



**Universidad
Técnica de
Cotopaxi**

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA

PROPUESTA TECNOLÓGICA

**“MEDICIÓN DE LA FRECUENCIA FRENTE A VARIACIONES
DE CARGA UTILIZANDO UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN”**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en
Sistemas Eléctricos de Potencia.

Autores:

Cerna Pacheco Marlon Alexander

Jiménez Jiménez Leoncio Medardo

Tutor Académico:

Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado M.Sc.

LATACUNGA – ECUADOR

FEBRERO 2019



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **CERNA PACHECO MARLON ALEXANDER** y **JIMÉNEZ JIMÉNEZ LEONCIO MEDARDO**, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“MEDICIÓN DE LA FRECUENCIA FRENTE A VARIACIONES DE CARGA UTILIZANDO UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN”**, siendo el Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado, Tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

.....
Cerna Pacheco Marlon Alexander
C.I: 0504044306

.....
Jiménez Jiménez Leoncio Medardo
C.I: 0504521774



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“MEDICIÓN DE LA FRECUENCIA FRENTE A VARIACIONES DE CARGA UTILIZANDO UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN” de los señores; CERNA PACHECO MARLON ALEXANDER y JIMÉNEZ JIMÉNEZ LEONCIO MEDARDO, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias De la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Febrero, 2019

El Tutor

Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado Ms. C.

C.I: 0502656424



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas por cuanto, los postulantes: CERNA PACHECO MARLON ALEXANDER y JIMÉNEZ JIMÉNEZ LEONCIO MEDARDO con el título de Proyecto de titulación: **“MEDICIÓN DE LA FRECUENCIA FRENTE A VARIACIONES DE CARGA UTILIZANDO UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN”** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Febrero del 2019.

Para constancia firman:

Lector 1

Ing. MSc. Marco León Segovia

CC: 05023050402

Lector 2

PhD. Iliana González Palau

CC: 1757070659

Lector 3

Ing. MSc. Edwin Lema Guamán

CC: 0302241351



AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

En calidad de director de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi certifico que mediante el proyecto de investigación: **“MEDICIÓN DE LA FRECUENCIA FRENTE A VARIACIONES DE CARGA UTILIZANDO UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN”** de los señores; CERNA PACHECO MARLON ALEXANDER y JIMÉNEZ JIMÉNEZ LEONCIO MEDARDO, realizan la entrega de un Módulo de visualización, monitoreo y adquisición de datos, para la medición de la frecuencia frente a variaciones de carga utilizando un prototipo de generación para el laboratorio de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, Febrero, 2019


.....
Ing. Secundino Marrero Ph.D
C.I: 1757107907



AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a Dios y la Virgen de Agua Santa por brindarme la salud, conocimiento y unos maravillosos padres que siempre quisieron verme superar y gracias a ellos he logrado cumplir varios sueños y entre uno de ellos y el más importante en convertirme en un profesional, es por ello que este proyecto es fruto del trabajo en conjunto a mi familia. Pero quiero agradecer en particular a nuestro tutor, Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado y amigo Cerna Pacheco Marlon Alexander y en particular a nuestro asesor Ing. Edison Velasco, quienes a lo largo de este tiempo hemos realizado esta propuesta tecnológica con la cual hemos tenido grandes resultados.

Por ultimo quiero dar un agradecimiento a esta prestigiosa Universidad quien me abrió las puertas y creyó en mi capacidad, preparándome para un futuro y una persona de bien.

LEONCIO

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser mi fortaleza, por brindarme la salud y las fuerzas necesarias durante todo este tiempo de estudios.

A mi querida familia por todo el esfuerzo por darme la oportunidad de ser una mejor persona y un gran profesional, en especial a mi madre Laura quien con sus cuidados, paciencia y cariño me ha brindado siempre su apoyo incondicional, convirtiéndose en mi ejemplo y en mi más grande orgullo.

A mi padre Tarquino por los consejos y el apoyo brindado durante todo este tiempo y a mis queridos hermanos Nelson y Andrea por siempre estar a mi lado en todo momento.

A todos los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica y en especial a mi tutor de proyecto el Ing. Xavier Proaño y en particular a nuestro asesor Ing. Edison Velasco por el apoyo incondicional y los conocimientos brindados en el transcurso de mi vida universitaria.

A mis compañeros y amigos con quien he compartido muchas experiencias en el transcurso de mi vida universitaria convirtiéndose en mi segunda familia.

MARLON

DEDICATORIA

Dedico en especial este proyecto a mis padres Sixto Medardo Jiménez A. y Iralda Natalia Jiménez J, quienes han sido mi soporte y un pilar fundamental para culminar mis estudios, también dedico a mis abuelitos y demás familiares quienes depositaron sus esperanzas en verme como un profesional.

LEONCIO

DEDICATORIA

Siempre hay que dar lo mejor de ti para cumplir con los sueños y metas que te propongas, a pesar de todo y con la ayuda de Dios y de las personas que te aman lo puedes lograr, es por ello que dedico este trabajo de investigación a mi querida familia, compañeros, amigos y docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica.

“El privilegio de poder controlar lo imaginable”

MARLON

ÍNDICE

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. DISEÑO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	2
2.1. Título de la propuesta tecnológica	2
2.2. Tipo de alcance	2
2.3. Área del conocimiento	2
2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica	2
2.5 Objeto de estudio y campo de acción	3
2.5.1. Objeto de estudio.....	3
2.5.2. Campo de acción	3
2.6. Situación Problemática y Problema	3
2.6.1. Situación problemática.....	3
2.6.2. Problema.....	4
2.7. Hipótesis	4
2.8. Objetivo(s)	4
2.8.1. Objetivo General	4
2.8.2. Objetivos Específicos.....	4
2.9. Descripción de las Actividades y Tareas propuestas con los Objetivos Establecidos	5
3. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA	6
3.1. Antecedentes	6
3.2. El sistema eléctrico de potencia	7
3.3. Estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia	7
3.4. Estabilidad de frecuencia en sistemas de potencia	8
3.5. Regulación de frecuencia en los SEP	9
3.5.1. Requisitos de rangos de frecuencia admisibles de operación de generadores	12
3.6. Tipos y respaldo para la regulación de frecuencia	12

3.7. Generador Síncrono	13
3.7.1. Generación de corriente alterna trifásica.....	14
3.7.2. Velocidad de rotación de un generador sincrónico	14
3.7.3. Onda de voltaje.....	15
3.7.3.1. Elementos y Parámetros de una Onda Periódica	17
3.8. Sistemas de excitación	17
3.8.1. Excitación de corriente continua	17
3.8.2. Excitación de sistemas de corriente alterna.....	18
3.8.3. Sistemas de excitación estática	18
3.9. Tipos de carga	18
3.9.1. Carga resistiva	18
3.9.2. Carga inductiva	18
3.9.3. Carga capacitiva	18
3.9.4. Potencia reactiva de un receptor.....	19
3.10. Arduino Nano	19
3.10.1. Estructura de un programa	20
3.10.2. Comunicación de Arduino con otros sistemas	20
3.10.3. Especificaciones técnicas	20
3.11. Optoacoplador	21
3.11.1. Funcionamiento del Optoacoplador	21
3.12. Sensor de efecto Hall	21
3.12.1. Principio de funcionamiento	22
3.12.2. Aplicaciones	22
3.13. Pantalla Nextion	23
4. METODOLOGÍA	25
4.1. Introducción	25
4.2. Métodos de Investigación	25

4.2.1. Método Deductivo.....	25
4.2.2. Método Descriptivo.....	25
4.2.3. Método Experimental.....	25
4.3. Tipos de Investigación	26
4.3.1. Investigación Bibliográfica	26
4.3.2. Investigación Aplicada.....	26
4.4. Técnicas e Instrumentos de Investigación	26
5. DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	26
5.1. Configuración de la pantalla Nextion	26
5.1.1. Conexiones de la pantalla Nextion al Arduino.....	27
5.2. Medición de velocidad RPM	27
5.3. Medición de frecuencia.....	28
5.4. Medición del voltaje.....	30
5.5. Programación del Arduino Nano	31
5.5.1. Diagrama de flujo.....	32
5.6. Análisis de resultados	33
5.6.1. Análisis de frecuencia ante variaciones de carga en el módulo Lab-Volt.....	33
5.6.1.1. Modelo de carga resistiva	34
5.6.1.2. Modelo de carga inductiva	40
5.6.1.3. Modelo de Carga Resistiva e Inductiva.....	45
5.6.2. Análisis en el Sistema de Generación de 5 kW	49
5.6.2.1. Cálculo de revoluciones por minuto del generador.....	50
5.6.2.2. Pruebas en vacío	51
5.6.2.3. Pruebas con carga resistiva balanceadas de 85 Ω	54
5.6.2.4. Pruebas con carga resistiva balanceada de 85 Ω y de 112 Ω	56
5.6.2.5. Pruebas con carga balanceada resistiva de 85 Ω e inductiva de 0.10 H.....	58
5.6.3. Pruebas con cargas desbalanceadas al sistema de generación de 5kW.....	60

5.6.3.1. Pruebas con carga resistiva R2 de 42 Ω a 1000 W a las líneas L2 y L3	60
5.6.3.2. Pruebas con carga resistiva R2 y R4 de 42 Ω a 1000 W a las líneas L1, L2, L3.....	62
5.6.3.3. Prueba con carga resistiva R2, R3 y R4 a 42 Ω y 1000 W a las líneas L1, L2, L3.....	63
5.6.3.4. Prueba con carga inductiva en la línea L2 y L3	64
5.6.3.5. Prueba con carga resistiva y estabilización del sistema en frecuencia y voltaje	65
5.6.4. Análisis de la banda de operación de la frecuencia $\pm 10\%$ en módulo Lav- Volt.....	67
6. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTO	69
6.1. Presupuesto	69
6.2. Análisis de Impactos	70
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
7.1. Conclusiones	70
7.2. Recomendaciones	71
8. REFERENCIAS.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Estructura de un sistema eléct.....	7
Figura 3.2. Clasificación Estabilidad de los sistemas de Potencia.	8
Figura 3.3. Desviación de frecuencia vs tiempo.....	9
Figura 3.4. Relación entre generación, demanda y frecuencia del sistema.	10
Figura 3.5. Escalas de tiempo de las estrategias de control de frecuencia.	11
Figura 3.6. Partes constitutivas para la generación de corriente eléctrica en el generador síncrono.	13
Figura 3.7. Generación trifásica con sus respectivos desfases.	14
Figura 3.8. Formas de onda de uso frecuente.	15
Figura 3.9. Onda Senoidal en el que el punto A recorre una circunferencia de radio A_0 con un movimiento circular uniforme de velocidad angular w y sentido contrario a las agujas del reloj.....	16
Figura 3.10. a) Onda pulsante. b) Onda alterna.....	16
Figura 3.11. Distribución de los pines de la placa Arduino.	19
Figura 3.12. Estructura de un Optoacoplador.....	21
Figura 3.13. Efecto hall.	22
Figura 3.14. Sensor de efecto hall aplicado a un motor.	23
Figura 3.15. Pantalla Nextion Editor.	23
Figura 3.16. Componentes de la Interfaz principal del editor de Nextion.	25
Figura 5.17. Entorno de la plataforma de configuración de Nextion.	27
Figura 5.18. Señal de pulsos generada por el sensor de efecto hall.	28
Figura 5.19. Sensor de Efecto Hall.....	28
Figura 5.20. Circuito de detección de cruce por cero y voltímetro para salida del generador.	29
Figura 5.21. Señal amarilla.- Tren de pulsos generado por optoacoplador.....	29
Figura 5.22. Señal morada.- Señal a la salida del transformador con voltaje pico pico de 24VAC.....	30
Figura 5.23. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 1200Ω	35
Figura 5.24. Operación del sistema en tiempo real.	35
Figura 5.25. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 600Ω	36
Figura 5.26. Operación del sistema en tiempo real.	36

Figura 5.27. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 300Ω	37
Figura 5.28. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 400Ω	38
Figura 5.29. Operación del sistema de generación en tiempo real.	38
Figura 5.30. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 200Ω	39
Figura 5.31. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 171.43Ω . .	40
Figura 5.32. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de $1146,055\Omega$	41
Figura 5.33. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de 573.02Ω	42
Figura 5.34. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de 286.51Ω	43
Figura 5.35. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de 382.014Ω	43
Figura 5.36. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de 191Ω	44
Figura 5.37. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de 163.72Ω	45
Figura 5.38. Respuesta de operación del generador a una carga R, L por fase de $1200\Omega + j1146,055\Omega$	46
Figura 5.39. Respuesta de operación del generador a una carga R, L por fase de $600\Omega + j573.02\Omega$	47
Figura 5.40. Respuesta de operación del generador a una carga R, L por fase de $300\Omega + j286.51\Omega$	48
Figura 5.41. Respuesta de operación del sistema de generación con una carga máxima en serie R, L, C.	49
Figura 5.42. Grupo Motor Generador.	50
Figura 5.43. Respuesta de operación del generador en condiciones normales.	52
Figura 5.44. Frecuencia máxima del generador.	52
Figura 5.45. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad.	53
Figura 5.46. Duración del ciclo de la frecuencia mínima y datos de operación del sistema. .	53
Figura 5.47. Duración del ciclo de la frecuencia máxima T (ms) y datos de operación del sistema.	54
Figura 5.48. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva de 85Ω	54

Figura 5.49. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad a una carga resistiva de 85 Ω	55
Figura 5.50. Duración del ciclo de la frecuencia T (ms) y datos de operación del sistema. ..	55
Figura 5.51. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva de 58.76 Ω	56
Figura 5.52. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad a una carga resistiva de 58.76 Ω	57
Figura 5.53. Duración del ciclo de la frecuencia T (ms) y datos de operación del sistema. ..	57
Figura 5.54. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva e inductiva.....	58
Figura 5.55. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad a una carga resistiva e inductiva.	59
Figura 5.56. Duración del ciclo de la frecuencia T (ms) y datos de operación del sistema. ..	59
Figura 5.57. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva de 42 Ω	60
Figura 5.58. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad a una carga resistiva de 42 Ω	61
Figura 5.59. Duración del ciclo de la frecuencia T (ms) y datos de operación del sistema. ..	61
Figura 5.60. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva R2 y R4.	62
Figura 5.61. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad a una carga resistiva R2 y R4....	63
Figura 5.62. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva R2-R3 y R4.	64
Figura 5.63. Duración del ciclo de la frecuencia T (ms) y datos de operación del sistema con L1	65
Figura 5.64. Respuesta de frecuencia por medio de la recuperación.	66
Figura 5.65. Estabilización del sistema en rangos nominales de operación.....	66
Figura 5.66. Indicador de baja frecuencia cuando supera la banda mínima de operación de 52Hz.....	68
Figura 5.67. Indicador de alta frecuencia cuando supera la banda de operación máxima de 55Hz.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados.....	5
Tabla 5.2. Cálculo de la frecuencia del generador con diferentes velocidades.	50
Tabla 5.3 Datos de operación del generador con carga resistiva de 85Ω	56
Tabla 5.4. Datos de operación del generador con carga resistiva 58.76Ω	58
Tabla 5.5. Datos de operación del generador con carga resistiva e inductiva de 58.76Ω	60
Tabla 5.6. Datos de operación del generador con carga resistiva de 42Ω	62
Tabla 5.7. Datos de operación del generador con carga resistiva de R2 y R4.....	63
Tabla 5.8. Datos de operación del generador con carga resistiva R2-R3 y R4.	64
Tabla 5.9. Datos de operación del generador con carga inductiva L1.....	65
Tabla 5.10. Datos de operación del generador luego de estabilizar el sistema.	66
Tabla 5.11. Datos de operación del generador luego de estabilizar e inyectar carga.	67
Tabla 6.12. Costos del proyecto.	69

