

**SIMULACIÓN DE UN GENERADOR DE PERTURBACIONES DE
LOS PARAMETROS DE CALIDAD DE LA POTENCIA
ELÉCTRICA PARA VERIFICAR LA CONFORMIDAD CON EL
ESTÁNDAR CEI 61000-4-30**

**Jorge Enrique Cobos Suárez
Juan Carlos Vargas Parra**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2009**

**SIMULACIÓN DE UN GENERADOR DE PERTURBACIONES DE
LOS PARAMETROS DE CALIDAD DE LA POTENCIA
ELÉCTRICA PARA VERIFICAR LA CONFORMIDAD CON EL
ESTÁNDAR CEI 61000-4-30**

Jorge Enrique Cobos Suárez

Juan Carlos Vargas Parra

Tesis de grado para optar al título de ingeniero electricista

Director

Profesor Gabriel Ordóñez Plata

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRONICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2009

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios, ya que gracias a el todo esto ha sido posible

A mis padres por la formación, el amor y apoyo incondicional que siempre me han brindado, dándome la fortaleza necesaria para superar todas las dificultades.

A mi director de proyecto, el profesor Ph.D. Gabriel Ordóñez Plata, que fue un gran guía en el desarrollo del proyecto, además que es un ejemplo a seguir, tanto profesionalmente como humanamente.

Jorge Enrique Cobos Suárez

AGRADECIMIENTOS

A Dios que todo lo puede.

A los profesores Gabriel Ordóñez y Cesar Duarte que me guiaron durante el proceso para la realización del proyecto.

A mis padres por su confianza y apoyo, pilar fundamental en la consecución de mis metas.

Juan Carlos Vargas P.

DEDICATORIA

A las personas que más quiero y se que son la que más me quieren, mis padres y mis hermanas, a ellos se los debo todo.

Jorge Enrique Cobos Suárez

DEDICATORIA

A mis padres y a mi hermano.

Juan Carlos Vargas P.

TABLA DE CONTENIDO

	PÁG
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1 Fluctuaciones de Tensión	4
1.1.1 Interrupciones de Tensión	5
1.1.2 Sobretensión (Swell)	6
1.1.3 Huecos (Sags o Dips)	6
1.2 Parpadeo (Flicker)	7
1.3 Componentes Armónicas	9
1.4 Desbalances de Tensión	11
1.5 Ruido de las señales	12
1.5.1 Señal de Ruido Blanco o Gaussiano	12
1.5.2 Señal de Ruido Rojo	13
1.5.3 Señal de Ruido Rosado	13
1.5.4 Señal Ruido Marrón	14
1.5.5 Señal de Ruido azul	15
1.5.6 Señal de Ruido Violeta	15
1.5.7 Señal de Ruido de Cuantificación o Cuantización	16
1.5.8 Señal de Ruido de Redondeo	16
1.6 Filtrado de Señales	16
2. CARACTERÍSTICAS DEL SIMULADOR DE UN GENERADOR DE PERTURBACIONES	18
2.1 Programación de las Perturbaciones	18
2.1.1 Diagramas de Flujo	19
2.1.1.1 Diagrama de flujo del subprograma Configuraciones	19
2.1.1.2 Diagrama de flujo del subprograma Armónicos	21
2.1.1.3 Diagrama de flujo del subprograma Interarmónicos	21
2.1.1.4 Diagrama de flujo del subprograma Salida	22
2.1.1.5 Diagrama de flujo del subprograma Flicker	22
2.2 INTERFAZ GRAFICA	24
2.2.1 Interfaz Principal	25
2.2.2 Interfaz Armónicos	27
2.2.3 Interfaz Interarmónicos	27

2.2.4	Interfaz Ruido	28
2.2.5	Interfaz Desbalances	29
2.2.6	Interfaz Flicker	30
2.2.7	Interfaz Configuración de Graficas	31
2.2.8	Interfaz Salida	33
2.3	SIMULACIÓN GENERADOR DE PERTURBACIONES TRIFÁSICO	33
3.	RESULTADOS OBTENIDOS	36
3.1	Ejemplos de Aplicación según norma IEC 61000-4-30 [4]	36
3.3	Ejemplo de señal con armónicos según norma IEC 61000-2-4 [12]	38
3.4	Ejemplo de señal con interarmónicos según norma IEC 61000-2-4 [12]	39
3.5	Ejemplo de señal con ruido	40
3.6	Ejemplo de señal con flicker	41
3.7	Ejemplo de señal con hueco de tensión, sobretensión e interrupción	42
4.	CONCLUSIONES	44
	BIBLIOGRAFÍA	46
	ANEXO A	47
	Algoritmos Utilizados	47
	ANEXO B	52
	MANUAL DEL USUARIO	52

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ejemplo de Fluctuaciones de Tensión.	5
Figura 2. Ejemplo de Interrupción de Tensión.	5
Figura 3. Ejemplo de Sobretensión.	6
Figura 4. Ejemplo de Hueco de Tensión.	7
Figura 5. Onda de tensión con Flicker.	8
Figura 6. Curva de irritación para el ojo humano.	8
Figura 7. Onda de tensión distorsionada por las componentes armónicas.	9
Figura 8. Onda de tensión distorsionada por las componentes interarmonicas.	10
Figura 9. Ejemplo de desbalance de tensión.	11
Figura 10. Ejemplo de Ruido Blanco.	12
Figura 11. Ejemplo de Ruido Rojo.	13
Figura 12. Ejemplo de Ruido Rosado.	14
Figura 13. Ejemplo de Ruido Marrón.	14
Figura 14. Ejemplo de Ruido Azul.	15
Figura 15. Ejemplo de Ruido Violeta.	16
Figura 16. Diagrama de flujo del algoritmo Configuraciones.	20
Figura 17. Diagrama de flujo del algoritmo Armónicos.	21
Figura 18. Diagrama de flujo del algoritmo Interarmónicos	22
Figura 19. Diagrama de flujo del algoritmo Salida.	23
Figura 20. Diagrama de flujo del algoritmo Flicker.	23
Figura 21. Diagrama de flujo de la interfaz principal.	25
Figura 22. Interfaz Principal de Generador de Perturbaciones.	26
Figura 23. Interfaz Armónicos.	27
Figura 24. Interfaz Interarmonicos.	28
Figura 25. Interfaz Ruido.	29
Figura 26. Interfaz Desbalances.	30
Figura 27. Interfaz Flicker.	31

Figura 28. Interfaz configuración de Graficas.	32
Figura 29. Interfaz Principal.	32
Figura 30. Señal resultante de la Simulación.	33
Figura 31. Cuadro de datos de entrada.	34
Figura 32. Sistema Trifásico Balanceado.	35
Figura 33. Señal resultante de la adición de las componentes armónicas.	35
Figura 34. Señal resultante.	37
Figura 35. Señal resultante de la suma de las componentes armónicas.	38
Figura 36. Señal resultante de la componente fundamental y armónicas.	38
Figura 37. Señal resultante de la suma de las componentes interarmónicas.	39
Figura 38. Señal resultante de la componente fundamental e interarmónicas.	39
Figura 39. Señal resultante.	40
Figura 40. Ruido blanco.	40
Figura 41. Señal Resultante.	41
Figura 42. Señal de Flicker.	41
Figura 43. Señal Resultante.	42
Figura 44. Señal con Perturbaciones.	42
Figura 45. Señal Resultante.	43

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Algoritmos Utilizados.

Anexo B. Manual del Usuario.

RESUMEN

TÍTULO:

SIMULACIÓN DE UN GENERADOR DE PERTURBACIONES DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA PARA VERIFICAR LA CONFORMIDAD CON EL ESTÁNDAR CEI 61000-4-30.*

AUTORES:

JORGE ENRIQUE COBOS SUÁREZ **
JUAN CARLOS VARGAS PARRA **

PALABRAS CLAVES:

Armónicos, Calidad de potencia, Desbalances, *Flicker*, Generador, Interarmónicos, Interfaz Gráfica, Perturbaciones.

DESCRIPCIÓN:

La calidad de la energía eléctrica es un tema relativamente nuevo, que ha tomado fuerza en Colombia luego de una serie de resoluciones expedidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), la cual obliga a los operadores de red a mantener monitoreada la energía eléctrica que entregan a sus usuarios, donde las perturbaciones de energía eléctrica deben estar dentro de unos umbrales establecidos y en caso de salir de estos umbrales tomar las medidas necesarias para resolver estos problemas, dichas resoluciones están basadas en las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), es en este punto donde un generador de perturbaciones toma importancia, ya que estas normas dan los márgenes de error e incertidumbre que debe tener los equipos de medida, en base a unas condiciones de ensayo, lo cual solo se logra con un equipo especial (un generador de perturbaciones). Este trabajo presenta el diseño y elaboración de un simulador de perturbaciones de los parámetros de calidad teniendo en cuenta las señales de prueba que propone la norma IEC 61000-4-30 para establecer si un equipo de monitorización de la calidad de la energía eléctrica cumple con las especificaciones de clase tipo A ó tipo B. En el documento se muestra el diagrama de flujo de los algoritmos programados dando una breve descripción del funcionamiento de cada uno, así como la presentación final de la interfaz gráfica (simulador–usuario) programada, explicando cómo se debe usar y configurar cada uno de los parámetros del simulador para obtener resultados adecuados.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Ph.D. Gabriel Ordóñez Plata

ABSTRACT

TITLE:

SIMULATION OF A GENERATOR FOR INTERFERENCE OF THE PARAMETERS OF ELECTRIC POWER QUALITY TESTING FOR COMPLIANCE WITH THE STANDARD IEC 61000-4-30 . *

AUTHORS:

JORGE ENRIQUE COBOS SUÁREZ **
JUAN CARLOS PARRA VARGAS **

KEY WORDS:

Harmonics, Power Quality, Unbalances, Flicker, Generator, interharmonics, GUI, disturbances.

DESCRIPTION:

The quality of electricity it is a relatively new issue that has taken hold in Colombia after a series of resolutions issued by the Committee on Energy and Gas Regulation (CREG), which requires network operators to maintain the monitored electrical energy delivered to its user where power disturbances must be within the thresholds set out and if these thresholds take the necessary steps to resolve these issues, those decisions are based on the rules of the International Electrotechnical Commission (IEC), is at this point where a generator of disturbances becomes important, as these rules are the margins of error and uncertainty must have the equipment for measurement, based on test conditions, which can only be accomplished with a special equipment (a generator of disturbances). This paper presents the design and development of a simulator disruptions of quality parameters in view of the test signals to IEC 61000-4-30 proposes to establish if a team monitoring the quality of electricity meets class specifications type A or type B. The paper shows the flow chart of algorithms programmed to give a brief description of each operation and the final presentation of the graphical interface (simulator-user) program, explaining how to use and configure each parameters of the simulator to obtain adequate results.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Ph.D. Gabriel Ordóñez Plata

INTRODUCCIÓN

La verificación del adecuado funcionamiento de un equipo de medida requiere de comparaciones, las cuales se pueden realizar ya sea con otro instrumento de medida de mejores prestaciones en procesos de calibración o mediante intercomparación o con un sistema capaz de generar las diferentes perturbaciones de la calidad de la energía eléctrica que estima el equipo de monitorización.

Las dos opciones sirven de referencia para establecer características del instrumento de medida. Sin embargo, la comparación con otro instrumento de medida requiere que se disponga de un proceso metrológico que garantice la trazabilidad del patrón de medición a otros patrones de referencia, el cual, para los parámetros de calidad de la energía está hasta ahora en construcción.

Para tener un adecuado proceso metrológico es necesario disponer de un generador de las perturbaciones de la calidad de la energía eléctrica, con el cual se puedan comparar las estimaciones de los equipos sometidos a procesos de calibración.

A raíz de esto, en este documento se presenta un simulador de las perturbaciones de calidad de la energía eléctrica, que permite simular todas las perturbaciones que se pueden presentar en un sistema eléctrico y que afecta la calidad de la energía eléctrica. El diseño realizado ha tenido en cuenta las señales de prueba establecidas en las normas IEC relacionadas con la monitorización de la calidad de la energía eléctrica (IEC 61000-4-30 [4], IEC 61000-4-15 [3], IEC 61000-4-7 [2]), lo cual permitirá contrastar los parámetros programados en el simulador con los resultados obtenidos con los algoritmos que se implementarán para el diseño de un equipo de monitorización de la calidad de la energía eléctrica.

El simulador es una herramienta útil para realizar diseño y comparaciones de equipos que realicen la monitorización de las perturbaciones de la calidad de las señales de energía eléctrica en las redes de media y baja tensión. Las perturbaciones que se pueden programar en el simulador son las siguientes:

- Huecos (hundimientos) de tensión (sags o dips), especificando su duración y profundidad.
- Interrupciones de tensión.
- Sobretensiones (swells), especificando su duración y valor máximo.
- Componentes armónicas mínimo hasta de orden cincuenta y los interarmónicos múltiplos de 5 Hz principalmente.
- Fenómeno de flicker.
- Variaciones de frecuencia.
- Cambios en la amplitud de la tensión de alimentación.
- Desbalances en la tensión de sistemas trifásicos.
- Cambios rápidos de tensión.

Para la programación del simulador se utilizó el programa Matlab, teniendo en cuenta las diferentes posibilidades que se tienen en esta herramienta de programar operaciones matriciales, además de a la sencillez para la elaboración de interfaces gráficas.

La organización del documento es la siguiente:

En el capítulo uno se presenta el marco teórico relacionado con la monitorización de la calidad de la energía eléctrica lo cual permite comprender los aspectos considerados para el diseño del simulador de perturbaciones de las señales de tensión y corriente tanto en estado transitorio como en estado estacionario.

La descripción detallada del generador de perturbaciones implementado en este trabajo de grado se presenta en el capítulo dos.

El tercer capítulo presenta una serie de señales generadas con el simulador de perturbaciones para ilustrar los rangos y valores permitidos según las normas, en especial la IEC 61000-4-30 [4].

Las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros se presentan en el capítulo cuatro.

Finalmente, se anexan los programas realizados en MATLAB que permiten la implementación de los algoritmos del simulador así como el manual del usuario para la utilización del generador de perturbaciones.

1. MARCO TEÓRICO

El diseño e implementación de un sistema como el desarrollado en este trabajo de grado, exige el conocimiento y dominio de diferentes tópicos de la ingeniería. El objetivo de este capítulo es presentar una recopilación de algunos conceptos básicos, necesarios para el desarrollo del trabajo presentado en este documento.

Los parámetros que se deben tener en cuenta para el análisis de la calidad del suministro de potencia se describen a continuación.

1.1 FLUCTUACIONES DE TENSIÓN [1]

Las fluctuaciones de tensión son perturbaciones que originan la distorsión transitoria de la forma de onda de la señal de tensión. Se considera que existe una inadecuada calidad del servicio de energía eléctrica cuando la tensión no sigue la forma de onda establecida, que es una onda senoidal de amplitud constante, igual a la tensión nominal y a una frecuencia de 60 Hz. Algunas de las causas de las fluctuaciones de la señal de tensión son: la conexión y desconexión de cargas con gran capacidad, variaciones en la compensación reactiva, sistemas con poca capacidad de regulación de tensión, posición incorrecta de cambiadores de derivación de transformadores, sobrecarga de circuitos, entre otros.

En la Figura 1 se muestra un ejemplo de diversas perturbaciones de la señal de tensión.

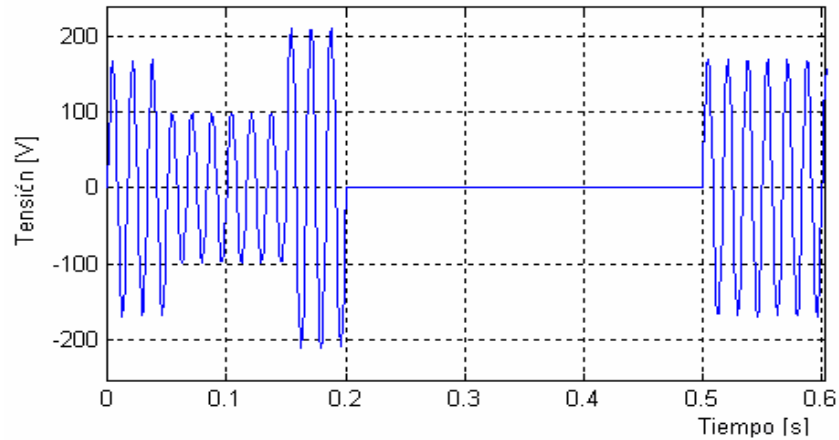


Figura 1. Ejemplo de fluctuaciones de tensión tales como, hueco, sobretensión e interrupción. La señal original tiene una magnitud de 120 [V r.m.s.] \approx 170 [V pico] y frecuencia de 60 [Hz]. Fuente: Autores.

Las características de las diferentes fluctuaciones de tensión son las siguientes:

Interrupciones de tensión [1]. Se presentan cuando la amplitud de la señal de tensión decrece a un valor menor de 0,1 p.u. de su valor nominal, por un período de tiempo menor a un minuto. De acuerdo con su duración se clasifican como: momentáneas (0,5 ciclos – 3 s) y temporales (3 s – 1 min). Cuando su duración es superior a un minuto se habla de un colapso de tensión. En la Figura 2 se muestra la forma de la señal de tensión cuando se presenta una interrupción de la misma.

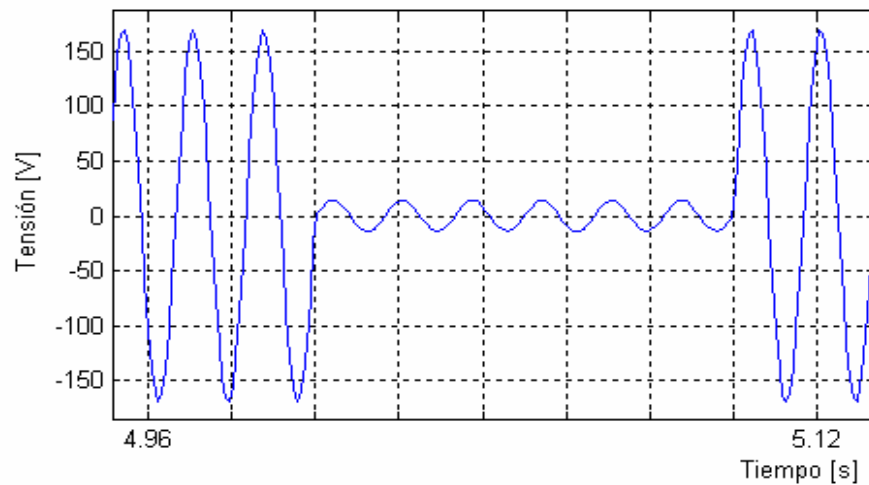


Figura 2. Ejemplo de una interrupción de tensión. La señal original tiene una magnitud de 120 [Vr.m.s.] y una frecuencia de 60 [Hz]. La tensión durante la interrupción tiene una magnitud de 10 [Vr.m.s.] y es catalogada como una interrupción momentánea. Fuente: Autores.

Sobretensión (Swell) [1]. Es el incremento de la magnitud de la señal de tensión entre 1,1 p.u. y 1,8 p.u., durante un período de tiempo menor a un minuto. De acuerdo con su duración se clasifican como: instantáneas (0,5 – 30 ciclos), momentáneas (30 ciclos – 3 s) y temporales (3 s-1 min). La Figura 3 presenta un ejemplo de esta perturbación.

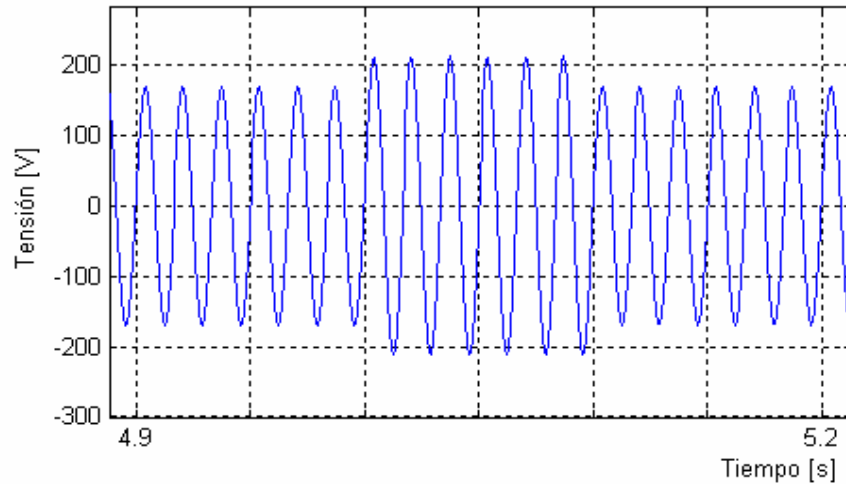


Figura 3. Ejemplo de una sobretensión. La señal original tiene una magnitud de 120 [Vr.m.s.] y una frecuencia de 60 [Hz]. La tensión durante la sobretensión tiene una magnitud de 150 [Vr.m.s.] y es catalogada como una sobretensión momentánea. Fuente: Autores.

Huecos (hundimientos) de tensión [1]. Son fluctuaciones de la señal de tensión, caracterizadas por producir una depresión transitoria de la amplitud de la onda tensión respecto a su valor nominal entre (0,1 y 0,9 p.u.) por un período de tiempo inferior a un minuto. Teniendo en cuenta su duración se clasifican como: instantáneos (0,5 – 30 ciclos), momentáneos (30 ciclos – 3 s) y temporales (3 s-1 min). La Figura 4 muestra la forma de la señal de tensión cuando se presenta un hueco de tensión.

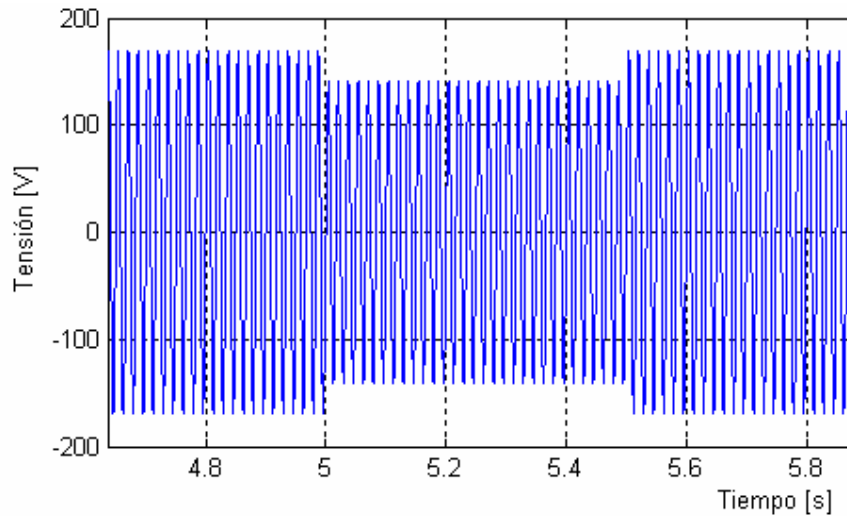


Figura 4. . Ejemplo de un hueco de tensión. La señal original tiene una magnitud de 120 [Vr.m.s.] y una frecuencia de 60 [Hz]. La tensión durante el hueco tiene una magnitud de 100 [Vr.m.s.] y es catalogada como un hueco instantáneo. Fuente: Autores.

1.2 FLICKER DE TENSIÓN [4]

La perturbación de la señal de tensión conocida como flicker, es también una fluctuación de tensión, pero presenta características diferentes a las fluctuaciones anteriores.

El efecto que genera esta perturbación es una Impresión de inestabilidad de la sensación visual causada por un estímulo luminoso cuya luminosidad o distribución espectral fluctúa en el tiempo. Este efecto se presenta por las variaciones sistemáticas de la envolvente de la señal de tensión lo cual tiene impacto en la intensidad luminosa en especial de lámparas incandescentes.

Esta fluctuación de la tensión es la respuesta del sistema de potencia a una carga de características no lineal y variante en el tiempo como por ejemplo: máquinas soldadoras, hornos de arco, molinos de rodillo, etc. [8] La Figura 5 muestra la forma de onda de una señal de tensión que presenta la esta perturbación.

