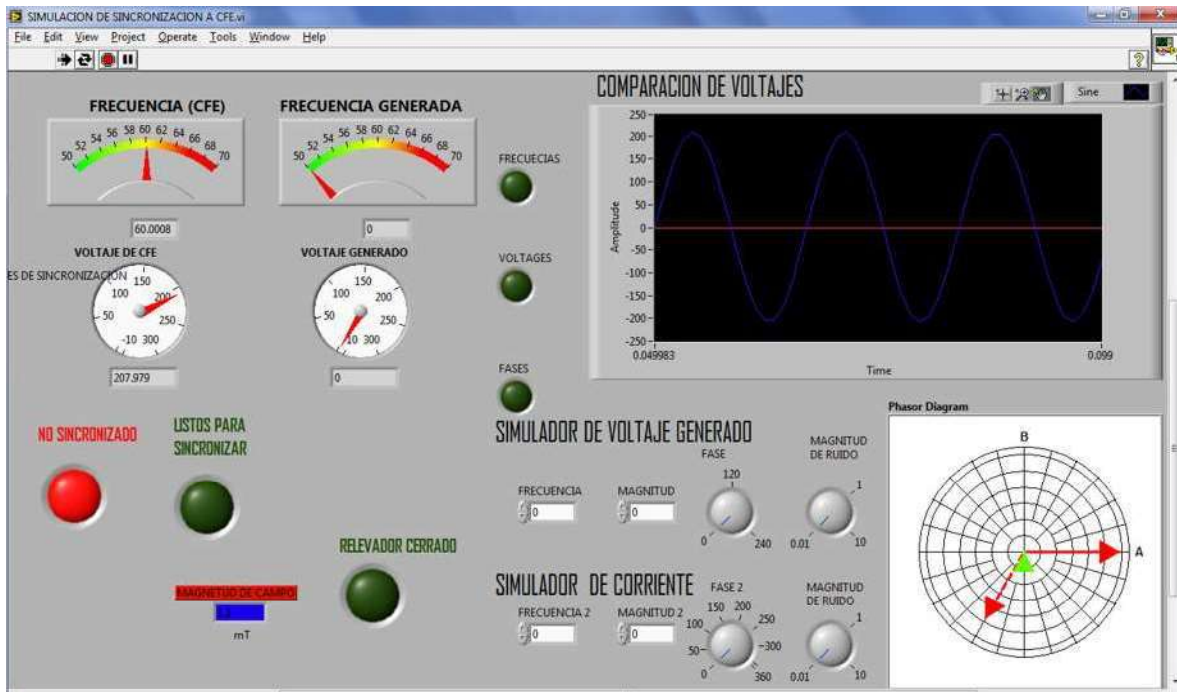


Figura 4.41 Simulación con parámetros en cero.

En la figura 4.42 introducimos en la simulación la frecuencia generada lo cual deberá de encender el indicador de igualdad de frecuencias; de la misma forma introducimos una magnitud de voltaje por debajo de la del bus (fuente) y desfasamos aproximadamente a 120° el fasor de voltaje.

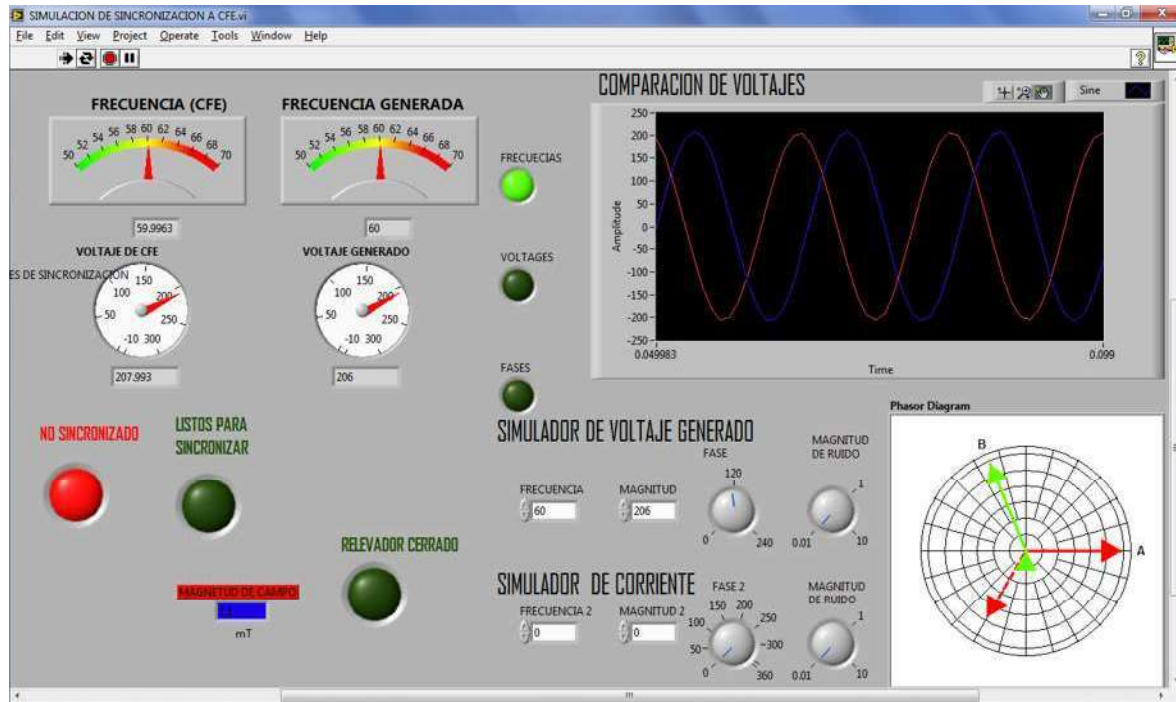


Figura 4.42 Prueba de indicadores de condiciones de sincronización.

En la siguiente figura se muestra la prueba realizada al introducir el voltaje generado de 208 V. a 60 Hz desfasado aproximadamente a 120° , podemos observar que la simulación funciona, está encendido el indicador de frecuencias y ahora el de voltajes mientras los demás indicadores siguen sin activarse; por lo tanto funciona correctamente.

Es importante notar que las graficas y los indicadores numéricos concuerdan en la condición tanto en magnitud como en frecuencia y la fase. Por esa razón es que podemos estar seguros que estamos teniendo una buena medición en condiciones ideales.

Nota: Las perillas de magnitud de ruido está en cero ya que simulamos en condiciones ideales. Además la corriente generada está en cero ya que esta depende de la carga y supongo que es en vacío.

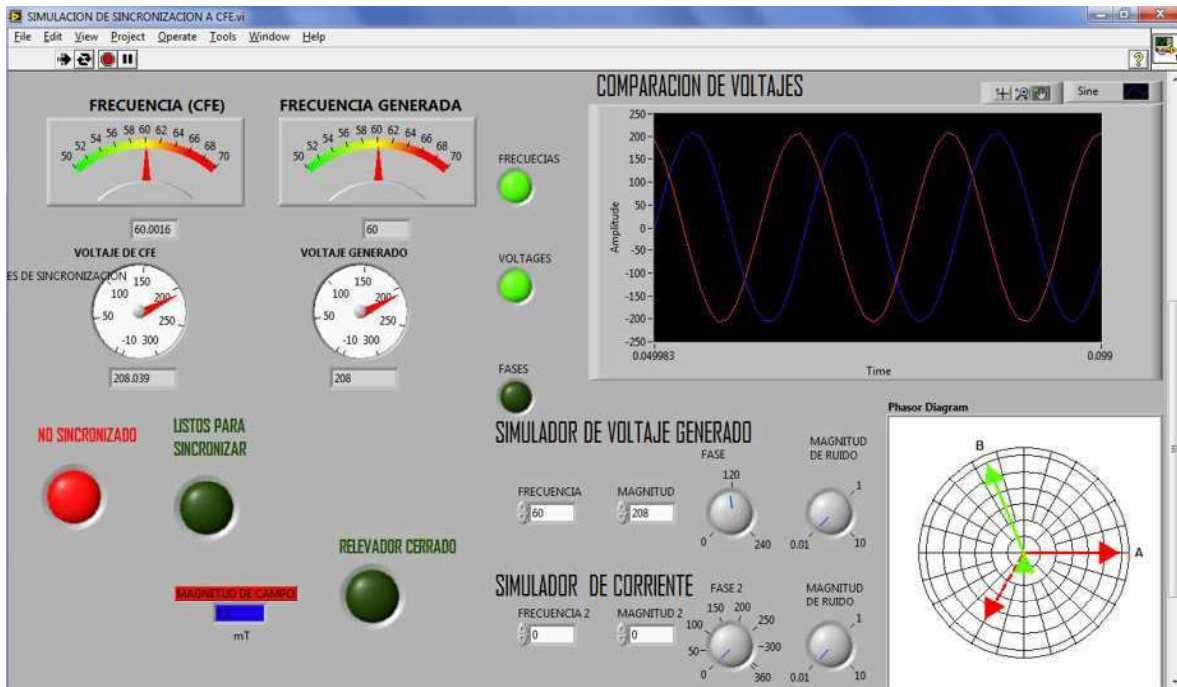


Figura 4.43 Prueba de indicador de igualdad de voltajes.

En la siguiente prueba comprobamos que el indicador de igualdad de fases funcione correctamente notemos en el diagrama fasorial que el fasor verde es el voltaje generado y el rojo el del bus infinito. Por lo tanto nuestro programa funciona correctamente. Aun este punto no podemos sincronizar ya que incluí la condición de campo magnético el cual está en ejecución fuera del rango con propósitos de verificar el funcionamiento de los indicadores y condiciones.

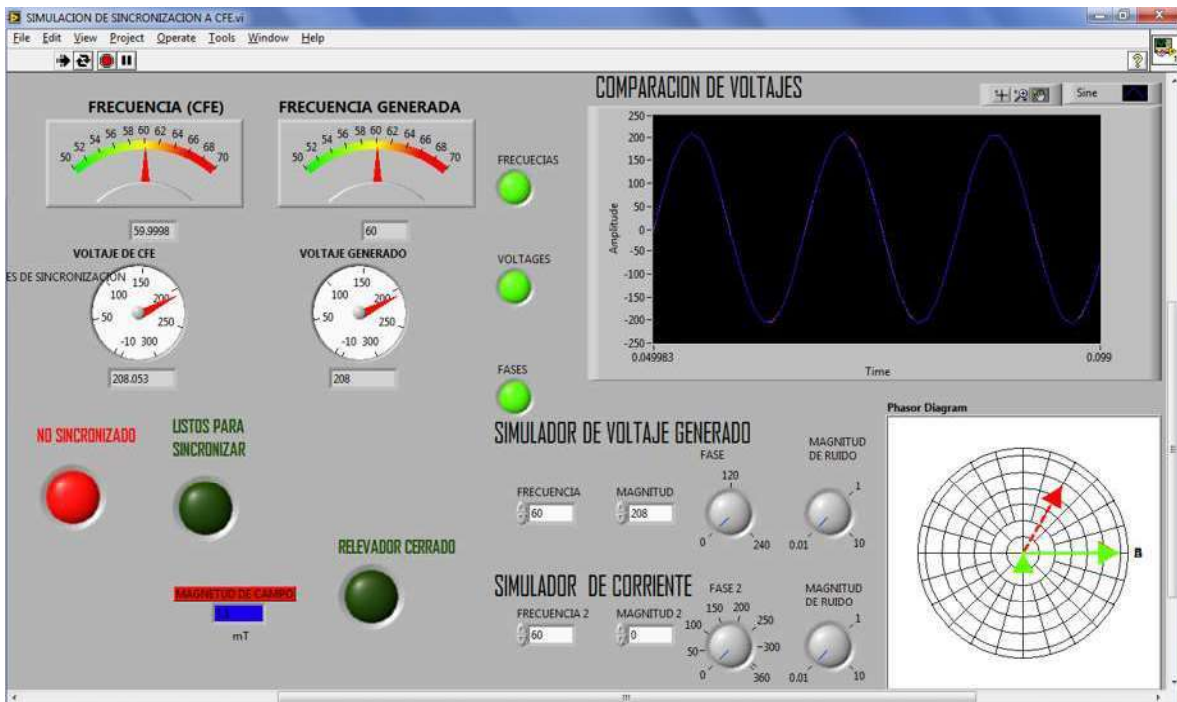


Figura 4.44 Prueba de indicador de igualdad de fases.

Una vez monitoreando el campo magnético y estando dentro del rango programado el indicador se enciende y automáticamente nos produce un disparo a él relevador activando así el modulo de sincronización al haberse cumplido con todas las condiciones.

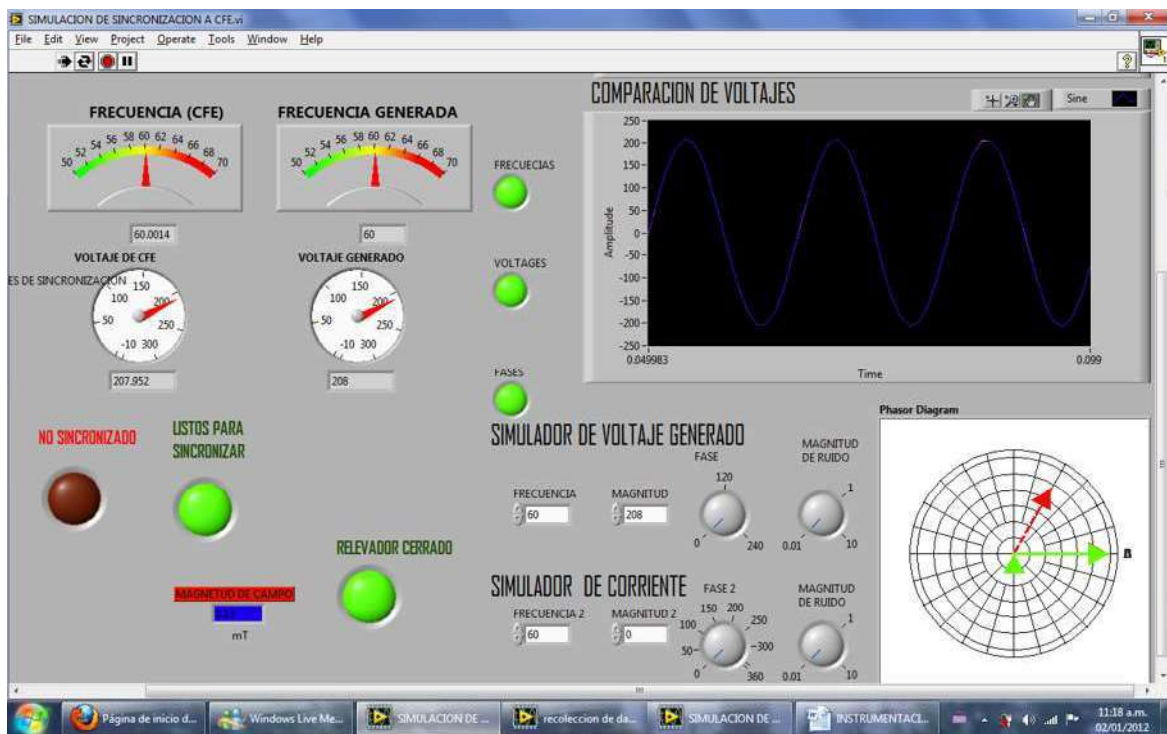


Figura 4.45 Prueba de cumplimiento y disparo para la sincronización.