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I: Programación en la plataforma Arduino

ANEXO II. Construcción del sistema de medición y pruebas realizadas

ANEXO III. Manual de uso del sistema de medición de frecuencia

ANEXO IV. EXPERIMENTO DE LABORATORIO I

ANEXO V. PRACTICA DE LABORATORIO 2

ANEXO VI. PRACTICA DE LABORATORIO 3



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS
INGENIERÍA ELÉCTRICA

TÍTULO: “MEDICIÓN DE LA FRECUENCIA FRENTE A VARIACIONES DE CARGA UTILIZANDO UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN”

Autores:

Marlon Alexander Cerna Pacheco
Leoncio Medardo Jiménez Jiménez

RESUMEN

En el documento se describe los fundamentos de control de Potencia-frecuencia en un generador síncrono y con el objeto de conocer el comportamiento de la frecuencia ante variaciones de carga y de parámetros de operación del sistema de generación en tiempo real, se desarrolló un módulo de visualización, monitoreo y adquisición de datos para la medición de frecuencia, velocidad y voltaje, empleando una placa de Arduino Nano y la pantalla Nextion a través de una programación adecuada y así evaluar los efectos producidos en el sistema. Para ello se realizó el estudio del comportamiento de la onda de voltaje para determinar la duración de cada ciclo, mediante la utilización de un transformador reductor y un circuito electrónico el cual permite convertir la onda senoidal en una onda cuadrada capaz de ser procesada, permitiendo obtener el tiempo de duración de cada ciclo y por medio de los cruces por cero lograr obtener la gráfica lineal de la frecuencia y a su vez medir el tiempo de duración de los transitorios. Debido a que la frecuencia varía ante cualquier perturbación de la carga, fue necesario realizar un modelo de práctica para comprender las variables que están inmersas en el control P.F. es por ello que en la etapa experimental al inyectar una carga resistiva en el grupo motor generador del módulo LabVolt se comprobó que la frecuencia disminuye en un 60% de su valor nominal y se estabiliza en un tiempo de 10 segundos en dicho valor, debido al incremento de carga afectando directamente a la frecuencia. Se comprobó que el voltaje generado disminuye entre un 30% y un 40% debido a que circula una corriente en el devanado del generador lo que ocasiona una caída de voltaje en la resistencia propia del mismo, dando como resultado que el voltaje en los bornes sea menor al momento de suministrar una carga.

Palabras clave: Frecuencia, Voltaje, Arduino, Nextion, Transitorios.



UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS
INGENIERIA ELECTRICA

TITLE: MEASUREMENT OF FREQUENCY VERSUS LOAD VARIATIONS USING A GENERATION PROTOTYPE

AUTHORS:

Marlon Alexander Cerna Pacheco
Leoncio Medardo Jiménez Jiménez

ABSTRACT

This research work discloses the basics of power-frequency control in a synchronous generator in order to know the behavior of the frequency before load variations and operating parameters of the generation system in the real-time. It built a display module, monitoring in order to acquire frequency, speed and voltage data, using an Arduino Nano board and the Nextion screen through proper programming.

This research studied the behavior of the voltage wave to determine the duration of each cycle using a reducer transformer and electrical circuit in order to convert the sine wave into a square wave allowing to obtain the duration of each cycle and through the crossings by zero to show the linear graph of the frequency measuring the duration time of the transients.

For this procedure it was necessary to make a practice model due to frequency variations to understand the variables that are immersed in the P.F control. The experimental data show that by injecting a resistive load into the generating group of the Lab-Volt module the frequency decreases by 60% of its nominal value and stabilizes in a time of 10 seconds due to the increased load that directly affects the frequency.

The results found in the investigation check that the voltage decreases between 30% and 40% due to a current flows in the generator winding which causes a voltage drop in the resistance.

KEY WORDS: Frequency, Voltage, Arduino, Nextion, Transients



CENTRO CULTURAL DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de docente del Idioma Inglés del Centro Cultural de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal Certifico que: la traducción del resumen de Proyecto de investigación al idioma inglés presentado por los señores de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de CIYA: **Cerna Pacheco Marlon Alexander** con número de cédula 0504044306 y **Jiménez Jiménez Leoncio Medardo** con número de cédula, cuyo título versa **“MEDICIÓN DE LA FRECUENCIA FRENTE A VARIACIONES DE CARGA UTILIZANDO UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN”**, lo realizo bajo mi supervisión y cumple con una correcta escritura y cumple con una correcta escritura gramatical del idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimen conveniente.

Latacunga, Febrero 2019.

Atentamente:

.....
Lic. José Ignacio Andrade.
DOCENTE DEL CENTRO DE IDIOMAS
CC: 050310104-0



CENTRO
DE IDIOMAS

1. INFORMACIÓN GENERAL

Propuesto por:

Marlon Alexander Cerna Pacheco.

Leoncio Medardo Jiménez Jiménez.

Título del Proyecto:

Medición de la frecuencia frente a variaciones de carga utilizando un prototipo de generación.

Carrera que auspicia

Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Director de la propuesta Tecnológica:

Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado MSc.

Equipo de Trabajo:

Tutor del Proyecto Investigación:

- Nombre: Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado MSc.
- Celular: 0979645465
- Correo electrónico: xavier.proano@utc.edu.ec
- Dirección: Latacunga

Coordinador de proyecto:

- Nombre: Ing. Iliana González Palao. Ph.D.
- Celular: 0984340820
- Correo electrónico: iliana.gonzalez@utc.edu.ec
- Dirección: Latacunga

Lugar de ejecución:

El proyecto se ejecutara en el laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi de la provincia de Cotopaxi, cantón Latacunga, parroquia San Felipe.

Tiempo de duración de la Propuesta:

Fecha de inicio:

08 de Octubre del 2018

Fecha de finalización:

28 de Enero del 2019.

Fecha de entrega:

18 de Febrero del 2019.

Línea de investigación:

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Generación con fuentes convencionales y no convencionales.

Tecnología:

Módulo de visualización, monitoreo y adquisición de datos, para evaluar la frecuencia cuando esta pierde su punto de estabilidad en un módulo de generación.

Tipo de propuesta Tecnológica:

Vinculado a la mejora de los laboratorios de la carrera de Ingeniería Eléctrica mediante la implementación de un módulo didáctico para visualización, monitoreo y adquisición de datos, para evaluar la frecuencia cuando esta pierde su punto de estabilidad en un módulo de generación en diferentes escenarios de estudio para promover a la participación activa de los estudiantes en el área experimental.

2. DISEÑO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA**2.1. Título de la propuesta tecnológica**

Módulo de visualización, monitoreo y adquisición de datos, para la medición de la frecuencia frente a variaciones de carga utilizando un prototipo de generación.

2.2. Tipo de alcance

Multipropósito

2.3. Área del conocimiento

Ingeniería, industria y construcción.

2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica

La frecuencia es uno de los temas más analizados dentro del Sistema Eléctrico de Potencia e

importante a analizar, puesto que una variación dentro de los parámetros establecidos puede ocasionar un colapso total o parcial del sistema y debido a estos efectos se provoca la inoperatividad de los distintos elementos ya sea en lo residencial o industrial, es por ello que este prototipo se enfoca al diseño y construcción de un módulo que permita la medición, visualización y adquisición de datos en tiempo real del comportamiento de la frecuencia en el grupo motor-generador.

La finalidad es comprender la importancia de mantener la frecuencia dentro de los parámetros establecidos y como se ve afectado el sistema de generación, al aplicar distintos escenarios de carga, y así obtener el tiempo de duración del transitorio ocasionado y realizar el análisis de las diferentes curvas obtenidas de frecuencia, velocidad y voltaje.

Vinculado a la mejora de la facultad y a la generación de conocimientos, como también promover a la participación activa de los estudiantes en el área experimental y práctica de posibles perturbaciones en un sistema de generación con el objeto de comprender la relación entre la potencia – frecuencia.

2.5 Objeto de estudio y campo de acción

2.5.1. Objeto de estudio

Visualización del comportamiento de la frecuencia frente variaciones de carga.

2.5.2. Campo de acción

Análisis de la frecuencia en un grupo motor-generador, para obtener el tiempo de duración del transitorio provocado por variaciones de carga.

2.6. Situación Problemática y Problema

2.6.1. Situación problemática

Un sistema eléctrico de potencia relaciona una serie de factores que implican el estudio de la generación, transmisión y distribución, cada uno de ellos están formados por distintos elementos y problemas los cuales deben ser analizados y solucionados de una forma eficiente y sistemática.

En la generación se deben cumplir parámetros de calidad de energía de forma que la frecuencia de la onda de voltaje debe permanecer constante y no presente perturbaciones para diferentes regímenes de carga los cuales varían durante el transcurso del día, puesto que la frecuencia está estrechamente relacionado con el equilibrio entre la generación y la demanda.

El problema surge al tratar de visualizar la curva de comportamiento de la frecuencia respecto al tiempo, así como también su medición y adquisición de datos de las perturbaciones provocadas al aplicar distintos escenarios de carga en un sistema de generación en los laboratorios de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.6.2. Problema

Desconocimiento del comportamiento de la frecuencia de forma gráfica en un grupo motor-generador y parámetros de operación en tiempo real ante variaciones de carga. Siendo la mejor alternativa que permita visualizar el efecto de la frecuencia es procesando la onda de voltaje.

2.7. Hipótesis

La utilización de una placa Arduino Nano y de la pantalla Nextion, mediante una programación adecuada, permitirá determinar los parámetros de frecuencia y de esta manera visualizarlo ante variaciones de carga.

2.8. Objetivo(s)

2.8.1. Objetivo General

- Determinar el comportamiento de la frecuencia ante la variación de carga, en un grupo motor-generador del laboratorio de ingeniería eléctrica, mediante el desarrollo de un sistema de adquisición de datos, visualización y monitoreo para evaluar los efectos producidos en el sistema.

2.8.2. Objetivos Específicos

- Investigar diferentes fuentes bibliográficas teóricas y prácticas que permitan determinar los distintos elementos, para la construcción de un sistema de monitoreo de la frecuencia.
- Diseñar un sistema de monitoreo de la frecuencia, voltaje y velocidad mediante la utilización de Arduino, para visualizar las curvas en relación al tiempo.
- Realizar diferentes pruebas en un sistema de generación mediante la variación de carga, para determinar la operación y la duración de los transitorios de frecuencia.
- Desarrollar una guía práctica de laboratorio, para la participación activa de prácticas enfocadas al comportamiento de la frecuencia.

2.9. Descripción de las Actividades y Tareas propuestas con los Objetivos Establecidos

Con la finalidad de dar el cumplimiento de los objetivos en el tiempo establecido, se elaboró la Tabla N° 2.1 en la cual se especifica la actividad realizada y el resultado obtenido, así como la metodología utilizada con lo que se consiguió además planificar los tiempos y costos.

Tabla 2.1. Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados.

OBJETIVOS	ACTIVIDAD (TAREAS)	RESULTADO DE LA ACTIVIDAD	MEDIOS DE VERIFICACIÓN
<p>Objetivo 1: Investigar diferentes fuentes bibliográficas teóricas y prácticas que permitan determinar los distintos elementos para la construcción de un sistema de monitoreo de la frecuencia.</p>	<p>Análisis de los aspectos técnicos y teóricos, mediante el uso de diferentes fuentes bibliográficas que permitan entender el comportamiento de la frecuencia.</p>	<p>Elaboración del marco teórico.</p>	<p>Recopilación de la información necesaria para la construcción del sistema de monitorio, utilizando el método de investigación analítico.</p>
<p>Objetivo 2: Diseñar un sistema de monitoreo de la frecuencia, voltaje y velocidad mediante la utilización de Arduino Nano para visualizar las curvas en relación al tiempo.</p>	<p>Diseño de un circuito electrónico con la utilización de un optoacoplador para el procesamiento de la señal sinusoidal. Programación en la plataforma Arduino y Nextion Editor.</p>	<p>Módulo de visualización y adquisición de datos de frecuencia voltaje y velocidad del generador.</p>	<p>Visualización y toma de datos en tiempo real de frecuencia, velocidad y voltaje en la Pantalla Nextion Editor.</p>

<p>Objetivo 3: Realizar diferentes pruebas en un sistema de generación mediante la variación de carga, para determinar la operación y la duración de los transitorios de frecuencia.</p>	<p>Por medio de variaciones de carga determinar los tiempos de los transitorios producidos en el generador.</p>	<p>Análisis de las curvas obtenidas de voltaje, frecuencia y velocidad.</p>	<p>Diseño y construcción de un módulo de cargas y visualización de datos en la pantalla.</p>
<p>Objetivo 4: Desarrollar una guía práctica de laboratorio, para la participación activa de prácticas enfocadas al comportamiento de la frecuencia.</p>	<p>Diseño una guía de laboratorio de diferentes prácticas a desarrollarse en el módulo de generación.</p>	<p>Evaluar el comportamiento de la frecuencia en un generador frente a variaciones de carga.</p>	<p>Participación activa de prácticas para los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica en asignaturas como Maquinas Eléctricas, y Operación de S.E.P</p>

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

3. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

3.1. Antecedentes

Un sistema eléctrico de potencia está conformado por una serie de equipos e instrumentos, que cambian constantemente debido al desarrollo de nuevas tecnologías, para cumplir con los parámetros de calidad de frecuencia debe existir un equilibrio entre la generación y la carga, por ello en el generador síncrono existe un sistema de monitoreo y control de la frecuencia para realizar las diferentes regulaciones. Debido al comportamiento en el tiempo de las ondas de voltaje y corriente se han desarrollado diferentes equipos que permiten la toma de datos y el almacenamiento. Anteriormente se han realizado artículos sobre el comportamiento de la frecuencia en un generador síncrono, a partir de esto para la presente investigación se utiliza un motor-generador acoplados, para realizar un monitorio de la frecuencia cuando existen variaciones de carga.