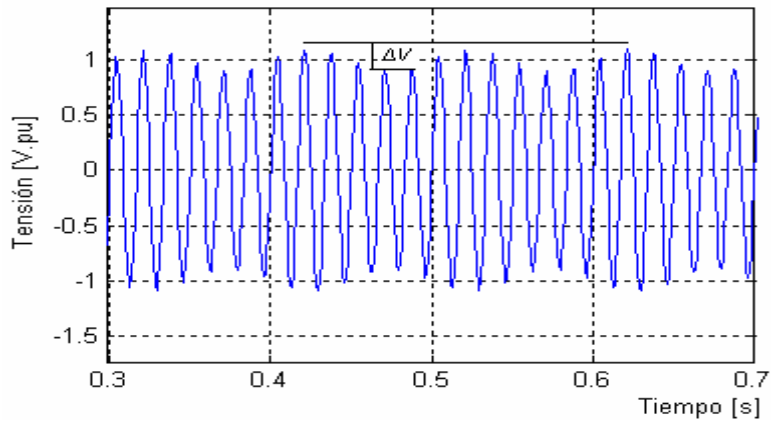


Figura 5. Ejemplo de una onda con flicker. Modulación senoidal con un valor porcentual (ΔV) igual al 15%. Fuente: Autores.

Por encima de cierto umbral de tensión, la titilación que genera el Flicker en una lámpara incandescente se vuelve molesta para los ojos, lo cual hace que se presente un parpadeo, razón por la cual algunas veces se denomina esta perturbación como parpadeo. Esta molestia aumenta rápidamente con el incremento de la amplitud de la variación como se muestra en la Figura 6.

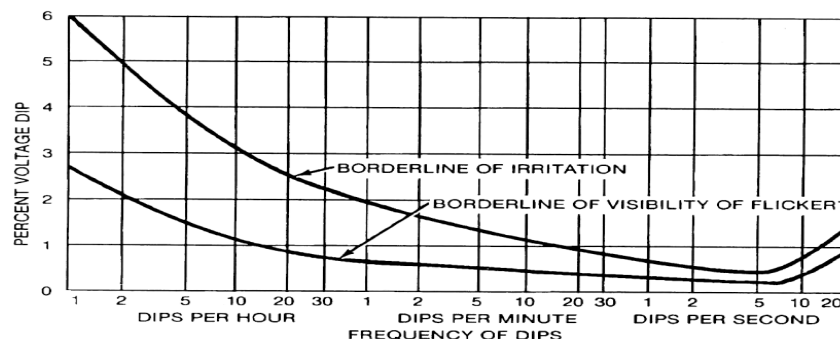


Figura 6. Curvas de irritación para el ojo humano. Fuente: ROMERO AGÜERO, Julio. **Introducción a la Calidad del Servicio Eléctrico**, Ciclo de Conferencias de la Rama Estudiantil de IEEE - Honduras, Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), Tegucigalpa, Honduras, 10 Mar. 2006 [8].

La intensidad de la molestia causada por el Flicker es definida en la norma IEC 61000-4-15 [3] y evaluada mediante los índices Pst y Plt, definidos como:

- Pst: severidad del parpadeo de corta duración (medida en un período de 10 minutos) utilizando un “flickermeter”.
- Plt: severidad del parpadeo de larga duración (calculada a partir de una secuencia de 12 valores de Pst en un intervalo de 2 horas).

1.3 COMPONENTES ARMÓNICAS [6]

Las componentes armónicas son señales tensión o corriente sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema está diseñado a operar (50 o 60 Hz). Las componentes armónicas se combinan con la tensión o corriente fundamental y producen la distorsión de la forma de onda.

Los indicadores THD_V (Total Harmonic Distortion of Voltaje) y THD_I son utilizados para establecer la distorsión armónica total de las señales de tensión y corriente con respecto a su componente fundamental. Estos parámetros permiten cuantificar el efecto de las componentes armónicas en el dimensionamiento de un sistema por el incremento del valor eficaz, sin embargo no dan información sobre la deformación de la forma de onda, razón por la cual es necesario especificar otros parámetros como las amplitudes y ángulos de fase de las diferentes componentes armónicas.

La Figura 7 muestra la forma de onda de una tensión distorsionada con componentes armónicas similares a las establecidas por la norma IEC 61000-2-4 [5].

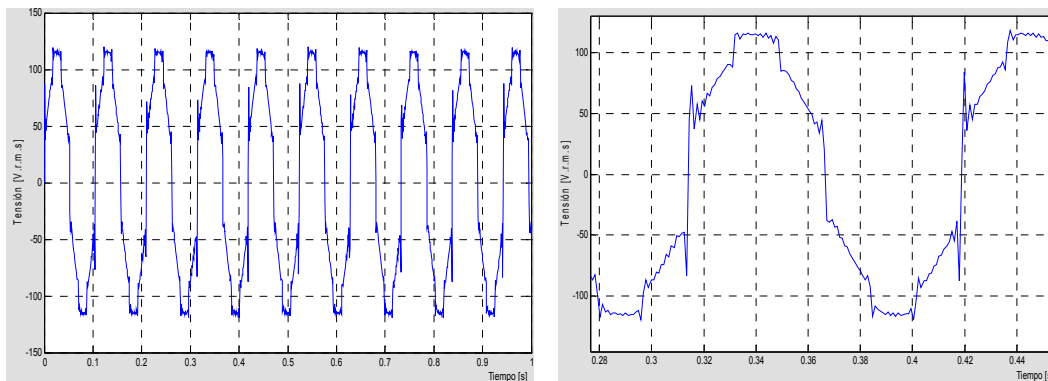


Figura 7. Ejemplo de una onda de tensión distorsionada, amplitud de 120 [Vr.m.s.], 60[Hz], con armónicos. Valores de armónicos correspondientes a la clase III según norma IEC 61000-2-4 [12]. Tiempo dado en segundos. Fuente: Autores.

Cuando las frecuencias de algunas de las componentes de frecuencia diferentes a la componente fundamental de una señal de tensión o corriente no son múltiplos enteros de esta frecuencia (50 o 60 Hz), se dice que se presentan

interarmónicos y subarmónicos en la señal [1], [6]. Por ejemplo una componente de frecuencia 75 Hz es un interarmónico tanto en un sistema frecuencia fundamental de 60 Hz como en uno de 50 Hz, porque esta frecuencia se encuentra en medio de la componente fundamental y del segundo armónico en ambos casos.

Los subarmónicos son las componentes de la señal cuya frecuencia es menor a la frecuencia fundamental de la señal; es decir son los interarmónicos que se presentan entre la componente de continua y la componente fundamental [1], [6]. La Figura 8 muestra la forma de onda de una señal con componentes interarmónicas.

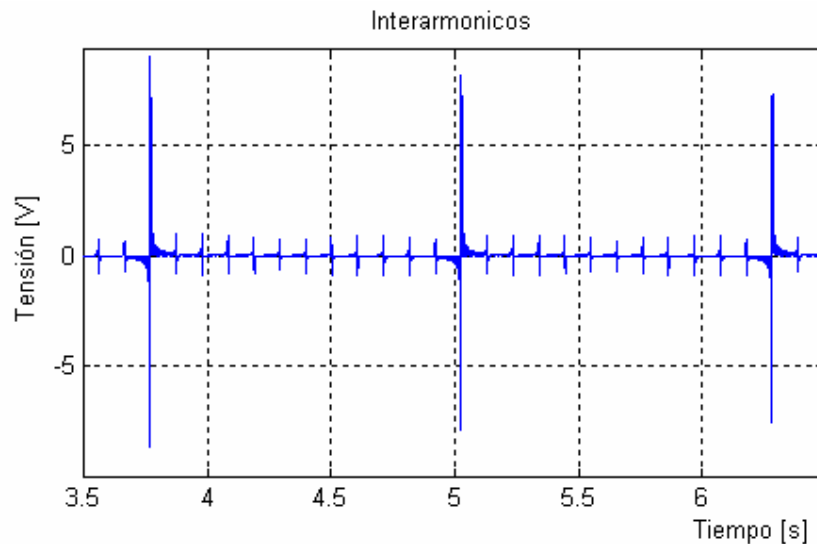


Figura 8. Ejemplo de una onda de tensión distorsionada, amplitud de 120 [Vr.m.s.], 60[Hz], con interarmónicos. Onda con once interarmónicos entre dos armónicos consecutivos. Valores de interarmónicos correspondientes a la clase III según norma IEC 61000-2-4 [5]. Tiempo dado en segundos. Fuente: Autores.

Las causas de la aparición de estas componentes de frecuencia se deben casi siempre a cambios rápidos en la corriente demandada (fluctuaciones de tensión), conmutación asíncrona de dispositivos semiconductores en convertidores estáticos; fuentes como las cargas de arco variable (hornos de arco), motores de inducción, convertidores estáticos de frecuencia, señales de control mediante onda portadora (power line carrier); dando como resultado fluctuaciones de tensión y flicker, oscilaciones de baja frecuencia en sistemas

mecánicos, interferencia con señales de control y protección, interferencia con señales de telecomunicaciones, saturación de transformadores de corriente.

1.4 DESBALANCE DE TENSIÓN [1]

Esta perturbación se presenta en sistemas trifásicos y de carácter permanente. Se cuantifica como la razón de la componente de secuencia negativa (o cero) respecto a la componente de secuencia positiva de la tensión. El desbalance de tensión también puede estimarse como la máxima desviación de tensión respecto al promedio de las tres fases, dividido entre el promedio de las tres fases.

La causa principal es la conexión de cargas monofásicas en circuitos trifásicos. También se presenta cuando las cargas trifásicas no están perfectamente balanceadas. Los efectos del desbalance de tensión son: el sobrecalentamiento de máquinas asíncronas trifásicas, la reducción de capacidad de transformadores, cables y líneas entre otros. La Figura 9 presenta las formas de onda de la tensión de un sistema trifásico desbalanceado en tensión.

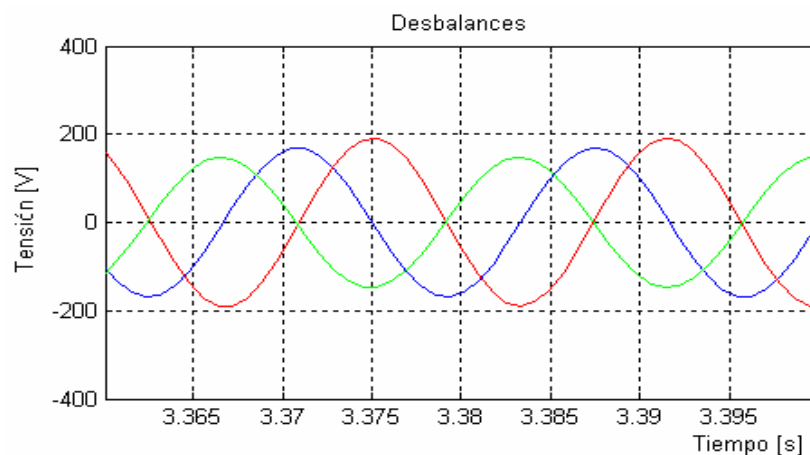


Figura 9. Ejemplo de un desbalance de tensión de un sistema trifásico. Fuente: Autores.

1.5 RUIDO DE LAS SEÑALES

El concepto de ruido corresponde a una señal perturbadora que se adiciona a una señal por diferentes motivos y que hay que atenuar para garantizar un adecuado procesamiento de las señales. En general todas las señales tienen un ruido asociado, por esta razón es importante considerarlo. A continuación se presenta la clasificación de estas señales de ruido y las causas de su aparición en una señal.

Señal de ruido blanco o gaussiano [7]. Esta señal presenta una densidad de potencia uniforme sobre todo el espectro de frecuencia. Una señal simple que cumple con las características deseadas de ruido blanco es la generación de valores aleatorios en un intervalo de tiempo.

En el procesamiento de señales puede aparecer por diversas causas como por ejemplo el ruido térmico de los materiales, la cuantificación de una señal en un conversor analógico digital, etc. La Figura 10 presenta un ejemplo de una señal de ruido blanco.

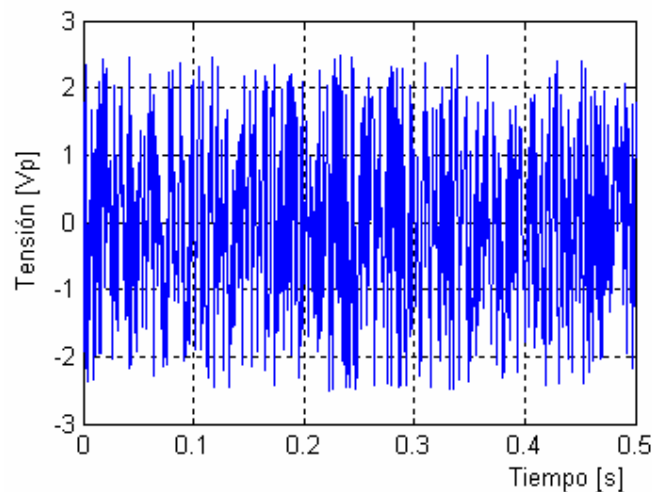


Figura 10. Ejemplo de ruido blanco con una frecuencia de muestreo de 1240 muestras en un intervalo de tiempo de 0.5 [s] y una magnitud de 5 [V]. Fuente: Autores.

Al tomar una señal de ruido blanco y utilizarla como entrada de diferentes filtros se producen los ruidos coloreados que se describen a continuación y que presentan características de respuesta en frecuencia en un determinado espectro y se utilizan para considerar señales de ruido generadas por la

interferencia de señales de comunicación o de potencia en un sistema de monitorización.

Señal de ruido rojo [7]. Se genera con un filtro pasa bajas lo que hace que el espectro de la señal tenga una similitud al mismo filtro pasa bajas. En la figura 11 se presenta la señal de ruido creado a partir de la señal de ruido blanco presentado en la Figura 10 al pasarlo por un filtro pasa bajas con una frecuencia de corte igual a 100 [Hz].

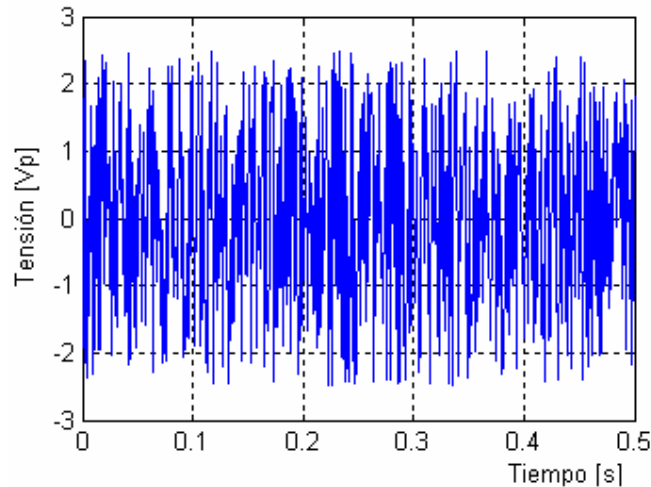


Figura 11. Ejemplo de ruido rojo con una frecuencia de muestreo de 1240 muestras en un intervalo de tiempo de 0.5 [s] y una magnitud de 5 [V]. Fuente: Autores.

Señal de ruido rosado [7]. Tiene un espectro de densidad de potencia que decrece 3 dB por cada octava conforme aumenta el valor de frecuencia, es decir proporcional al $\frac{1}{f}$. La señal de ruido rosado es producida integrando la señal de ruido blanco. En la Figura 12 se muestra un ejemplo de ruido rosado generado integrando la señal de ruido blanco de la Figura 10.

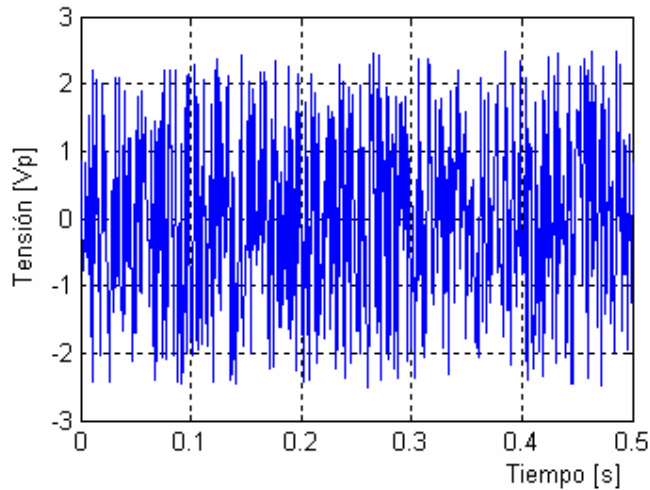


Figura 12. Ejemplo de ruido rosado con una frecuencia de muestreo de 1240 muestras en un intervalo de tiempo de 0.5 [s] y una magnitud de 5 [V]. Fuente: Autores.

Señal de ruido marrón [7]. Se caracteriza por tener un espectro de densidad de potencia que decae 6 dB por octava al aumentar la frecuencia, es decir la densidad es proporcional a $\frac{1}{f^2}$. La señal de ruido marrón es producida

integrando dos veces la señal de ruido blanco. La Figura 13 muestra un ejemplo de ruido marrón generado a partir de la señal de ruido blanco de la Figura 10.

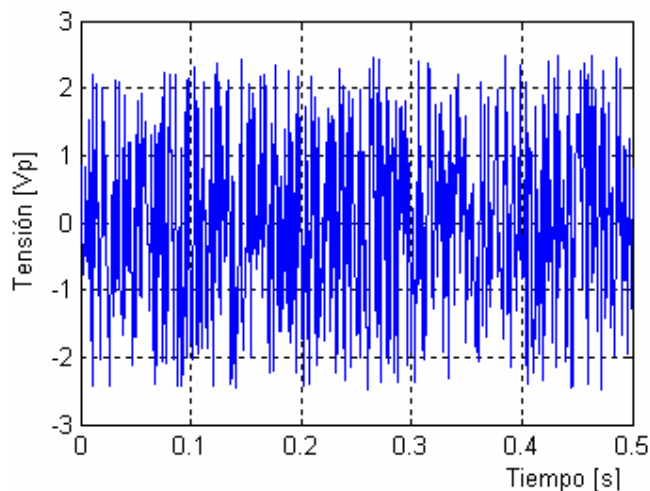


Figura 13. Ejemplo de ruido marrón con una frecuencia de muestreo de 1240 muestras en un intervalo de tiempo de 0.5 [s] y una magnitud de 5 [V]. Fuente: Autores.

Señal de ruido azul [7]. Se define como una señal cuyo espectro de densidad de potencia se encuentra solo en la banda de las altas frecuencias. Sin embargo, la señal estándar de ruido azul es la señal cuyo espectro incrementa 3 dB por octava a medida que se aumenta la frecuencia, es decir el espectro es proporcional a f . Esta señal se genera derivando la señal de ruido blanco. La Figura 14 muestra la señal de ruido azul generada a partir de la señal de ruido blanco de la Figura 10.

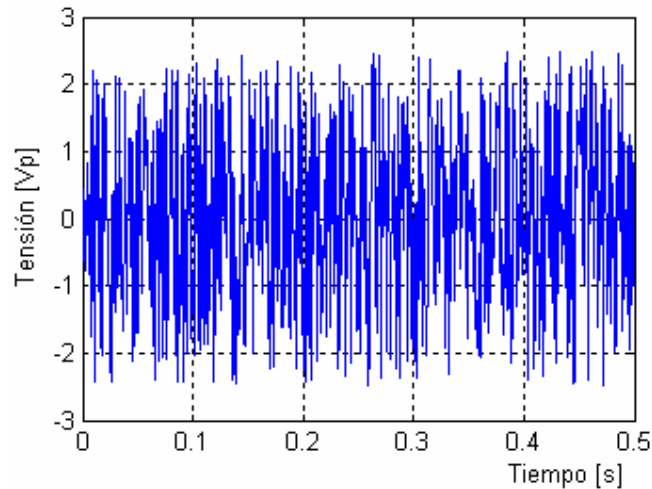


Figura 14. Ejemplo de ruido azul con una frecuencia de muestreo de 1240 muestras en un intervalo de tiempo de 0.5 [s] y una magnitud de 5 [V]. Fuente: Autores.

Señal de ruido violeta [7]. Esta caracterizada por tener un espectro de densidad de potencia que aumenta 6 dB por cada octava al aumentar la frecuencia es decir es proporcional a f^2 . Esta señal se genera como la deriva de segundo orden de la señal de ruido blanco. En la Figura 15 se presenta la señal de ruido violeta generada a partir de la señal de ruido blanco de la Figura 10.

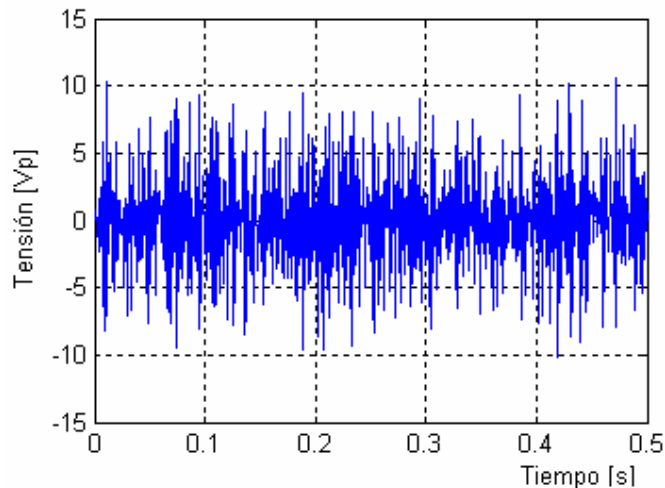


Figura 15. Ejemplo de ruido violeta con una frecuencia de muestreo de 1240 muestras en un intervalo de tiempo de 0.5 [s] y una magnitud de 5 [V]. Fuente: Autores.

Señal de ruido de cuantificación. Esta señal de ruido se presenta siempre que se realiza un procesamiento digital de señales y es debido a que el valor de la señal adquirida tiene una resolución finita que viene determinada por el número de bits del convertidor analógico digital (A/D) y por el número de bits donde se realiza el procesamiento de las señales digitales. Esta señal se modela como un ruido blanco con distribución rectangular.

Señal de ruido de redondeo. Esta señal de ruido se modela de forma similar al ruido de cuantificación y depende de la resolución del equipo de monitorización, tanto en el número de bits del procesador de las señales digitales (DSP) como del visualizador (display) del dispositivo. Es importante seleccionar una longitud de palabra adecuada, de forma que el sistema digital se adapte a los requerimientos especificados en la clase de exactitud de la variable estimada.

1.5 FILTRADO DE SEÑALES

El procesamiento de señales digitales requiere de la realización de filtrado de señales. Previo a la conversión de una señal analógica en digital debe garantizarse que esta tenga un ancho de banda finito, para lo cual se diseña un filtro que deja pasar sólo las frecuencias de interés. Para la monitorización de la calidad de la energía eléctrica se utilizan filtros que pasa-bajos que eliminan las

frecuencias por encima de un determinado valor. La incorporación de este filtro conocido como antisolapamiento tiene efecto sobre la señal a procesar, por tal motivo es importante en el simulador permitir la incorporación de este elemento en el esquema general del generador de perturbaciones.

Para la implementación de un filtro pasa-bajo en sistemas de monitorización que requieren la adquisición de muestras de una señal, el tipo de filtro más utilizado es el Butterworth, por presentar una magnitud de su función de transferencia extremadamente plana en la banda de paso, ideal en estas aplicaciones. Este tipo de modelo es el que se implementa en el simulador de perturbaciones.

2. CARACTERÍSTICAS DEL SIMULADOR DE UN GENERADOR DE PERTURBACIONES

En este capítulo se presenta una descripción detallada del simulador del sistema de generación de perturbaciones implementado en este trabajo de grado. Con diagramas de bloques, se muestran cada uno de los subprogramas utilizados en la generación de las diferentes perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica y se describe el principio de funcionamiento de la interfaz gráfica diseñada para la programación del generador de perturbaciones.

El diseño del simulador del generador de perturbaciones requiere de dos etapas: la primera, fundamentada en la programación de los algoritmos requeridos, la cual es realizada en modo texto y la segunda, con la elaboración de la interfaz gráfica que permite la programación de las diferentes perturbaciones, todo esto utilizando la herramienta computacional MATLAB.

2.1 PROGRAMACIÓN DE LAS PERTURBACIONES

Uno de los primeros problemas encontrados en el simulador fue la forma como se introducirían los datos de la señal; por tal razón, se decidió fragmentar el programa, de forma que si algún dato era mal introducido o se querían modificar los parámetros de las perturbaciones, solo el algoritmo específico a ese dato sea el que se procese.

Adicionalmente, se decidió proponerle al usuario la posibilidad de introducir datos de una base diseñada de acuerdo con los valores máximos de tablas de las normas EN 50160 [1] e IEC 61000-2-4 [5] de componentes armónicas e interarmónicas.

Otra flexibilidad introducida en el simulador es la posibilidad cambiar los parámetros de magnitud, frecuencia y ángulo de fase de magnitudes, permitiendo al usuario configurar las variaciones que deseen de estos tres parámetros durante el tiempo de simulación. Es decir el usuario puede variar de un valor a otro en forma escalón, rampa o cuadrática (función de segundo orden). Con esto se puede decir que se puede generar cualquier tipo de perturbación.