El monitoreo del campo magnético se sigue ejecutando así como el monitoreo la de las variables de voltaje, frecuencia y fase. En la figura 4.45 observemos el VI de monitoreo de campo magnético con cual podemos guardar los datos adquiridos para tener referencias sobre los fenómenos por los cuales salió de sincronismo, esta es una parte interesante de estudio y objetivo de esta tesis. Estos datos pueden ser exportados como imagen de la tabla o como datos para poder ser manipulados en hojas de cálculo.

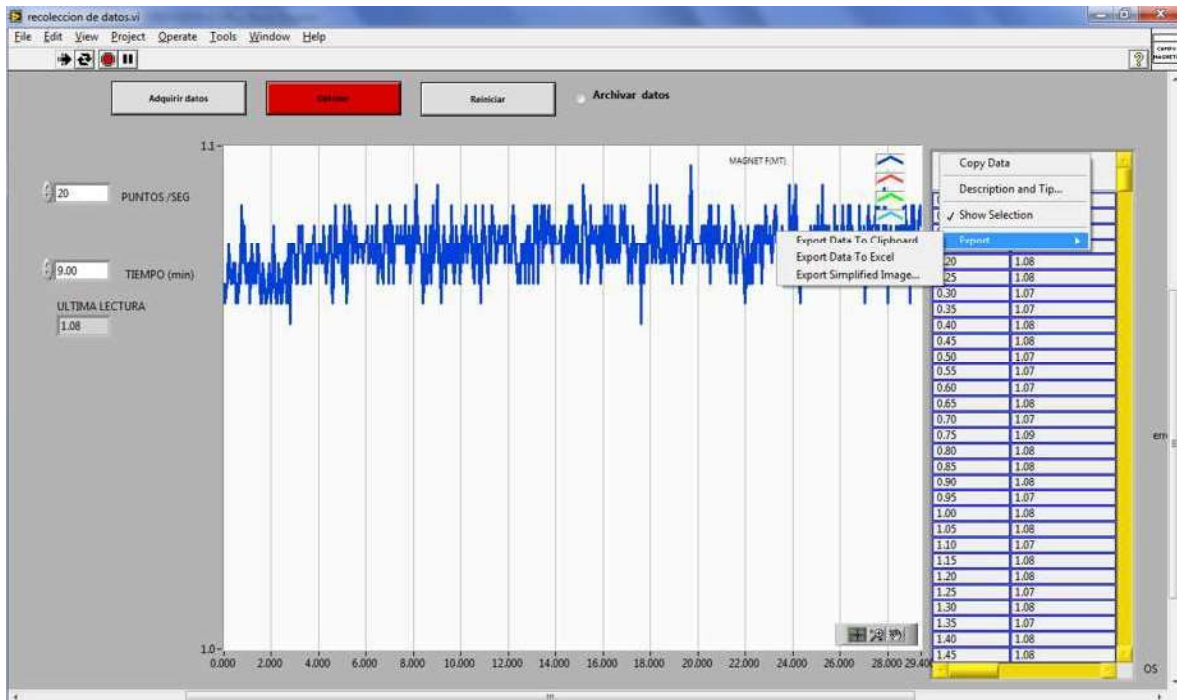


Figura 4.46 Monitoreo de campo magnético y exportación de datos a hoja de cálculo.

A razón del monitoreo de campo magnético programe un rango censando un el campo magnético en un imán el cual está dentro del rango de 0 a 0.9 mT. Como podemos ver en la figura el valor esta en un nivel de 1.1 mT lo cual tendrá que mandar un disparo para desactivar la sincronización.

Con este sencillo experimento podemos caracterizar rangos de operación donde la sincronización esté garantizada a diferentes tipos de cargas resistivas inductivas o capacitivas si salen de esos rangos sacamos el generador de sincronismo. Podemos obtener información del monitoreo de campo y así determinar cuál fue el motivo por el cual salió de sincronismo. Puede ser una herramienta muy útil.

Por lo tanto si esto sucede el proceso de monitoreo actúa y reiniciamos el proceso de sincronización, Como se muestra en la colección de imágenes siguiente:

CAPÍTULO 5

MONITOREO DE CAMPO MAGNÉTICO COMO PARÁMETRO DE PROTECCION EN GENERDORES SINCRONOS MEDIANTE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS VERNIER (LabPro), NI 6008 Y LABVIEW

5.1 Descripción y características del equipo utilizado para realizar la sincronización

Como se pudo observar en el capítulo anterior la programación en LabVIEW es una herramienta la cual nos permite visualizar en ventanas de un ordenador (PC) mediciones, parámetros características etc. Por lo tanto el objetivo de este capítulo es realizar un VI (programa realizado en LabVIEW) el cual sea capaz de monitorear variables del proceso de sincronización de un generador al sistema de la red eléctrica de CFE así como el monitoreo del campo magnético.

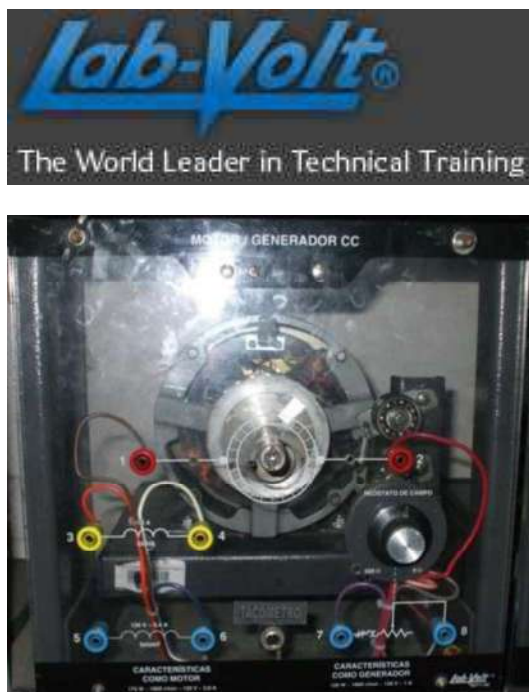
A continuación se presenta el equipo utilizado para realizar la práctica en la figura 5.1.



Datos de Motor	Datos del Generador
¼ de HP	120 VA
1800 rpm	1800 rpm
208 V	208 V
0.8 Amp	0.33 Amp
60 HZ	60 HZ
3 Fases	3 Fases

Figura 5.1 Máquina síncrona modelo EMS 8241.

El primo-motor utilizado es un motor de corriente directa modelo 8211-02 el cual es utilizado como energía mecánica proporcionada al generador síncrono, que se muestra en la figura 5.2.



Características como Motor

175 W

1800 rpm/min

120 V

2.8 A

Características como Generador

120 W

1800 rpm/min

120 V

1 A

Figura 5.2 Primo-motor modelo 8211-02.

Los módulos de transformadores para la instrumentación de la adquisición de señales se ilustran en la figura 5.3.



Datos nominales

60 VA-120V/208V-0.5/0.3 A
60HZ-1 Fase

OTRAS FUNCIONES:
AUTOTRANSFORMADOR
ACOPLAMIENTO
IMPEDANCIA

Figura 5.3 Transformadores para instrumentación.

Se utilizó una relación de transformación de 120 volts a 28 volts conectar otro transformador de 127 a 12 y a 24 para disminuir los niveles de voltaje a menos de 5 volts. Los transformadores mencionados se muestran en la figura 5.4.

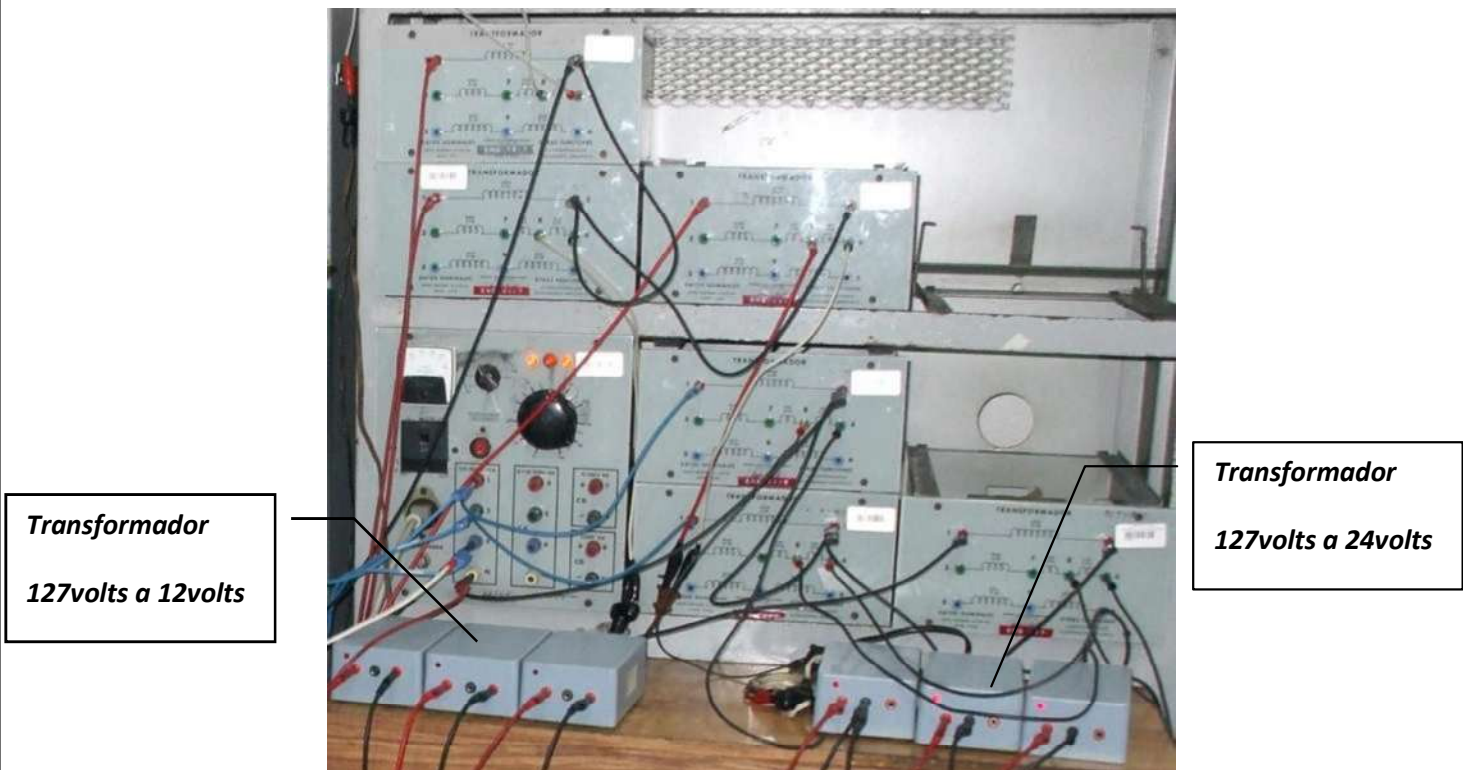


Figura 5.4 Transformadores de 127 V a 12V y 127V a 24V.

Para poder realizar la sincronización de modo convencional en el laboratorio se realizan con el modulo de sincronización de la figura 5.5.



Datos nominales

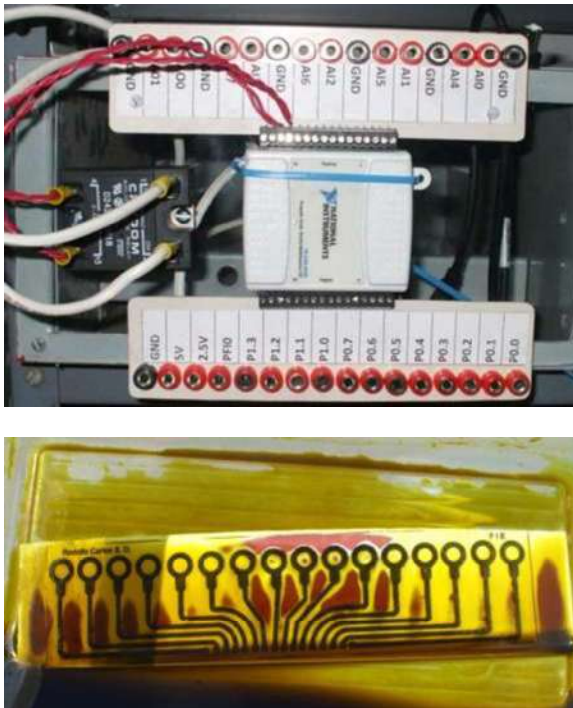
Lámparas de 6 w-220V
Switch-5 A -220V

OTRAS FUNCIONES:
Comparador de voltaje

Figura 5.5 Módulo de sincronización.