3.2. El sistema eléctrico de potencia

Los sistemas eléctricos de potencia están constituidos de tres subsistemas principales que constituyen la red eléctrica de potencia siendo su función; la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica hasta el usuario.

Estas tareas son realizadas por cada una de las mayores empresas que presentan el servicio de electricidad. Los sistemas de potencia son estructuras complejas y extensas, y debido a múltiples factores ya sean estratégicos o económicos.

Es así que estos no operan de manera aislada, sino que por lo contrario, se encuentran relacionados entre sí, constituyendo lo que se denomina un Sistema Interconectado.

Los sistemas interconectados son dos o más sistemas de potencia que se encuentran conectados eléctricamente entre sí, los cuales son planificados y operados de tal forma logren suministrar la energía de manera más confiable y económica a sus cargas y consumidores, combinando, con los planes de expansión, mejora y mantenimiento de cada sistema, con el objetivo de lograr crecer a la par de la carga, en la fig. 3.1, se muestra la estructura de un sistema eléctrico de Potencia. [1]

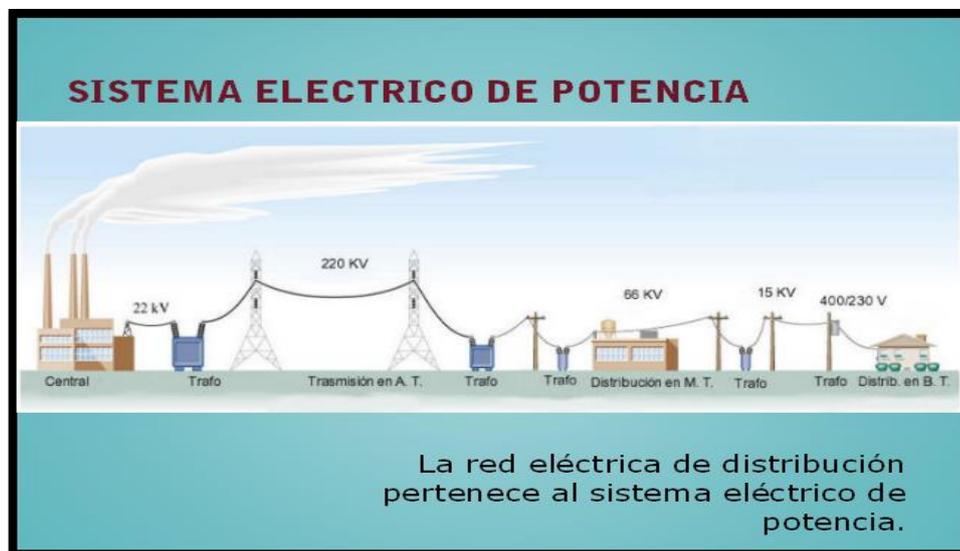


Figura 3.1. Estructura de un sistema eléctrico de potencia.

Fuente: [2]

3.3. Estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia

La estabilidad de un sistema eléctrico de Potencia puede ser definida como la propiedad donde los sistemas eléctricos, puedan mantenerse en un estado de operación equilibrado bajo

condiciones normales y recuperar un estado aceptable de equilibrio después de ser sujeto a una perturbación. En la evaluación de la estabilidad, el interés es el comportamiento del sistema ante esta perturbación transitoria. El sistema debe de ser capaz de operar satisfactoriamente bajo estas condiciones de funcionamiento y satisfacer de la misma manera el máximo valor de la carga. Podemos clasificar la estabilidad de un sistema de potencia de la siguiente manera véase en la fig. 3.2. [2]

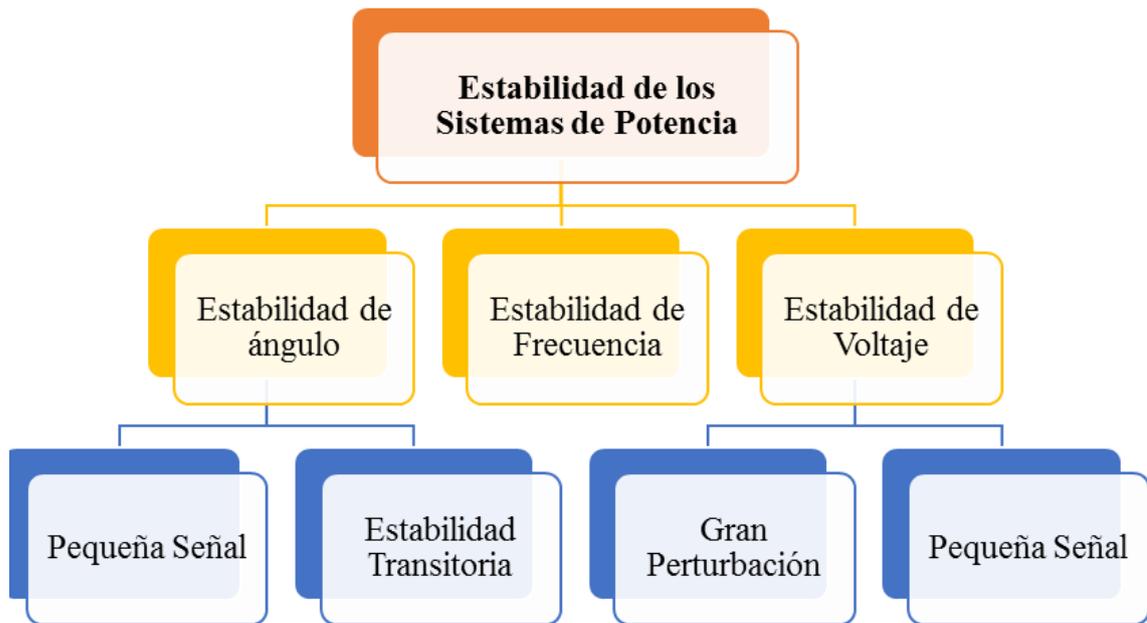


Figura 3.2. Clasificación Estabilidad de los sistemas de Potencia.

Fuente: [2]

3.4. Estabilidad de frecuencia en sistemas de potencia

La estabilidad de frecuencia está estrechamente relacionada con el balance de potencia activa en cada uno de los nodos de la red. La potencia generada debe ser igual a la demandada por las cargas, más las pérdidas ocurridas en las líneas. Cuando se presentan variaciones de potencia debidas a perturbaciones, se producen desbalances de potencia. [3]

Esta diferencia de potencia, se refleja en el cambio de energía cinética almacenada en las partes giratorias del generador, provocando una aceleración o desaceleración del rotor, que posteriormente ocasiona una desviación de frecuencia en el sistema.

En la figura 3.3, se indica el comportamiento típico de una desviación de frecuencia ante una perturbación tipo escalón y las variables que intervienen en la respuesta del sistema. [4]

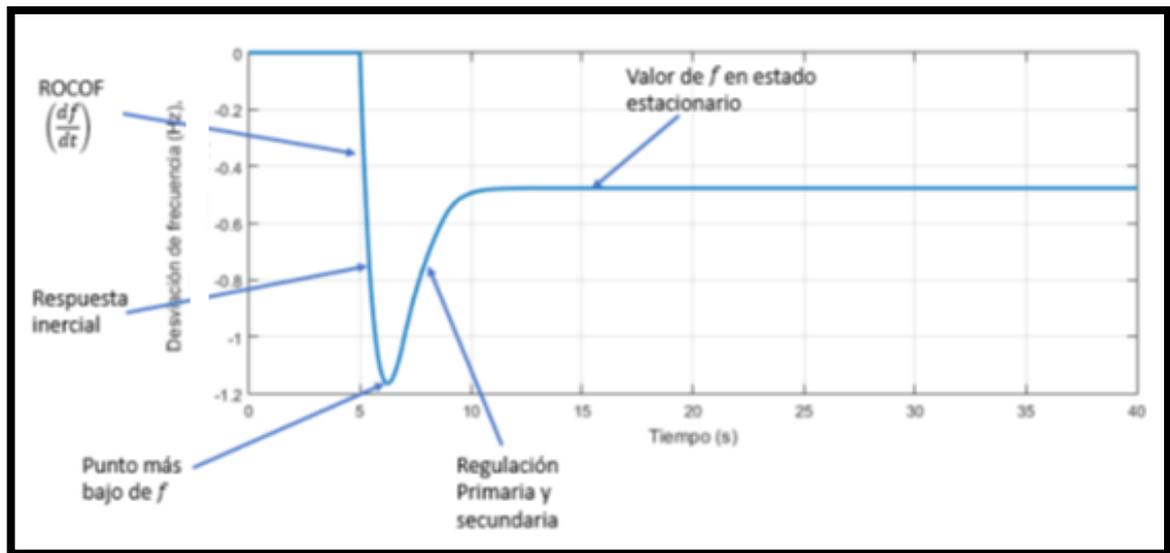


Figura 3.3. Desviación de frecuencia vs tiempo.

Fuente: [4]

Inicialmente la frecuencia sufre un decremento a razón df/dt , a este fenómeno se le conoce como ROCOF (Rate Of Change Of Frequency). Está determinado por la cantidad de energía cinética almacenada en el sistema y por la inercia acumulada en las masas rotantes, indicada en la figura 3.3, como respuesta inercial.

Una vez se logra la mayor magnitud de desviación de frecuencia, actúan los esquemas de control primario y secundario (Control convencional), llevando el error de la señal a un valor de estado estacionario cercano o igual a cero. Más adelante se detallara sobre la regulación de la frecuencia [4]

3.5. Regulación de frecuencia en los SEP

La estabilidad de frecuencia es la habilidad para retornar a las condiciones iniciales de operación y recuperar el equilibrio después de ocurrida una perturbación física, con la mayoría de variables limitadas. En otras palabras, puede ser entendida como una condición de equilibrio entre fuerzas opuestas. [4]

La frecuencia de la onda de voltaje debe permanecer dentro de unos límites estrictos para que el suministro eléctrico se realice en condiciones de calidad aceptables. Variaciones de la frecuencia alejadas del valor nominal pueden provocar el mal funcionamiento de diversos equipos industriales o domésticos. Por ejemplo, algunos motores pueden verse forzados a girar a velocidades distintas de aquella para la que fueron diseñados.

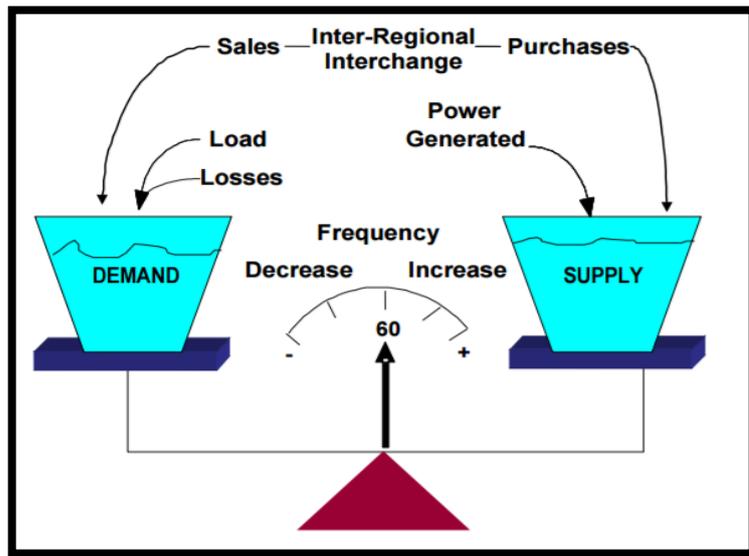


Figura 3.4. Relación entre generación, demanda y frecuencia del sistema.

Fuente: [4]

Como se observa en la figura 3.4, si se presenta un aumento en la demanda y pérdidas de generación, la frecuencia del sistema presenta una disminución respecto de su valor de referencia (60.00 Hz). En otro caso, se puede presentar un deslastre de carga y entradas de generación, produciendo un incremento en la frecuencia del sistema.

Todo Sistema Eléctrico de Potencia es operado a su valor de frecuencia nominal, o en un rango de desviación muy pequeño. Teniéndose así, que los diferentes equipos del Sistema de Potencia, ya sean los equipos de los suministradores del servicio de energía eléctrica o de los consumidores, operen correctamente. Ante la operación con valores diferentes a la frecuencia nominal, se puede perjudicar diferentes equipos de la red, deteriorando su rendimiento y vida útil.

La frecuencia en un Sistema de Potencia está ligado a la velocidad de rotación de los ejes de las unidades generadoras conectadas a la red, el cual se mantiene constante si es que la demanda más pérdidas es igual a la potencia generada. [5]. La frecuencia en los SEP, depende del siguiente balance entre las potencias activas:

$$P_{\text{Generación}} = P_{\text{carga}} + P_{\text{pérdidas}} \quad (3.1)$$

En régimen permanente todos los generadores síncronos de una red eléctrica funcionan en sincronismo, es decir, la frecuencia de giro de cualquiera de ellos multiplicada por el número de pares de polos es precisamente la frecuencia eléctrica del sistema. Si se produce una variación de potencia activa en la demanda, esto se verá reflejado en la frecuencia del sistema,

la energía almacenada en las masas rotantes de las turbinas y generadores circulará hacia o desde la red en función del déficit o superávit de potencia. [2]

- Si el aporte de energía mecánica es insuficiente se reducirá la velocidad de rotación de las máquinas (sub frecuencia).
- Si el aporte de energía mecánica es superior a lo requerido se incrementará la velocidad de rotación de éstas (sobre frecuencia).

Por lo que es necesario que los generadores puedan equiparar las diferencias de potencia activa que se produzcan con el fin de mantener la frecuencia en rango.

En la operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia, el equilibrio generación – demanda se ve continuamente perturbado, ya que se conectan y desconectan cargas continuamente, o por eventos de pérdida de generación o carga. Debido a que la frecuencia de una red es proporcional a la velocidad de rotación de las unidades de generación, la regulación de frecuencia de un Sistema de Potencia se enfoca en la regulación de velocidad de las unidades generadoras. [2]

La reglamentación establece que el porcentaje óptimo de reserva requerido para la RPF será definido estacionalmente por el CENACE y será de cumplimiento obligatorio por parte de todos los generadores. En caso de que un generador no cumpla con el porcentaje establecido, podrá comprar a otros generadores que dispongan de excedentes de regulación primaria [6]. La figura 3.5. Muestra las escalas de tiempo involucradas de los diferentes tipos de control para el caso de una caída en la frecuencia del sistema debido a la salida de una unidad de generación o un aumento significativo en la carga.