Con la finalidad de hacer el generador lo más cercano posible a la realidad, se propone que el generador permita la simulación de ruido blanco y coloreado, adicionalmente se introdujo el ruido de cuantificación y el ruido de redondeo que generalmente están presentes en estas señales, posibles causas de errores debido al muestreo que va a tener la señal.

2.1.1 DIAGRAMAS DE FLUJO

Con el propósito de hacer flexible la programación y el ingreso de datos al generador de perturbaciones, éste se diseñó a partir de subprogramas. A continuación se muestra un diagrama de flujo simplificado de cada uno de ellos y una breve explicación de cada algoritmo.

2.1.1.1. Diagrama de flujo del subprograma Configuraciones.

Este primer subprograma es el núcleo del simulador, en él se establecen las configuraciones generales de toda la simulación y se configuran los parámetros para generar señales con las perturbaciones de huecos de tensión, sobretensiones, interrupciones y desbalances de tensión en sistemas trifásicos. El usuario define la forma de realizar la transición de un tipo de señal con determinadas perturbaciones a otro en un tiempo determinado, ya sea en forma instantánea (escalón de tensión), o como una rampa o parábola de tensión. En la figura 16 se muestra el diagrama de flujo.

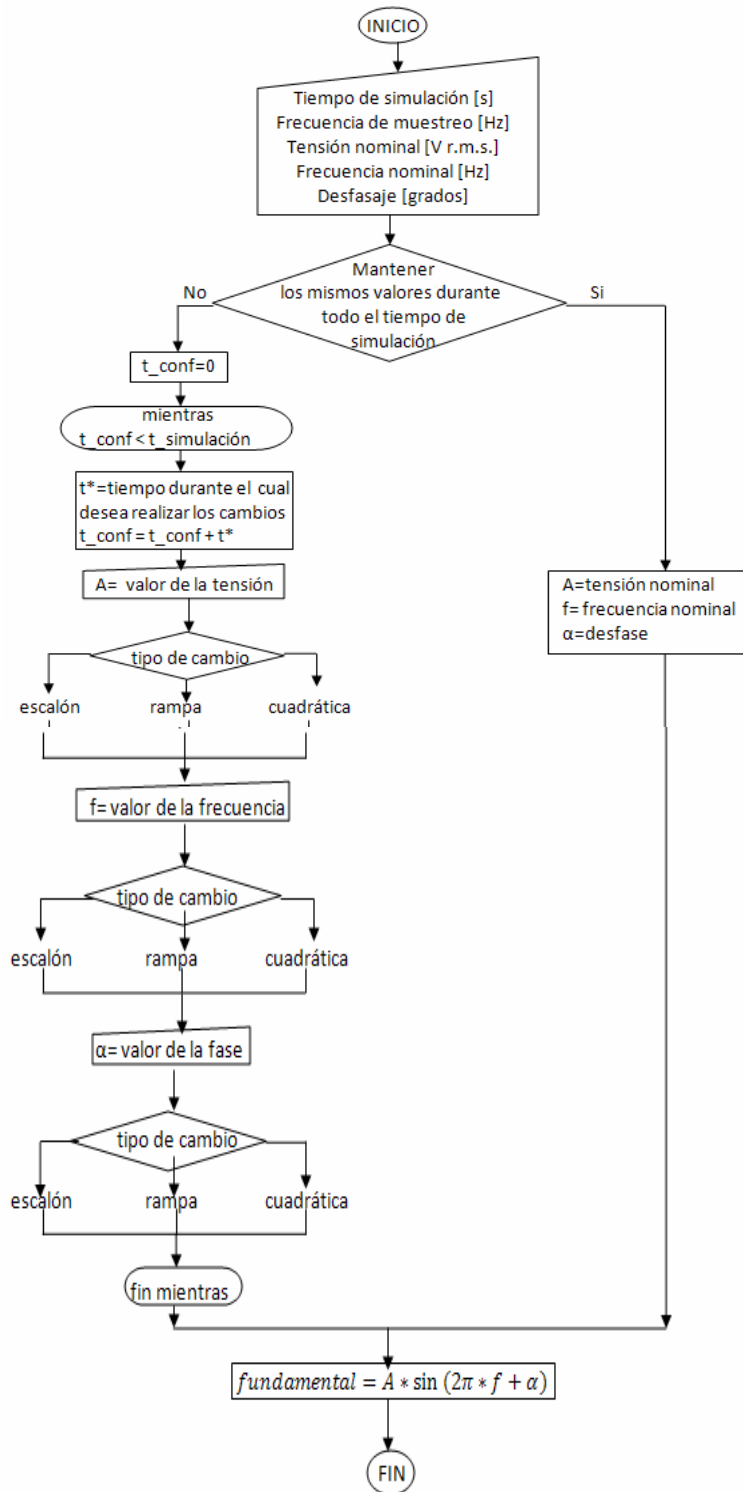


Figura 16. Diagrama de flujo del algoritmo configuraciones. Fuente: Autores.

2.1.1.2. Diagrama de flujo del subprograma Armónicos.

Los datos de las componentes armónicas se establecen en este subprograma. Si no se desean incluir componentes armónicas a la señal no es necesario ejecutarlo. Los datos de magnitud y ángulo de fase de cada una de las componentes armónicas se pueden introducir manualmente. Sin embargo, por defecto el programa genera una tabla con los valores propuestos por las norma IEC 61000-2-4 (clase1, clase 2 y clase 3) [5] y la norma EN 50160 [1]. En la figura 17 se muestra el diagrama de bloques de este subprograma.

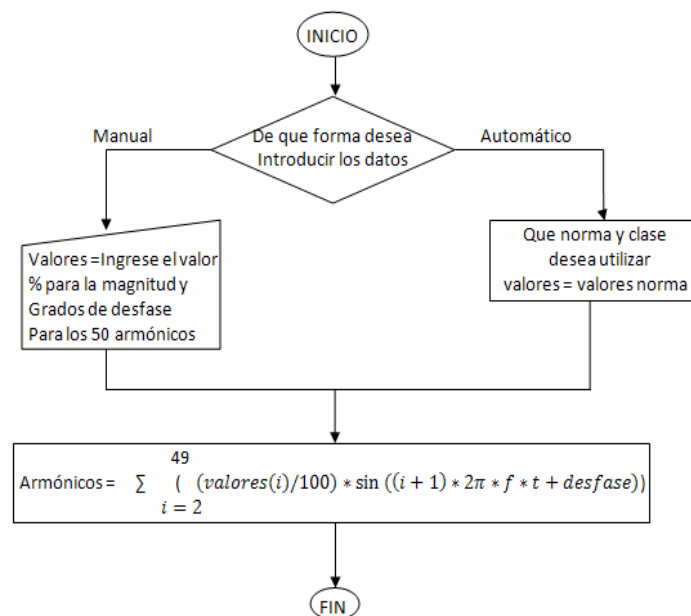


Figura 17. Diagrama de flujo del algoritmo armónicos.
Fuente: Autores.

2.1.1.3. Diagrama de flujo del subprograma Interarmónicos.

Este subprograma es el utilizado para introducir los datos de magnitud y ángulo de fase de las componentes interarmónicas. Si no se desean incluir componentes interarmónicas a la señal no es necesario ejecutarlo. Los datos de las componentes interarmónicas se pueden introducir manualmente; sin embargo, por defecto el programa genera una tabla con los valores propuestos para estas componentes por las norma IEC 61000-2-4 (clase1, clase 2 y clase 3) [5]. En la figura 18 se muestra el diagrama de bloques de este subprograma.

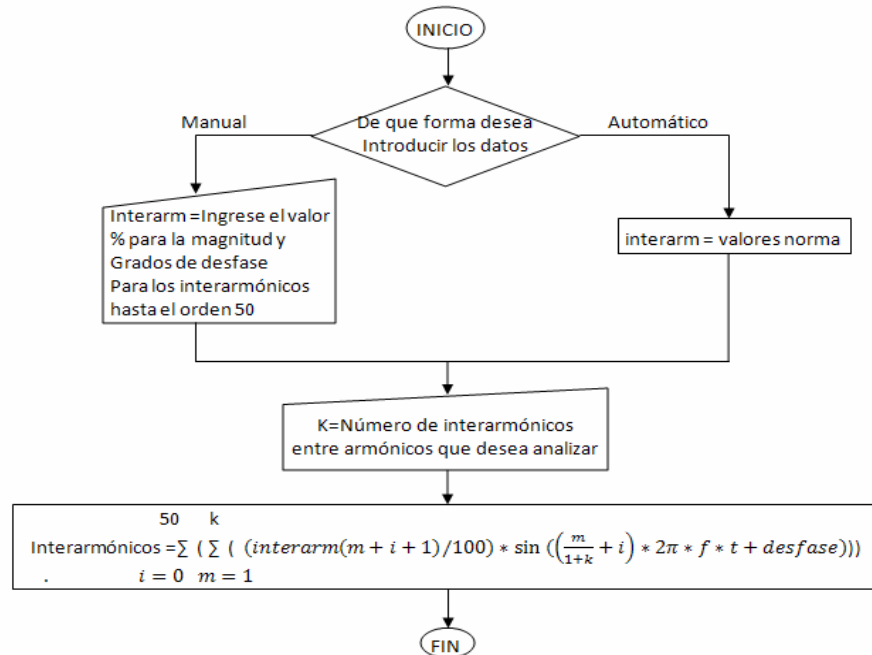


Figura 18. Diagrama de flujo del algoritmo interarmónicos.
Fuente: Autores.

2.1.1.4. Diagrama de flujo del subprograma Salida.

Este subprograma configura las señales de ruido y los tipos de errores que se deseen introducir a la señal y genera el vector de salida, el cual está conformado por la suma de los vectores que contienen la información de la señal fundamental, los armónicos, los interarmónicos y los ruidos previamente configurados. En la figura 19 se muestra el diagrama de bloques de este algoritmo.

2.1.1.5. Diagrama de flujo del subprograma Flicker.

Con este programa se finaliza la simulación y éste se ejecuta si se desea incluir el efecto de *Flicker* a la señal. La modulación para el *Flicker* se puede seleccionar entre una onda cuadrada o una senoidal. Luego de generar el vector de modulación se multiplica por el el vector de salida y se genera el vector *Flicker*, el cual contiene la información de todas las perturbaciones que fueron configuradas e introducidas a la señal fundamental. En la figura 20 se muestra el diagrama de flujo de este algoritmo.

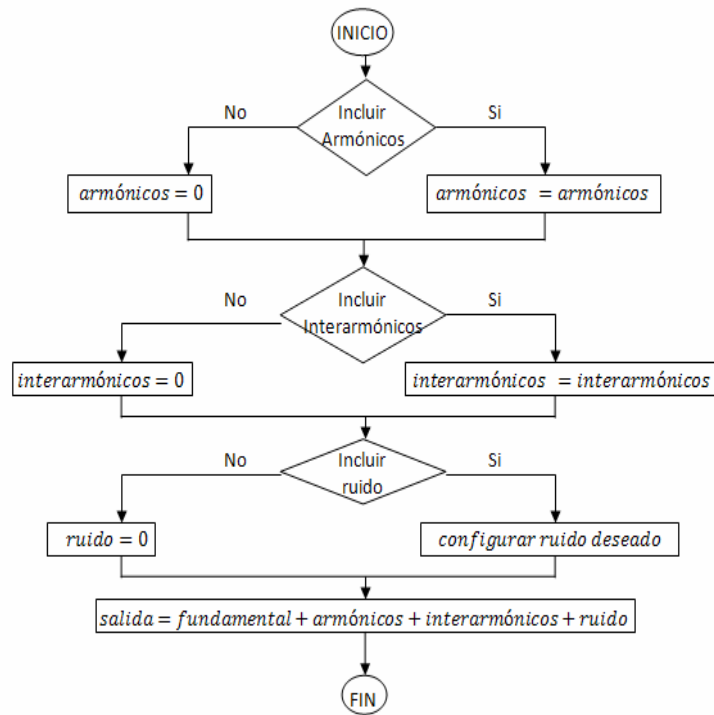


Figura 19. Diagrama de flujo del algoritmo salida.
Fuente: Autores.

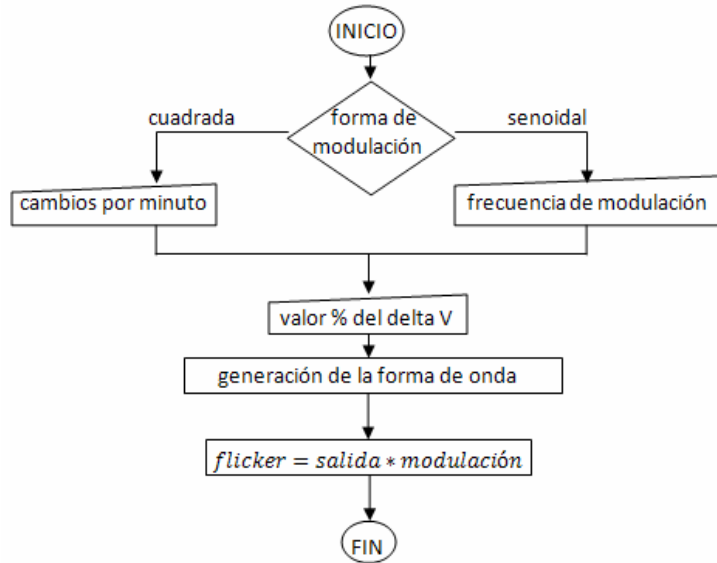


Figura 20. Diagrama de flujo del algoritmo flicker.
Fuente: Autores.

2.2 INTERFAZ GRAFICA

La interfaz grafica se realizó con el fin de facilitarle al usuario la generación de la señal sintética con los parámetros que se deseen de acuerdo con las perturbaciones que se quieran simular.

La interfaz se realizó con el programa GUI de MATLAB, el cual permite crear cada pantalla o interfaz por medio de elementos básicos como ejes gráficos, *push-bottons*, textos editables, entre otros. Inicialmente los algoritmos fueron programados en modo texto y luego de depurarlos, se realizó la programación del simulador utilizando la GUI de MATLAB.

El desarrollo de la interfaz permite flexibilizar los algoritmos, ya que no se debe tener una rutina de ejecución específica. Al ejecutar la interfaz grafica se abre la ventana principal que tiene una serie de botones que permiten abrir ventanas secundarias, en las cuales se realizan las configuraciones específicas de los parámetros y una vez finalizadas las configuraciones se vuelve a la ventana principal. Es decir que el usuario puede configurar en el orden que necesite o desee, todos los parámetros, así como obtener de datos de salida en cualquier instante, estos datos pueden ser graficas, vectores o señales.

En la Figura 21 se muestra un diagrama de flujo simplificado, que muestra la funcionalidad de esta interfaz.

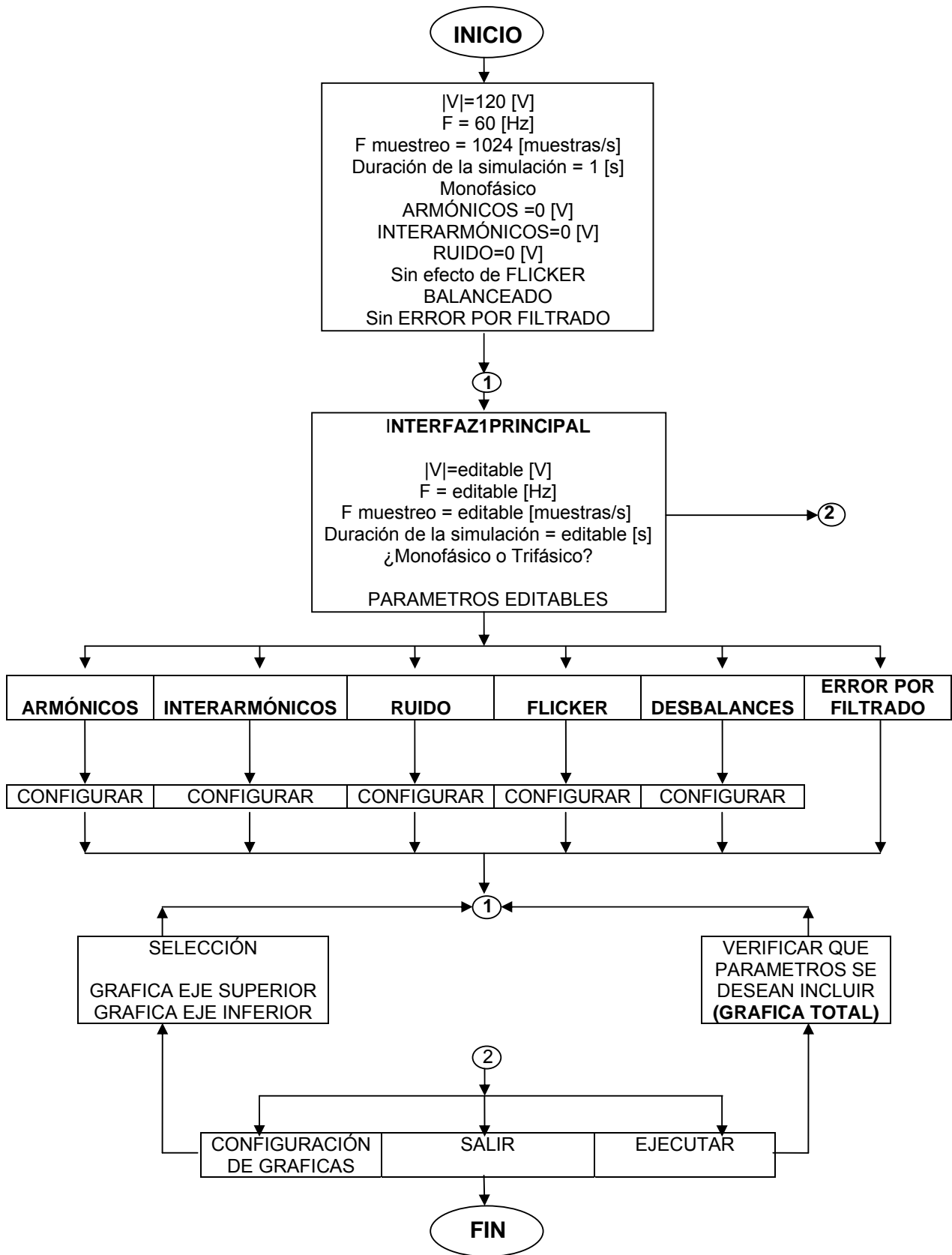


Figura 21. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica
Fuente: Autores.

2.2.1 Interfaz principal. El generador de perturbaciones de los parámetros de calidad de la potencia eléctrica consta de una interfaz grafica principal en donde aparece un cuadro con las configuraciones generales tales como tiempo de simulación, valor eficaz de la componente fundamental de la tensión, frecuencia de muestreo y frecuencia de la red. En la interfaz principal se asignan unos valores por defecto los cuales pueden ser modificados según lo requiera el usuario; estos valores se utilizan durante toda la simulación y no se pueden modificar.

Cuenta con dos ejes en donde se pueden visualizar los efectos originados por las perturbaciones (armónicos, interarmónicos, flicker, desbalances, ruido), pulsando el respectivo botón se procede a configurar cada perturbación en donde se accede a una interfaz secundaria y de esta forma se modifican los parámetros según la necesidad del usuario. El simulador de perturbaciones esta diseñado de tal forma que desde el comienzo se puede configurar en modo trifásico o monofásico, esto influye directamente en cada interfaz secundaria en donde si se elige desde el principio el modo monofásico solo una fase puede ser modificada deshabilitando las otras dos fases. La Figura 22 muestra esta interfaz.

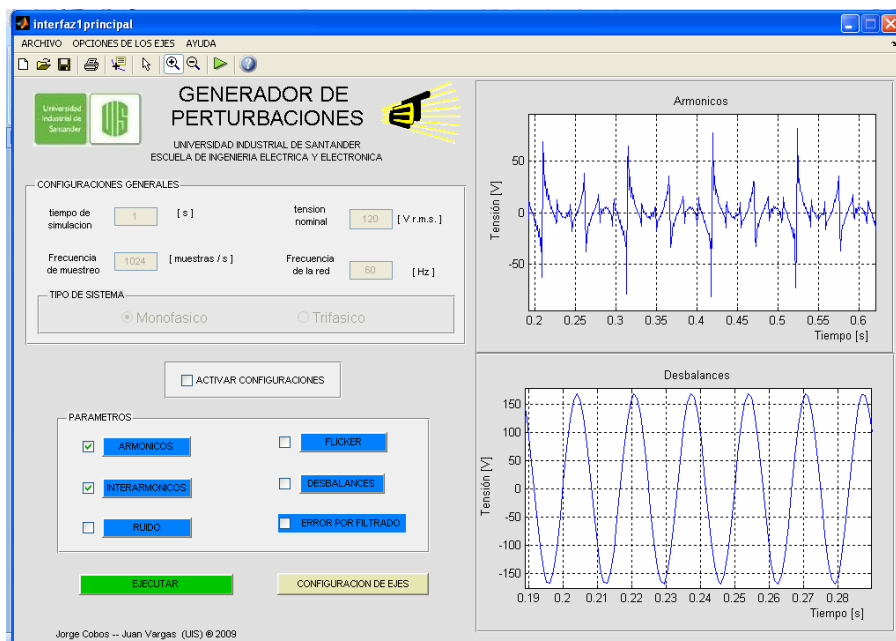


Figura 22. Interfaz principal del simulador de perturbaciones.
Fuente: Autores.

2.2.2 Interfaz armónicos En la figura 23 se muestra a modo de ejemplo la interfaz respectiva de las componentes armónicas, en donde se puede introducir los datos de cada componente armónica (hasta 50 armónicos). Tanto su respectiva magnitud (valor porcentual con respecto a la componente fundamental) y ángulo de fase (en grados) o si se prefiere utilizar los valores ya incluidos de la norma IEC 61000-2-4 (clase I, II, III) [5] y de la norma 50160 [1] para cada una de las fases, una vez aplicados y aceptados los cambios realizados, por defecto se grafica en la interfaz principal los armónicos configurados para la fase A en el eje superior de la interfaz grafica principal.

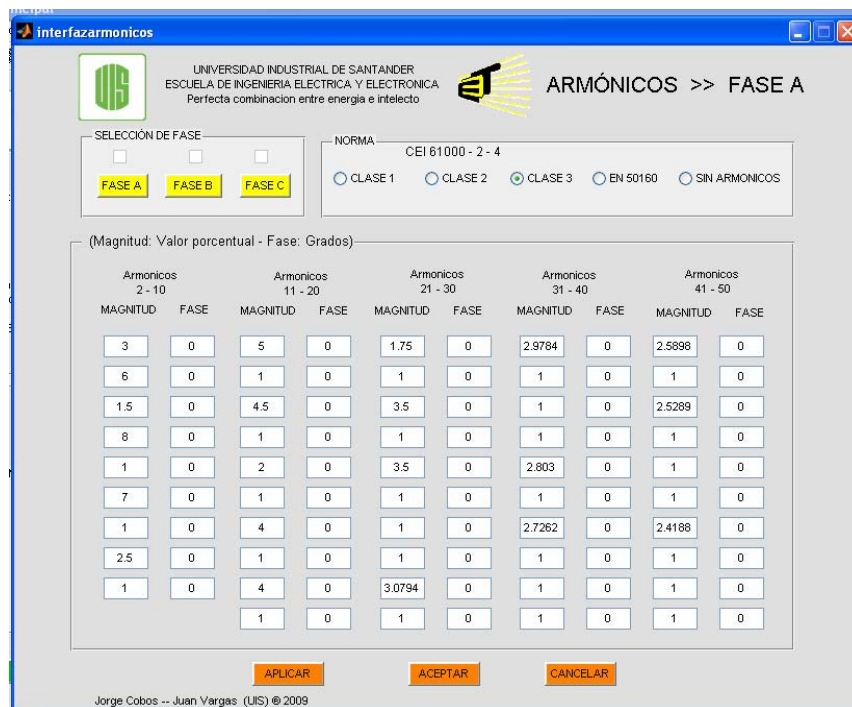


Figura 23. Interfaz de armónicos tomada del generador de perturbaciones.
Fuente: Autores.

2.2.3 Interfaz interarmónicos. En cuanto a la configuración de las componentes interarmónicas es un poco más compleja ya que este es un fenómeno muy particular, el programa permite configurar individualmente cada componente interarmónica para lo cual el usuario debe introducir la frecuencia, el valor porcentual de la magnitud con respecto a la magnitud de la componente fundamental y el ángulo de desfase de cada componente interarmónica. También se pueden introducir las componentes interarmónicas

por intervalos de frecuencia, para este caso los datos de entrada son: la frecuencia inicial, la frecuencia final del intervalo, el valor máximo de la amplitud de las componentes interarmónicas, donde pueden ser el mismo para todas o que el subprograma lo determine aleatoriamente. En la Figura 24 se muestra la interfaz de este subprograma.