Este módulo es utilizado como comparador de voltaje entre el nivel de voltaje de CFE y el del generador síncrono, así como también podemos observar la secuencia de fases de manera empírica por el fenómeno en las lámparas.

Para poder realizar la adquisición de datos fue necesario acondicionar las conexiones hacia la tarjeta de adquisición de National Instrument modelo 6008, por lo cual se acondicionó un módulo que se muestra en la figura 5.6.



Características de NI 6008.

- 8 entradas analógicas (12 bits, 10 kS/s)
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s), 12 E/S digitales; contador de 32 bits
- Energizado por bus para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada
- La versión OEM está disponible
- Compatible con LabVIEW, LabWindows/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET
- Software controlador NI-DAQmx y software interactivo NI LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos.

Figura 5.6 Tarjeta de adquisición de datos NI6008.

Para poder obtener el campo magnético se presenta en la figura 5.7 la tarjeta de adquisición de datos LabPro de Vernier.



- **Frecuencia de muestreo máxima: 50.000 lecturas por segundo**
- **Resolución: 12 bits de conversión A / D**
- **Memoria interna: Almacena hasta 12.000 puntos de datos**
- **Entrada / Salida: 8 líneas TTL (4 en cada puerto DIG / SONIC)**
- **Salida analógica: 1 canal, ± 3 voltios, 100 mA (con generador de funciones)**



Figura 5.7 Tarjeta de adquisición LabPro de Vernier.

El sensor de de campo magnético cuenta con la instrumentación ya integrada como se muestra en la figura 5.8.



Figura 5.8 Sensor de campo magnético.

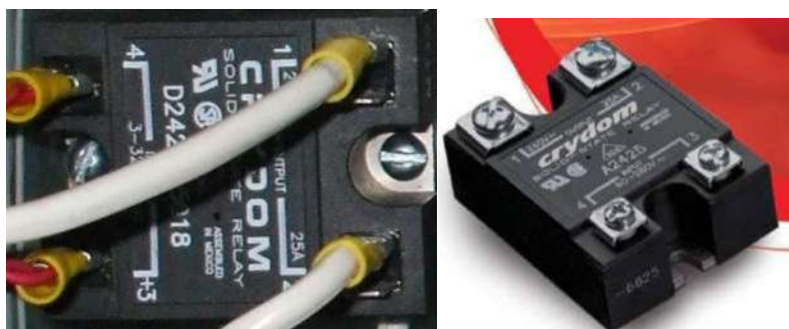
El sensor cuenta con amplificación de la señal lo cual se muestra en la siguiente imagen, de la figura 5.9.



Figura 5.9 Módulo de amplificación del sensor de campo magnético.

La amplificación de las señales en los sensores es muy importante ya que esto es una herramienta para tener mejor definición en la lectura, es parte esencial al adquirir datos.

Para la parte de control fue necesario acoplar un relevador de estado sólido, que se muestra en la figura 5.10 el cual es de la marca CRYDOM con las siguientes características.



	Line Voltage Range Vrms	Load Current Range Arms	Control Voltage Range Vrms	Control Current@ 120Vrms mA	Must Release Voltage Vrms	Surge Current 1-Cycle A _{pk}	
A1210	24-140	.04-10	90-280	2.0	10.0	120	UL, CSA, VDE
A1225	24-140	.04-25	90-280	2.0	10.0	250	UL, CSA, VDE
A1240	24-140	.04-40	90-280	2.0	10.0	625	UL, CSA, VDE
A2410	24-280	.04-10	90-280	2.0	10.0	120	UL, CSA, VDE
A2425	24-280	.04-25	90-280	2.0	10.0	250	UL, CSA, VDE
A2450	24-280	.04-50	90-280	2.0	10.0	625	UL, CSA, VDE
A2475	24-280	.04-75	90-280	2.0	10.0	1000	UL, CSA, VDE
A2490	24-280	.04-90	90-280	2.0	10.0	1200	UL, CSA, VDE
A24110	24-280	.15-110	90-280	2.0	10.0	1500	UL, cUL
A24125	24-280	.15-125	90-280	2.0	10.0	1750	UL, cUL

Operating Temperature Range: -40°C to 80°C, Isolation Voltage: 4000 Vrms, Minimum Off-State dV/dt: 500V/ μ sec

Figura 5.10 Relevador CRYDOM y sus características.

Este relevador es utilizado para energizar un contactor del cual utilizamos sus contactos normalmente abiertos para realizar la sincronización.

El contactor se muestra en la figura 5.11 así como sus especificaciones.

Características de operación:

- Alimentación de 120 V a 60 HZ.
- 4 contactos normalmente abiertos.
- 4 contactos normalmente cerrados.



Figura 5.11 Contactor.

Este módulo es quien realiza la conexión del generador al bus infinito de la red eléctrica de CFE mediante una señal de control programado en el VI de sincronización por medio de un relevador de estado sólido el cual energiza los contactos. La conexión se muestra en la siguiente figura 5.12.

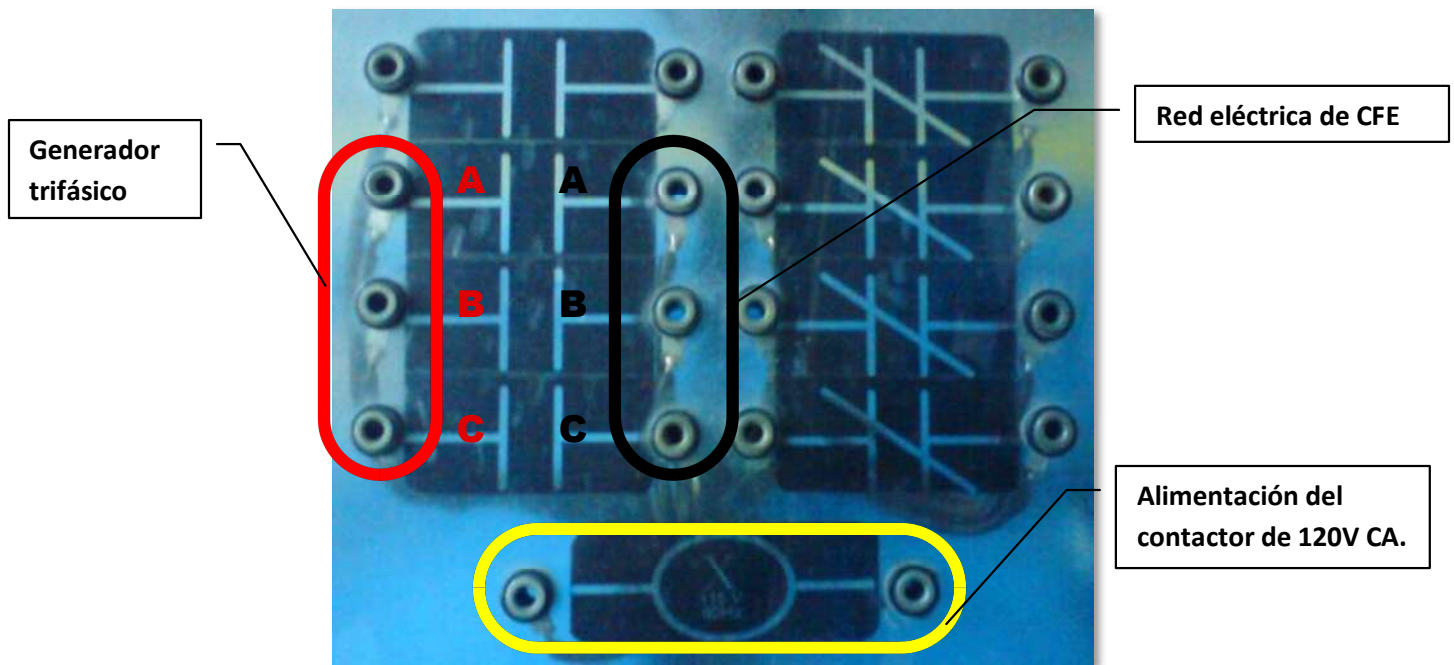


Figura 5.12 Modulo de contactos para realizar conexión del generador a la red eléctrica.

Fue necesario tener un tacómetro para poder llevar por medio del primo motor al generador a la velocidad síncrona, igualmente es necesario un multímetro para comparar las mediciones y la instrumentación en LabVIEW, estos se muestran en la figura 5.13.



Figura 5.13 Multímetros utilizados.

El tacómetro muestra la velocidad en rpm, el voltímetro es utilizado para medir el voltaje de alimentación del motor de corriente directa para no sobre-pasar los parámetros de la máquina.

Todo el equipo descrito anteriormente es necesario para llevar a cabo la sincronización por medio de LabVIEW instalado en un ordenador el cual cuenta con las características que se indican en la figura 5.14.



Figura 5.14 Descripción de LabVIEW.

Como se muestra en la imagen podemos notar que los recursos computacionales son suficientes para poder realizar el VI en LabVIEW.

5.2 Obtención de parámetros

Los parámetros a medir son los siguientes:

- Campo magnético del generador síncrono.
- Voltajes de fases a neutro de CFE (Fase A, Fase B, Fase C)
- Voltajes de fases a neutro del Generador (Fase A, Fase B, Fase C)
- Diagramas fasoriales tanto de CFE como del Generador.

En esta parte de la tesis se dará una descripción del desarrollo de la toma de datos para determinar la ubicación del sensor de campo magnético con el objetivo de encontrar que el sensor detecte los cambios del campo magnético en la máquina.

Para poder determinar de manera segura una lectura más precisa de la magnitud del campo magnético fue necesario hacer análisis con la máquina síncrona trabajando como generador trifásico. La metodología fue la siguiente:

1.- Determinar una referencia sobre la carcasa del generador, para de ahí partir y distribuir en tres partes la carcasa donde pueda tener acceso a instalar el sensor, tal como se muestra en la figura 5.15

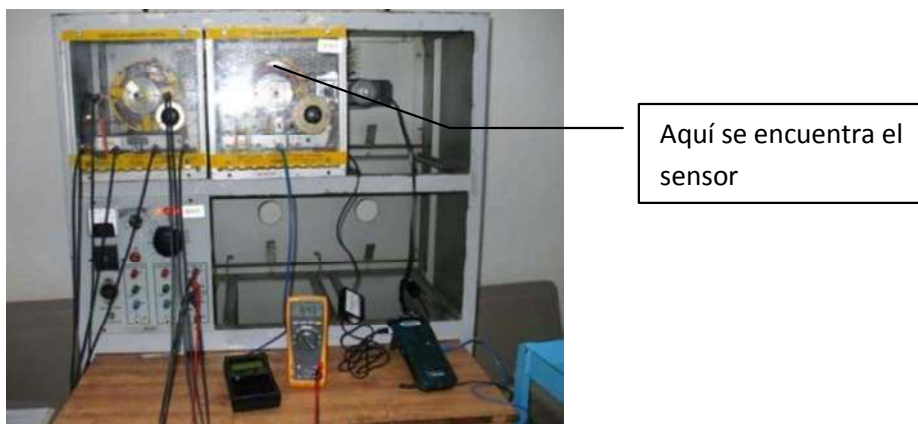


Figura 5.15 ubicación del sensor de campo magnético.

2.-Una vez ubicado en la referencia se hizo una lectura del campo con el VI anteriormente analizado en el capítulo 4. Los resultados obtenidos de esta primera fueron los siguientes:

Ya que el sensor nos brinda la posibilidad de de tener la lectura más rápida o más lenta a razón de la velocidad del campo. Se obtuvieron dos lecturas respectivamente generando las graficas de las figuras 5.16 y 5.17

Figura 5.16.-Podemos ver que las lecturas obtenidas por el sensor no detecta cambios al sobreexcitar o sub-excitar el generador.

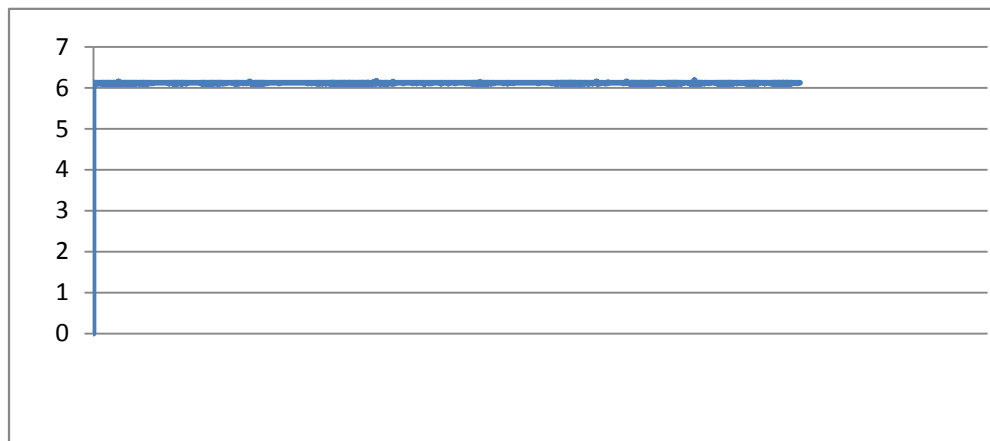


Figura 5.16 Prueba con el sensor en alta.

En la Figura 5.17 Observemos que en este modo de lectura alcanzamos a apreciar los cambios en el campo a razón de sobreexcitar y sub-excitar el reóstato de campo del generador.

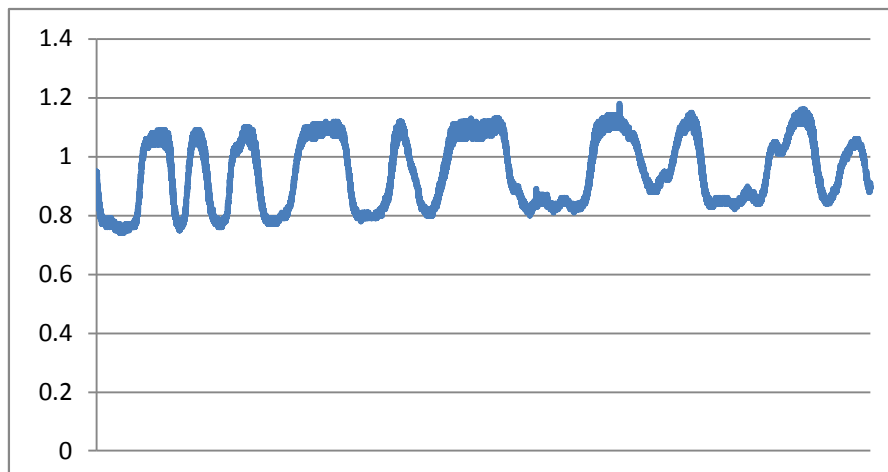


Figura 5.17 Prueba con el sensor en bajo.