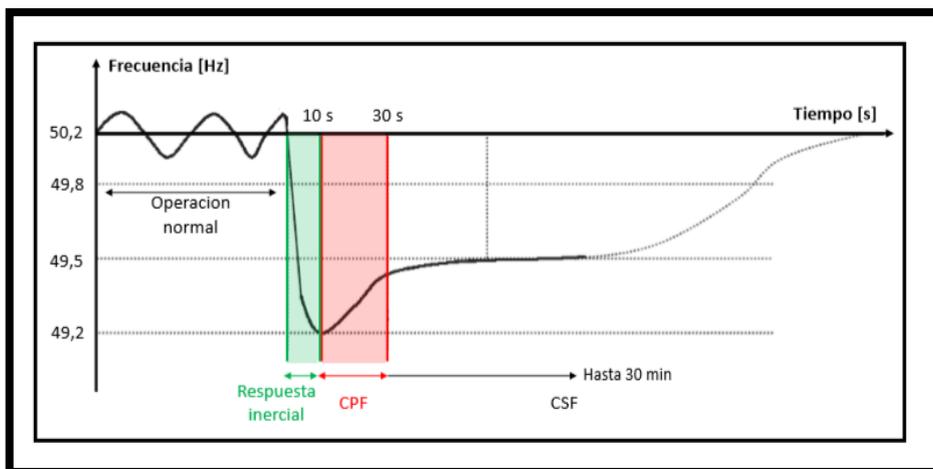


Figura 3.5. Escalas de tiempo de las estrategias de control de frecuencia.

Fuente: [2]

3.5.1. Requisitos de rangos de frecuencia admisibles de operación de generadores

Los rangos de frecuencia admisibles de operación del grupo serán:

- Sin la actuación de relés instantáneos de desconexión propios del mismo entre 57,5 Hz y 62 Hz.
- Para un período mínimo de 10 seg. entre 57,5 y 58 Hz, y entre 61,5 y 62 Hz.
- Para un período mínimo de 20 seg. entre 58 y 59 Hz, y entre 61 y 61,5 Hz.
- Sin límite de tiempo entre 59 y 61 Hz. [6]

3.6. Tipos y respaldo para la regulación de frecuencia

Ante un déficit de potencia demandada, un sistema de generación responde para evitar los cambios de la frecuencia con las siguientes características:

- Reserva de las masas rotantes (energía cinética de la inercia del sistema), cuya actuación es inmediata y evita por unos instantes que la frecuencia varíe. Esta característica del sistema de potencia está determinada por la constante de inercia total del sistema. [7]
- Regulación primaria de frecuencia, cuya actuación se produce luego de algunos segundos hasta los primeros minutos. Compensa parte de la potencia perdida mediante la acción local de los reguladores de velocidad de las unidades de generación.
- Regulación secundaria de frecuencia, cuya actuación se manifiesta luego de varios minutos. Este tipo de regulación asume la restitución de la potencia perdida debido al evento.

A esta capacidad del SEP se añade el efecto de la dependencia de la carga con las variaciones de frecuencia, el cual siempre es amortiguante; es decir, que ante déficit de generación la carga disminuirá, y ante superávit de generación la carga aumentará.

Ante desequilibrios de generación – demanda, la energía cinética acumulada del sistema es la primera que intenta frenar el desequilibrio en forma transitoria, pero luego que ésta es absorbida, la frecuencia empieza a disminuir o subir. Luego se manifiesta la regulación primaria y secundaria de frecuencia, ejercida por las unidades generadoras, para llevar la frecuencia del sistema a su valor nominal. [7]

Si consideramos un evento en la que se produce un déficit de potencia considerable, entonces el tiempo de respuesta de la regulación primaria de frecuencia sería muy lento para evitar que

el sistema de potencia opere a valores bajos de frecuencia, o en un caso más severo, que la frecuencia llegue a valores de desconexión de las unidades generadoras por sus protecciones de mínima frecuencia [2]

Entonces los Tipos y Respaldo para la Regulación de Frecuencia son:

- a) Regulación Primaria de Frecuencia.
- b) Regulación Secundaria de Frecuencia.
- c) Rechazo Automático de Carga por Mínima Frecuencia.
- d) Desconexión de Generación por Sobre Frecuencia.

3.7. Generador Síncrono

El generador síncrono es la principal fuente de generación que se usan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna. Estas máquinas, son usadas en las centrales para la generación de energía eléctrica (hidráulicas, térmicas o nucleares) en sistemas interconectados. Generalmente, son trifásicos y consiste en un electroimán girando (rotor), al lado bobinas (estator), generalmente conectadas en estrella por efecto de la rotación del rotor va a inducir voltaje trifásica en el estator. [8]

La figura 3.6. Esquematiza las partes constitutivas para la generación de corriente eléctrica en el generador síncrono.

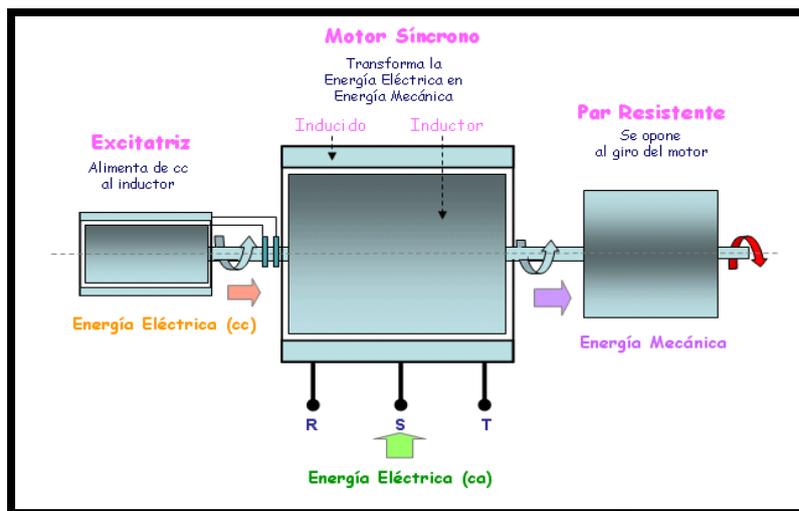


Figura 3.6. Partes constitutivas para la generación de corriente eléctrica en el generador síncrono.

Fuente: [8]

3.7.1. Generación de corriente alterna trifásica

Uno de los principios básicos más analizados es la generación de corriente eléctrica que es generada por inducción electromagnética. Cuando las líneas de fuerza producidas por el campo magnético cortan a un conductor en movimiento se obtiene en los extremos diferencia de potencial o tensión inducida. [9].

La corriente inducida se produce en los devanados con núcleo de hierro, que están en reposo y se encuentran distribuidos en la parte interna del estator, dispuestos de forma que queden desplazados entre sí 120° . Durante una vuelta del rotor, los polos Norte y Sur pasan frente a los tres devanados del estator. [8]

Por ello, se habla de campo magnético giratorio, lo cual en cada uno de los devanados se genera una tensión alterna monofásica. Las tres tensiones alternas monofásicas tienen el mismo ciclo en el tiempo, pero desplazadas entre sí en la tercera parte de una vuelta (120°), por lo que se dice que tienen la misma "fase de oscilación", de manera que la tensión y la corriente inducida son sinusoidales. [8]. La figura 3.7. Muestra el esquema de generación trifásica con sus respectivos desfases.

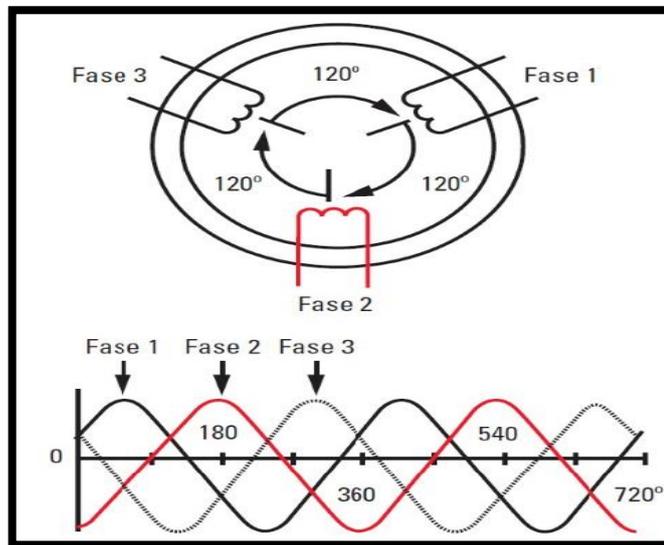


Figura 3.7. Generación trifásica con sus respectivos desfases.

Fuente: [10]

3.7.2. Velocidad de rotación de un generador sincrónico

Los generadores por definición son sincrónicos, generalmente las máquinas de polos salientes tienen devanados amortiguadores con el objeto de reducir las oscilaciones mecánicas del rotor

hasta la velocidad síncrona que se determina por el número de polos de la máquina y la frecuencia del sistema que está conectada. En las máquinas de dos polos se genera un ciclo de voltaje por cada revolución del rotor de dos polos. En la máquina de cuatro polos se genera dos ciclos en cada bobina por revolución. Como el número de ciclos por revolución es igual al número de pares de polos la frecuencia del voltaje generado es. [11]

$$f = \frac{p}{2} * \frac{\eta}{60} = \frac{p}{2} * f_m \quad (\text{Hz}) \quad (3.2)$$

Donde:

f = Frecuencia eléctrica en Hz.

η = Velocidad del campo magnético en (rpm)

p = Número de polos.

$f_m = n/60$, frecuencia mecánica en revoluciones por segundo (rps)

3.7.3. Onda de voltaje

Se considera una forma de onda a aquellas señales de tensión o intensidad de corriente que generalmente varían con el tiempo, la cual se expresa en forma gráfica o ecuación que da una descripción completa de la señal en función del tiempo. En la figura 3.8. Siguiendo se muestran algunas formas de onda de uso frecuente así como también la representación simbólica de la onda senoidal. [12]

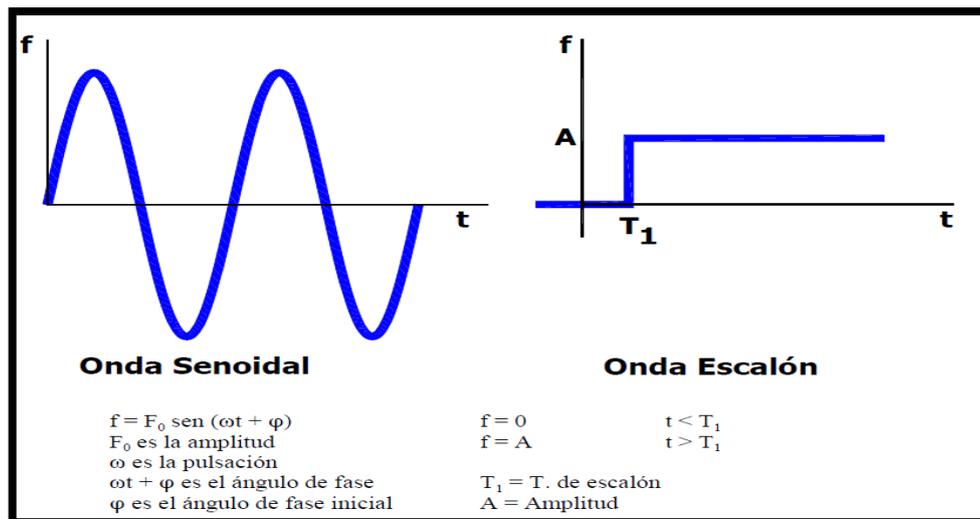


Figura 3.8. Formas de onda de uso frecuente.

Fuente: [12]

f Puede ser señal de intensidad de corriente **i** o señal de tensión **u**

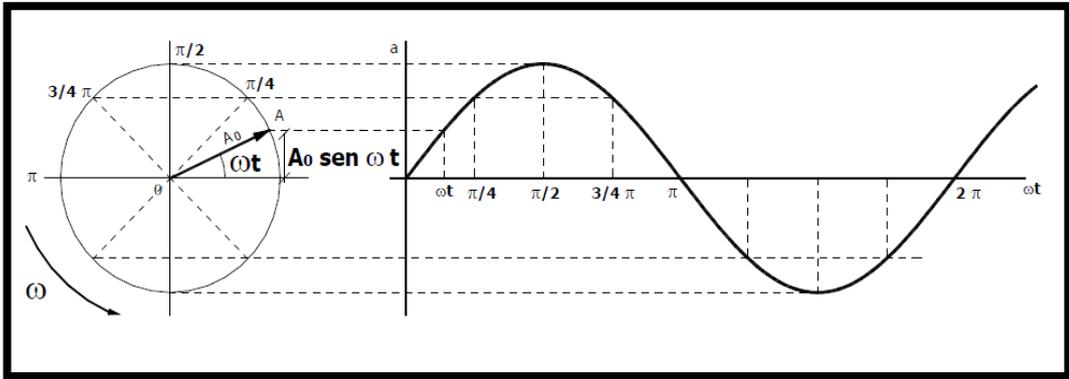


Figura 3.9. Onda Senoidal en el que el punto A recorre una circunferencia de radio A_0 con un movimiento circular uniforme de velocidad angular ω y sentido contrario a las agujas del reloj.

Fuente: [12]

Se considera ondas periódicas, a las que se refieren a magnitudes cuyos valores se repiten a intervalos iguales de tiempo, y siempre en el mismo orden. En la ecuación 3.3. Expresa la función característica cuando la onda es periódica. [12]

$$f(t) = f(t + T) = f(t + 2T) = f(t + 3T) = \dots \quad (3.3)$$

Donde:

$a = f(t)$ es periódica de periodo T .

Las ondas periódicas pueden ser de dos clases.

- **Pulsantes:** si la magnitud representada no cambia de sentido.
- **Alternas:** si dicha magnitud cambia de sentido dentro del intervalo o correspondiente a cada periodo. En la figura 3.10. Se muestra formas de onda pulsante y alterna.

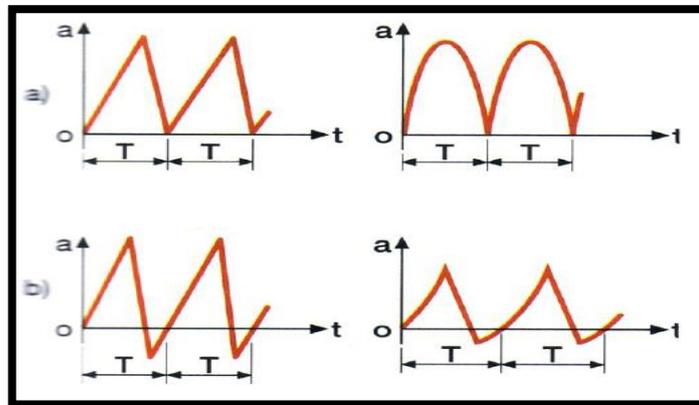


Figura 3.10. a) Onda pulsante. b) Onda alterna.