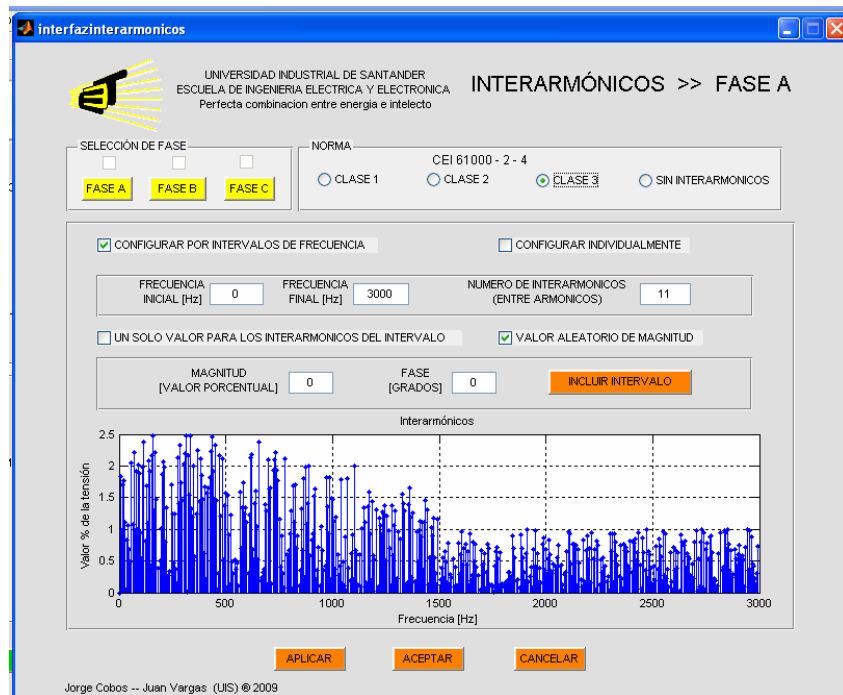


Figura 24. Interfaz de interarmónicos tomada del generador de perturbaciones.
Fuente: Autores.

2.2.4 Interfaz ruido Para la configuración de las señales de ruido (ver figura 25) el usuario tiene la opción de ingresar la magnitud del ruido para cada una de las fases en forma de decibeles o en volts. Esta opción le da versatilidad al simulador, y se busca que las señales obtenidas en el simulador sean similares a las que se pueden presentar en un sistema eléctrico.

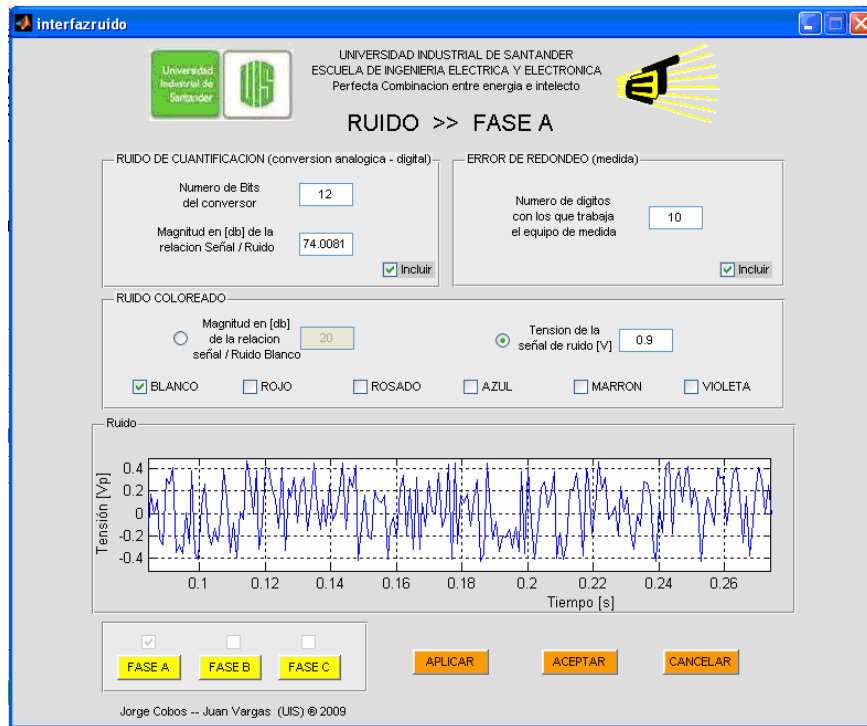


Figura 25. Interfaz de ruido tomada del generador de perturbaciones.
Fuente: Autores

2.2.5 Interfaz desbalances La configuración de los cambios que se pueden presentar en las señales de tensión de un sistema trifásico tiene en cuenta posibles cambios que se puedan presentar de las variables: frecuencia, magnitud de la tensión y ángulo de fase. Esto permite establecer perturbaciones de tensión: lentas, rápidas y de estado estacionario que se requieren para generar señales que permitan comparar sus parámetros con los resultados que estimen los algoritmos de estimación de los parámetros de calidad de la energía eléctrica. El tiempo de simulación, se puede subdividir en N intervalos y en cada uno de ellos se puede cambiar la magnitud, la fase y la frecuencia en forma de escalón, rampa o cuadrática, (adicional a esto está la forma exponencial que permite simular cambios de magnitud de transitorios). Adicionalmente, se tienen tres ejes auxiliares que permiten ver la evolución de la simulación teniendo en cuenta los cambios que se hayan programado de los parámetros (magnitud de la tensión, fase, frecuencia). También se cuenta con un cuadro de los datos de los parámetros del intervalo anterior de simulación;

todo esto se puede hacer para cada una de las tres fases. En la Figura 26 se muestra la interfaz gráfica de este subprograma.

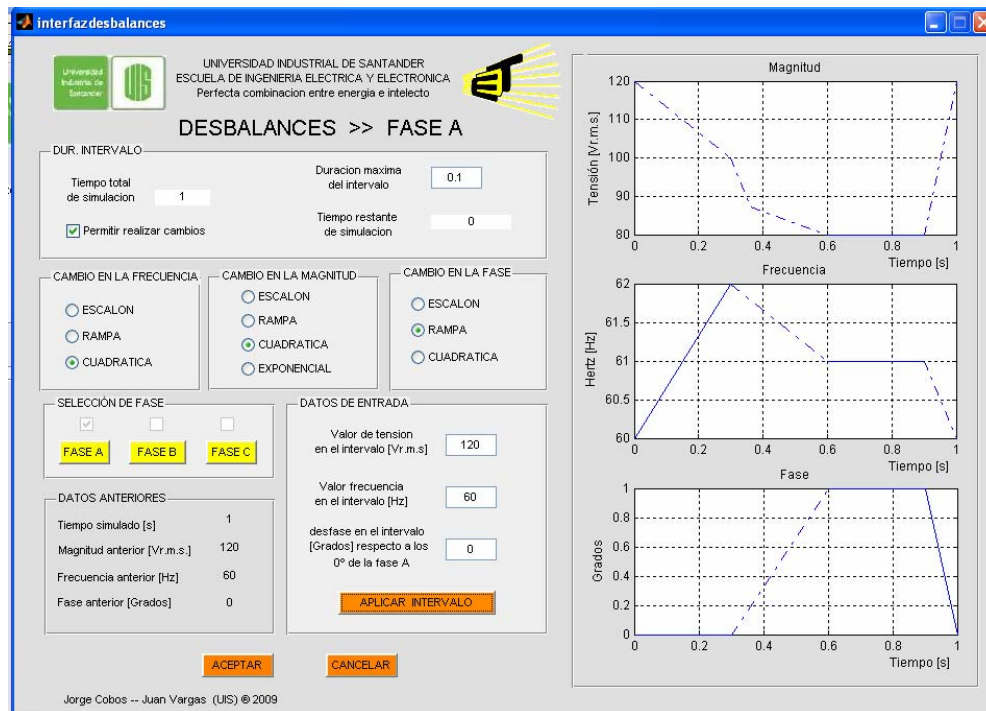


Figura 26. Interfaz de desbalances tomada del generador de perturbaciones.
Fuente: Autores

2.2.6 Interfaz Flicker El simulador también permite evaluar las implicaciones que tiene el efecto de *flicker* en una onda de tensión, para esto el usuario tiene la posibilidad de definir el valor porcentual del cambio en la magnitud de tensión ΔV (entre 0 y 20% según la norma IEC 61000-4-30 [4]), así como la forma de modulación con la cual desea realizar la simulación. La modulación puede realizarse con señales de onda cuadrada o senoidal, para el caso de modulación con una onda cuadrada, el usuario define el número de cambios por minuto y para la modulación senoidal el dato de entrada es la frecuencia de modulación en Hz (8,8 Hz valor recomendado por la norma IEC 61000-4-15 [3]). Una vez configurados y validados los datos de entrada se visualiza un esbozo del efecto de flicker configurado; en la Figura 27 se muestra un ejemplo de esta perturbación.

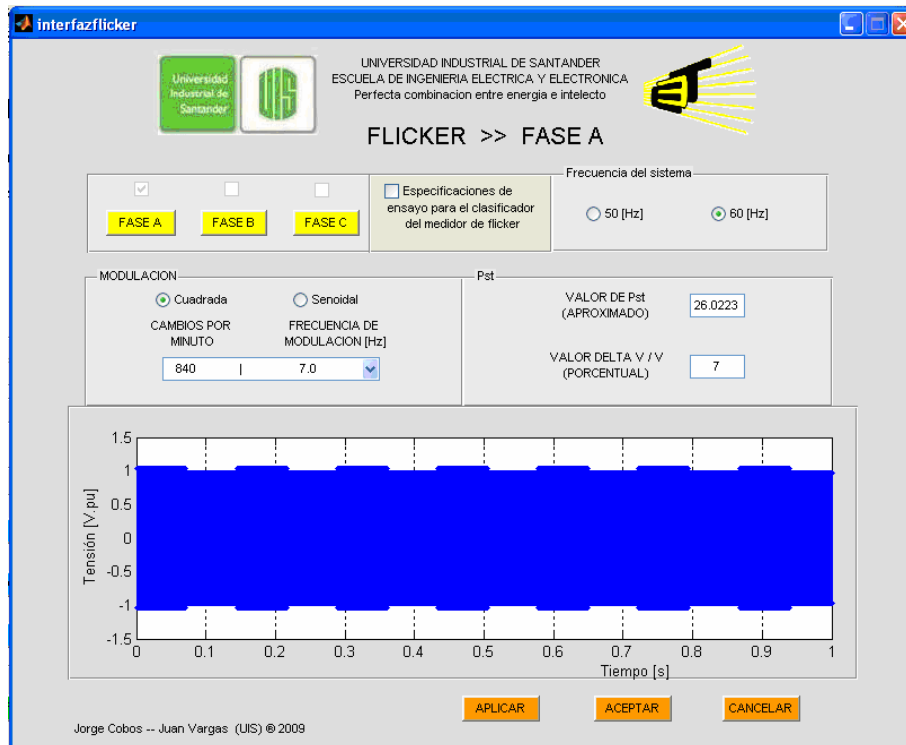


Figura 27. Interfaz de flicker tomada del generador de perturbaciones.
Fuente: Autores

2.2.7 Interfaz configuración de graficas. El simulador cuenta con un botón llamado “configuración de graficas” que permite ver la señal de cada fase o las tres fases al tiempo en un mismo eje (ver Figura 28), allí se puede observar cada una de la señales ya sea de los armónicos, de los interarmónicos, del ruido, del *Flicker*, y de los desbalances que se hagan durante una simulación. También puede mostrar la frecuencia, la tensión, el desfase entre cada una de las fases o si se requiere las tres fases al tiempo, lo cual permite comparar los cambios entre una y otra fase.

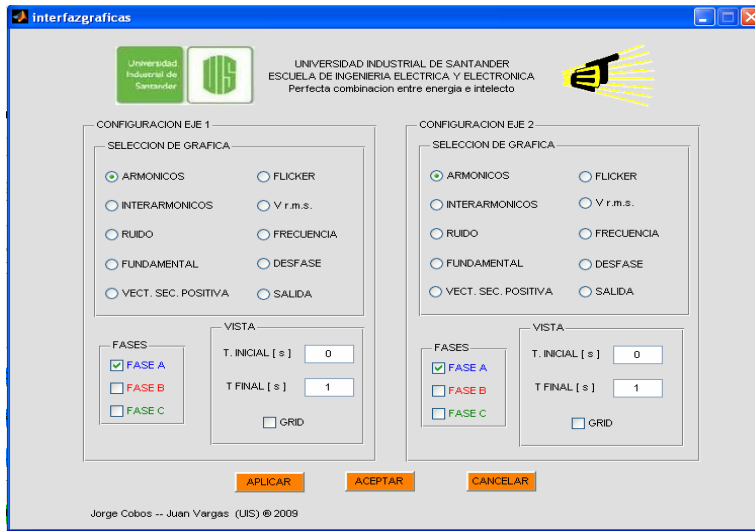


Figura 28. Interfaz configuración de graficas tomada del generador de perturbaciones.
Fuente: Autores

Adicionalmente, el simulador permite que el usuario observe como varía la magnitud y la fase de cada vector de tensión (en las tres fases) durante todo el tiempo de simulación de acuerdo a los cambios incluidos en la interfaz de desbalances; se muestran los cambios en coordenadas polares solo aparecen los vectores de fase (ver Figura 29).

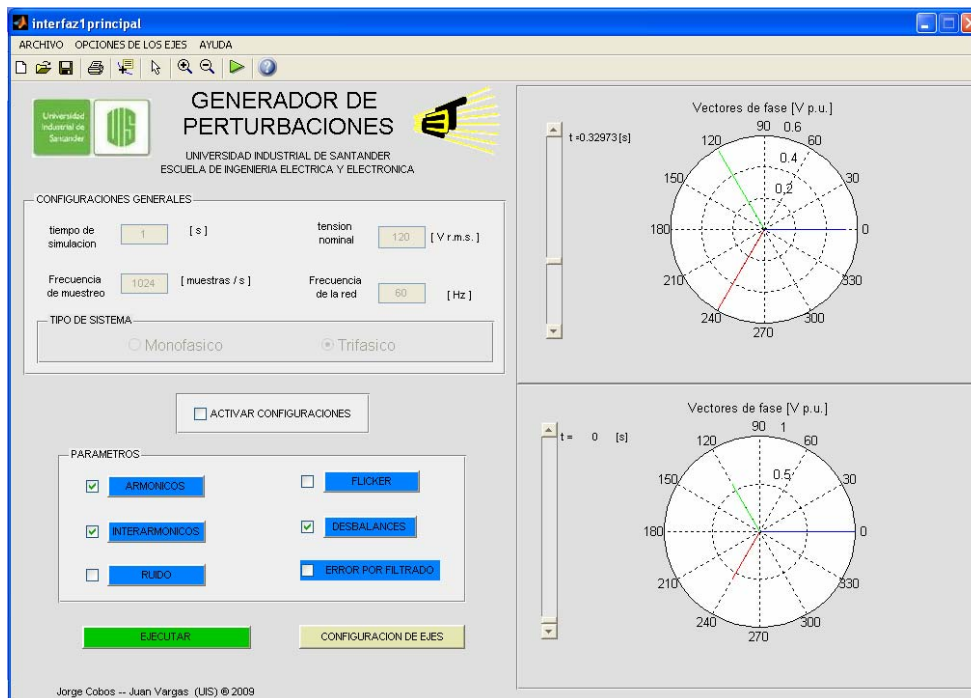


Figura 29. Interfaz principal tomada del generador de perturbaciones.
Fuente: Autores

2.2.8 Interfaz salida. Cuando se han validado los valores respectivos de cada una de las perturbaciones y se desee ver la señal de salida resultante, en la interfaz principal se encuentra el botón *ejecutar*, al pulsarlo muestra la señal final que es la suma de la componente fundamental con las componentes armónicas e interarmónicas, el ruido, el flicker y el desbalance de tensión que se haya configurado (ver figura 30). Esto se puede ver en cada una de las fases por separado o en dos de ellas o en las tres a la vez, siempre y cuando se haya configurado el sistema como trifásico, de lo contrario sólo se mostrará la señal de la fase A.

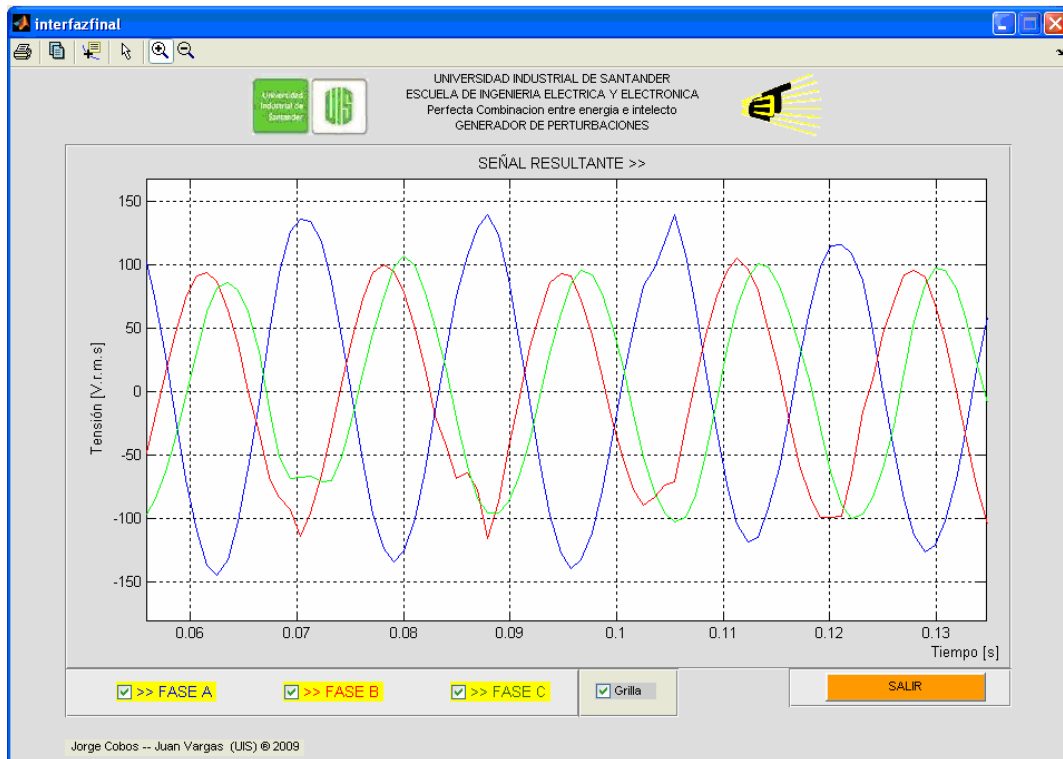


Figura 30. Señal resultante de la simulación tomada del generador de perturbaciones.
Fuente: Autores.

2.3 SIMULACIÓN DEL GENERADOR DE PERTURBACIONES TRIFÁSICO

El principio de funcionamiento del simulador del sistema trifásico, es básicamente el mismo que el monofásico. En cuanto a la programación de los

algoritmos que se utilizaron para la creación de las señales sintéticas, simplemente se tomó cada uno de ellos y se modificaron levemente para crear las otras dos fases, los cambios respectivos fueron en cuanto al nombre de las variables y el ángulo de fase de las señales ($\pm 120^\circ$ dependiendo la fase que se estuviera analizando y del número del armónico que se está simulando).

Al iniciar una simulación con el generador de perturbaciones, se pregunta si la simulación se va a realizar para un sistema monofásico o uno trifásico, dependiendo de esto el generador de perturbaciones habilita o no las otras dos fases (ver Figura 31).

CONFIGURACIONES GENERALES					
tiempo de simulacion	1	[s]	tension nominal	120	[V r.m.s.]
Frecuencia de muestreo	1240	[muestras / s]	Frecuencia de la red	60	[Hz]
TIPO DE SISTEMA					
<input type="radio"/> Monofasico		<input checked="" type="radio"/> Trifasico			

Figura 31. Cuadro de datos de entrada, tomada de la interfaz principal del generador de perturbaciones. Fuente: Autores.

El generador de perturbaciones para el caso de sistemas trifásicos tiene la opción de mostrar las señales de cada una de las fases por separado, facilitando de esta forma el estudio y análisis de cada señal o mostrar las tres en la misma gráfica. Como ejemplo se presentan las formas ondas de tensión en un sistema trifásico equilibrado sin ninguna perturbación en la Figura 32, mientras que en la Figura 33 se muestran las distorsiones que afectan a las tensiones de las tres fases al considerar componentes armónicas diferentes en cada una de las tres fases. Los valores especificados de estas componentes son los propuestos por la norma IEC 61000-2-4 [5] para tres clases diferentes; en este caso se consideraron los valores de la clase 1 en la fase A, los valores de la clase 2 en la fase B y los valores de la clase 3 en la fase C. Obsérvese las diferencias de las tres señales de tensión del sistema trifásico simulado.

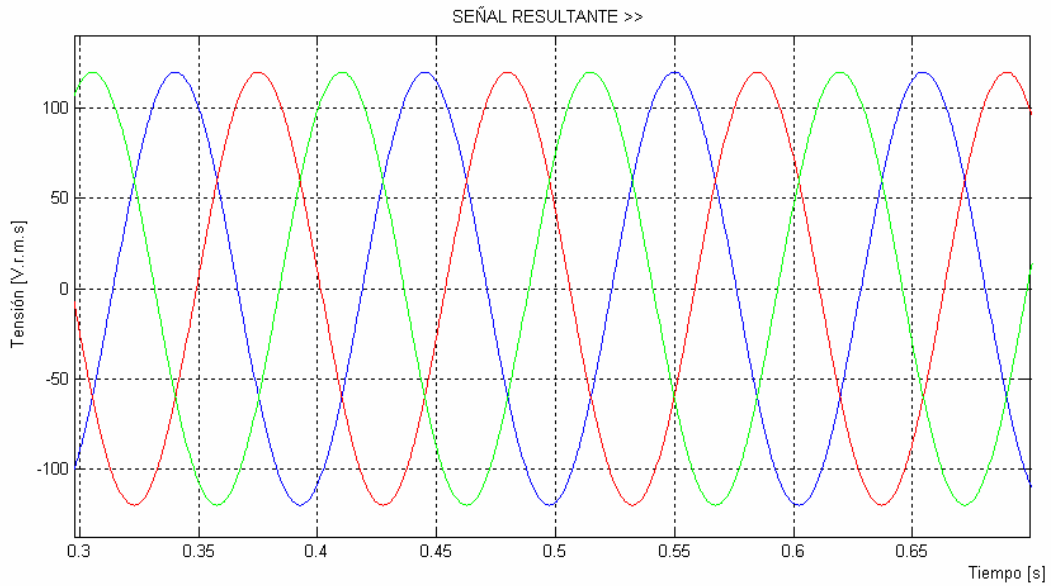


Figura 32. Sistema trifásico balanceado sin ninguna perturbación, tomada del generador de perturbaciones. Fuente: Autores.

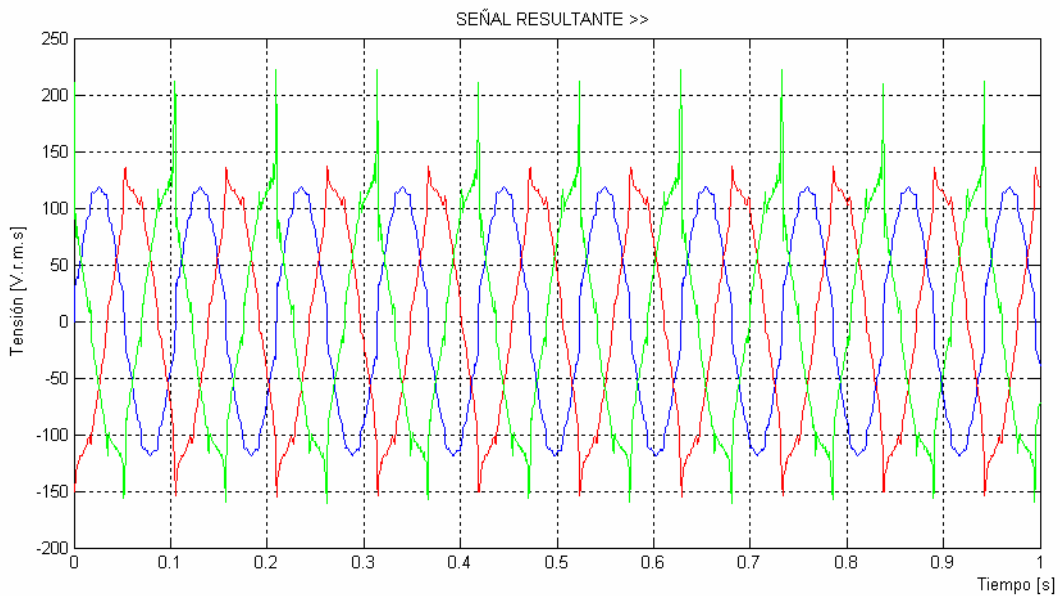


Figura 33. Señal resultante de la adición de los armónicos. Se puede observar que los valores para armónicos de la clase 3 según IEC 61000-2-4 [5] producen los picos de mayor magnitud. Tomada del generador de perturbaciones. Fuente: Autores.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

El programa implementado permite generar y analizar formas de onda de tensión compuestas por la combinación de diferentes señales senoidales con diferentes frecuencias y otros parámetros que al adicionarlos a la componente fundamental distorsionan la señal. A continuación se presenta una serie representativa de señales generadas con el simulador de perturbaciones para ilustrar los rangos y valores permitidos según las normas, en especial la IEC 61000-4-30 [4].