Lo cual lleva a realizar las pruebas en este modo de operación con el fin de tener esta variación y determinar estos parámetros en el generador.

Para poder definir las áreas en las cuales tomaremos las lecturas fue necesario tener en consideración que esta máquina síncrona es de 4 polos concentrados en el estator, por lo tanto está dividida en tres áreas de la máquina, ya que en la parte inferior no puedo instalar el sensor por el armazón del modulo de la fuente.

Tomando en cuenta esas consideraciones las áreas quedaron de la manera que se ilustra en las figuras 5.18.



Figura 5.18 Distribución de áreas para análisis del campo magnético.

Empezamos con la zona A en la cual obtuvimos las siguientes lecturas se indican en la figura 5.19.

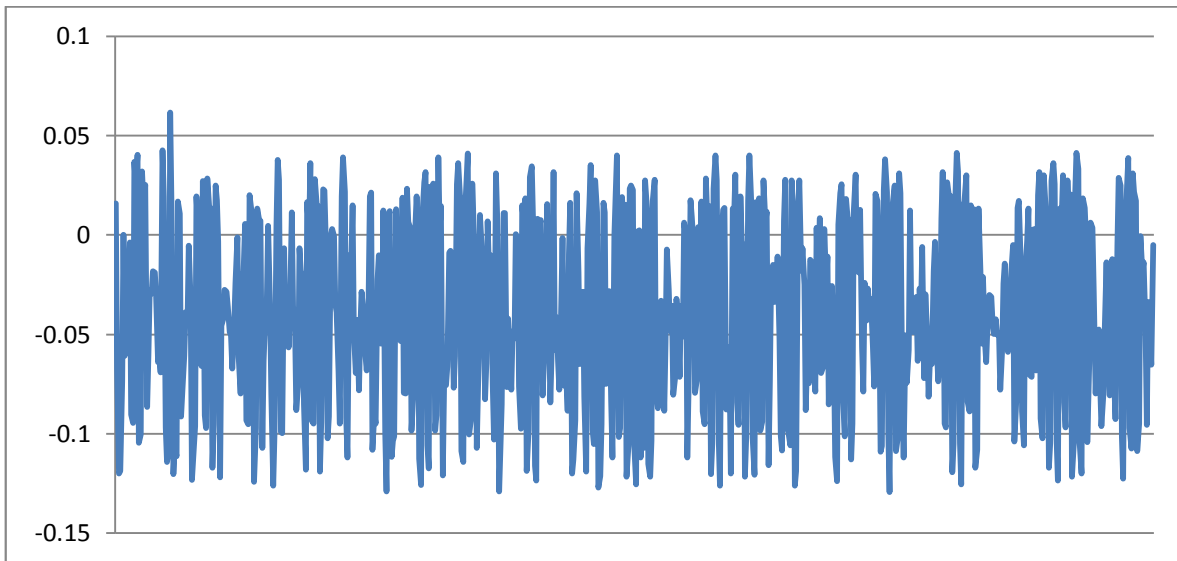


Figura 5.19 Grafica del campo magnético en la zona A.

Obtuvimos un mínimo de -0.1293 mTeslas el signo menos representa sólo la polaridad en que el sensor está ubicado con respecto al que está leyendo; así también obtuvimos un máximo de 0.0615 mTeslas.

Como podemos ver la lectura en esta zona no es muy favorable para el objetivo que tenemos que es determinar la mejor ubicación del sensor para detectar los cambios de la corriente y de intensidad del campo al manipular el generador con el reóstato de campo, por lo que queda totalmente descartada. Estas lecturas se toman alrededor de toda la zona.

En la zona B los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.20

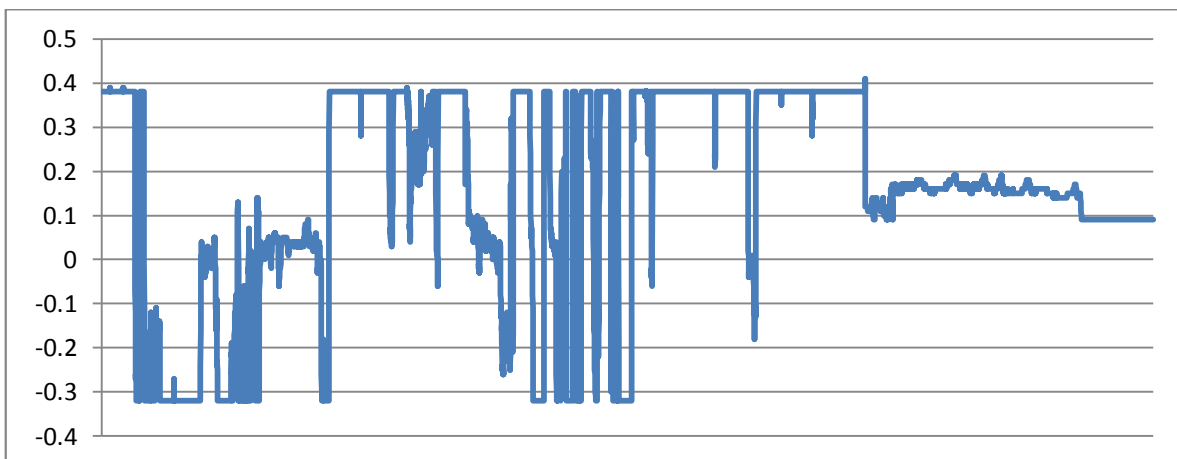


Figura 5.20 Análisis del campo magnético en la zona B.

En esta zona notamos que las lecturas son más inestables al igual que la zona anterior, no tenemos una lectura confiable la cual detecte los cambios de en el campo de manera constante, por lo tanto esta zona tampoco no es útil.

Concluyendo por medio de los resultados, que se determinó ubicar acertadamente el sensor en la zona que consideré de referencia ya que como se muestra en la figura 5.17 es donde mejor podemos apreciar los cambios de corriente reflejados en el campo magnético del generador.

Se obtuvieron las siguientes lecturas:

Mínimo= 0.74m teslas

Máximo = 1.18 m teslas

Con estas lecturas al variar el reóstato de campo es posible detectar cuando este en un estado de operación optimo a un estado riesgoso. El parámetro que hay que cuidar es la corriente de excitación el cual está reflejado en el incremento de campo magnético en el generador.

A continuación se muestran algunas imágenes relacionadas con la prueba realizada, en la figura 5.21.



Figura 5.21 Pruebas realizadas en el laboratorio de máquinas eléctricas.

Es importante resaltar que las lecturas obtenidas en las zonas A y B presentan variaciones a razón de la vibración de las máquinas ya que estas zonas son laterales y no es óptimo para mantener este tipo de sensores el cual varía dependiendo de su posición; lo cual introduce errores de medición. Por esas razones se define ubicarlo en la zona de referencia.

En teoría si los 4 polos están ubicados geométricamente distribuidos en el estator de la máquina debería tener la misma lectura, pero ya que el sensor es un sensor de efecto hall hay que definir un punto en el cual este fijo y en un punto de máxima concentración del campo cerca de las bobinas; además que la carcasa está diseñada de tal forma que no permita que el campo magnético salga de interior de la máquina así como muchos aparatos electrónicos. Por todos esos factores es un poco complicado tener una buena lectura del campo. Sin embargo, para fines prácticos el objetivo se cumple satisfactoriamente.

A continuación, se muestra en la figura 5.22 nuestro como se instrumentó la parte de la adquisición de las señales de voltaje tanto de la fuente de CFE como del generador síncrono.

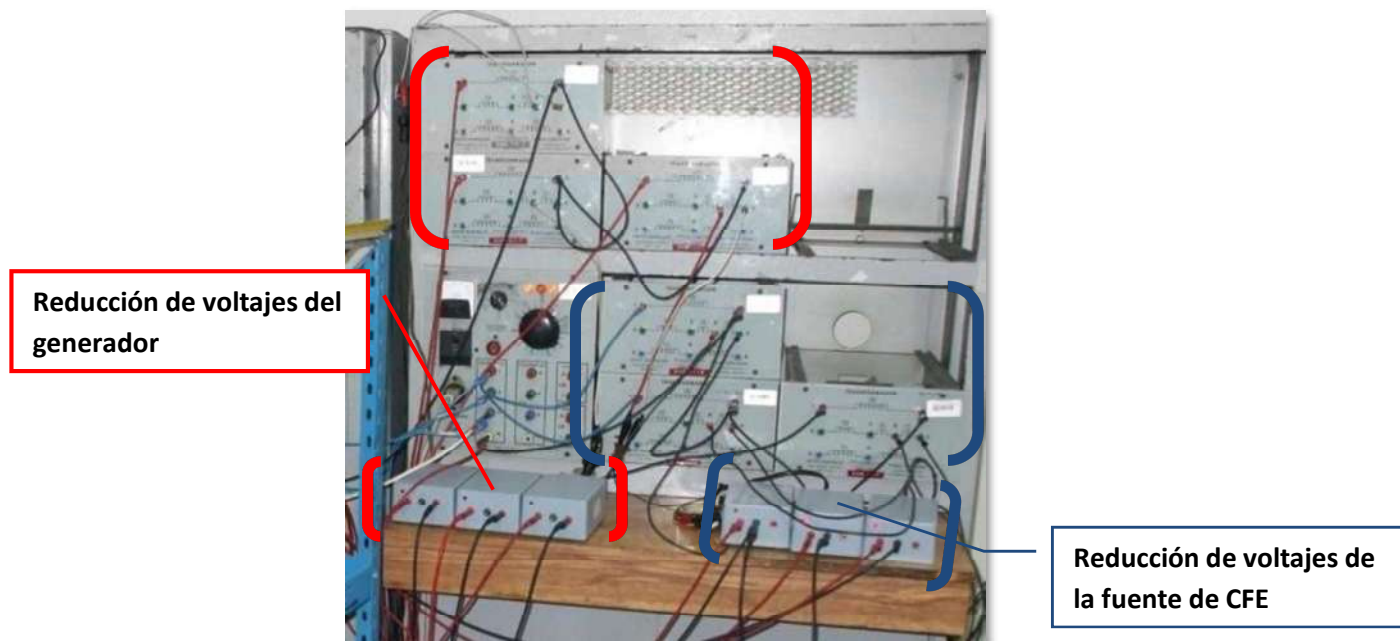


Figura 5.22 Instrumentación para la adquisición de voltajes.

Se realizó una conexión entre transformadores como reductores de voltajes por cada una de las fases a neutro como se muestra en la figura 5.23 para reducir el voltaje y poder conectarla a la tarjeta de adquisición de datos NI 6008.

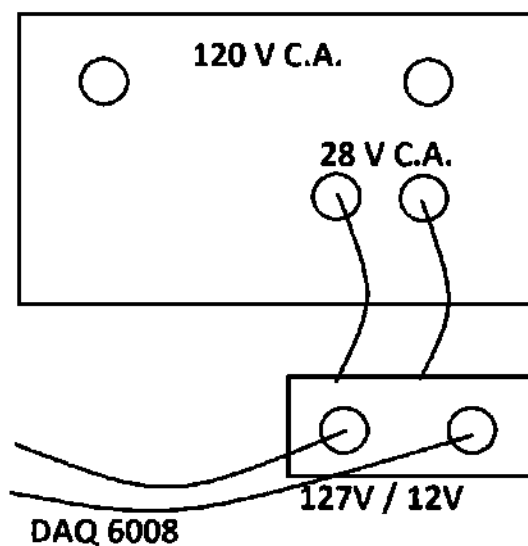


Figura 5.23 Diagrama de conexión para cada una de las fases del generador.

La finalidad de esta conexión es reducir el voltaje de 120 Volts a menos de 5 Volts para poder realizar la instrumentación virtual, obteniendo como resultado 3 Volts.

Para la adquisición de las señales de voltaje de la fuente de CFE se realizó la misma conexión pero con transformadores de 127 V a 24 V CA con tap central como se muestra en la figura 5.24.

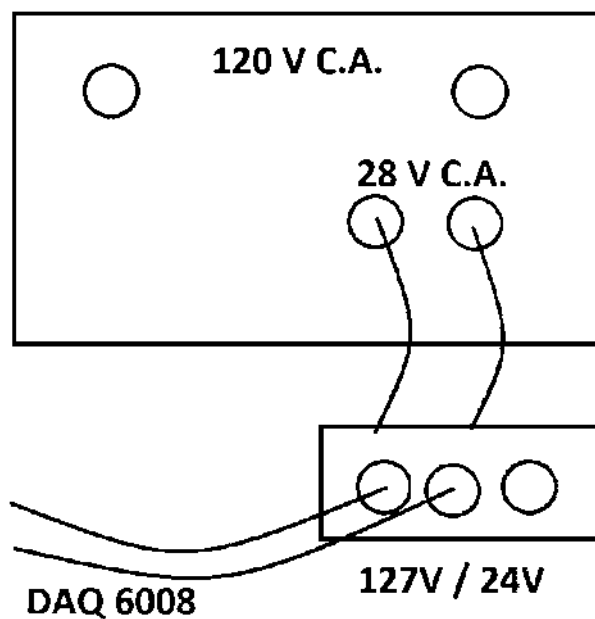


Figura 5.24 Diagrama de conexión para cada uno de las fases de la fuente de CFE.

Es necesario utilizar el tap central de transformador para obtener menos de 5 volts para la adquisición en la DAQ NI 6008, obteniendo como resultado 3.9 Volts.