Fuente: [12]

3.7.3.1. Elementos y Parámetros de una Onda Periódica

En toda onda periódica se debe considerar los siguientes parámetros:

- **Periodo, T.** Tiempo que invierte la onda en realizar un ciclo su unidad el segundo (s).
- **Frecuencia, f.** numero de ciclos que se cumplen en una unidad de tiempo. Su unidad es el ciclo por segundo o s^{-1} conocida como hercio. [12]

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{O también} \quad T = \frac{1}{f} \quad (3.4)$$

Donde:

T = es el periodo.

f = la frecuencia.

Como la frecuencia y el periodo son inversos en efecto: si en T segundos la onda avanza 1 ciclo, en 1 segundo efectuará f ciclos. [12]

3.8. Sistemas de excitación

Los generadores síncronos son empleados para la generación de energía eléctrica, pero no generan voltaje en sus terminales por cuenta propia debido a que es necesario hacer uso de un sistema de excitación en el campo para alcanzar el voltaje de salida necesario. El diseño del sistema de excitación es parte sustancial del generador debido a que además de mantener el voltaje de salida estable, debe tener una respuesta rápida ante cambios repentinos de carga de tal manera que no altere la estabilidad del sistema. [13]

En términos generales los sistemas de excitación se clasifican de acuerdo a la fuente de poder que se utiliza en la excitación de los cuales se derivan los siguientes:

- Corriente Continua (DC)
- Corriente Alterna (AC)
- Estática

3.8.1. Excitación de corriente continua

Este tipo de excitación DC es empleada en generadores de corriente eléctrica como fuentes de excitación para suministrar corriente al rotor de la maquina síncrona. El excitador puede ser impulsado por un motor o, aprovechando la energía primaria, por el mismo eje del generador. Puede ser excitada por si misma o excitada en forma separada. [13]

3.8.2. Excitación de sistemas de corriente alterna

La excitación de esta categoría utiliza alternadores (maquinas AC) como fuentes para la excitación del generador de poder. Generalmente, el excitador está montado sobre el mismo eje de la turbina del generador. La salida AC del excitador es rectificadora por rectificadores controlados o no controlados, la que produce la corriente continua necesaria para el campo del generador. [13]

3.8.3. Sistemas de excitación estática

Todas las componentes en este sistema son estáticas o estacionarias, tanto los rectificadores estáticos, controlados o no controlados, como las fuentes de excitación DC para el campo del generador sincrónico principal a través de anillos deslizantes (o rozantes). La fuente de alimentación para los rectificadores se obtiene del generador principal a través de un transformador que baja el voltaje a un nivel apropiado. [13]

3.9. Tipos de carga

En una red o circuito eléctrico a los elementos pasivos se los conoce como cargas, ya que por medio de ellos la energía eléctrica se consume dependiendo de la intensidad de corriente que circule en los mismos, por lo que a dicha corriente se la conoce como corriente de carga de característica resistiva, inductiva o capacitiva dependiendo del tipo de carga que sea. [14]

3.9.1. Carga resistiva

En las cargas resistivas como las lámparas incandescentes, calefactores, resistencias de carbón (es toda energía que se convierte en luz y calor) el voltaje y la corriente están en fase. En este caso, se tiene un factor de potencia unitario. La característica de estas cargas es que el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente es cero, es decir, se encuentran en fase.

3.9.2. Carga inductiva

En las cargas inductivas o bobinas como los motores y transformadores la característica principal de estos elementos es la de almacenar y consumir la energía eléctrica convirtiéndola en energía magnética por medio del campo magnético que genera al circular corriente eléctrica por estos elementos, la corriente se encuentra retrasada respecto al voltaje, es decir, existe un desfase negativo (-90). En este caso se tiene un factor de potencia retrasado. [14]

3.9.3. Carga capacitiva

En las cargas capacitivas como los condensadores el mismo que es capaz de almacenar energía

en forma de campo eléctrico, la corriente se encuentra adelantada respecto del voltaje por esta razón hay un desfase positivo. En este caso se tiene un factor de potencia adelantado. [14]

3.9.4. Potencia reactiva de un receptor

Es el número real que expresa la potencia reactiva de un receptor de corriente alterna puede ser positivo o negativo. Cuando es positivo se menciona que ese receptor absorbe potencia reactiva, y cuando es negativo se menciona que suministra potencia reactiva. Por ejemplo, la potencia reactiva de todas las bobinas es positiva. Por eso se dice que las bobinas absorben potencia reactiva. La potencia reactiva de los condensadores es negativa, por eso se dice que los condensadores entregan potencia reactiva, o que suministran potencia reactiva. También algunos dicen que los condensadores generan potencia reactiva. De nuevo hay que decir que el condensador no genera nada, no genera potencia en sentido termodinámico. Con esa expresión solo se quiere decir de nuevo que el número que hemos llamado potencia reactiva del condensador es negativo. [15]

3.10. Arduino Nano

Es una herramienta que se ha venido incorporando a la automatización en el uso residencial e industrial por su alta capacidad de procesamiento de señales, contribuyendo a la economía puesto que dispone de una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo (software), diseñada para mejorar y facilitar el uso de la electrónica en proyectos múltiples. En la figura 3.11. Se muestra la distribución de los pines de la placa Arduino.

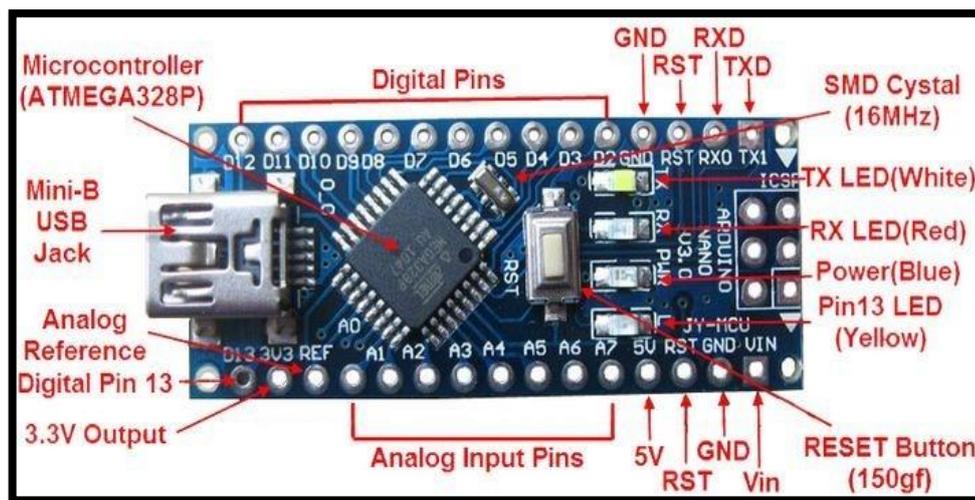


Figura 3.11. Distribución de los pines de la placa Arduino.

Fuente: [16]

3.10.1. Estructura de un programa

La estructura básica del lenguaje de programación de Arduino es bastante simple y se compone de al menos dos partes. Estas dos partes necesarias, o funciones, encierran bloques que contienen declaraciones, estamentos o instrucciones como se muestra a continuación. [16]

```
void setup()
{
estamentos;
}
void loop()
{
estamentos; }
```

Donde:

setup(): Es la parte encargada de recoger la configuración.

loop(): Es la que contienen el programa que se ejecutará cíclicamente (de ahí el termino loop –bucle-). Ambas funciones son necesarias para que el programa trabaje. [16]

3.10.2. Comunicación de Arduino con otros sistemas

Una de las formas más empleadas de comunicación de dispositivos electrónicos es la comunicación serial y Arduino no es la excepción. A través de este tipo de comunicación se puede enviar datos así como también desde Arduino a otros microcontroladores o a un computador, conectando el comportamiento del sonido a sensores o actuadores. [16]

3.10.3. Especificaciones técnicas

- **Microcontrolador:** ATmega328.
- **Tensión de Operación (nivel lógico):** 5 V.
- **Tensión de Entrada (recomendado):** 7-12 V.
- **Tensión de Entrada (límites):** 6-20 V. Pines E/S Digitales: 14 (de los cuales 6 proveen de salida PWM).
- **Entradas Analógicas:** 8. Corriente máx por cada PIN de E/S: 40 mA.
- **Memoria Flash:** 32 KB (ATmega328) de los cuales 2KB son usados por el bootloader.
- **SRAM:** 2 KB (ATmega328).
- **EEPROM:** 1 KB (ATmega328).

- **Frecuencia de reloj:** 16 MHz.
- **Dimensiones:** 18.5mm x 43.2mm.

3.11. Optoacoplador

El optoacoplador es un dispositivo electrónico capaz de acoplar dos circuitos AC o DC, este elemento es de emisión y recepción de luz que funciona como un interruptor excitado mediante la luz. Esta luz es emitida por un diodo led que satura un componente optoelectrónico, normalmente en forma de fototransistor. [17]

3.11.1. Funcionamiento del Optoacoplador

La figura 3.13. Muestra un optoacoplador 4N25 formado por un LED y un fototransistor. La tensión de la fuente y la resistencia en serie establecen una corriente en el LED emisor cuando se cierra el interruptor S1. Si dicha corriente proporciona un nivel de luz adecuado, al incidir sobre el fototransistor lo saturará, generando una corriente en R2. De este modo la tensión de salida será igual a cero con S1 cerrado y a V2 con S1 abierto. [17]

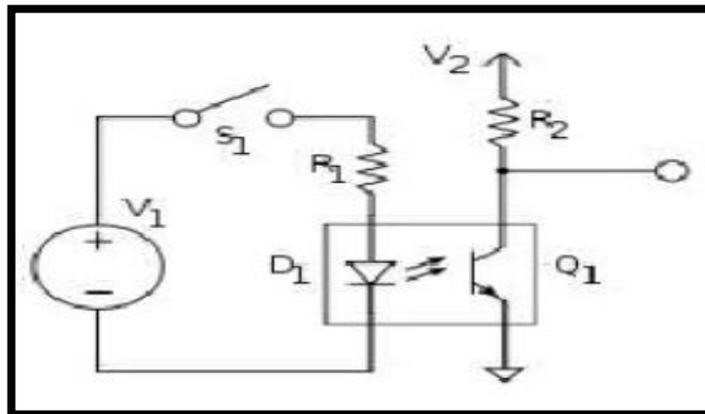


Figura 3.12. Estructura de un Optoacoplador.

Fuente: [17]

Esto quiere decir que si el voltaje varía, la cantidad de luz también lo hará, lo que significa que el voltaje de salida cambia de acuerdo con la tensión de entrada. De esta forma el dispositivo electrónico puede acoplar una señal de entrada con el circuito de salida, aunque hay que tener en cuenta que las curvas tensión/luz del LED no son lineales, por lo que la señal puede distorsionarse.

3.12. Sensor de efecto Hall

Los sensores de efecto hall son de gran importancia debido a su principio de funcionamiento, estos son inmunes a factores ambientales tales como la humedad, temperatura, humo etc. Los

cuales son utilizados en una serie de aplicaciones ya que su trabajo depende en gran parte del campo magnético a medir. [18]

3.12.1. Principio de funcionamiento

Estos poseen una placa semiconductor a través de la cual circula una corriente como se muestra en la figura 3.14. A su vez al aplicar un campo magnético en forma perpendicular al flujo de corriente, este genera un voltaje en los extremos del semiconductor. [18]

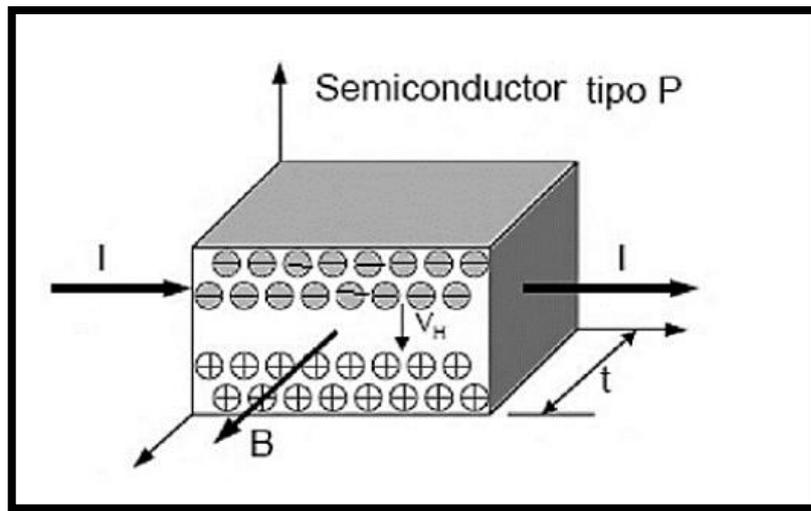


Figura 3.13. Efecto hall.

Fuente: [18]

El voltaje que se genere dependerá de la corriente a la cual este circulando y la intensidad del campo magnético que interactúa con el sensor.

3.12.2. Aplicaciones

Las aplicaciones son múltiples las cuales dependen de su uso, para nuestro caso se hace referencia como sensores de velocidad y de posición.

Como sensor de velocidad se realiza el acople de un imán permanente o de varios para una mejor precisión en la toma de datos, en un disco externo de un motor o generador acoplado al eje, es así que cuando el motor comience a girar este genera un tren de impulsos de voltaje, los cuales mediante un tratamiento externo se podrá determinar su velocidad es decir en un determinado tiempo específico se determina el número de pulsos por medio de Arduino que depende del número de imanes de neodimio, tal y como se muestra en la figura 3.14. El lugar donde estarán colocados los sensores. [18]

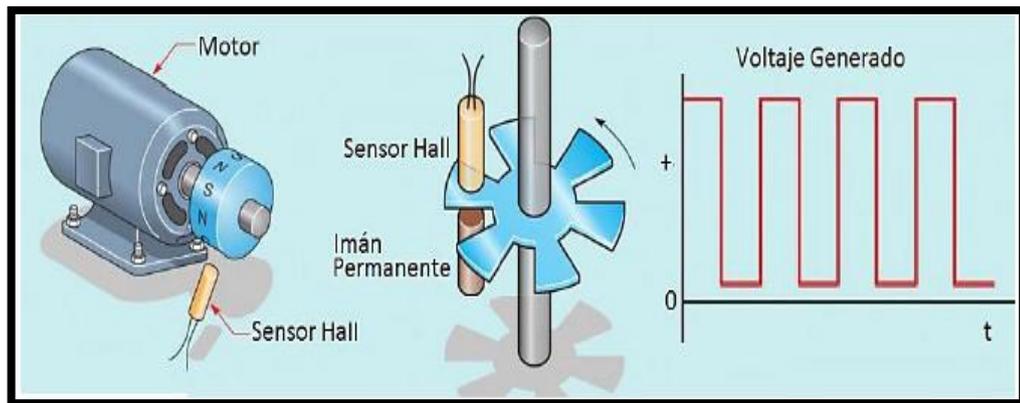


Figura 3.14. Sensor de efecto hall aplicado a un motor.