3.1 EJEMPLOS DE APLICACIÓN SEGÚN LA IEC 61000-4-30

Concluida la programación se puede presentar como resultado una interfaz gráfica, la cual tiene como objetivo principal generar de forma sintética las señales necesarias para verificar conformidad de los algoritmos de medida con normas internacionales. Su fácil manejo permite que la interfaz pueda ser utilizada para analizar y comprender los efectos que tienen las perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica y cómo alteran la forma de onda.

A continuación en la Figura 34, a modo de ejemplo, se presenta la forma de onda de la señal de prueba sugerida para establecer la conformidad del algoritmo de medición de Flicker, bajo condiciones de ensayo 1 según la norma IEC 6100-4-30 [4]; para el cual se deben mantener unos valores fijos de las demás magnitudes y se ensaya para 5 valores equidistantes dentro del margen de de la magnitud de influencia, por ejemplo $P_{st} = (0, 5, 10, 15, 20)$. Según norma IEC 61000-4-30 [4]. En la Tabla 1 se muestran los valores permitidos para las condiciones del ensayo 1, y los valores utilizados para generar la señal.

Tensión nominal de la red = 120 [V r.m.s.]

Frecuencia nominal de la red = 60 [Hz]

Se obtiene como resultado la señal que se ilustra en la figura 33. Donde la fase A está en azul, la fase B en rojo, y la fase C en verde.

Magnitudes de influencia	Condiciones de ensayo	Valores aplicados a la señal
Frecuencia	$f_{nom} \pm 0,5\text{Hz}$	Fase A = 60,5 Hz Fase B = 60,5 Hz Fase C = 60,5 Hz
Amplitud de tensión	$U_{din} \pm 1\%$	118,8 V r.m.s.
Flicker	$Pst < 0.1$	Fase A , Pst = 0 Fase B , Pst = 0 Fase C , Pst = 0
Desequilibrio	0% a 0,5% de U_{din}	Fase A = U_{din} Fase B = 99.8% U_{din} Fase C = 100.2% U_{din}
Armónicos	0% a 3% de U_{din}	CEI 61000-2-4 Clase 1 [5], para las tres fases
Interarmónicos	0% a 0,5% de U_{din}	CEI 61000-2-4 Clase 1 [5] para las tres fases

Tabla 1. Valores de las magnitudes de influencia para condiciones de ensayo 1.

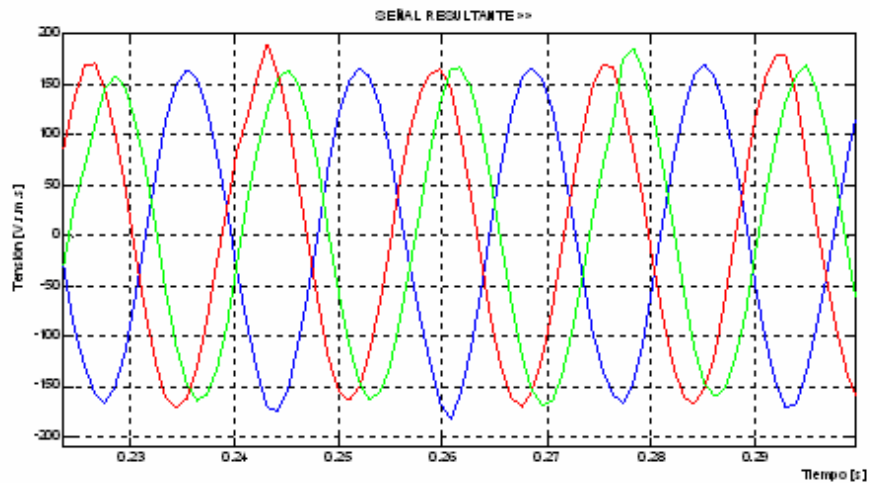


Figura 34 Señal resultante de la simulación tomada del generador de perturbaciones.

3.2 EJEMPLO DE UNA SEÑAL CON COMPONENTE FUNDAMENTAL Y COMPONENTES ARMÓNICAS

En la Figura 35 se muestra la señal con sólo las componentes armónicas que según norma IEC 61000-2-4 deben generarse para establecer la conformidad de equipos de medición de componentes armónicas clase 3 [5]. En la Figura 36 se muestra la distorsión de la componente fundamental cuando se adicionan estas componentes armónicas.

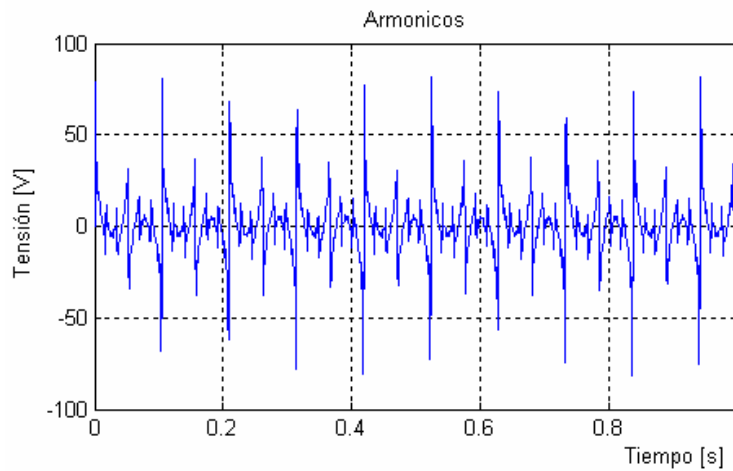


Figura 35 Señal resultante de la suma de las componentes armónicas según la norma IEC 61000-2-4, clase 3 para revisar la conformidad para equipos de medida clase 3. Tomada del generador de perturbaciones.

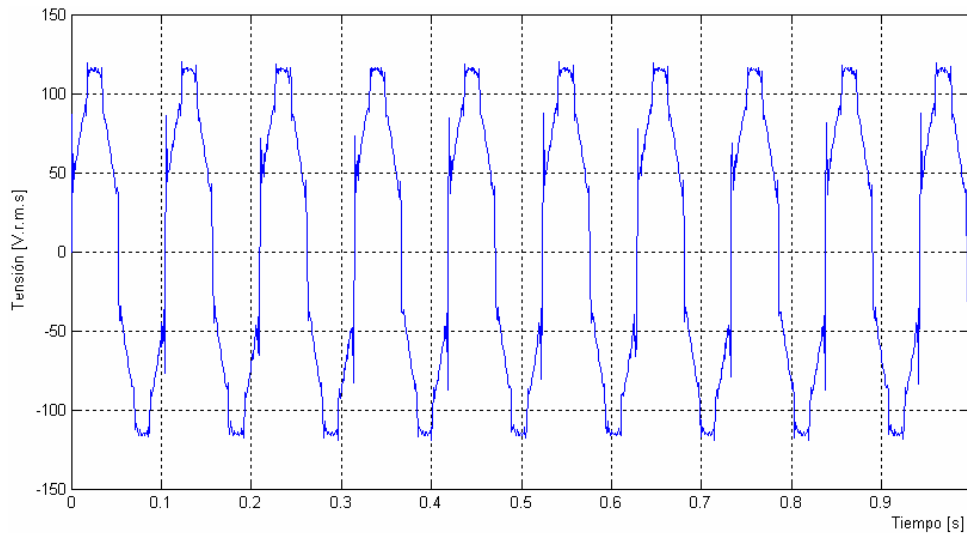


Figura 36 Señal resultante de la suma de la componente fundamental y las componentes armónicas. Nótese la distorsión causada a la senoide (amplitud de 120 [Vr.m.s.] y una frecuencia de 60[Hz]). Tomada del generador de perturbaciones.

3.3 EJEMPLO DE UNA SEÑAL CON COMPONENTE FUNDAMENTAL Y COMPONENTES INTERARMÓNICAS

A continuación se muestra en la Figura 37 la señal resultante de la suma de las componentes interarmónicas que según la norma IEC 61000-2-4 deben generarse para establecer la conformidad de equipos de medición de componentes armónicas clase 3 [5]. La Figura 38 muestra la señal resultante al sumarle las componentes armónicas a la componente fundamental y la Figura 39 muestra una ampliación de la señal de la Figura 38.

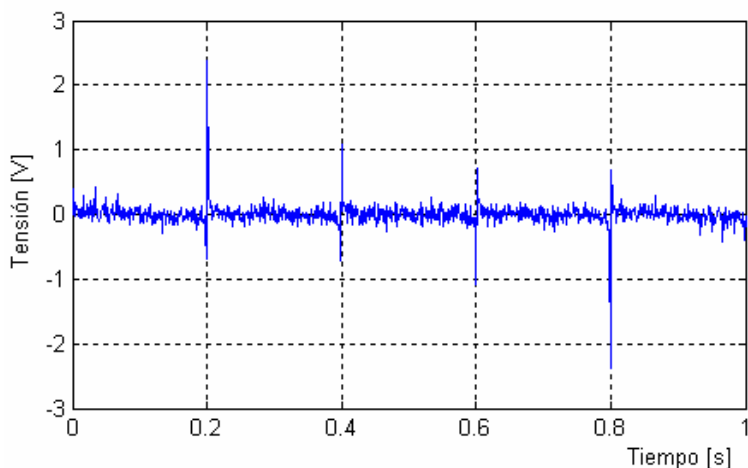


Figura 37 Señal resultante de la suma de las componentes interarmónicas según la norma IEC 61000-2-4, clase 3 para revisar la conformidad para equipos de medida clase 3. Tomada del generador de perturbaciones.

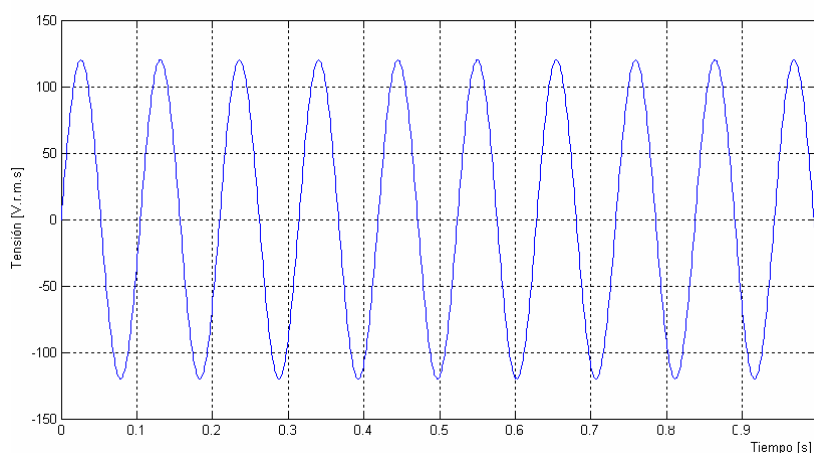


Figura 38 Señal resultante de la suma de la componente fundamental y las componentes interarmónicas. El efecto de los interarmónicos es imperceptible en la componente fundamental (amplitud de 120 [Vr.m.s.] y una frecuencia de 60[Hz]). Tomada del generador de perturbaciones.

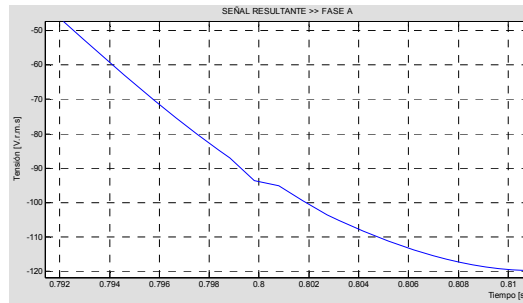


Figura 39 Señal con interarmónicos. Acercamiento, que permite visualizar el efecto de los interarmónicos (amplitud de 120 [Vr.m.s.] y una frecuencia de 60[Hz]), tomada del generador de perturbaciones.

3.4 EJEMPLO DE UNA SEÑAL CON COMPONENTE FUNDAMENTAL Y RUIDO BLANCO Y DE CUANTIFICACIÓN

Para visualizar el efecto de las señales de ruido en una señal con sólo componente fundamental, se muestran dos señales de ruido: una de ruido blanco y otra de ruido de cuantificación. La Figura 40 muestra las señales de ruido blanco y ruido de cuantificación y la Figura 41 el efecto de estas dos señales al sumarse a la componente fundamental de 60 Hz.

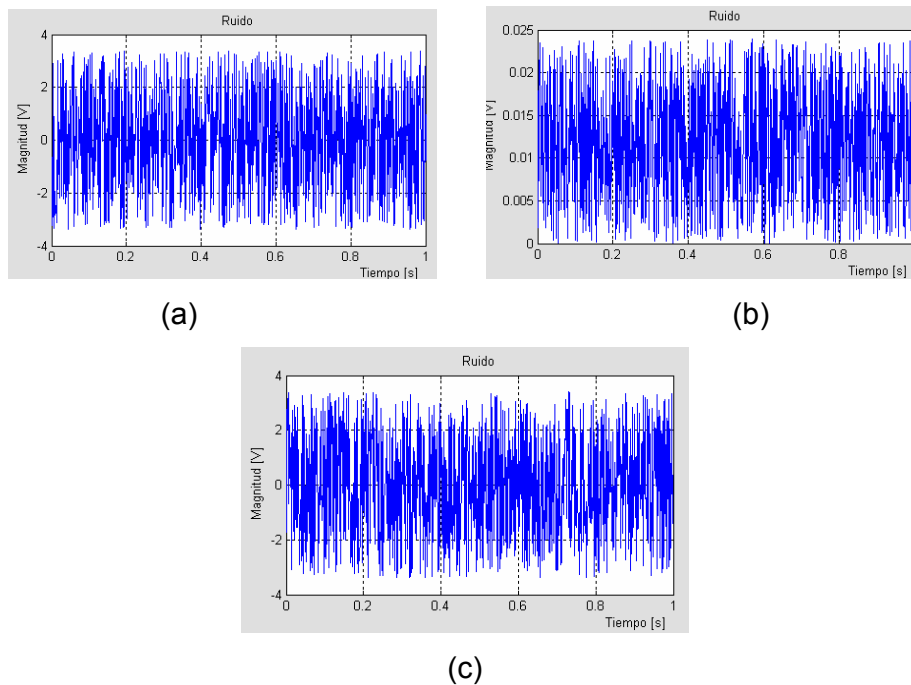


Figura 40. (a) Señal de ruido blanco con relación señal ruido (25 [db] - 6.75 [V]), (b) Señal de ruido de cuantificación (12 bits del convertor) y (c) Suma de las señales de ruido (a) y (b), tomada del generador de perturbaciones.

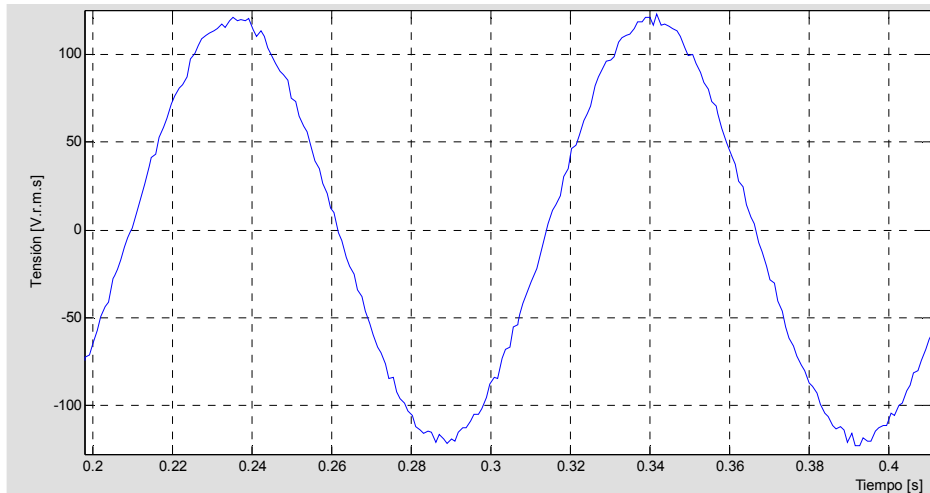


Figura 41 Señal resultante de la suma de la componente fundamental con las señales de ruido de la Figura 40. Tomada del generador de perturbaciones.

3.5 EJEMPLO DE UNA SEÑAL CON COMPONENTE FUNDAMENTAL Y EFECTO DE FLICKER

Para la generación de esta señal se considera que el Flicker tiene modulación cuadrada, con un valor de $P_{st} = 1$ [3]. La Figura 42 muestra la señal generada para simular el efecto del Flicker y la Figura 43 el efecto de este Flicker en la componente fundamental de una señal de 60 Hz.

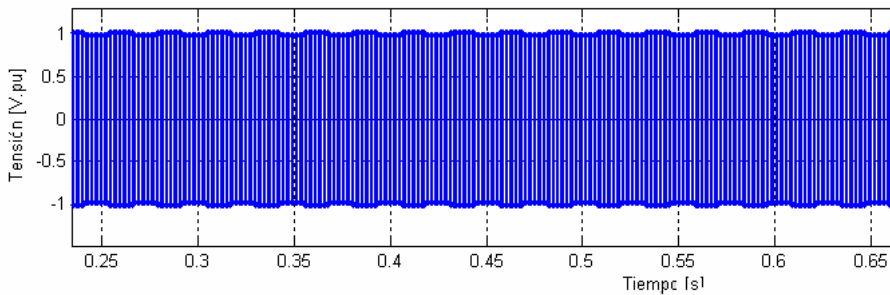


Figura 42 Señal de flicker. Esta señal tiene una modulación cuadrada de 4800 cambios por minuto, con un ΔV de 3,46%. Tomada del generador de perturbaciones.

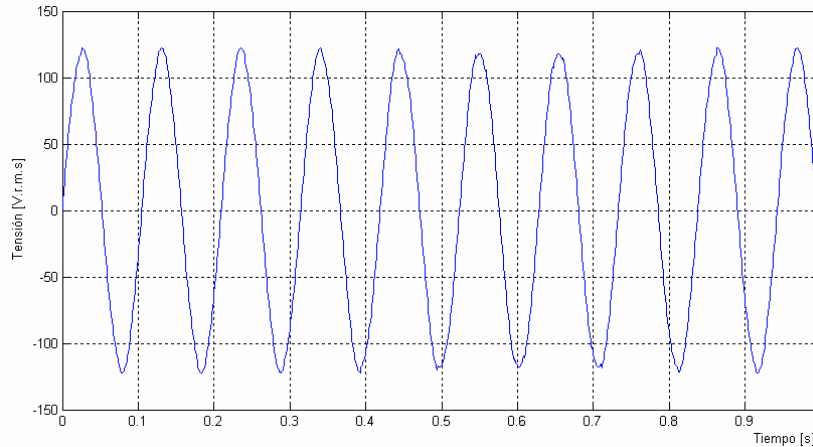


Figura 43 Señal resultante de la suma de la componente fundamental con la señal de Flicker mostrada en la Figura 42. Tomada del generador de perturbaciones.

3.6 EJEMPLO DE UNA SEÑAL QUE SIMULA PERTURBACIONES TRANSITORIAS: HUECO DE TENSIÓN, SOBRETENSIÓN E INTERRUPCIÓN

La generación de una señal con perturbaciones se realiza considerando los valores límites dados por la IEC 61000-4-30 [4], para cada una de estas perturbaciones. Las características simuladas con las siguientes: Un hueco de tensión instantáneo de magnitud de tensión del 80% de la tensión nominal, una sobre tensión instantánea del 110% de la tensión nominal y una interrupción momentánea de magnitud del 10% de la tensión nominal. La señal obtenida con estas perturbaciones se muestra en la Figura 44.

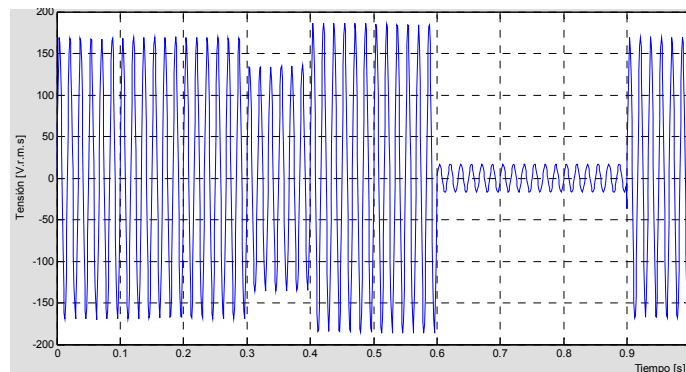


Figura 44 Señal con perturbaciones. La interrupción es momentánea, la sobretensión es instantánea y el hueco de tensión es instantáneo. Tomada del generador de perturbaciones.

Finalmente, en la Figura 45 se muestra la señal resultante al sumar cada una de las perturbaciones establecidas en los ejemplos de este capítulo. Como resultado se tiene una señal distorsionada y con perturbaciones.

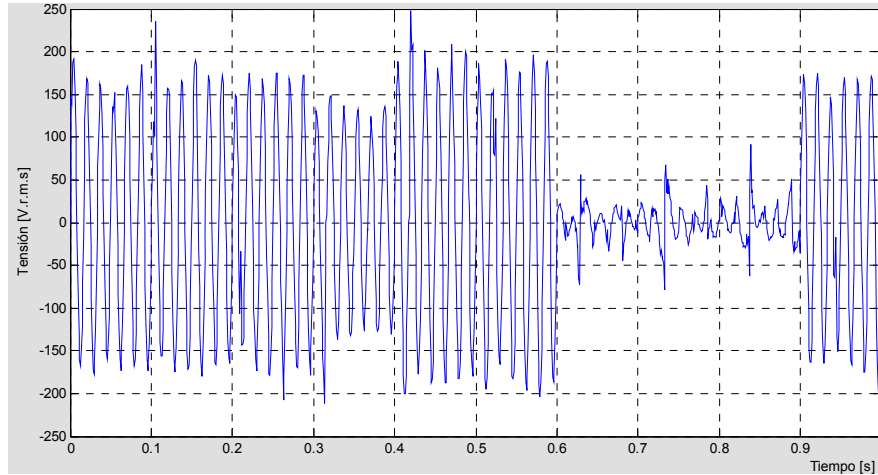


Figura 45 Señal resultante de considerar todas las perturbaciones establecidas en los ejemplos del capítulo 3. Tomada del generador de perturbaciones.

4. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este proyecto, se suministra una herramienta de simulación capaz de reproducir las diferentes perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica en las redes de distribución, además sirve como referencia para la realización de futuros desarrollos e investigaciones en el área de la calidad de la potencia eléctrica ya que permite hacer un análisis previo de cada uno de estos fenómenos mediante la simulación por software.

Las conclusiones relevantes de este trabajo son las siguientes:

1. Un sistema generador de señales sintéticas basado en el programa computacional MATLAB fue diseñado. El simulador es flexible y permite crear señales de tensión con el contenido de componentes armónicas e interarmónicas a las cuales es posible ajustar su magnitud y ángulo de fase, también se pueden considerar señales de ruido de diferentes tipo (coloreado, ruido de cuantificación, ruido o error por redondeo) así como señales con el fenómeno del Flicker, desbalances y fluctuaciones de tensión tanto permanentes como transitorias, tales como huecos de tensión, sobretensiones, interrupciones, cambios rápidos de tensión; igualmente se pueden realizar cambios de frecuencia y de fase según se requiera, tanto para sistemas monofásicos como trifásicos.
2. La interfaz grafica del simulador permite realizar cambios en los parámetros de forma sencilla y didáctica facilitando de esta forma el análisis en el dominio del tiempo de cada las perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica.
3. Las características y principios de funcionamiento del generador de perturbaciones se basan en los algoritmos que fueron sometidos a diferentes pruebas, para de esta forma comparar sus resultados con los

resultados dados por las normas internacionales, esto hace que el simulador del generador de perturbaciones sea confiable y sea un referente para futuros desarrollos relacionados con el tema de la calidad de la energía eléctrica.