De manera que para poder realizar la instrumentación virtual en el VI de sincronización es necesario tener protegida la tarjeta de adquisición de datos por medio de los transformadores los cuales son una conexión segura ya que es por medio de inducción magnética la reducción.

A continuación se muestra en la figura 5.25 la instrumentación y equipo montado para realizar la prueba.

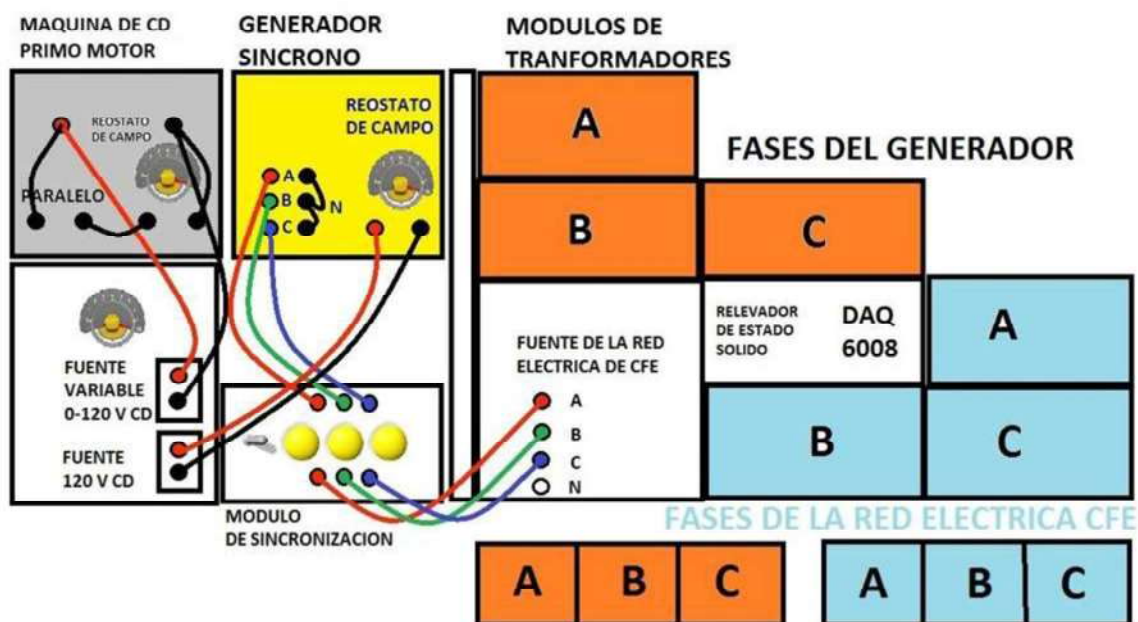


Figura 5.25 Diagrama de conexión entre los equipos, instrumentación, adquisición de datos y sincronización del generador a la red eléctrica.

Enseguida se muestra físicamente el equipo montado en la figura 5.26.

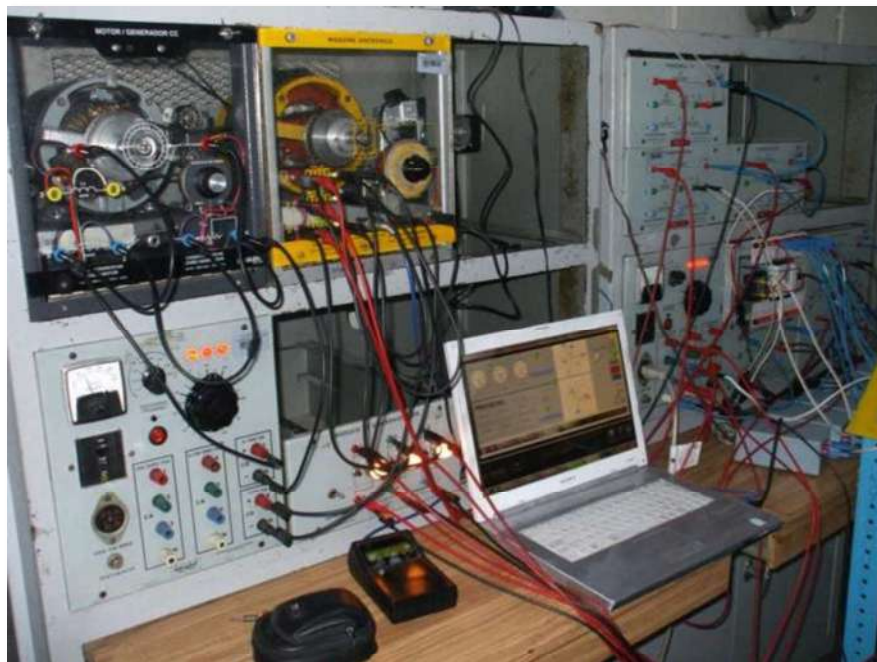


Figura 5.26 Equipo e instrumentación.

Es necesario describir cual fue la instrumentación virtual realizada como se describe a continuación.

5.3 Descripción del VI de sincronización

Para empezar a describir el VI hay que recordar lo presentado en el capítulo anterior, en el cual se describe una simulación de la sincronización del generador y la descripción de los SubVI's creados y bloques utilizados; los cuales de igual manera son utilizados en este VI donde ya obtenemos las señales de voltajes reales.

Para poder describir el diagrama de bloques es necesario dividir por etapas en el orden de la adquisición y proceso de las señales como se muestra a continuación en las figuras 5.27 y 5.28.

Se utilizaron 6 entradas analógicas las cuales están programadas como se muestra en la figura 5.27 empezando con las señales de voltaje de la fuente de CFE y enseguida las señales de voltaje del Generador síncrono.

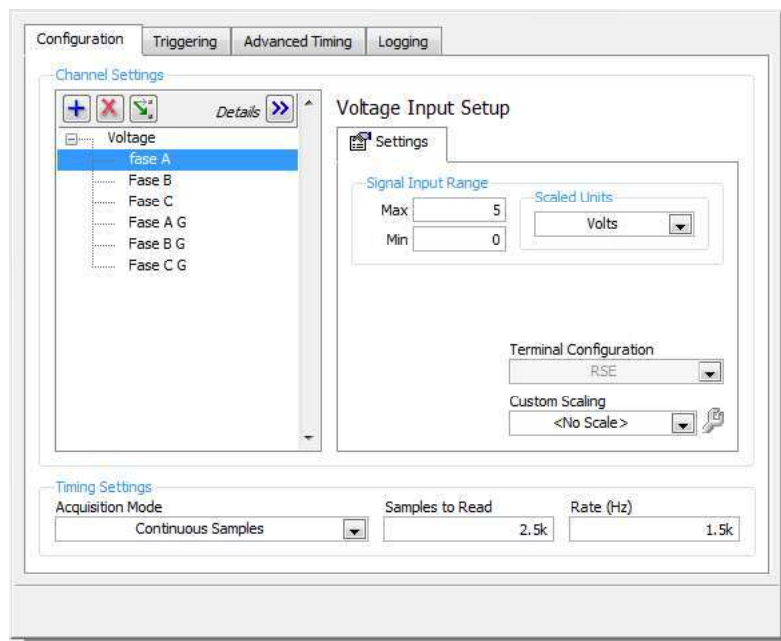


Figura 5.27 Orden de las señales adquiridas.

Se programaron una salida analógica de 5 volts la cual es requerida para activar el relevador de estado solido y poder llevar acabo la accion del módulo de sincronización con el contactor en cuenta sean cumplidas las condiciones para la sincronización.

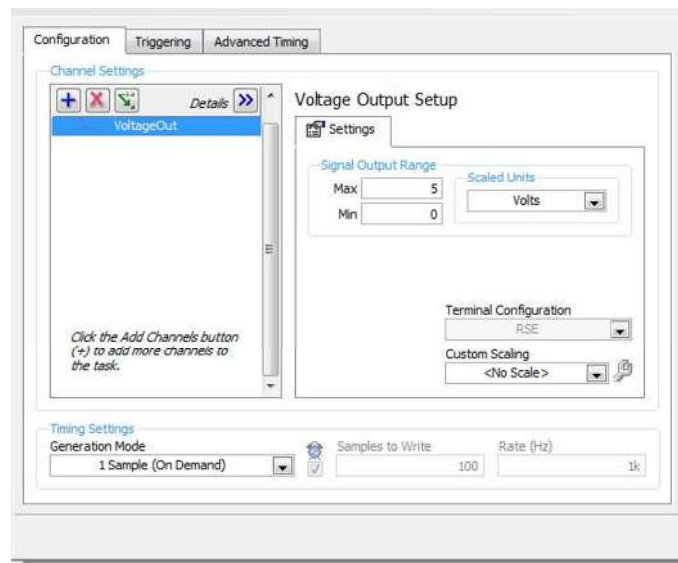
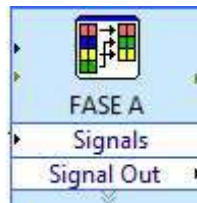


Figura 5.28 DAQ para salida a analógica.

La instrumentacion virtual propuesta está desarrollada de la siguiente manera:



Seleccionamos la señal para separarla en sus elementos básicos como es su magnitud frecuencia y fase, para esto es utilizado el bloque llamado ***select signal express VI y Tone Measurements*** que se muestra en la figura 5.29 los cuales son muy practicos para conectar la intrumentación virtual como son los voltímetros medidores de frecuencia, fases y gráficas de la señales.

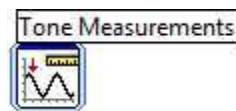


Figura 5.29 select signal express y Tone VI.

El objetivo de introducir estos voltimemtros es para tener monitoreado a cada momento el estado de las variables para llevar acabo la sincronización.

Como se observa en la figura 5.30 podemos tener dos referencias sobre la lectura una gráfica con una aguja y una pantalla digital esto ayuda mucho a visualizar al mismo tiempo mucho más variables ,a simple vista como si se teviera físicamente los equipos de medición dispersos.



Figura 5.30 Grafica de aguja.

Una vez que la instrumentación esta conectada a la señal que queremos mostrar tenemos que *acondicionar la señal* para obtener los datos reales, a ésto le llamo, ajuste de compensación o calibración; esto es ya que al nosotros bajar los voltajes existe una relación de transformación de la señal real a la que tenemos en la adquisición. Para realizar este ajuste tenemos que considerar la relación de transformación en los transformadores y buscar un factor el cual al multiplicar la señal obtendremos el valor más cercano al valor real.

Como se muestra en la figura 5.31 existen bloques de operaciones matemáticas para realizar esta compensación y calibrar nuestra señal en un dato confiable.

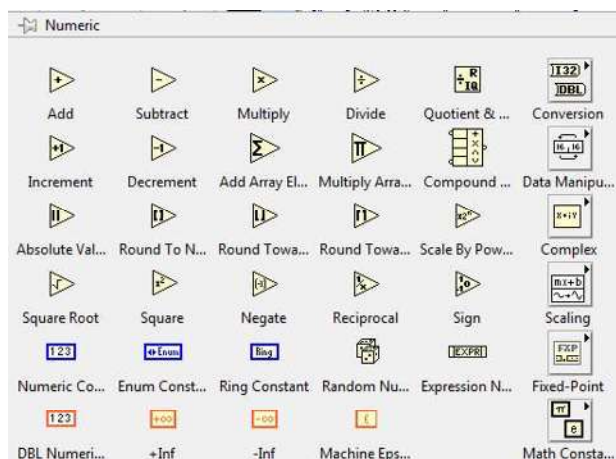


Figura 5.31 Bloques de operaciones matemáticas.

Esta paleta muestra todos los operadores matemáticos para realizar la compensación necesaria con el fin de tener una lectura lo más real posible mejorando así, el resultado de la instrumentación virtual.

En mi caso fue necesario realizar una operación de multiplicación de la señal para introducir la compensación por la reducción de voltaje para encontrar el valor óptimo, se utilizó un control numérico el cual se variaba mientras comparaba el valor real de la señal en un multímetro teniendo como resultado un valor en la fuentes de CFE una compensación de 23.9 y para los bloques de las señales del generador quedo de 27.3.

Esta diferencia entre las compensaciones se debe a los transformadores de 127V a 24 V y los de 127V a 12 V respectivamente en la instrumentación física.

Después de acondicionar la señal se presenta la etapa programación de las condiciones de sincronización, en la cual se llevará a cabo las comparaciones de las señales para determinar si realmente se cumple la condición. Para realizar este proceso fue necesario realizar un SubVI que se muestra en la figura 5.32 el cual recibe las señales acondicionadas y realizar la operación necesaria para determinar si esta dentro de las condiciones sustituyendo el funcionamiento del módulo de sincronización.