Fuente: [18]

3.13. Pantalla Nextion

Las pantallas Nextion son un tipo de pantallas táctiles que permiten una interfaz hombre maquina (HMI) y así facilita y crea una interfaz de control y visualización para monitorear y controlar determinados procesos.

Existen varios módulos de visualización Nextion, con tamaños que van desde 2.4 "a 7", también poseen un microcontrolador ARM incorporado que controla la pantalla, por ejemplo, se encarga de generar los botones, crear texto, almacenar imágenes o cambiar el fondo.

El Nextion se comunica con cualquier microcontrolador mediante comunicación en serie a una velocidad de 9600 baudios. Por lo tanto, funciona con cualquier placa que tenga capacidades en serie como Arduino, Raspberry Pi, ESP8266, ESP32, etc. En la figura 3.15 y 3.16 se muestran la estructura de la Pantalla Nextion Editor así como también su entorno operativo. [19]



Figura 3.15. Pantalla Nextion Editor.

Fuente: [19]

Nextion cuenta con diferentes características las cuales son:

- ✓ RGB 65K fiel a los colores de la vida
- ✓ Pantalla TFT panel resistivo táctil
- ✓ Fácil interfaz de 4 pines a cualquier TTL Host Serial
- ✓ Memoria Flash 4M para Código de usuario, aplicaciones y datos
- ✓ Ranura para tarjeta micro-SD para actualización de firmware
- ✓ Área Visual: 57.6mm x 43.2mm
- ✓ Brillo ajustable: 0 ~ 180 nit, el intervalo de ajuste es de 1%
- ✓ Consumo de energía 5V, 65mA.

La Interfaz principal del editor de Nextion está enfocada a facilitar el uso de la misma, en la siguiente figura 3.16, se puede observar las diferentes barras y comandos que contiene. [19]

1. Barra de título
2. a) Menú principal y b) Barras de herramientas
3. Panel de recursos de imagen
4. Panel de recursos de fuente ZI
5. Panel de página
6. Panel de componentes
7. Lienzo de diseño de componentes visuales
8. Diseño de componentes no visuales
9. Panel de atributos
10. Código de evento de usuario
11. Pestañas de visualización / instrucciones
12. Salida
13. Barra de estado

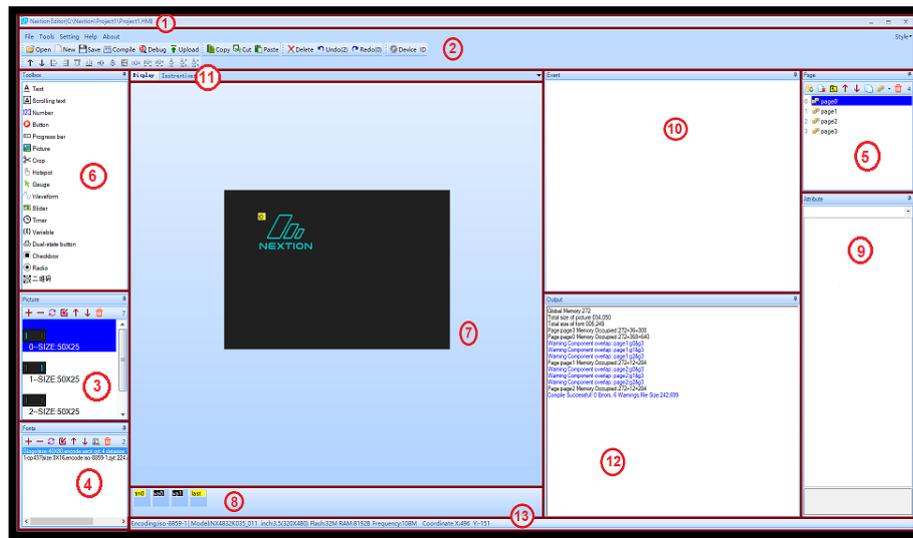


Figura 3.16. Componentes de la Interfaz principal del editor de Nextion.

Fuente: [19]

4. METODOLOGÍA

4.1. Introducción

La metodología de la investigación es la disciplina que se encarga del estudio crítico de los procedimientos, y medios aplicados por los seres humanos, que permiten alcanzar y crear el conocimiento en el campo de la investigación científica.

4.2. Métodos de Investigación

4.2.1. Método Deductivo

Este método, es el procedimiento racional que va de lo general a lo particular, por lo cual se analiza los componentes de un sistema eléctrico de potencia y se centra en el estudio del comportamiento de un generador síncrono ante una variación de carga.

4.2.2. Método Descriptivo

La metodología que se utilizó para el análisis y elaboración del marco teórico relacionado a la descripción de cada uno de los elementos que constituyen un sistema de generación, parámetros de estabilidad de frecuencia, comportamiento de onda senoidal de voltaje y parámetros necesarios para el diseño y construcción de la pantalla de visualización.

4.2.3. Método Experimental

Este método permite explicar y analizar fenómenos que existen en la vida real, por ello se realiza desarrollo de un sistema de adquisición de datos, visualización y monitoreo que permita evaluar

los efectos producidos en el sistema de generación ante variaciones de carga y así brindar una herramienta didáctica para el estudio del comportamiento de la frecuencia.

4.3. Tipos de Investigación

4.3.1. Investigación Bibliográfica

Esta investigación consiste en la recopilación de información de diferentes trabajos que tienen similares e idénticas características, las cuales brindan una guía para el desarrollo del estudio, con la facilidad de ser aplicadas a la solución del problema dentro de la investigación del comportamiento de la frecuencia en un sistema de generación frente a incrementos de carga para cumplir con los distintos parámetros de calidad de energía.

4.3.2. Investigación Aplicada

En el presente proyecto la investigación es aplicada porque permite analizar los parámetros de calidad de energía, en este caso relacionado a la frecuencia y voltaje, los cuales deben estar dentro de los límites establecidos por las diferentes regulaciones.

4.4. Técnicas e Instrumentos de Investigación

La medición parámetros eléctricos tanto de frecuencia, voltaje, corriente, potencia activa se realizara través de equipos de medición. Para la obtención de la frecuencia se utiliza la señal de voltaje generado en las fases y a través de un optoacoplador se procesa la una onda senoidal para transformarla a una onda cuadrada por medio de los cruces por cero y se obtiene la duración de cada ciclo para graficarla de forma lineal en función del tiempo con la utilización de la pantalla Nextion.

Para la elaboración del prototipo se realizara la elección del motor generador acorde a los parámetros necesarios para visualizar la variación de frecuencia, así como también las respectivas a cargas necesarias para el análisis de resultados. El control de potencia frecuencia ante una variación de frecuencia no acorde a los parámetros establecidos en la presente investigación, se realizara de forma manual para visualizar a mayor detalle dichas perturbaciones.

5. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

5.1. Configuración de la pantalla Nextion

Para configurar la pantalla de visualización lineal de la frecuencia, se utiliza el Editor de Nextion, en el cual se agregan diferentes pantallas en este caso una para la visualización de

frecuencia, voltaje y velocidad, así como para la comparación de gráficas, esta cuenta con botones, etiquetas de texto que permite interactuar al usuario de una manera fácil como se muestra en la figura 5.17. Se utiliza la pantalla Nextion de 7", que realiza una comunicación directa con Arduino.

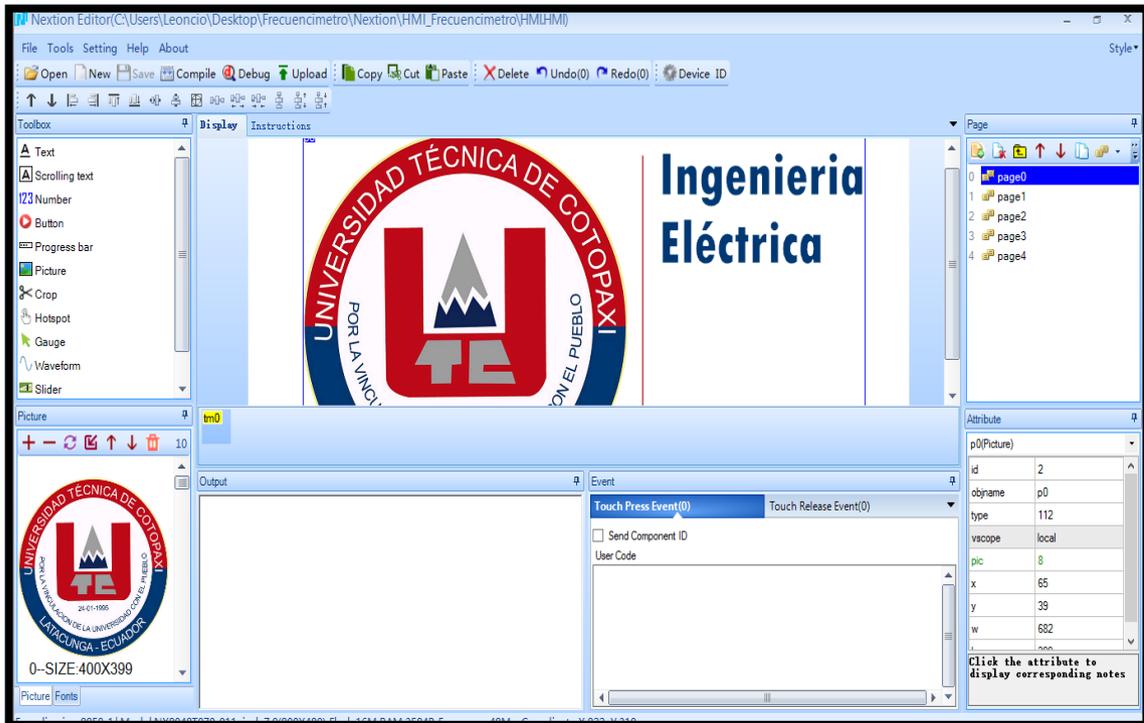


Figura 5.17. Entorno de la plataforma de configuración de Nextion.

Para el diseño de las diferentes graficas con Nextion, se utiliza Nextion Editor, en donde se agregan las diferentes características enfocadas al proyecto y se crean direcciones necesarias para la comunicación con el Arduino.

5.1.1. Conexiones de la pantalla Nextion al Arduino

Para conectar se necesita realizar cuatro conexiones Arduino con Display, son de la siguiente manera: GND con Gnd (negro), TX con RX (amarillo), RX con Tx (azul) y + 5V con +5V (rojo), para lo cual aquellos pines están etiquetados en la parte posterior de la pantalla y de Arduino.

5.2. Medición de velocidad RPM

Para registrar la velocidad del motor en RPM, se utiliza un sensor de efecto Hall, el cual contiene un grupo de 6 imanes en una rueda de diámetro de 3 cm, acoplado en el rotor del generador, formando una serie de pulsos mientras el generador gira, tal como se muestra en la figura 5.18, así como también el sensor de efecto Hall en la figura 5.19.

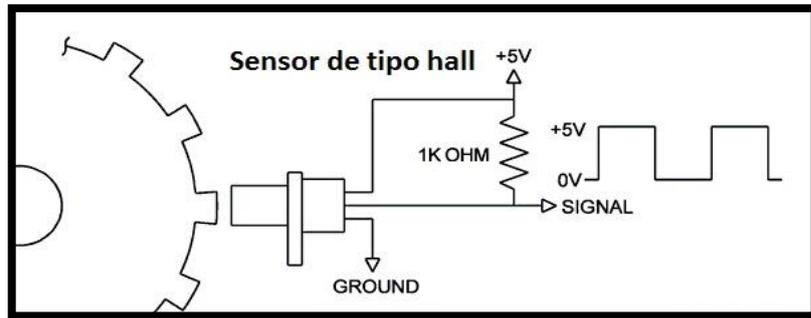


Figura 5.18. Señal de pulsos generada por el sensor de efecto hall.

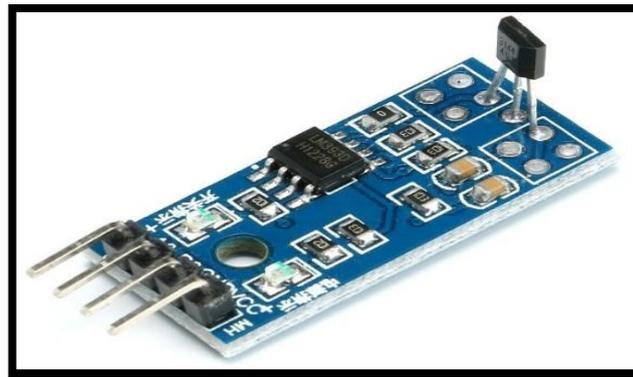


Figura 5.19. Sensor de Efecto Hall.

Estos pulsos son contados mediante **interrupciones**, las cuales registran la cantidad de pulsos que se dan en un cierto tiempo. Al poseer 6 imágenes en el extremo del rotor, se conoce que al obtener 6 pulsos se ha registrado una vuelta del generador, de esta manera se puede calcular la velocidad del mismo mediante la fórmula 5.5:

$$\text{rpm} = (60 * 1000 / \text{pulsesperturn}) / (\text{millis}() - \text{timeold}) * \text{pulses}; \quad (5.5)$$

Donde:

pulsesperturn: Es la cantidad de pulsos que se pueden dar por vuelta, en este caso son 6.

millis() – timeold: Se conoce como el tiempo de medición total por pulso.

pulses: Es la cantidad de pulsos que se generaron en el tiempo de medición.

Aplicando esta fórmula (línea 61 del programa de Arduino), obtenemos la cantidad de RPM del generador.

5.3. Medición de frecuencia

De la misma manera que en la medición de RPM, se utiliza una interrupción externa, la cual es activada al momento del cruce por cero de la señal alterna generada.

Para la detección de cruce por cero se ha implementado un circuito detallado en la siguiente figura 5.20.