4. Con el propósito de hacer del generador de perturbaciones una herramienta lo más real posible, se introdujo la interfaz de ruido en donde el usuario puede agregar diferentes tipos de ruido para ver los efectos que esto conlleva.
5. Al finalizar una simulación se pueden obtener los vectores y matrices utilizados para la creación de las señales según parámetros dados previamente por el usuario de esta forma se puede hacer un análisis más detallado de cada perturbación.
6. El trabajo en equipo y cooperación interdisciplinaria, es de vital importancia para el desarrollo satisfactorio de un sistema como el implementado en este trabajo de grado que corresponde a una parte de un proyecto de investigación sobre monitorización de calidad de la energía eléctrica.
7. Con el desarrollo de este simulador se deja abierta la posibilidad, de un futuro desarrollo de un generador de perturbaciones real, así mismo de múltiples algoritmos y equipos de medida de los parámetros que influyen en la calidad de la energía eléctrica. Cumpliendo con la norma IEC 61000-4-30.
8. Este proyecto nos sirvió de gran experiencia, ya que la calidad de energía eléctrica es un tema relativamente nuevo sobre el cual aun queda mucho por investigar, lo cual nos abre un inmenso campo laboral.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] **Norma EN 50160**; Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. CENELEC, distribuye en España AENOR.

[2] **Norma CEI 61000- 4- 7**; EMC. Part 4. Testing and measurement techniques. Sect.7 General guide on harmonics and interharmonics measurements and Instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto CENELEC, distribuye en España AENOR.

[3] **Norma CEI 61000- 4- 15**; EMC. Part 4. Testing and measurement techniques. Sect. 15. Flickermeter. CENELEC, distribuye en España AENOR.

[4] **Norma CEI 61000- 4- 30 (Draft)**; EMC. Part 4. Testing and measurement techniques: Power Quality measurement methods. CENELEC, distribuye en España AENOR

[5] **Norma CEI 61000-2-4**; EMC - Part 2-4 - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances, CENELEC, distribuye en España AENOR.

[6] **Norma CEI 61000-2-2 (2002-03)**; EMC - Part 2-2 Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems, CENELEC, distribuye en España AENOR.

[7] VILLAMIZAR MONTES, Libardo. **Prototipo de Herramienta Software para la Estimación de Parámetros de la Maquina Síncrona Bajo Condiciones de Carga**. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia, 2008.

[8] ROMERO AGÜERO, Julio. **Introducción a la Calidad del Servicio Eléctrico**, Ciclo de Conferencias de la Rama Estudiantil de IEEE - Honduras, Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), Tegucigalpa, Honduras, 10 Mar. 2006.

ANEXO A

Estos algoritmos se realizaron con ayuda de MATLAB y son estos los que permiten crear las diferentes señales, estos algoritmos se hicieron previamente para hacer diferentes pruebas y comprobar su confiabilidad. Después de esto se crearon las diferentes interfaces graficas y con estos algoritmos fue más sencilla la programación.

ALGORITMOS REALIZADOS

```
disp '          SIMULADOR DE UN GENERADOR DE PERTURBACIONES'
disp ' '
disp 'CONFIGURACIONES PREVIAS '
disp ' '
dur = input ('Especifique el tiempo de simulación [ s ] = ');
cmues = input ('Digite el número de muestras por segundo con el cual
desea trabajar [Fs]= ');
mues = cmues*dur;
disp 'si desea mantener los mismos valores de tensión y frecuencia
durante todo el tiempo de simulación'
igu = input('digite 1 >> ');
t=linspace(0,dur,mues);
    va = t*0;
    %vb = t*0;
    %vc = t*0;
    vf = t*0;
    vfsa=t*0;
if igu==1
    a = input ('Marque el valor de la tensión nominal de operación en
[Vrms] en la que desea trabajar ');
    a = a*2^(1/2);
    varm=a;
    va = va+a;
    %vb = va;
    %vc = va;
    disp 'Por defecto la frecuencia de operación es de 60 Hz'
    cond = input ('si desea cambiarla digite "1" de los contrario
digite cualquier número ');
    disp ' '

    if cond == 1
        f= input('frecuencia a la que desea operar en Hz = ');
        f= 2*pi*f;
        vf = vf+f;
    else
        f=120*pi;
        vf = vf+f;
    end
desa = 100;
```

```

disp 'Configuración de fases '
disp ' '
fsa = input ('Especifique el desfase en grados respecto a los 0°
para la fase A ');
vfsa=vfsa+fsa;
else
varm=input('valor nominal de tensión de la linea >> ');
tprima=0;
vect=1;
vectf=1;
vectfsa=1;
a=input('Valor inicial para la tensión de la fase A >> ');
f=input('Valor inicial para la frecuencia de la fase A >> ');
desa = 100;
disp 'Configuración de fases '
disp ' '
fsa = input ('Especifique el desfase en grados respecto a los 0°
para la fase A ');
a=a*2^(1/2);
f=2*pi*f;
while tprima<dur
segundos=dur-tprima;
disp ' '
disp 'la duración máx del intervalo en >> ',segundos
disp ' '
tsum= input('Duración del intervalo [ s ] = ');
VIa=a;
a = input ('Marque el valor de la tensión nominal para la FASE
A en [Vrms] en este intervalo >> ');
a = a*2^(1/2);
%b = input ('Marque el valor de la tensión nominal para la
FASE B en [Vrms] en este intervalo >> ');
%b = b*2^(1/2);
%c = input ('Marque el valor de la tensión nominal para la
FASE C en [Vrms] en este intervalo >> ');
%c = c*2^(1/2);

TO=tprima;
tprima=tprima+tsum;
%tie=linspace(TO,tprima,cmues*3600*tprima);
if VIa==a
cond=1;
else
disp ' Forma en la cual desea que se realice el cambio en
la magnitud'
cond=input(' escalon >> 1, rampa >> 2,
cuadratica >> 3 >>');
disp ' '
end
if cond==2
cu=1;
while cmues*tprima >= vect
va(vect)=((a-VIa)/(tprima-TO+1e-7))*(t(vect)-TO)+VIa;
vect=vect+1;
end
elseif cond==3
cu=1;
while cmues*tprima >= vect
va(vect)=((t(vect)-TO)^2*(a-VIa)/(TO-tprima+1e-
7)^2)+VIa;
vect=vect+1;

```

```

        end
elseif cond==1
    while cmues*tprima >= vect
        va(vect) = va(vect)+a;
        %vb(vect) = vb(vect)+b;
        %vc(vect) = vc(vect)+c;
        vect=vect+1;

        end
    end
VIf=f;
f= input('frecuencia de operación para este intervalo en Hz =
');
f= 2*pi*f;
if VIf==f
    cond=1;
else
    disp ' Forma en la cual desea que se realice el cambio en
la frecuencia'
    cond=input(' escalon >> 1, rampa >> 2,
cuadratica >> 3 >>');
    disp ' '
    cond=1;
end
if cond==2
    cu=1;
    while cmues*tprima >= vectf
        vf(vectf)=((f-VIf)/(tprima-TO+1e-7))*(t(vectf)-
TO)+VIf;
        vectf=vectf+1;

        end
elseif cond==3
    cu=1;
    while cmues*tprima >= vectf
        vf(vectf)=((t(vectf)-TO)^2*(f-VIf)/(TO-tprima+1e-
7)^2)+VIf;
        vectf=vectf+1;
    end
elseif cond==1
    while cmues*tprima >= vectf
        vf(vectf) =f;
        vectf=vectf+1;
    end
end
VIfsa=fsa;
fsa= input('Desfase para este intervalo en [ grados ] = ');
if VIfsa==fsa
    cond=1;
else
    disp ' Forma en la cual desea que se realice el cambio en
la fase'
    cond=input(' escalon >> 1, rampa >> 2,
cuadratica >> 3 >>');
    disp ' '
end
if cond==2
    cu=1;
    while cmues*tprima >= vectfsa
        vfsa(vectfsa)=((fsa-VIfsa)/(tprima-TO+1e-
7))*(t(vectfsa)-TO)+VIfsa;

```

```

        vectfsa=vectfsa+1;

    end
elseif condf==3
    cu=1;
    while cmues*tprima >= vectfsa
        vfsa(vectfsa)=((t(vectfsa)-TO)^2*(fsa-Vifsa)/(TO-
tprima+1e-7)^2)+Vifsa;
        vectfsa=vectfsa+1;
    end
elseif condf==1
    while cmues*tprima >= vectfsa
        vfsa(vectfsa) =fsa;
        vectfsa=vectfsa+1;
    end
end
end
end
end

```

SALIDA

```

clc
confarm = input ('si ya configuro los armónicos marque 0 >> ');
confintarm = input ('si ya configuro los interarmónicos marque 0 >> ');
if confarm == 0
iarm = input ('para incluir los armónicos marque 1 >> ');
else
    iarm = 0;
end
if confintarm == 0
iintarm = input ('para incluir los interarmónicos marque 1 >> ');
else
    iintarm=0;
end
t=linspace(0,dur,mues);
cruido=input('Digite "1" si desea agregar ruido blanco a la señal >> ');
if cruido==1
    porrui=input('Digite el valor del ruido en [ V ] >> ');
    porrui=porrui*rand(1,length(t));
    cruidorojo=input('Digite "1" si desea agregar ruido rojo a la
señal >> ');
    if cruidorojo==1
        ruidorojo=filter([0.0017 -0.0034 0.0066 -0.0117 0.0192 -0.0300
0.0460 -0.0704 0.1119 -0.2026 0.6334 0.6334 -0.2026 0.1119 -0.0704
0.0460 -0.0300 0.0192 -0.0117 0.0066 -0.0034 0.0017],1,porrui);
    else
        ruidorojo=0;
        %cruideoazul=input('Digite "1" si desea agregar ruido azul a la
señal >> ');
        %ruidoazul=filter((0.0131 -0.0415 0.0827 -0.1204 0.1358 -
0.1204 0.0827 -0.0415 0.0131),1,diff([0,porrui]));
        %if
    end
else
    porrui=0;
end

```

```

    ruidorojo=0;
end
%contsal=0;
%while contsal<mues
%   contsal=contsal+1;
%
Vfuna(contsal)=va(contsal)*desa/100*sin(f(contsal)*t+fsa(contsal));
    %Vfunb=vb*desb/100.*sin(f.*t+fasb);
    %Vfunc=vc*desc/100.*sin(f.*t+fasc);
%end
contsal=1;
Vfuna=0*t;
while contsal<=mues
Vfuna(contsal)=va(contsal)*desa/100*sin(vf(contsal)*t(contsal)+vfa(contsal));
contsal=contsal+1;
end
if confarm > 0
    arm = 0*t;
end
if confintarm > 0
    tintarm = 0*t;
end
if iarm == 1
    defarm=arm;
else
    defarm = 0*arm;
end
if iintarm == 1
    defintarm = tintarm;
else
    defintarm = 0*tintarm;
end
sal=Vfuna+defarm+defintarm;
sal=sal+porrui+ruidorojo;
%plot(t,sal)
%grid on
ondasalidaa=[t;sal]';
save ondas ondasalidaa t sal f

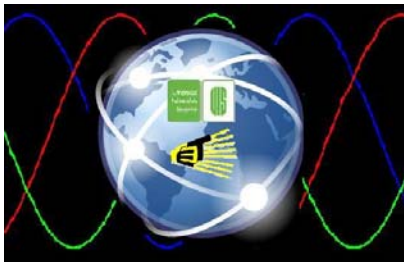
```

ANEXO B

El generador de perturbaciones, es una herramienta computacional de apoyo a la generación, análisis, estudio y medida de los parámetros que afectan la calidad de la energía eléctrica. Se puede acceder al generador de perturbaciones a través del sistema operativo Windows, con el programa MATLAB. Este manual permitirá aprender a utilizar todas las funcionalidades básicas del generador de perturbaciones.

MANUAL DE USUARIO

GENERADOR DE PERTURBACIONES

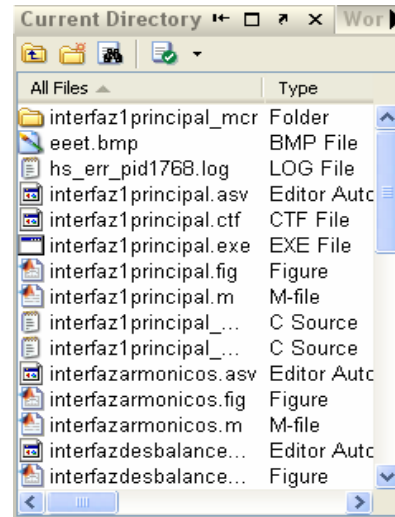
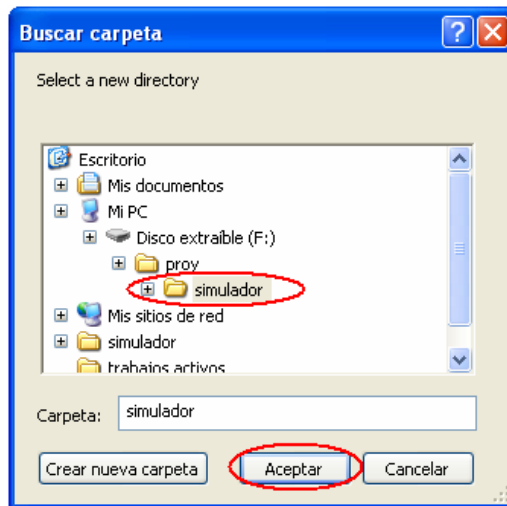
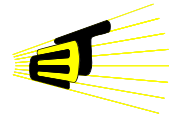


¿Cómo acceder al Generador de perturbaciones?

Abrir MATLAB y buscar la carpeta con el nombre **simulador**. Para ubicar el directorio de forma rápida pulsamos el botón que esta la parte superior derecha de la barra de herramientas de MATLAB. En la figura se muestra encerrado por el círculo rojo

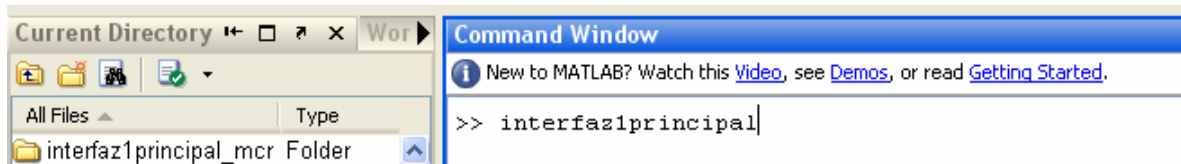


Luego de ubicar la carpeta **simulador** damos click en aceptar. Ahora es posible apreciar todos los archivos vinculados a esta carpeta



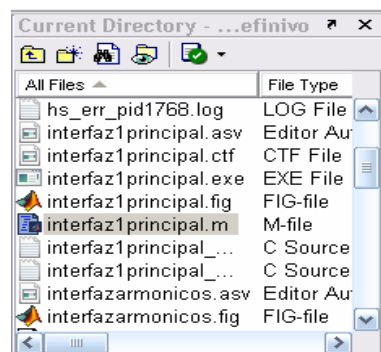
a- Acceso rápido (recomendado)

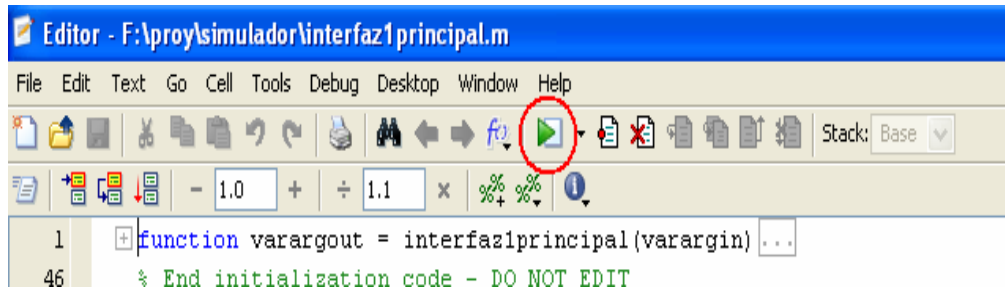
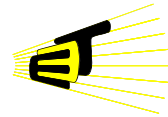
Una vez hecho esto puede acceder al programa digitando en la ventana de comandos de MATLAB `interfaz1principal` y pulsar entrar



b- Acceso avanzado

Ubicar el archivo **interfaz1principal.m** al abrirlo se encontrará con el archivo de texto asociado a la interfaz grafica, en el centro de la ventana que contiene el archivo .m encontrara una flecha verde (Run), el cual se debe pulsar.



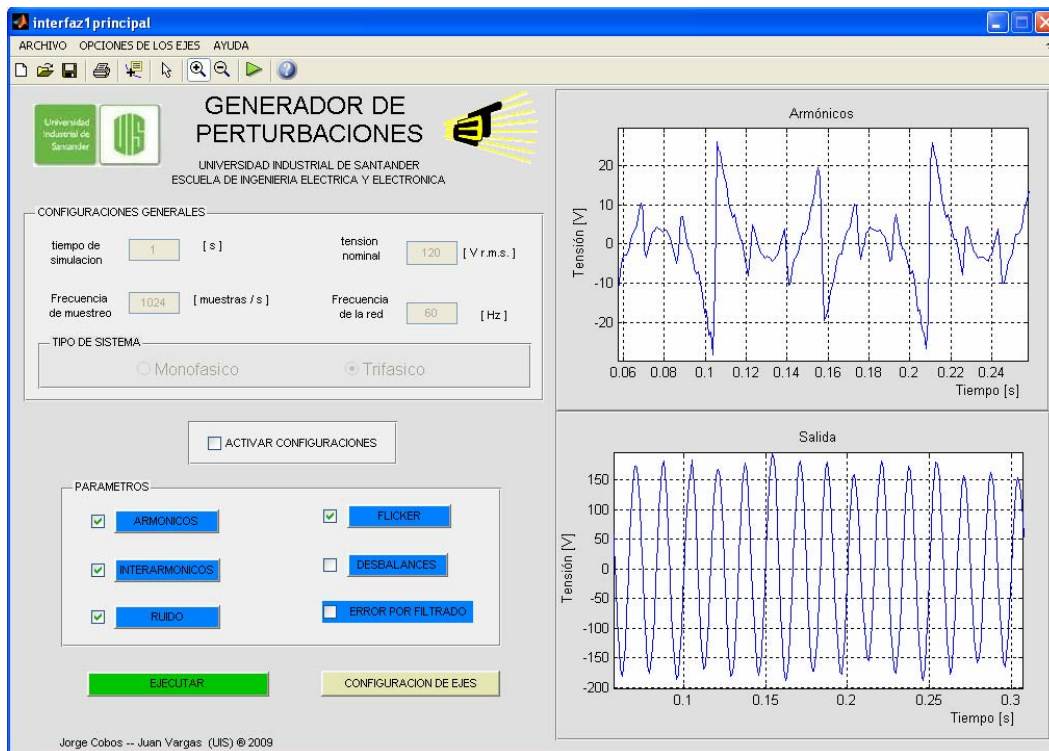


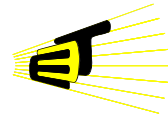
Nota: esta forma no se recomienda debido a que cualquier cambio en el archivo de texto puede originar el mal funcionamiento o dañarlo completamente.

Luego de abrir el programa se va encontrar con la ventana principal del Generador de perturbaciones.

1. PANTALLA PRINCIPAL

Al ejecutar el programa se encontrará con la interfaz principal la cual tiene el siguiente formato:



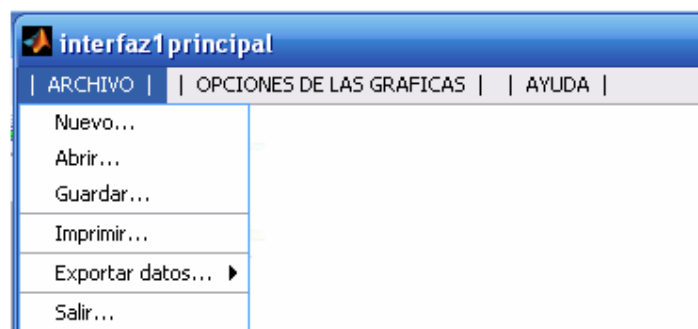


Esta tiene una serie de botones, ejes y entradas editables la cuales se explicaran con detalle más adelante.

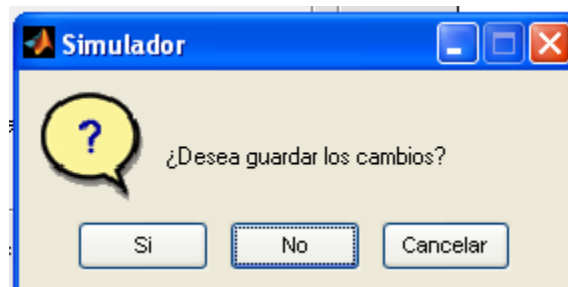
1.1. MENÚS

En la parte superior izquierda la interfaz principal cuenta con unos menús y sus respectivos submenús estos son: **ARCHIVO, OPCIONES DE LAS GRAFICAS Y AYUDA.**

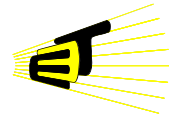
1.1.1. ARCHIVO



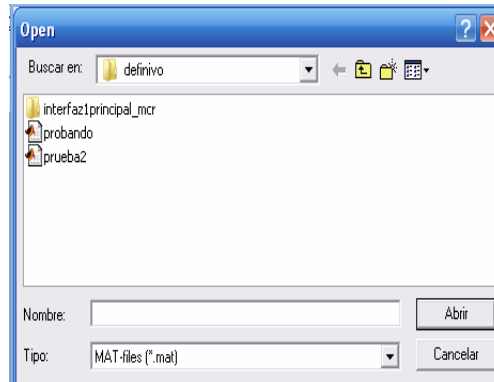
Nuevo: el cual al seleccionarlo “reinicializa” el programa, borrando las graficas en los ejes y volviendo a los valores iniciales dados por defecto, con el fin de evitar que por accidente se reinicialice la simulación borrando todas la variables configuradas, luego de pulsar nuevo aparecerá el siguiente mensaje de confirmación:



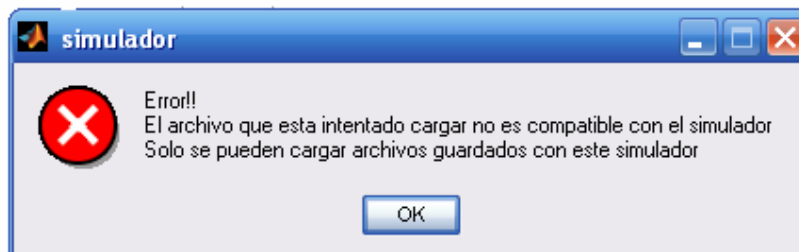
Abrir: esta opción que cumple con la función de cargar los datos de simulaciones previamente guardados. En configuraciones generales aparecerá el valor de la magnitud de cada uno de las variables (tiempo total de simulación, frecuencia de muestreo, frecuencia del sistema, tensión nominal) también mostrará las señales resultantes en cada fase (esto se puede ver al pulsar el botón **EJECUTAR Y CONFIGURACIÓN DE GRAFICAS**) y al seleccionar cada una de las perturbaciones en cada fase



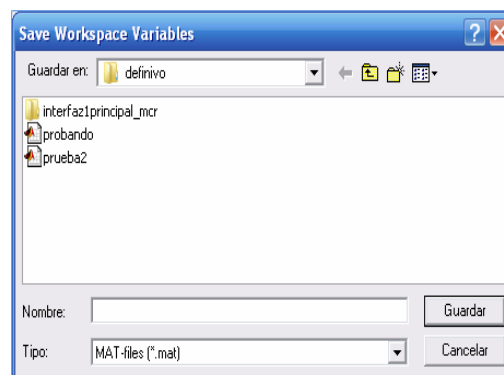
se mostrarán los valores y las señales correspondientes a los datos dados cuando se realizó dicha simulación.