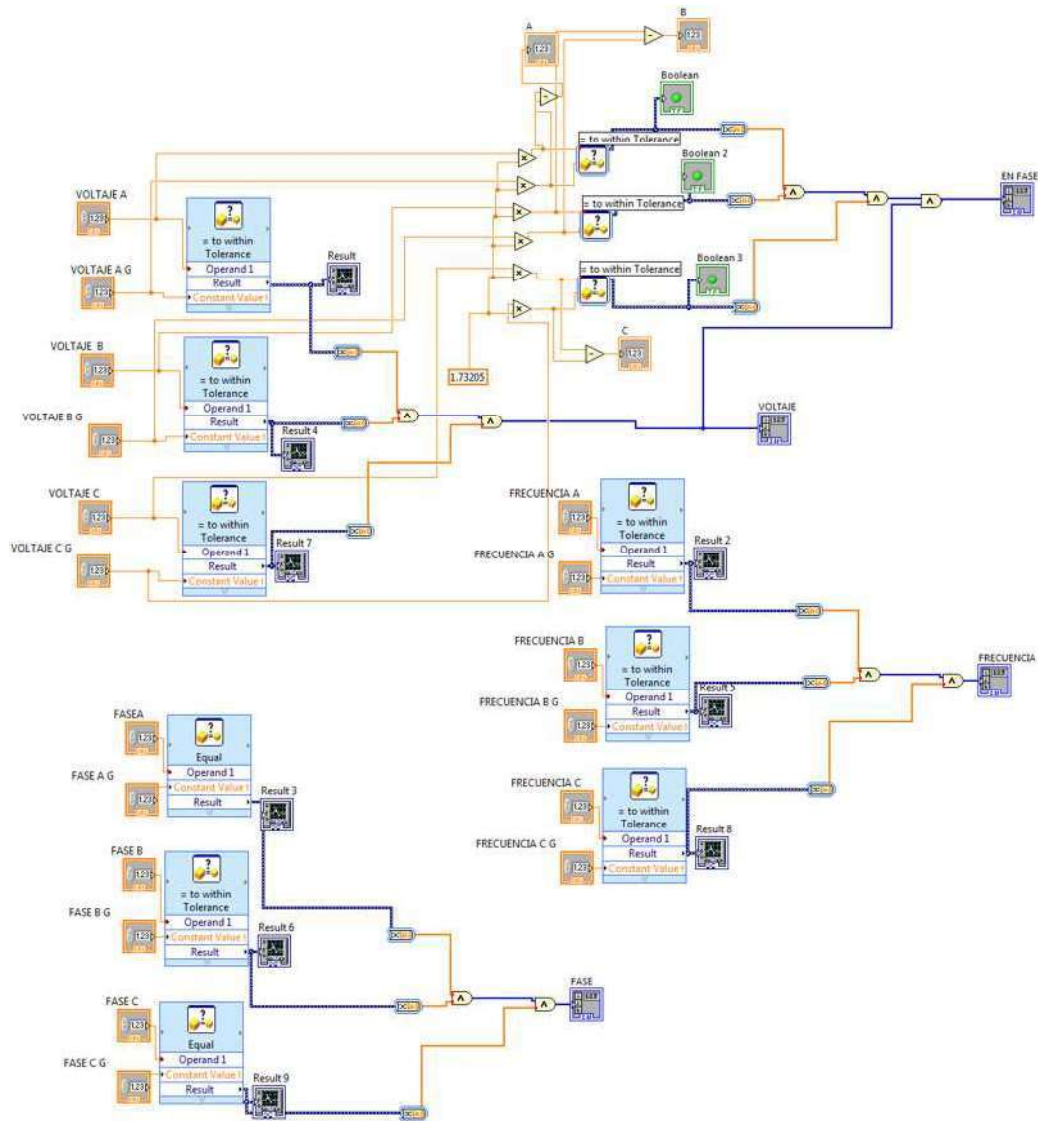


Figura 5.32 Sub VI de módulo de sincronización.

Es importante mencionar que en este subVI llamado *Comparación de V_F por fase* realiza la comparación por fase de cada una de las señales adquiridas tanto de la fuente de CFE como del Generador síncrono conforme las condiciones de igualdad de voltajes, frecuencia y fase se cumplan siendo de gran importancia tener una frecuencia con un margen no más del 0.3 de diferencia, así como una secuencia de fases correcta.

Adicionalmente, se realiza el cálculo de los voltajes de línea para determinar la diferencia de voltaje entre fases, esto ayuda a visualizar la secuencia al presentar una pequeña diferencia de voltaje entre las fases de CFE y las del Generador; esta diferencia la puede ser ajustada.

El subVI es introducido al diagrama de bloques del VI de sincronización el cual tiene la siguiente estructura que se ilustra en la figura 5.33.

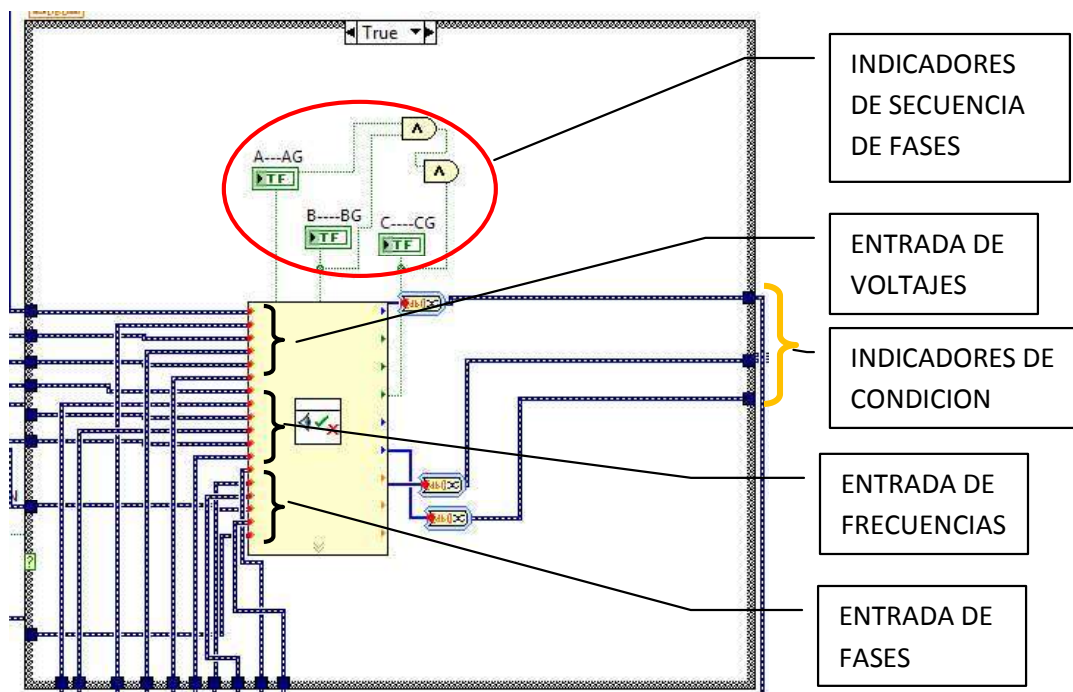


Figura 5.33 Bloques del VI de sincronización.

Este es el punto clave para que nuestro VI funcione correctamente ya que es la parte donde sustituimos el módulo de sincronización. Las consideraciones importantes son los parámetros de la norma de CFE para la conexión del generador al buz infinito.



Figura 5.34 Pantalla de sincronización.

En la práctica se realizó el ajuste de las condiciones y la tolerancia entre cada una de las comparaciones para poder llevar a cabo la sincronización en condiciones reales.

En la figura 5.34 se observa que como sólo dos de las condiciones se han cumplido ya que la secuencia de fases no es la correcta. Conforme los ajustes se realizan el VI sufre cambios en beneficio de una mejor visualización por lo que va cambiando.

Después de esta etapa de acondicionamiento de las condiciones de sincronización entramos a la etapa de toma de decisiones como se muestra a continuación.

En la figura 5.35 se ilustra el diagrama interno de las diferentes etapas de monitoreo, sincronización y operación.

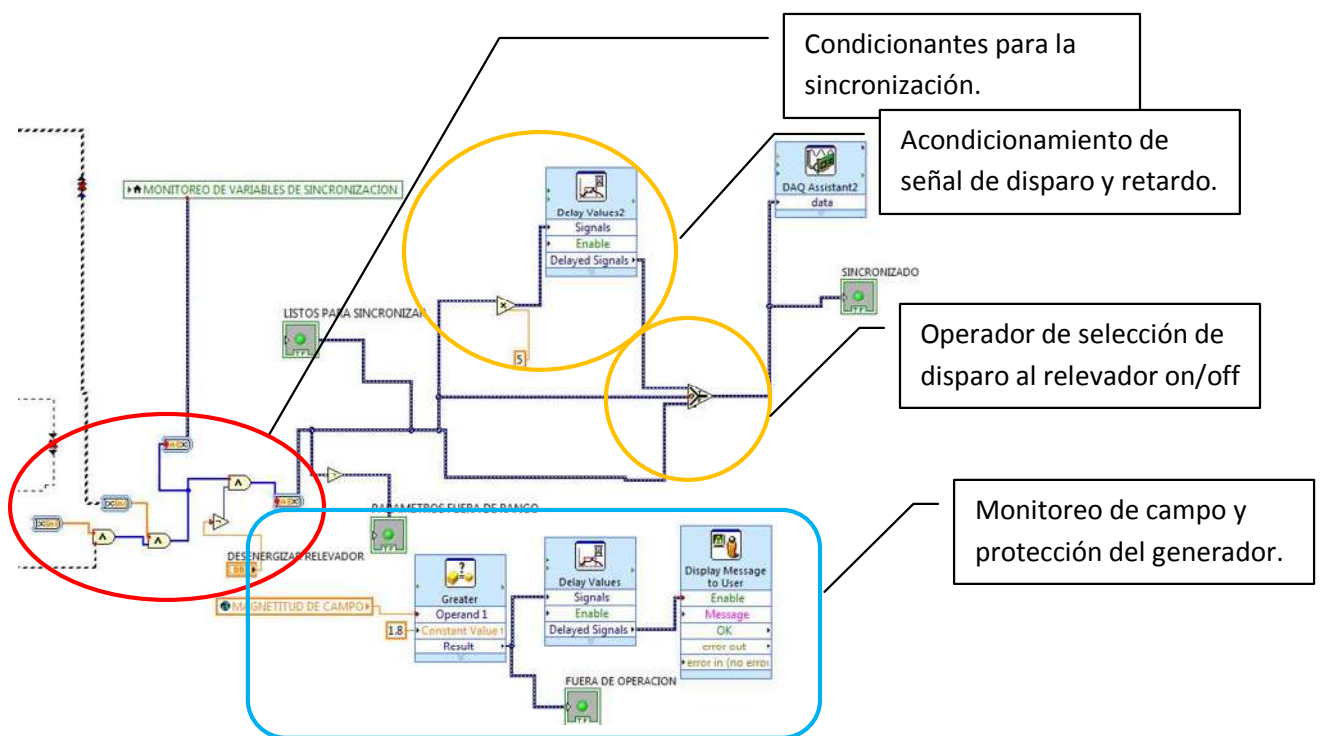


Figura 5.35 Descripción de las etapas.

En esta etapa se toman las decisiones, si las tres condiciones de sincronización son cumplidas estamos listos para sincronizar lo cual indico que el generador está en condiciones óptimas para sincronizarse, adicionalmente tiene que cumplirse que la lectura del campo magnético este dentro del rango óptimo de operación así y sólo así se accionará una salida analógica de 5 volts la cual accionará un relevador de estado sólido para energizar una contactor con un grupo de contactos los cuales se cerrarán y sincronizará el generador al buz infinito de CFE.

Para llevar cabo la protección del generador se describe un caso en el cual se introducen los parámetros obtenidos del experimento para encontrar la mejor posición del sensor de campo magnético el cual proporciona los datos nominales de la máquina de manera indirecta por medio del campo magnético.

El campo magnético es tomado de el VI llamado *recolección de datos de campo* que se muestra en la figura 5.36 en el cual creamos una variable global llamada MAGNITUD DE CAMPO. Este realiza el monitoreo del generador dependiendo del cambio de magnitud del campo.

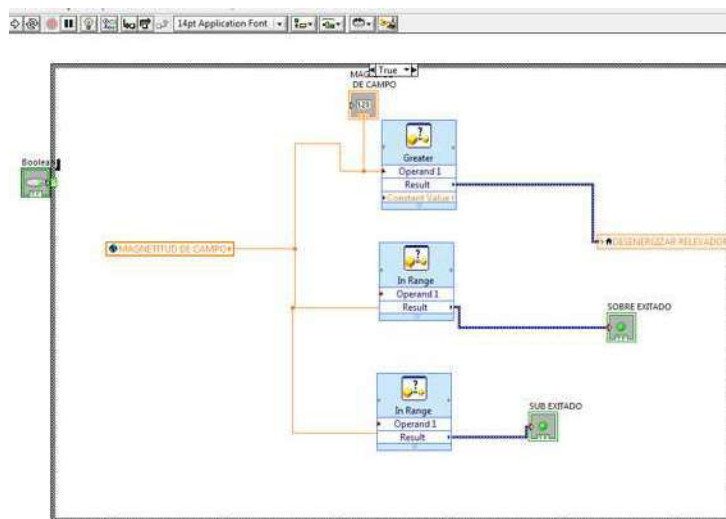


Figura 5.36 Recolección de Datos.

De manera que los parámetros obtenidos en base al estudio al generador se ilustran en la figura 5.37.

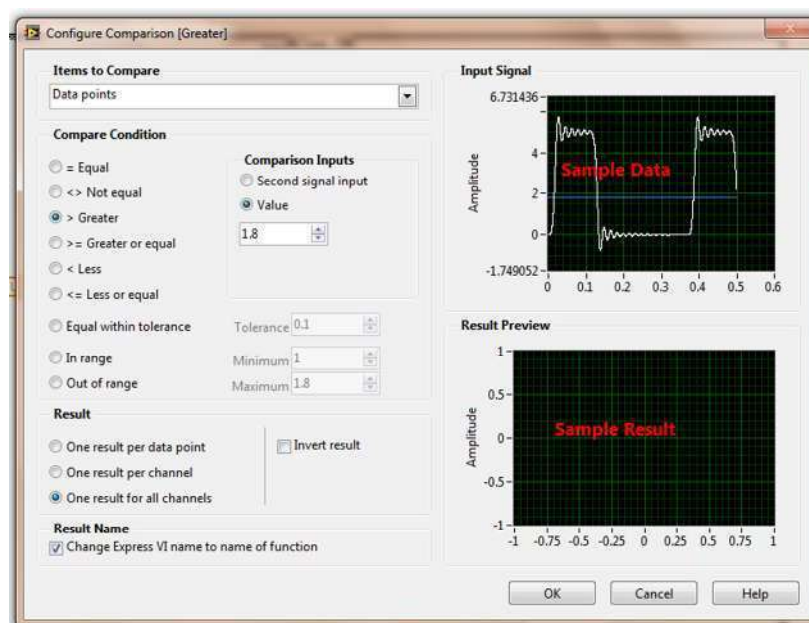


Figura 5.37 Aplicación de los parámetros de la recolección de datos

Al sobre excitar demasiado al generador podemos dañarlo; el exceso de carga provoca demasiada corriente al generador por lo que programamos los parámetros de protección conforme a los resultados obtenidos en la prueba. La magnitud máxima en la cual el generador está en operación es de 1.8 m teslas, por lo tanto, al rebasar ese parámetro se activa la protección y saca al generador de la red.