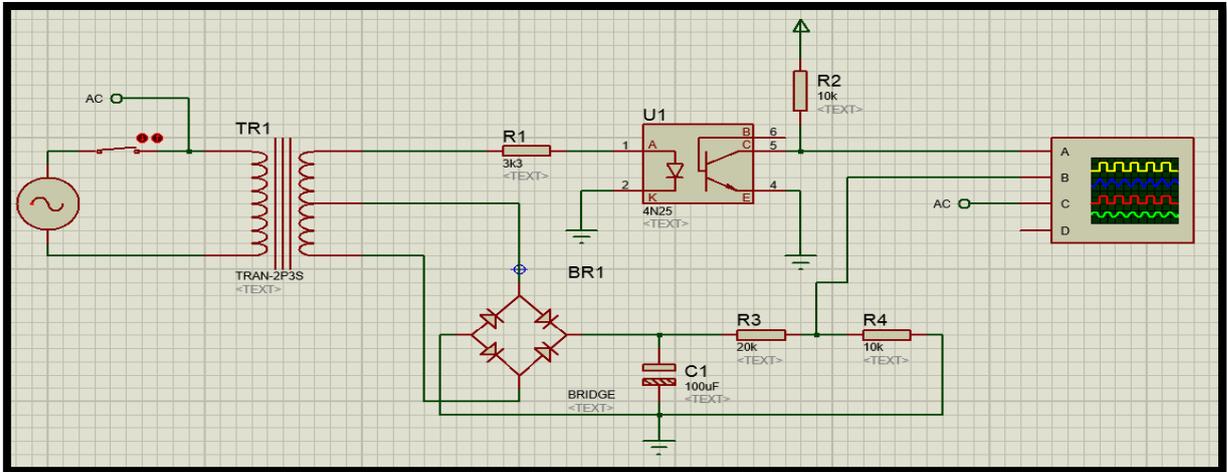


Figura 5.20. Circuito de detección de cruce por cero y voltímetro para salida del generador.

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

Como se detalla en la figura anterior, el optoaclopador U1 (4n25) es el encargado de convertir los cruces por cero de la señal alterna en pulsos de igual frecuencia que la señal entregada por el generador. Esta señal tiene una forma cuadrada, como se visualiza en la siguiente figura 5.21, la misma tiene como voltaje pico de 5Vcc, de esta forma el controlador Arduino nano puede detectar los flancos de subida que representara los cruces por cero de la señal dada por el generador.

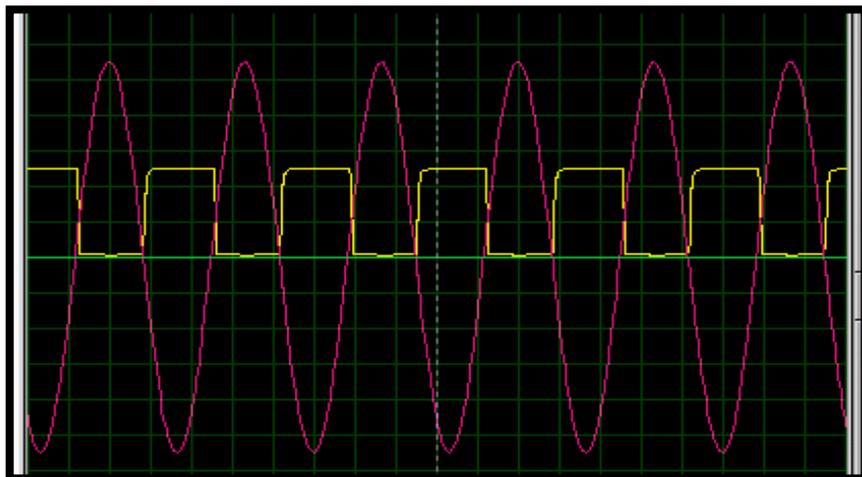


Figura 5.21. Señal amarilla.- Tren de pulsos generado por optoaclopador.

Señal morada.- Señal senoidal a la salida del transformador conectado al generador.

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

Mediante la fórmula 5.6, expuesta en la línea 69 de la programación del arduino, se puede calcular la frecuencia.

$$\text{freq} = 1e6 / \text{float}(\text{duration}) * (\text{float})\text{pulsecount}; \quad (5.6)$$

Donde:

duration: Es el tiempo de duración entre el conteo de todos los flancos.

pulsecount: Es la cantidad de pulsos que se dan en los flancos positivos de la señal cuadrada.

Entregándonos como resultado la frecuencia medida de la señal alterna generada.

5.4. Medición del voltaje

Para poder medir el voltaje VAC que el generador entrega, se dispone de un transformador, el cual disminuye el voltaje de entrada con una relación de 0.05, de esta manera hacer que los voltajes que ingresarán sean de un rango que el Arduino pueda soportar. Además se dispone de un rectificador de onda completa, el cual está compuesto por un puente de diodos y de un capacitor de $100\mu F$. Obteniendo como resultado la siguiente forma de onda como se muestra en la figura 5.22.

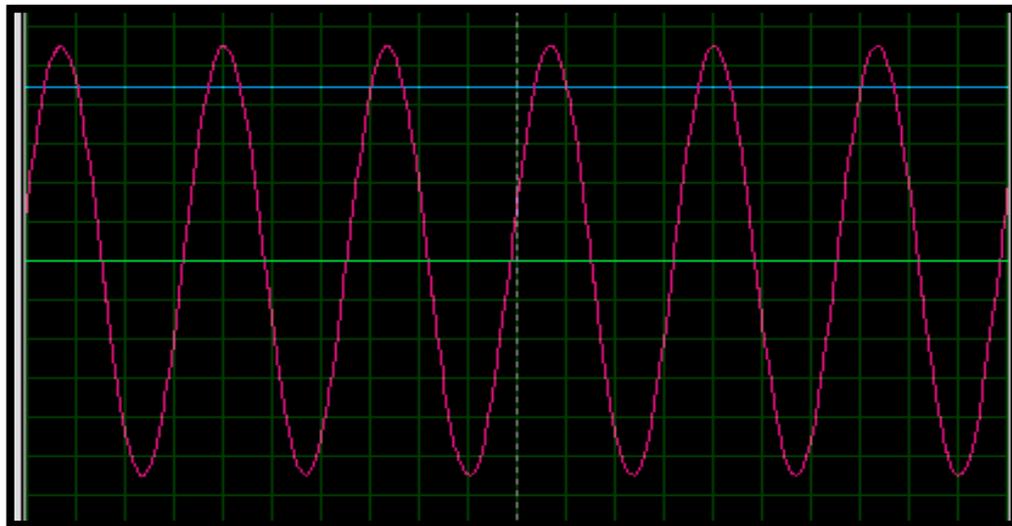


Figura 5.22. Señal morada.- Señal a la salida del transformador con voltaje pico pico de 24VAC.

Señal azul.- Señal rectificada con voltaje de máximo de 5Vcc.

Al tener un voltaje menor entregado por el generador, el transformador tendrá a su salida un voltaje mejor, con una relación de 0.05, y el voltaje rectificado disminuirá, de esta manera se puede medir el voltaje entregado mediante una entrada analógica del Arduino. Donde su valor de 5Vcc representara a los 220 VAC máximos que puede entregar el generador. Para poder representar este voltaje, usamos la fórmula 5.7.

$$\text{voltaje} = \text{float}(\text{voltaje} * 0.26) + 20,57 - ((\text{voltaje} * 0.000010265) * \text{voltaje}) \quad (5.7)$$

Donde:

voltaje_bits: Es la cantidad de bits medidos en la entrada analógica del Arduino Nano y números calculados por interpolación.

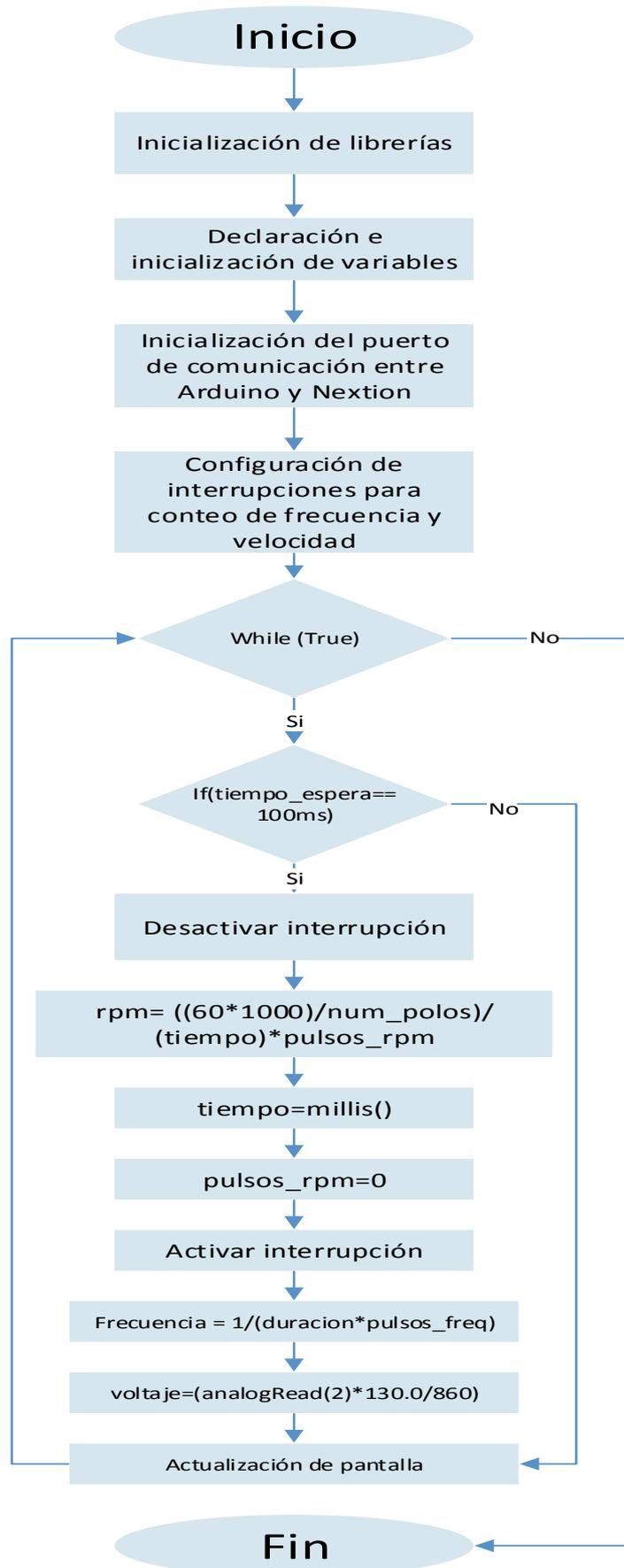
5.5. Programación del Arduino Nano

Para la programación del Arduino nano fueron necesarias las librerías:

- **SoftwareSerial:** Librería necesaria para crear puertos de comunicación serial virtuales, el mismo que se utilizara para comunicar el Arduino nano con la pantalla Nextion.
- **Nextion:** Librería propia de la pantalla Nextion, empelada para envío y recepción de datos en la interfaz de visualización.

A continuación se muestra un **diagrama de flujo** empleado para la programación.

5.5.1. Diagrama de flujo



5.6. Análisis de resultados

5.6.1. Análisis de frecuencia ante variaciones de carga en el módulo Lab-Volt

Para el análisis de la frecuencia por medio del sistema de visualización, medición y adquisición de datos, se utiliza un motor alternador síncrono, del módulo Lab-Volt con las siguientes características:

Voltaje: 208 V 3F.

Potencia aparente: 120 VA

Velocidad: 1800 r/min.

Corriente de campo: 0,33 A.

Frecuencia: 60 Hz.

Para obtener el número de polos de la maquina utilizaremos la siguiente ecuación 3.2:

$$f = \frac{\eta \cdot p}{120}$$
$$p = \frac{f * 120}{n}$$
$$p = \frac{60Hz * 120}{1800}$$
$$p = 4$$

numero de polos de la maquina 4

Uno de los parámetros a controlar es el voltaje nominal, en los bordes de generación para lo cual se debe hacer uso de un sistema de excitación en el campo para alcanzar el voltaje de salida, el sistema de excitación de la maquina es de 120 V, CC (Corriente Continua) variable.

En las centrales hidroeléctricas para obtener la potencia mecánica se aprovecha la energía potencial gravitatoria que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel a través de las turbinas, para simular este efecto se utiliza un motor jaula de ardilla de cuatro polos del módulo Lab-Volt con las siguientes características:

Voltaje: 208 V 3F.

Potencia: 175 W

Velocidad: 1570 r/min.

Corriente: 1,2 A.

Frecuencia: 60 Hz.

Para simular esa variación del caudal de agua que se da lugar en una hidroeléctrica se utiliza una fuente de voltaje en AC variable de 20 V a 220 V, que alimenta el motor para obtener las diferentes variaciones de fuerza mecánica en el acople hacia el generador síncrono.

5.6.1.1. Modelo de carga resistiva

Mediante la utilización del módulo de Lab-Volt se maneja un banco de carga resistiva con una potencia de 252 W a 120 V, con una resistencia por fase de 300 ohmios, 600 ohmios y 1200 ohmios, y mediante la conexión de cada una de las cargas se analiza el comportamiento del generador. Las posibles potencias de carga resistiva a emplearse para el análisis son las siguientes.

Primero se estabiliza el sistema con parámetros tanto en voltaje y frecuencia, asumiendo que el sistema está en condiciones óptimas para suministrar energía eléctrica a la demanda existente. Por lo cual el generador síncrono utilizado para el análisis sin carga muestra los siguientes valores:

Voltaje: 190 V.

Velocidad: 1710 rev/min

Frecuencia: 57 Hz.

Se emplea para el primer caso una carga resistiva R_1 de 1200 ohmios por cada fase, los siguientes datos obtenidos en el generador síncrono suministrando la carga, así como también en la figura 5.23 se visualiza la respuesta de frecuencia vs tiempo y en la figura 5.24, se detalla la operación del sistema en tiempo real, son los siguientes:

Voltaje: 185 V.

Velocidad: 1671 rev/min.

Corriente: 0,1 A.

Frecuencia: 55,70 Hz. Con un periodo por ciclo de 17.96 ms.

Tiempo de duración del transitorio: 4,65 seg.



Figura 5.23. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 1200Ω

	F (Hz)	T (ms)	Vac (V)
1	55.69	17.96	186.66
2	55.68	17.96	185.88
3	55.68	17.96	187.18
4	55.68	17.96	186.40
5	55.66	17.96	185.36
6	55.67	17.96	186.14
7	55.67	17.96	184.84
8	55.67	17.96	185.62

Figura 5.24. Operación del sistema en tiempo real.