NOTA: El simulador de perturbaciones solo permite cargar los archivos .MAT previamente guardados por el mismo. De lo contrario muestra el siguiente mensaje:

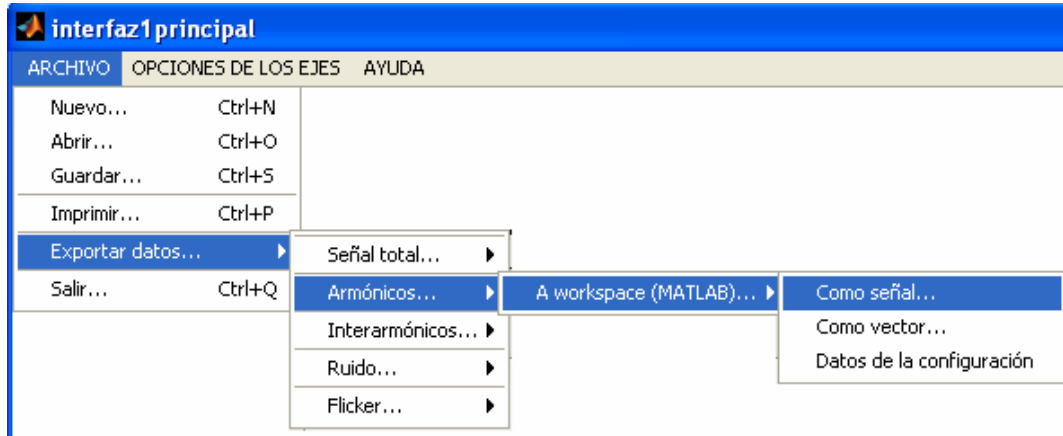
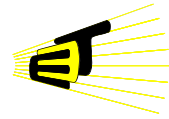


Guardar: que permite salvar los datos de la simulación en un archivo .MAT.



Imprimir: imprime una copia de la ventana principal

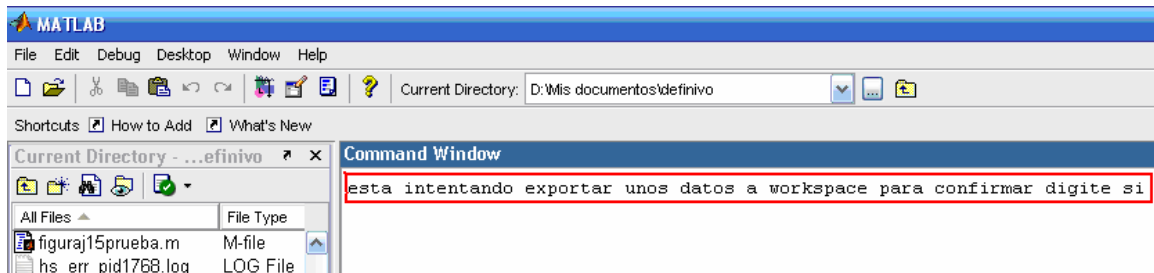
Exportar datos: permite exportar al workspace de MATLAB los vectores, las señales y para algunos casos los datos de configuración para todos los parámetros así como de la salida resultante.



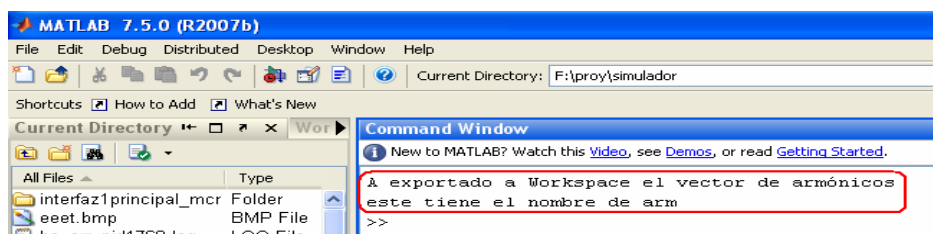
Esta opción le sirve al usuario para obtener los valores de los vectores y matrices utilizados para crear las señales sintéticas con los datos dados.

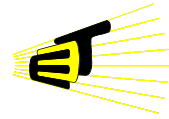
Como ejemplo se mostrará los datos como vector de los armónicos utilizados en una simulación de 1 segundo con una frecuencia de muestreo de 1240 muestras/segundo, con una tensión de 120 Vr.m.s. y una frecuencia de 60 Hertz.

Después de configurar los armónicos se va al menú **ARCHIVO** y al submenú **Exportar datos, Armónicos**, se escoge la opción **como vector** e inmediatamente en el workspace de MATLAB aparecerá:



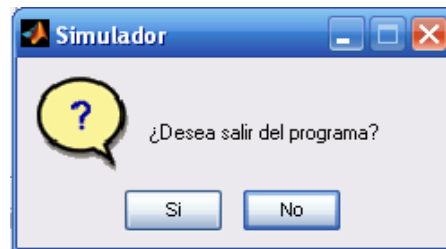
Al digitar **si**, MATLAB le dará el nombre de la variable para este caso es **arm** y con esto se mostrará la matriz correspondiente.





Esto se hace con las demás perturbaciones incluidas en el submenú (interarmónicos, ruido, flicker y la señal total).

Salir: esta la opción de salida donde se pregunta si realmente quiere dejar el programa o no, esto es con el fin de dar una salida directa del simulador.



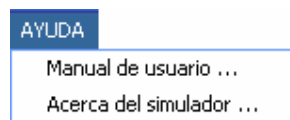
1.1.2. OPCIONES DE LAS GRAFICAS

Vista: con el fin una mejor visualización de las curvas mostradas en los ejes el usuario tiene la opción de acercar o alejar la vista, así como restablecer al grafica que se muestra por defecto



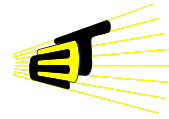
Copiar figura: el cual permite realizar una copia del eje como archivo de imagen para ser utilizado en cualquier otro archivo. Esto puede hacerlo tanto en el eje superior como en el inferior.

1.1.3. AYUDA



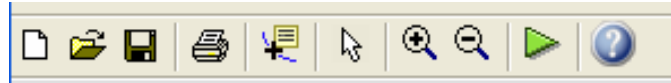
Manual del usuario: muestra los tips acerca del generador de perturbaciones esto con el fin de solucionar cualquier inconveniente que se presente durante una simulación.

Acerca del simulador: muestra la información en la cual puede contactar a los autores para realizarles sugerencias y/o preguntas sobre el simulador.



1.2. BARRA DE HERRAMIENTAS

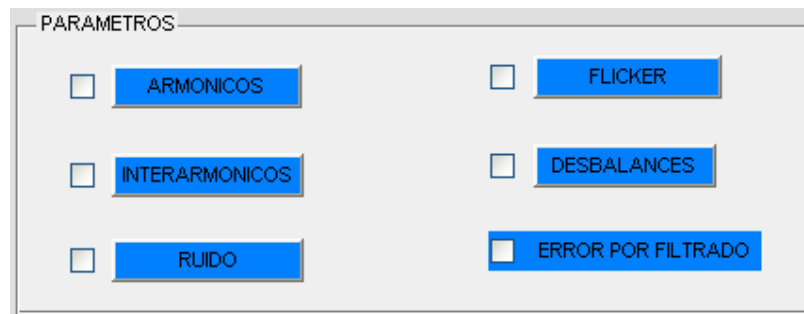
Con el fin de tener acceso rápido a algunas funciones del simulador se diseña la barra de herramienta que se muestra a continuación



De izquierda a derecha encontramos los botones:

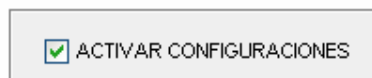
- Nuevo, abrir, guardar e imprimir, estos cumplen la misma función de los explicados en el menú ARCHIVO.
- Data cursor, permite tener información de la señales graficadas
- Flecha, restaura el cursor a su forma original
- Acercar y alejar, cumplen con las mismas funciones ya explicadas en el submenú VISTA del menú OPCIONES DE LAS GRAFICAS.
- Ejecutar, genera le grafica de la señal de salida.
- Ayuda, muestra el manual de usuario.

1.3. PARAMETROS

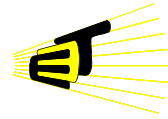


Estos botón abren ventanas secundarias que permiten configurar las perturbaciones que se van a introducir a la señal, más adelante se hablara con detalle de cada botón y su interfaz secundaria asociada.

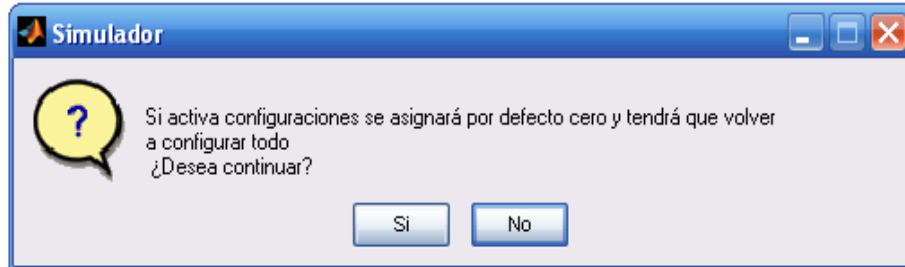
1.4. ACTIVAR CONFIGURACIONES



En la parte central de la interfaz principal se encuentra el check-box correspondiente, este comando sirve para cambiar las CONFIGURACIONES GENERALES (tiempo total de simulación,



frecuencia de muestreo, frecuencia del sistema, tensión nominal), ya que estas variables son fijas durante una simulación.

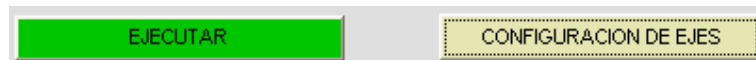


Cuando se selecciona aparece este mensaje de advertencia si se da **SI**, en el cuadro de configuraciones generales aparecerán todas las variables con valor de cero, inmediatamente se borrará de la memoria cualquier configuración hecha con anterioridad y los ejes borrarán cualquier grafica que hubieran mostrado.



1.5. OTRAS FUNCIONES

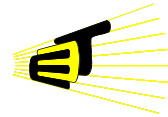
En la interfaz principal se pueden visualizar en la parte inferior los botones ejecutar y configuración de ejes, los cuales se detallaran más adelante.



2. PASOS PARA REALIZAR UNA SIMULACIÓN

2.1. CONFIGURACIONES GENERALES.

Cuando se requiera hacer uso del generador de perturbaciones lo primero que se tiene que hacer es dar los datos generales de la simulación, para ello



está **CONFIGURACIONES GENERALES**, aquí se pregunta el tiempo total de la simulación, el número de muestras por segundo, la tensión del sistema R.M.S. y la frecuencia del sistema, por defecto aparecerá al principio de cada simulación estos valores que pueden ser modificados a voluntad por el usuario. Aparte de esto debe elegir si el sistema es monofásico o trifásico esto hará que las demás fases se deshabiliten o estén activas para ser configuradas.

CONFIGURACIONES GENERALES

tiempo de simulacion	<input type="text" value="180"/> [s]	tension nominal	<input type="text" value="120"/> [V r.m.s.]
Frecuencia de muestreo	<input type="text" value="10240"/> [muestras / s]	Frecuencia de la red	<input type="text" value="60"/> [Hz]

TIPO DE SISTEMA

Monofasico Trifasico

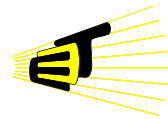
2.2. CONFIGURACION DE PARAMETROS

PARAMETROS

<input type="checkbox"/> ARMONICOS	<input type="checkbox"/> FLICKER
<input type="checkbox"/> INTERARMONICOS	<input type="checkbox"/> DESBALANCES
<input type="checkbox"/> RUIDO	<input type="checkbox"/> ERROR POR FILTRADO

Debajo de configuraciones generales se encuentra **PARAMETROS** allí se localizan los botones respectivos para configurar los **armónicos**, **interarmónicos**, **ruido**, **flicker** y cualquier **desbalance** (huecos, interrupciones, sobretensiones, cambios rápidos de tensión y de frecuencia, desfasaje); se seleccionan solo las que se requieran para el debido análisis. Al final se puede seleccionar **error por filtrado** en donde se simula el error que puede producir un equipo de medida en la adquisición de datos.

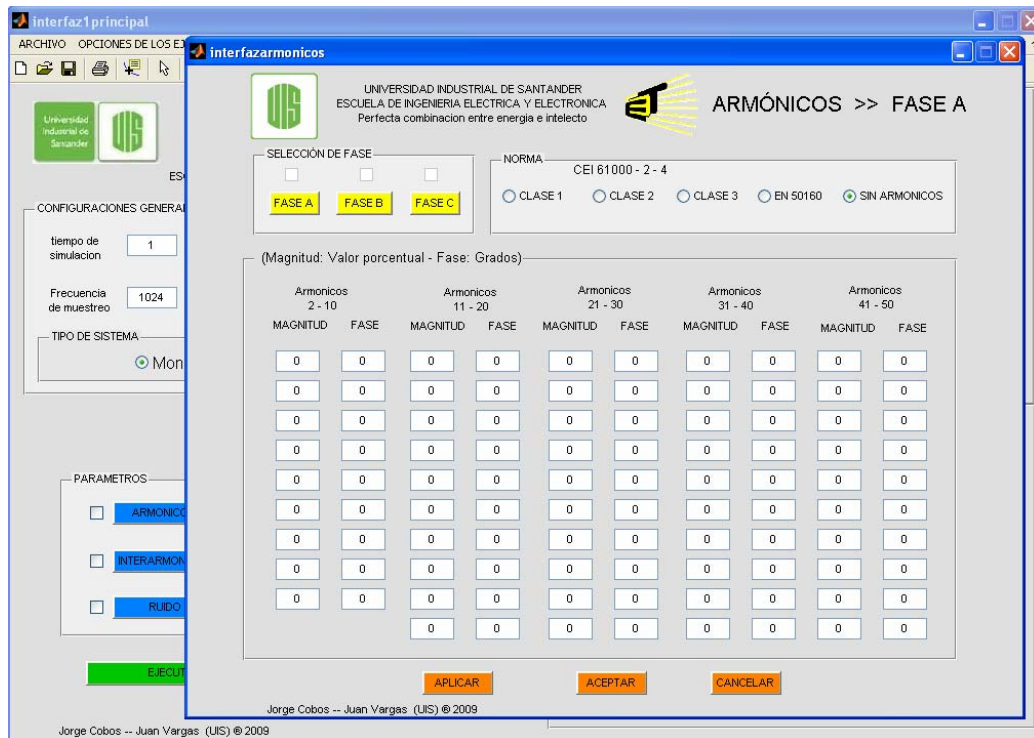
Cuando se termina de configurar con éxito alguno de los parámetros este aparecerá marcado en la principal, en la imagen se muestra a modo de ejemplo que los armónicos ya están configurados y los demás aun no. Esto ayuda de manera que muestra que perturbación esta siendo sumada a la onda senoidal y de esta forma entender la señal resultante, mostrando los efectos que se causa a la senoide cuando se quita y se le adicionan las diferentes perturbaciones ya configuradas.



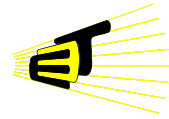
2.2.1. CONFIGURACIÓN DE ARMÓNICOS



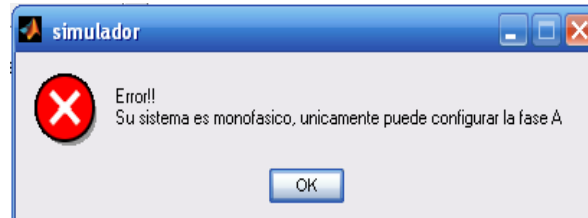
Tras pulsar el botón mostrado se proceder a configurar las perturbaciones, aquí se mostrará cada una de ellas empezando con los armónicos en donde se despliega una interfaz secundaria con la opción de incluir los armónicos que se requieran uno a uno se digitan en cada una de las fases o si se prefiere se utilizan los valores ya configurados de acuerdo a la norma CEI 61000-2-4 y la norma 50160 los cuales ya tienen en cuenta la secuencia armónica o simplemente sin armónicos si no se necesitan. Se empieza con la fase A se escoge la clase o se digitan los valores que se requieren dando su magnitud (valor porcentual) y la fase (grados), a continuación se da aplicar y el programa automáticamente almacena estos valores, se procede a hacer lo mismo con las otras fases cuando el sistema es trifásico.



Recuerde: que en configuraciones generales debe decidir si el sistema es trifásico o monofásico de igual forma el sistema avisa con mensajes de error (ver figura abajo). Cuando se selecciona un sistema monofásico y se intenta modificar la fase B o C este tipo de mensajes aparece, el sistema esta diseñado para que con estos mensajes el usuario pueda resolver cualquier



duda por si mismo, lo que convierte al simulador en un programa de fácil manejo y entendimiento.



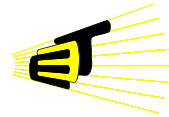
Para finalizar la configuración de armónicos se da **ACEPTAR**, inmediatamente se despliega la principal con la onda correspondiente. Esta onda muestra los cambios en cuanto a los armónicos se refieren de la fase A para ver los de la fase B o C remítase al botón **CONFIGURACIÓN DE GRAFICAS**.

2.2.2. CONFIGURACIÓN DE INTERARMONICOS

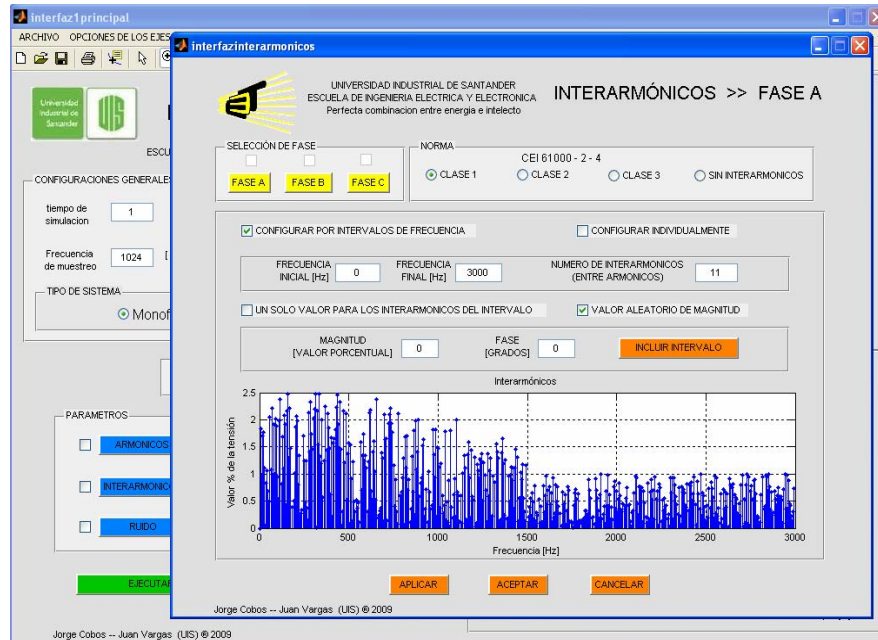
INTERARMONICOS

Si se hace necesario utilizar el comando interarmónicos simplemente se vuelve al cuadro de parámetros y se da clic al botón interarmónicos inmediatamente se abre la interfaz respectiva. Como en el caso de armónicos se puede digitar manualmente el valor porcentual de la magnitud de tensión y de la fase en grados, o escoger los valores preestablecidos de la clase I, II, III de la norma CEI 61000-2-4 esto para cada una de las fases, el programa también pregunta cuantos interarmónicos entre dos armónicos. , para este caso se permite configurar individualmente cada interarmónico, para este caso el usuario debe introducir la frecuencia del interarmónico, el valor porcentual de la magnitud y los grados de desfase o por intervalos de frecuencia, para este caso los datos de entrada son frecuencia inicial, frecuencia final del intervalos, valor máximo los interarmónicos, donde pueden ser el mismo para todos o aleatorio.

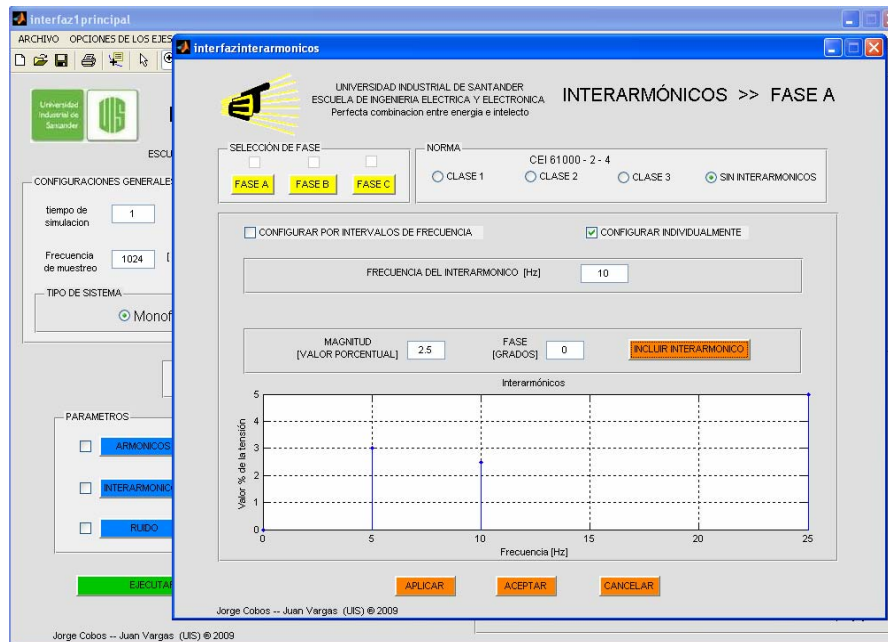
A continuación se muestra las dos presentaciones de la interfaz de interarmónicos dependiendo si se desea configurar por intervalos de frecuencia o de forma individual cada interarmónico.



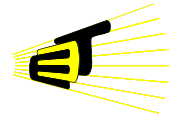
- Configuración por intervalos de frecuencia



- Configuración individual



Igualmente se da **APLICAR** cada vez que se configura una fase para que el programa guarde estos valores y para finalizar **ACEPTAR**.



2.2.3. CONFIGURACIÓN DE RUIDO

RUIDO

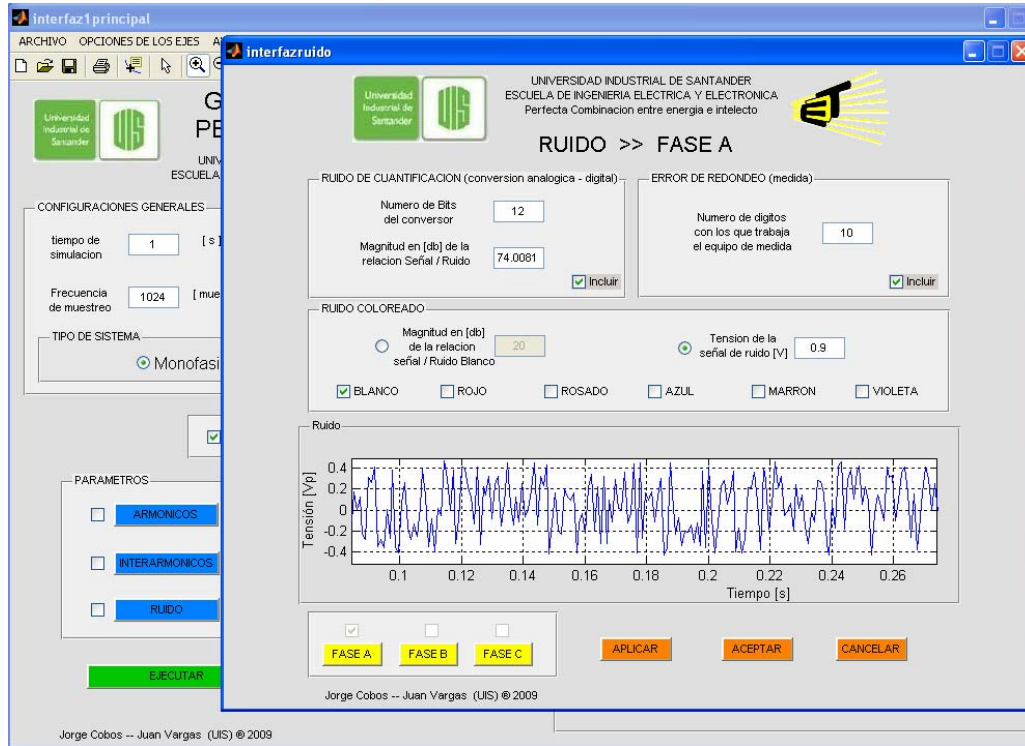
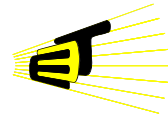
Siguiendo el orden de los parámetros sigue la configuración de **RUIDO**, si se desea por medio de esta interfaz se pueden agregar las siguientes señales: ruido de cuantificación, ruido o error por redondeo, ruido blanco y/o coloreado.

Los ruidos coloreados son derivaciones del ruido blanco entre estos tenemos ruido rojo, rosado, azul, marrón, violeta; la magnitud del ruido puede ser ingresada al programa en decibeles o en voltios según la aplicación.