Para realizar la desconexión es necesario crear una variable local la cual llamamos *desernegizar relevador* esta actúa como condición dentro de las condiciones de sincronización.

El generador síncrono es utilizado en ocasiones para proporcionar o consumir potencia reactiva es decir, subexcitado o sobre excitado variando el reóstato de campo por lo cual se introdujo dos indicadores los cuales nos dicen en qué condiciones esta a partir del estado de operación del generador como se muestra en las figuras 5.38 y 5.39.

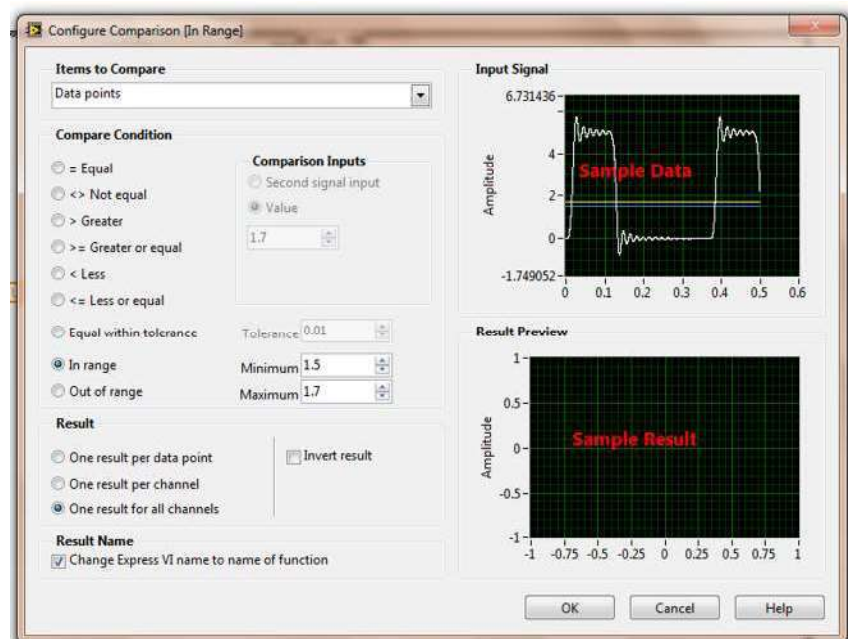


Figura 5.38 Generador sobrexcitado.

Tenemos que mientras el campo magnético se encuentre dentro del rango de 1.5 a 1.7 m teslas el estado de generador es Sobrexcitado y se encenderá un indicador.

De igual manera cuando el campo magnético se encuentre entre 1.1 y 1.3 m teslas se encenderá un indicador del estado de subexcitado del generador como se muestra en la figura 5.39.

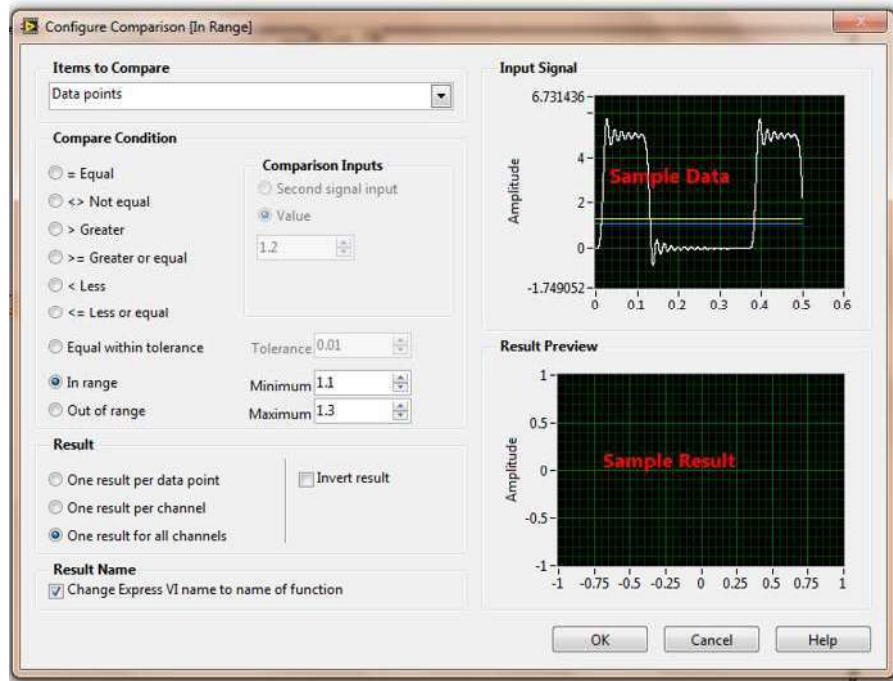


Figura 5.39 Generador subexcitado.

Gracias al estudio realizado a la maquina síncrona con el sensor de campo magnético se pudo determinar estas tres condiciones del generador las cuales son muy importantes para el control y instrumentación del sistema de sincronización de manera virtual.

El diagrama general por etapas del sistema se muestra en la figura 5.40, y el panel frontal en la figura 5.41.

Diagrama de bloques por etapas.

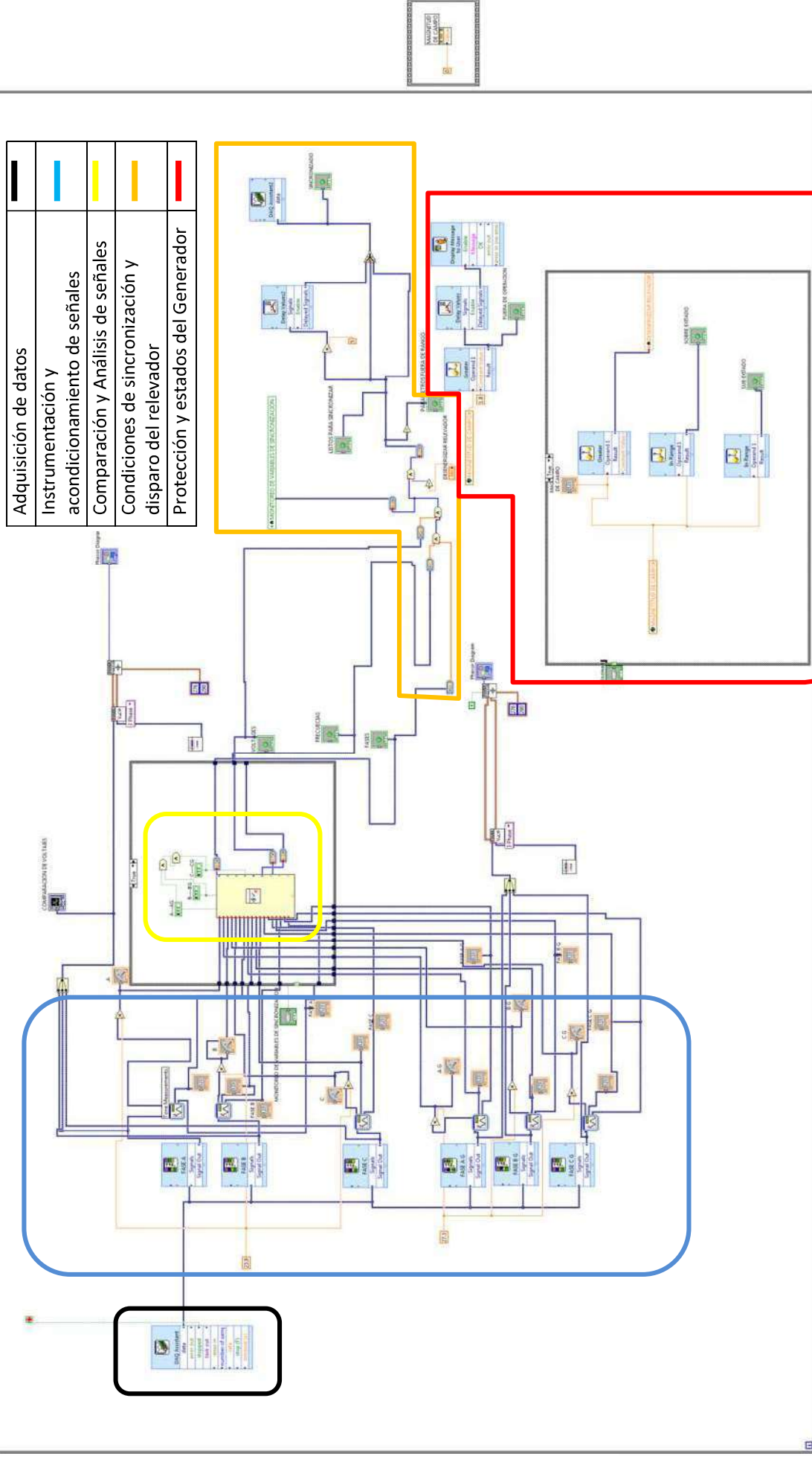


Figura 5.40 Diagrama de bloques del VI de sincronización



Panel frontal de Instrumentación virtual para la Sincronización.

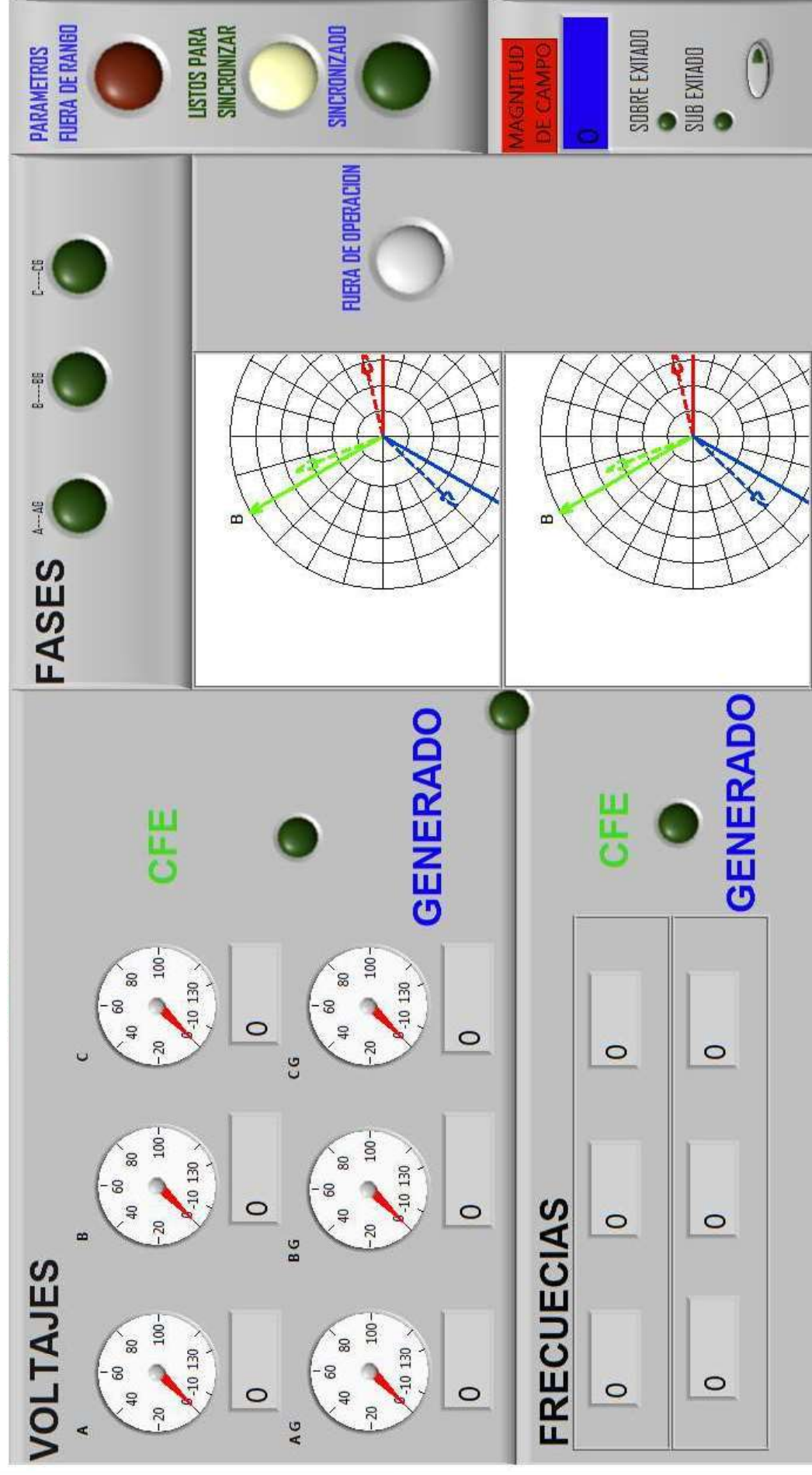


Figura 5.41 Panel frontal del VI de sincronización.

Como se pudo observar en el panel frontal del VI de sincronización tenemos todos los elementos necesarios para monitorear el generador y compararlo con la red eléctrica de CFE facilitando así el proceso de sincronización.

Como último dato de la descripción del VI cabe resaltar que es necesario dar un tiempo para que realice la sincronización por algún imprevisto por lo que fue necesario retrasar la señal de disparo al relevador, este puede ser programado por el usuario si así lo requiere sólo sustituyendo en el de la figura 5.42 bloque el valor del tiempo de retardo.

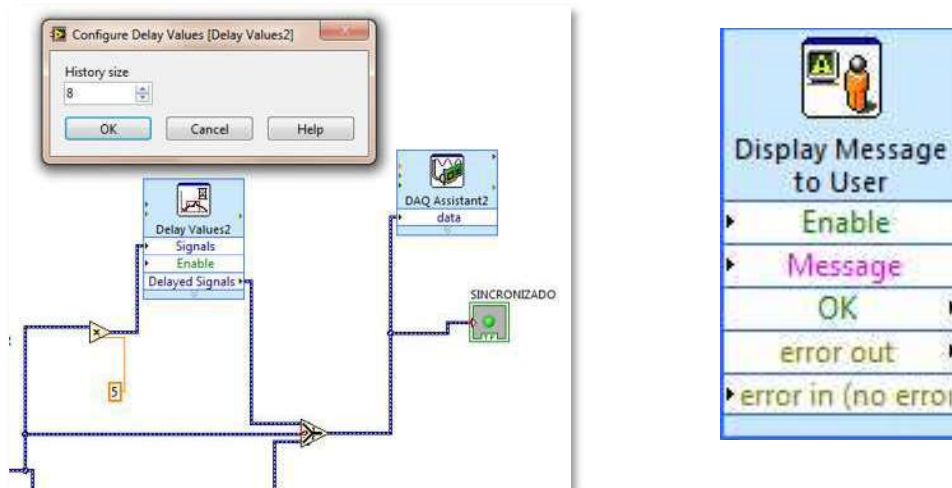


Figura 5.42 Bloque de tiempo de retardo.