El ruido de cuantificación (producido por la conversión analógica a digital), se puede introducir el valor en decibeles de la relación señal/ruido o el número de bits del conversor, estos dos están interrelacionados de tal manera que al cambiar cualquiera de las dos magnitudes automáticamente modifica la otra, además cuenta con un check, para incluir o no este ruido.

El ruido o error de redondeo (depende de la resolución del equipo de medida), es más sencillo, simplemente basta con ingresar el número de dígitos con el cual trabaja el equipo de medida, este también cuenta con un check para incluir o no este ruido.

Después de esto se seleccionan los otros ruidos (si se necesitan) seguido de **APLICAR** de esta forma se pueden ver en el eje los cambios que se hagan en la fase correspondiente. Se repite el procedimiento para las otras dos fases si el sistema es trifásico. Para finalizar **ACEPTAR**.



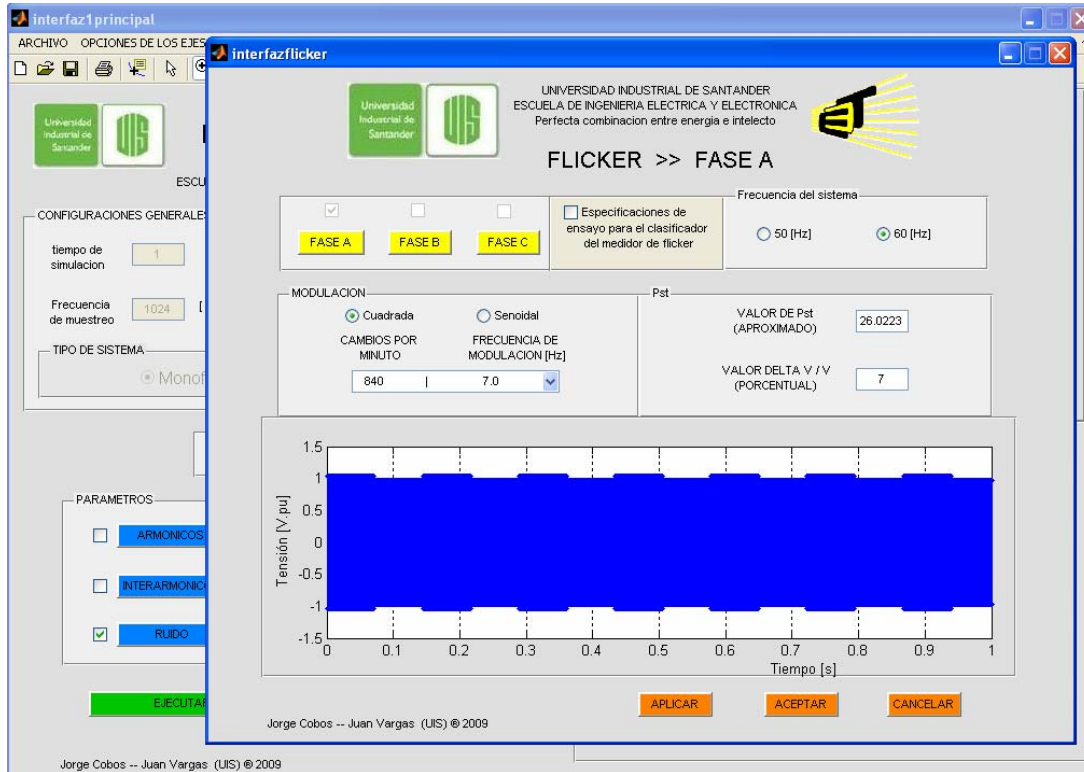
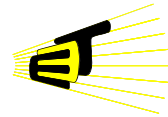
2.2.4. CONFIGURACIÓN DE FLICKER



Al ingresar en la interfaz de flicker lo primero que se debe hacer es seleccionar la frecuencia del sistemas (mirar la parte superior derecha de la interfaz), luego en la parte superior izquierda se elige el tipo de modulación de la señal la cual puede ser cuadrada o senoidal, en esta parte también encontramos una lista de valores de cambios por minuto y su equivalente en Hertz, (esta lista de valores es de la norma IEC 61000-4-15), al seleccionar algún valor de esta lista se asigna automáticamente un valor porcentual de $\Delta V/V$ para el cual se da un Pst de uno, para un valor de frecuencia del sistema y de modulación asignados se puede variar el valor del Pst o el $\% \Delta V/V$, los cuales están interrelacionados, se permite un valor máximo $\% \Delta V/V$ de 10.

Cuando seleccionamos la opción de especificaciones de ensayo, la modulación únicamente puede ser cuadrada, tal como se especifica en la norma ya mencionada, también cambia la lista de valores de cambios por minuto. (Estos valores son para clasificar y calibrar el medidor de flicker)

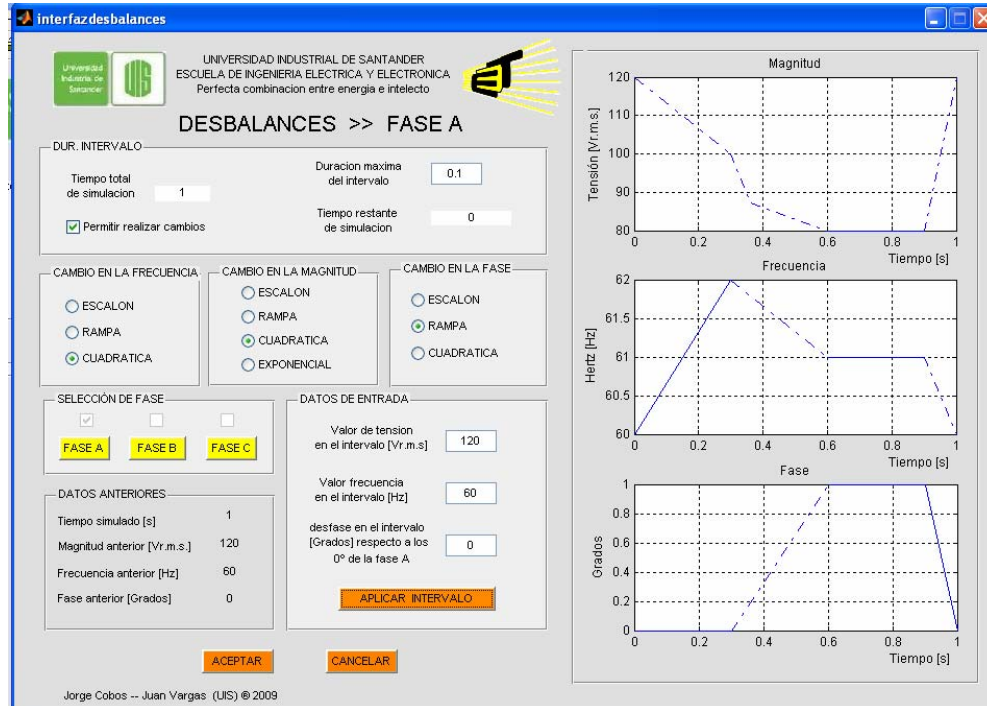
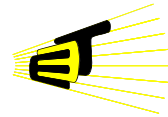
En el eje solo se muestra la envolvente de la señal de flicker. Igual que en las demás configuraciones se da **APLICAR** ante cualquier cambio para que el programa guarde estos valores, esto se hace en cada una de las tres fases si el sistema es trifásico. Para finalizar **ACEPTAR**.



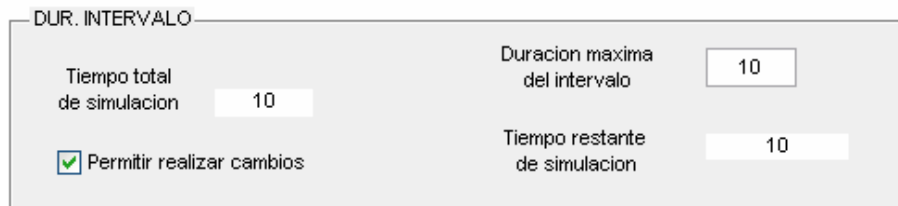
2.2.5. CONFIGURACIÓN DE DESBALANCES

DESBALANCES

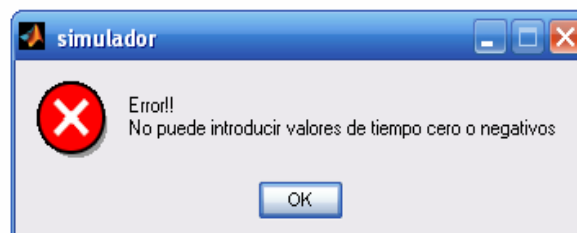
Cuando se quiere crear algún tipo de hueco, sobretensión, interrupción, variaciones de frecuencia, cambios rápidos de tensión, desfasaje, en general cualquier tipo de desbalance de la señal en un determinado tiempo se busca el botón configurar desbalances en la interfaz principal. Al hacerlo se despliega la pantalla correspondiente (ver figura).



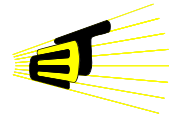
En la parte superior se da la opción de “partir” el tiempo total de simulación en N-intervalos,



Recuerde que el tiempo del intervalo no puede ser igual a cero o ser negativo de lo contrario a parecerá un mensaje de error como este:



En cada intervalo se puede cambiar la magnitud de la tensión, la frecuencia de operación del sistema (Hertz) y la fase (grados), permitiendo de esta forma crear los desbalances que se quieran; aparte de esto se puede cambiar la fase, la frecuencia y la tensión de la onda en forma escalón, rampa y

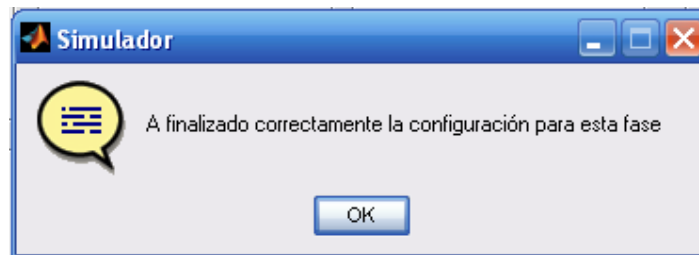


cuadrática, adicionalmente para magnitud se permite que el cambio pueda realizarse en forma exponencial, lo cual permite simular transitorios.

CAMBIO EN LA FRECUENCIA	CAMBIO EN LA MAGNITUD	CAMBIO EN LA FASE
<input checked="" type="radio"/> ESCALON <input type="radio"/> RAMPA <input type="radio"/> CUADRÁTICA	<input checked="" type="radio"/> ESCALON <input type="radio"/> RAMPA <input type="radio"/> CUADRÁTICA <input type="radio"/> EXPONENCIAL	<input checked="" type="radio"/> ESCALON <input type="radio"/> RAMPA <input type="radio"/> CUADRÁTICA

Estos cambios se pueden apreciar en los tres ejes de la pantalla. Recuerde que cada vez que se realiza un cambio en un determinado intervalo hay que pulsar **APLICAR**

INTERVALO para que los cambios se guarden. Cuando se ha completado el tiempo total de simulación aparecerá este mensaje se da **OK** y seguidamente **ACEPTAR**. Esto se hace para cada una de las fases si el sistema es trifásico.

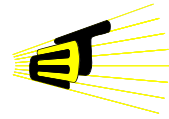


2.2.6. CONFIGURACIÓN DEL ERROR FILTRADO

ERROR POR FILTRADO

Con esta función lo que se busca es simular el error que producen los equipos de medida en la adquisición de datos. Esta función la puede activar simplemente activado el check-box correspondiente.

El error por filtrado consiste en pasar la señal por un filtro cuya función de transferencia es la obtenida de un equipo de medida real.



3. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Finalmente si se quiere ver y analizar la señal resultante con todos los datos y parámetros configurados, debe prestar atención en que se estén aplicando los parámetros que deseamos para la simulación, esto se puede verificar fácilmente mirando en la interfaz principal el cuadro de PARAMETROS, a la señal se introducen las perturbaciones que este activas (chequeadas)

Por ejemplo:

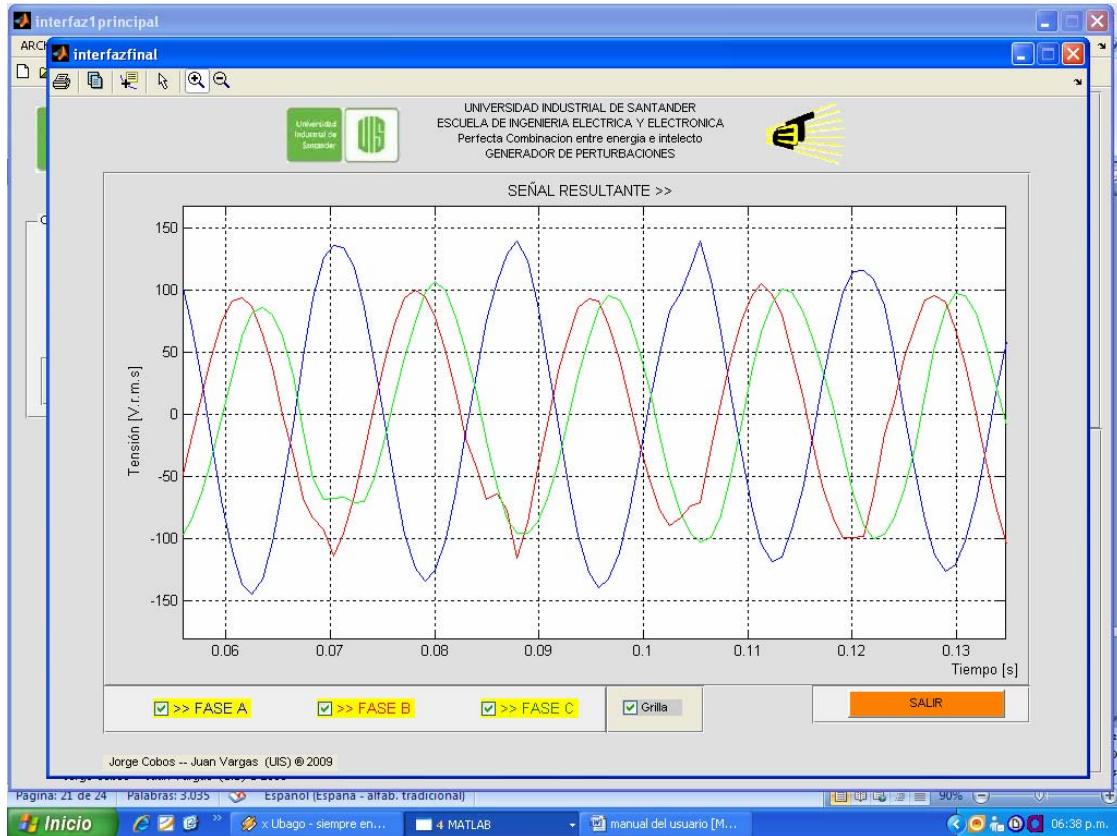
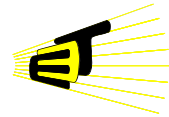
PARAMETROS	
<input checked="" type="checkbox"/> ARMONICOS	<input type="checkbox"/> FLICKER
<input checked="" type="checkbox"/> INTERARMONICOS	<input checked="" type="checkbox"/> DESBALANCES
<input type="checkbox"/> RUIDO	<input type="checkbox"/> ERROR POR FILTRADO

A la señal fundamental se van introducir los efectos de armónicos, interarmónicos y desbalances previamente configurados

Ahora si da clic al botón **EJECUTAR** que se encuentra en la parte inferior de la interfaz principal, o en la barra de herramientas.

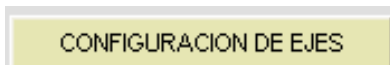


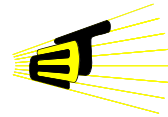
Se desplegará la siguiente pantalla:



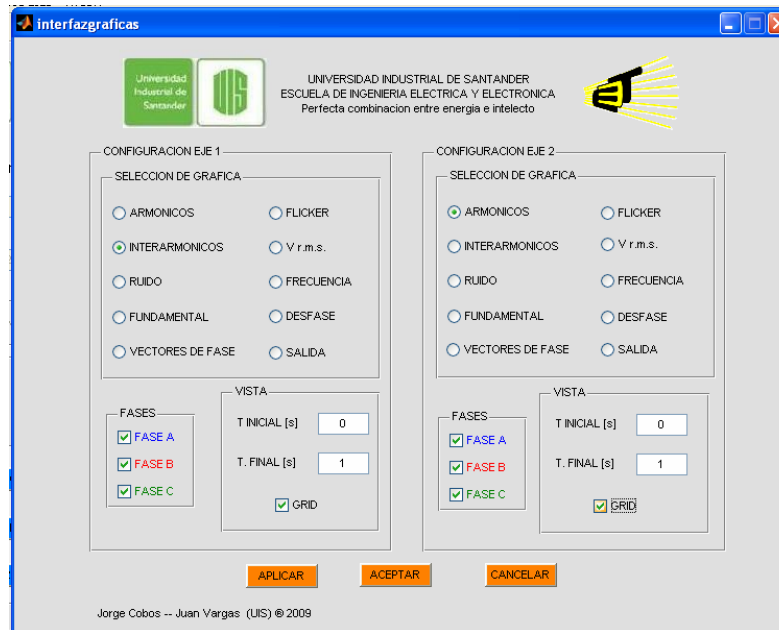
Esta muestra la señal resultante de la adición de cada uno de las perturbaciones, se puede hacer el análisis con ella debido a que esta señal muestra los efectos degenerativos de la onda original (senoidal) y de esta manera ver las implicaciones que traen consigo en la calidad de la energía eléctrica. Una de las ventajas del generador de perturbaciones es que se puede ver paso a paso las deformaciones de la onda senoidal. En esta interfaz se puede ver la señal total en cada una de las fases esto si el sistema es trifásico.

4. CONFIGURACIÓN DE EJES (OPCIONAL)

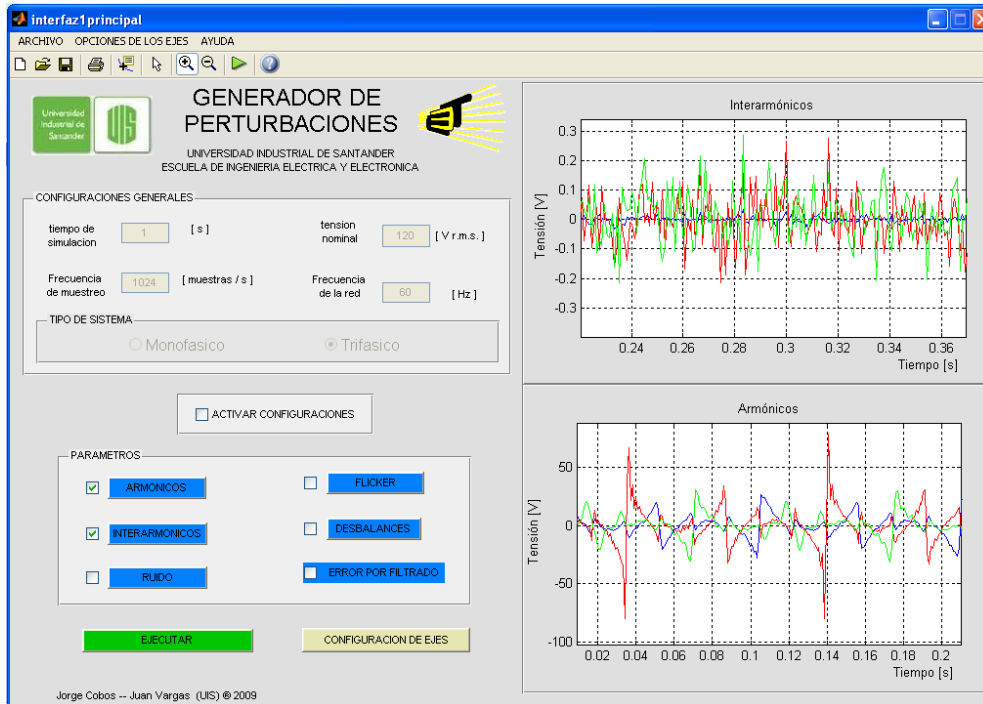
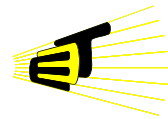




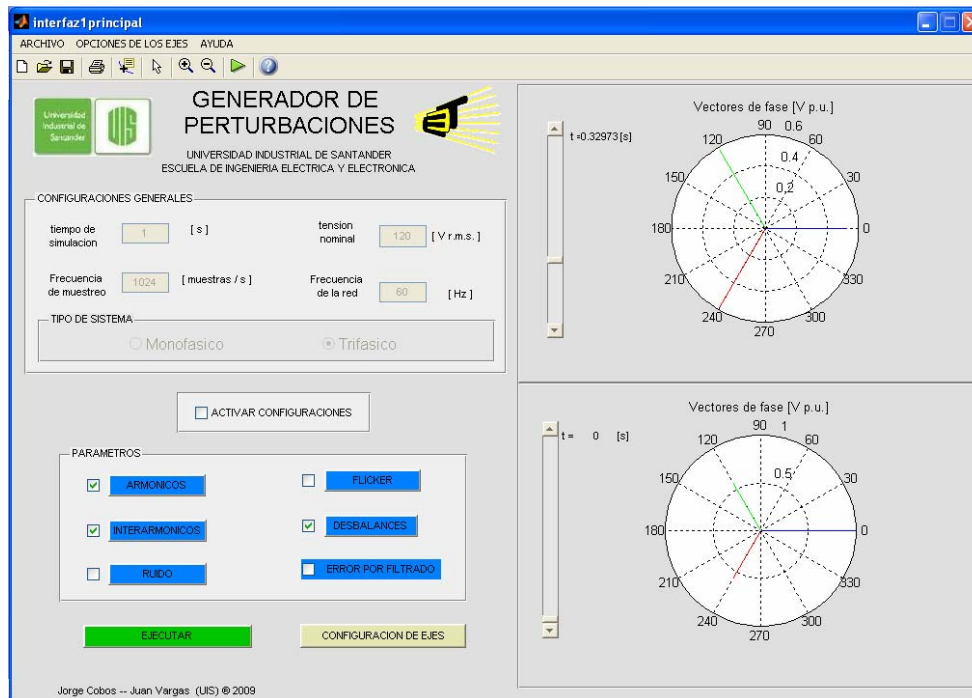
El simulador de perturbaciones cuenta con el botón configuración de ejes que se encuentra en la parte inferior de la interfaz principal, al pulsarlo se accede a la siguiente ventana:

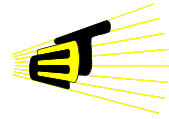


En esta pantalla se puede escoger cada una de las señales con los cambios asignados durante toda la simulación, se puede ver cada uno de los parámetros en cada una de las fases o si se prefiere ver la misma perturbación en las tres fases y en el mismo eje según requiera el estudio. A modo de ejemplo se mostrará la señal de salida en la fase A y en la fase B, para ello se selecciona SALIDA y la fase o las fases que se quieren ver en el respectivo eje seguido de **APLICAR** y para finalizar **ACEPTAR**. Inmediatamente se mostrará en la principal las señales escogidas.

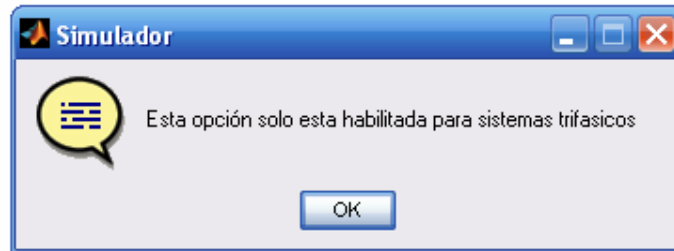


El generador de perturbaciones cuenta con las coordenadas polares, esta forma muestra cada una de las tres fases en su forma vectorial, el usuario tiene la posibilidad de ver como cambia la magnitud y la fase durante todo el tiempo de simulación.





Al activar esta opción el sistema necesariamente debe ser trifásico de lo contrario mostrará el dialogo:



5. GENERADOR DE PERTURBACIONES

5.1. ¿Qué es?

Es el nuevo programa que permite generar de forma fácil señales sintéticas. El generador de perturbaciones motiva a la investigación. Los usuarios podrán analizar los fenómeno que afectan la calidad de la energía eléctrica y proponer soluciones para contra restar estas perturbaciones. Los usuarios del Generador de perturbaciones pueden exportar, imprimir, generar señales sintéticas para posteriores estudios.

5.2. Ejemplos de uso del Generador de perturbaciones

- Verificación del correcto funcionamiento de algoritmos de medida.
- Estudio y análisis de efectos de señales contaminantes en la red eléctrica.

Más información del Simulador de perturbaciones:

joenco05@hotmail.com
juankvarpa@hotmail.com

2009