De igual manera se utiliza un retardo de tiempo para determinar si sale de operación el generador y mandar un mensaje de alerta y reiniciar el proceso.

5.4 Pruebas y desarrollo del funcionamiento del VI de sincronización

La base para la construcción del VI fue tomado de la simulación realizada en el capítulo 4 de esta tesis por lo que se muestra en la figura 5.43 la evolución del VI sobre el proceso de acondicionamiento de los parámetros reales.



Figura 5.43 Sistema completo.

Inicialmente se introducen los voltímetros de las tres fases tanto del Generador como de CFE, por lo tanto, tenemos 6 medidores de voltaje y 6 de frecuencia así como un diagrama fasorial para probar que esté funcionando de manera correcta.

Se puede observar en la figura 5.44 que tenemos los mismos indicadores que el VI simulado, por lo que tendremos indicadores de condiciones y el indicador numérico del sensor de campo magnético.

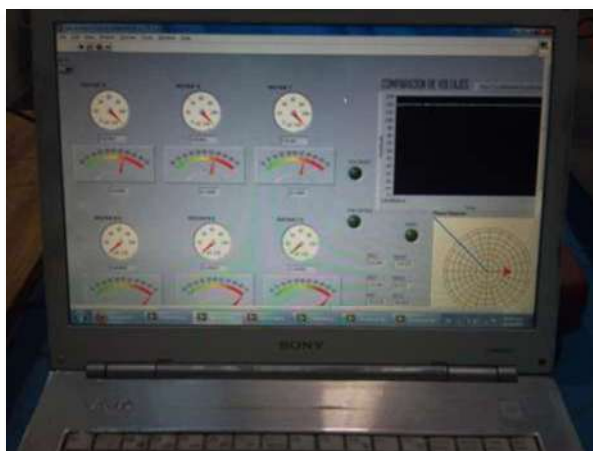


Figura 5.44 Panel frontal de medidores de voltaje y frecuencia.

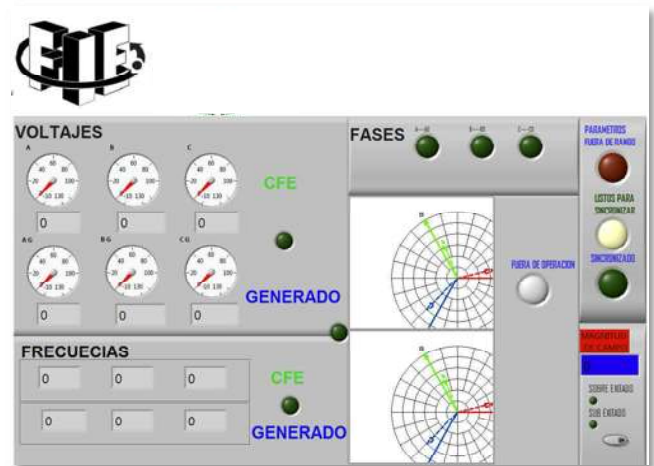
Al realizar las pruebas se tuvo que realizar cambios como reorganizar los voltímetros y quitar los indicadores de frecuencia a sólo un indicador numérico para tener una mejor visualización de todos los parámetros.

Por experiencia fue necesario hacer más grandes los indicadores numéricos de tal forma que sea mejor la visualización.

se introdujo el diagrama fasorial del Generador, acomodar por módulos los indicadores y gráficas para tener organizada la instrumentación, también se introdujeron indicadores de las fases los cuales nos indican si no hay secuencia de fases y es necesario invertirlas del generador, de tal forma que queda como se muestra en la figura 5.45.



a) Etapa de acondicionamiento y desarrollo.



b) Programa final.

Figura 5.45 Descripción final del sistema.

Como podemos observar el VI final está estructurado de manera que podamos visualizar todos los parámetros en una sola pantalla con la finalidad de tener un monitoreo más confiable.

Para garantizar que no ocurra que la conexión del Generador de manera forzada por algún error en la programación y en la etapa de prueba se estuvo trabajando con el relevador sin conexiones en los contactos, como se muestra en la siguiente figura 5.46.



Figura 5.46 Pruebas de disparo y temporizador para garantizar el buen funcionamiento del sistema.

En seguida se muestran los resultados obtenidos a razón de la prueba final. Se puso en marcha la sincronización la cual fue un éxito de manera que el generador está conectado a la red eléctrica de CFE como se observa en la figura 5.47.



Figura 5.47 Operación de sincronización.

Es importante mencionar que no fue posible tomar fotografías del proceso de sincronización por que tome un video tutorial en el cual se observa el proceso para llegar a la sincronización.

Aquí unas imágenes del video tomado del sistema operando en las figura 5.48 y 5.49.



Figura 5.48 Proceso de monitoreo.

Inicialmente es la frecuencia la cual llevamos al generador en su estado óptimo.

Afortunadamente en la prueba la secuencia de fases no fue necesario cambiarlas, por lo que prácticamente solo fue necesario llevar a los niveles de voltaje óptimo para estar listos para sincronizar como se muestra en la figura 5.49.



Figura 5.49 Operación del sistema.

Para poder sincronizar es necesario activar la parte de monitoreo de campo magnético el cual inicia después la alerta de *listos para sincronizar*.

Una vez sincronizado podemos variar el reóstato de campo para sobre excitar o sub excitar el Generador como se muestra en la figura 5.49. Podemos notar que tenemos de igual manera la magnitud del campo magnético en la vista del panel frontal.



Figura 5.50 Operación del generador.

Al estar monitoreando el campo magnético si seguimos sobre excitando al generador estamos suponiendo que sería el comportamiento con carga de tal forma que rebase sus parámetros nominales, por lo tanto estaríamos forzando al Generador y propiciando que la protección opere como se muestra en la figura 5.50 de la derecha la cual manda un aviso.

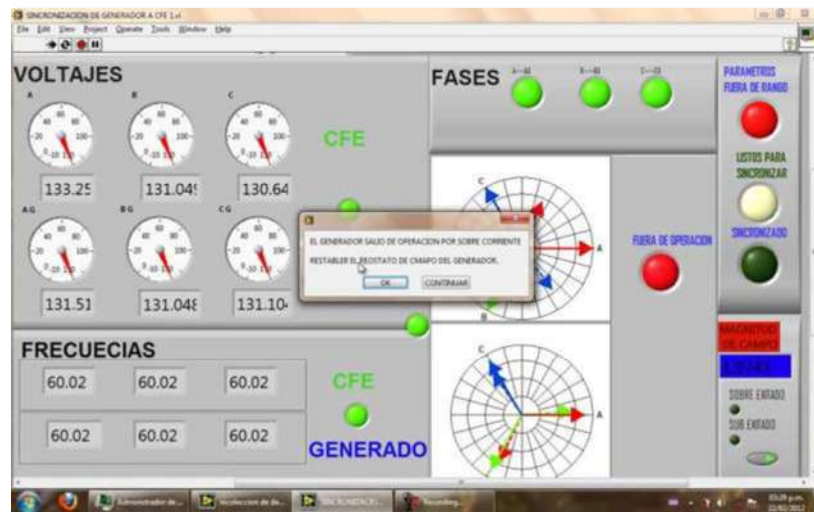


Figura 5.51 Generador con protección.

Después del aviso está programado para determinar si persiste la sobre carga y enseguida deshabilita al generador sacándolo de operación lanza una alerta de sobre carga y sugiere en nuestro caso que restablezcamos el reóstato de campo, como se indica en la figura 5.51.

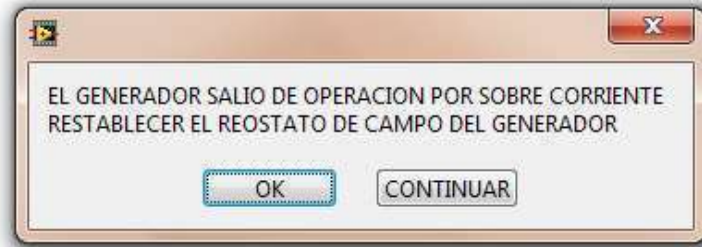


Figura 5.52 Indicador de restablecimiento.

Así mismo podríamos poner más protecciones dependiendo de las necesidades. Esto garantiza que el Generador no volverá a tratar sincronizarse hasta que el operador así lo determine y reiniciar el monitoreo.

Con esto termina la prueba final del VI de sincronización de manera satisfactoria.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La innovación tecnológica como son sensores, tarjetas de adquisición de datos, software etc. con el objetivo de mejorar el aprendizaje y desarrollar proyectos innovadores es un motivante esencial para el ingeniero electricista.

En particular la experiencia de trabajar con las simulaciones en el software de LabView, abre las puertas a un mundo muy amplio dentro de las aplicaciones de control con sus ventajas y desventajas, pero a final de cuentas innovadores.

Al realizar estos VI como los llaman en lenguaje de LabView encontré la flexibilidad de los bloques que ofrece para la manipulación de los diferentes tipos de datos, herramientas para filtrar señales en sus componentes básicas. La instrumentación mostrada es realmente buena ya que nos ofrece en una misma pantalla todos los parámetros.

En el proceso de armado de la instrumentación me encontré con contratiempos ya que obtuve una desventaja de este tipo de programación; por ser una programación visual requiere de procesamiento demasiado potente para aplicaciones que contengan ya un gran número de bloques que no pueden ser ejecutados al mismo tiempo en un mismo VI por lo cual es ineficiente ya que tenemos que correr los programas por separado. La solución a este problema fue el utilizar variables globales las cuales no son otra cosa que un VI donde se almacena esa variable la cual es mandada llamar como un subVI.

La pregunta que se presenta a menudo en los simuladores, es la parte de simulación en tiempo real. LabView es una herramienta potente ya que National Instrument proporciona una amplia gama de tarjetas de adquisición de datos; aquí la desventaja es el CPU la computadora en la cual se ejecute el VI. Existe una relación directa entre la tarjeta de adquisición y el procesador del CPU para obtener una buena medición en tiempo real. Tiempo real es un término el cual significa que tendremos una respuesta o lectura casi instantánea ya que el tiempo no se detiene.

En realidad tenemos sistemas muy cercanos a la adquisición de datos en tiempo real ya que el procesar y transformar las señales analógicas a digitales tardan un tiempo, es ahí donde radica las diferentes tipos de tarjetas de adquisición de datos a razón del tipo de sensor y su conversión análogo digital y viceversa.

A razón de la experiencia adquirida con la simulación mostrada en el capítulo 4 la realización del VI de sincronización cumplió con mis expectativas ya que se logro alcanzar satisfactoriamente con los objetivos planteados puede visualizar los voltajes, frecuencias y diagrama de fases instrumentación necesaria para poder sincronizar de manera segura un generador a la red eléctrica de CFE.

Como experiencia se que desarrolle muchas cualidades del Ingeniero ya que pude abarcar distintas aéreas de la ingeniería eléctrica, puede realizar la sincronización por lo cual requerí de conocimientos básicos de Teoría electromagnética, Máquinas eléctricas, Control de máquinas, programación de computadoras, instrumentación y lo más importante aplicar en conjunto los conocimientos adquiridos.

Utilizando el sensor de campo magnético se obtiene un parámetro importante sobre el estado del generador síncrono-bus infinito, determina su estado de operación ya sea sub-excitado o sobre excitado. Ahora se tiene una opción más para obtener estos parámetros importantes de manera visual. Este tipo de tecnología es una nueva herramienta para el Ingeniero el cual busca siempre innovar.

6.2 Recomendaciones

Conforme el desarrollo del VI los objetivos principales comienzan a tomar otra perspectiva ya que al cumplir satisfactoriamente con lo planeado van surgiendo más y más ideas lo cual me llevó a tomar decisiones y replantear el objetivo sin salir del principal.

Algunos de los cambios que realice fue el nombre ya que conforme avanzaba me di cuenta que el tema principal ya no era el sensor de campo sino todo lo que conlleva desarrollar el uso de el mismo y las demás herramientas como lo es LabVIEW.

La ingeniería como su nombre lo dice es ser ingenioso lo cual es una cualidad única, en mi experiencia propia abre las puertas a la investigación al ser un individuo autodidacta con ganas y motivación para mejorar en todos los aspectos es un orgullo decir y ser Ingeniero.

De acuerdo a la experiencia adquirida se me presentó una problemática al terminar de realizar el VI, ya que al estar trabajando por varios minutos y teniendo ejecutándose mas de un VI el procesador de mi PC fue insuficiente para trabajar por varias horas, por lo que recomiendo revisar el consumo de recursos de la aplicación que queramos usar y prevenir fallas en las pruebas de adquisición de datos por cuestiones técnicas como estas:

- Uso del procesador al 100% ejecutando los dos VI simultáneamente recolección de datos de campo magnético y las variables de sincronización.
- Memoria de la tarjeta de video insuficiente al utilizar demasiado espacio mediante la implementación de instrumentación virtual.

BIBLIOGRAFIA

1.-Teoría Electromagnética

William Hayt

Mc Graw-Hill

2.-Máquinas Eléctricas 3ª edición

Stephen J. Champ

Mc Graw-Hill

3.-Física II

Robert Resnick

David Halliy

CECSA

4.-Física II

Raymond A. Serway

Mc Graw-Hill

5.- <http://mexico.ni.com/>

6.- <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201986>

7.- <http://www.vernier.com/products/interfaces/labpro/>