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

Como se muestra en el análisis se realiza el control del sistema manualmente, con los niveles nominales tanto de voltaje y frecuencia, y se emplea para el segundo caso una carga resistiva R_2 de 600 ohmios por cada fase. En la figura 5.25 se visualiza la respuesta de frecuencia vs tiempo y en la figura 5.26, se detalla la operación del sistema en tiempo real, son los siguientes:

Voltaje: 177,56 V.

Velocidad: 1623 rev/min.

Corriente: 0,2 A.

Frecuencia: 54,08 Hz. Con un periodo por ciclo de 18.48 ms.

Tiempo de duración del transitorio: 3,48 seg.



Figura 5.25. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 600Ω .

	F (Hz)	T (ms)	Vac (V)
1	54.11	18.48	174.96
2	54.11	18.48	177.30
3	54.09	18.49	176.78
4	54.11	18.48	177.30
5	54.09	18.49	176.00
6	54.11	18.48	178.08
7	54.11	18.48	176.26
8	54.12	18.48	176.26

Figura 5.26. Operación del sistema en tiempo real.

Se realiza el control del sistema manualmente, con los niveles nominales tanto de voltaje y frecuencia, y se emplea para el tercer caso una carga resistiva R_3 de 300 ohmios por cada fase, los datos de operación se detalla en las figuras 5.27. Los siguientes resultados obtenidos en el generador síncrono suministrando esta carga son los siguientes:

Voltaje: 157,28 V.

Velocidad: 1481 rev/min.

Corriente: 0,4 A.

Frecuencia: 49,37 Hz. Con un periodo por ciclo de 20.37 ms.

Tiempo de duración del transitorio: 5,81 seg.

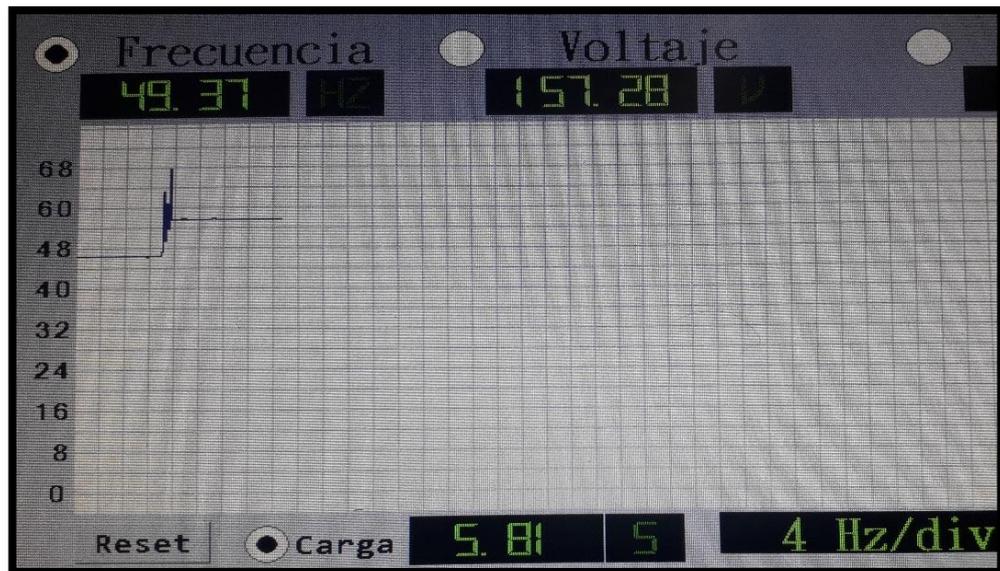


Figura 5.27. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 300Ω.

Para el cuarto caso se emplea dos resistencias en paralelo por cada fase de 1200 y 600 ohmios.

$$\frac{1}{RT} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}$$

$$\frac{1}{RT} = \frac{1}{1200} + \frac{1}{600}$$

$$RT = 400 \Omega$$

Se realiza el control del sistema manualmente, con los niveles nominales tanto de voltaje y frecuencia, y se emplea para el cuarto caso una carga resistiva R_4 de 400 ohmios por cada fase, en las figuras 5.28 y 5.29 se detalla los datos de operación del sistema, los valores obtenidos en el generador síncrono suministrando esta carga son los siguientes:

Voltaje: 163.26 V.

Velocidad: 1525 rev/min.

Corriente: 0,3 A.

Frecuencia: 50,83 Hz. Con un periodo por ciclo de 19.65 ms.

Tiempo de duración del transitorio: 8,95 seg.

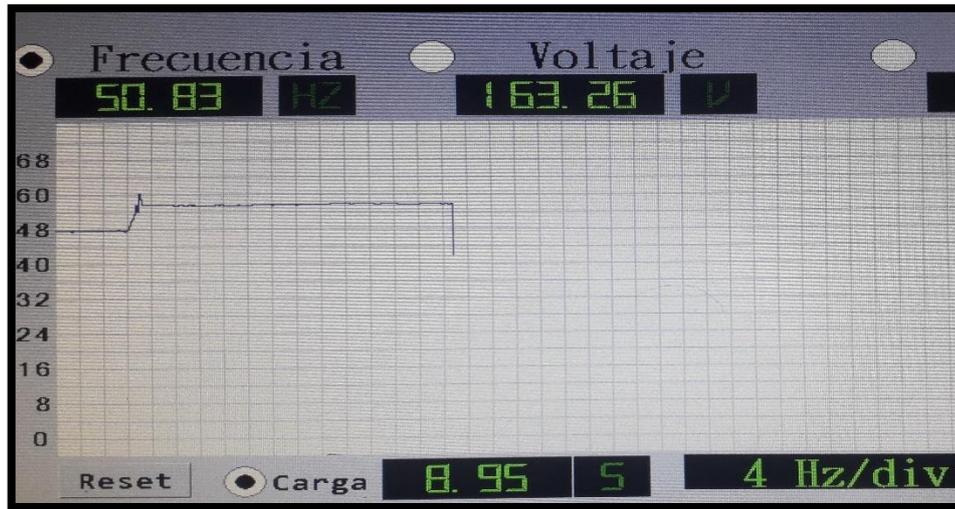


Figura 5.28. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 400Ω.

	F (Hz)	T (ms)	Vac (V)
1	50.81	19.68	161.70
2	50.87	19.66	163.26
3	50.90	19.65	165.60
4	50.88	19.65	164.30
5	50.83	19.67	163.78
6	50.74	19.71	162.22
7	50.80	19.68	163.26
8	50.77	19.70	162.48

Figura 5.29. Operación del sistema de generación en tiempo real.

Para el quinto caso se emplea dos resistencias en paralelo por cada fase de 300 y 600 ohmios

$$\frac{1}{RT} = \frac{1}{R3} + \frac{1}{R2}$$

$$\frac{1}{RT} = \frac{1}{300} + \frac{1}{600}$$

$$\frac{1}{RT} = \frac{180000}{900}$$

$$RT = 200 \Omega$$

Se realiza el control del sistema manualmente, con los niveles nominales tanto de voltaje y frecuencia, y se emplea para el quinto caso una carga resistiva R_5 de 200 ohmios por cada fase, en la figura 5.30, se detalla los datos de operación del sistema, los siguientes valores obtenidos en el generador síncrono suministrando esta carga son los siguientes:

Voltaje: 120,10 V.

Velocidad: 1164 rev/min.

Corriente: 0,6 A.

Frecuencia: 38,83 Hz. Con un periodo por ciclo de 26.32 ms.

Tiempo de duración del transitorio: 9,13 seg.

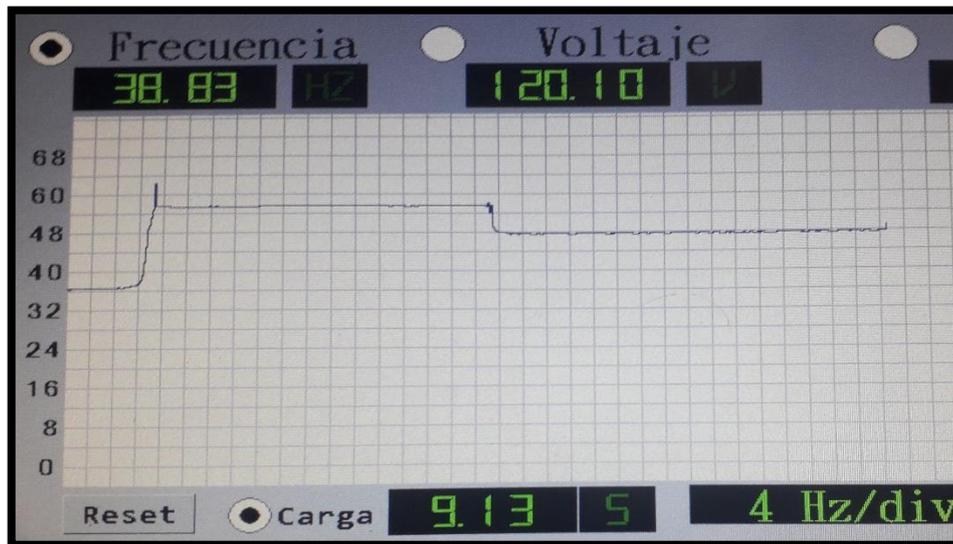


Figura 5.30. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 200Ω.

Para el sexto caso se emplea las tres resistencias en paralelo por fase de 1200, 300, 600 ohmios, empleando la carga en su totalidad.

$$\frac{1}{RT} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3}$$
$$\frac{1}{RT} = \frac{1}{1200} + \frac{1}{600} + \frac{1}{300}$$
$$RT = 171.43 \Omega$$

Se realiza el control del sistema manualmente, con los niveles nominales tanto de voltaje y frecuencia, y se emplea para el sexto caso una carga resistiva R_6 de 171.43 ohmios por cada fase, en la figura 5.31, se detalla los datos de operación del sistema, los siguientes valores obtenidos en el generador síncrono suministrando esta carga son los siguientes:

Voltaje: 105.28 V.

Velocidad: 1469 rev/min.

Corriente: 0,7 A.

Frecuencia: 34.27 Hz. Con un periodo por ciclo de 29.67 ms.

Tiempo de duración del transitorio: 9,30 seg.

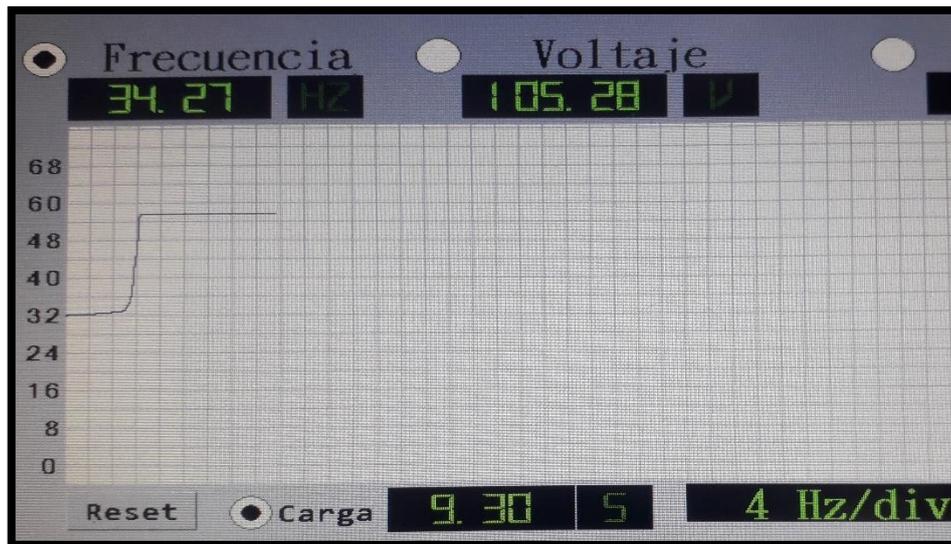


Figura 5.31. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 171.43Ω.

Como se observa en este análisis existe una mayor caída de la frecuencia debido al consumo de potencia activa, que afecta directamente a este factor, los picos generados en las curvas de frecuencia vs tiempo son provocados por el ingreso de las cargas indistintamente a las fases, lo que provoca un desbalance en el generador ocasionando esos efectos.

El sistema de generación no trata de recuperarse con la propia inercia del generador producto de que no dispone de un variador de velocidad lo que ocasiona que los factores como es en la frecuencia, decaigan en mayor proporción debido a la carga. El caso más relevante ocurre al inyectar una carga resistiva de 172 ohmios por fase consumiendo una potencia trifásica de 230 W provocando una caída de frecuencia en un 60% de la nominal con una duración de transitorio de 9,30 seg.

Existe una caída de voltaje debido a que circula una corriente interna en el sistema lo que ocasiona se genere una propia resistencia interna en el generador que se resta de su fuerza electro motriz dando como resultado que el voltaje en los bornes del generador sea menor al momento de suministrar a una carga y también existe un frenado del mismo.

Es por ello la importancia de realizar un control potencia frecuencia y regular el sistema de excitación para recuperar al sistema en valores nominales de operación.

5.6.1.2. Modelo de carga inductiva

Mediante la utilización del módulo de Lab-Volt se maneja un banco de carga inductiva con una potencia de 252 VAr a 120 V, con una inductancia por fase de 0.8 Henrios, 1.8 henrios y 3.2

henrios y mediante la conexión de cada una de las cargas se analiza el comportamiento del generador.

Primero se estabiliza el sistema con parámetros tanto en voltaje y frecuencia, asumiendo que el sistema está en condiciones óptimas para suministrar energía eléctrica a la demanda existente. Por lo cual el generador síncrono utilizado para el análisis sin carga muestra los siguientes valores:

Voltaje: 190 V.

Velocidad: 1710 rev/min

Frecuencia: 57 Hz.

Se emplea para el primer caso una carga inductiva X_{L1} de 1146,055 ohmios por cada fase, los siguientes datos obtenidos en el generador síncrono suministrando la carga son los siguientes, así como también en la figura 5.32:

Voltaje: 179,12 V.

Velocidad: 1709 rev/min.

Corriente: 0,1 A.

Frecuencia: 56,99 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 1,17 seg.



Figura 5.32. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de 1146,055Ω.

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

Como se muestra en el análisis se realiza el control del sistema manualmente, con los niveles nominales tanto de voltaje y frecuencia, y se emplea para el segundo caso una carga inductiva X_{L2} de 573,02 ohmios por cada fase.

Los siguientes datos obtenidos en el generador síncrono suministrando esta carga son los siguientes y se lo representa de forma gráfica en la figura 5.33:

Voltaje: 171,06 V

Velocidad: 14707 rev/min.

Corriente: 0,2 A.

Frecuencia: 56,89 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 1,17 seg.

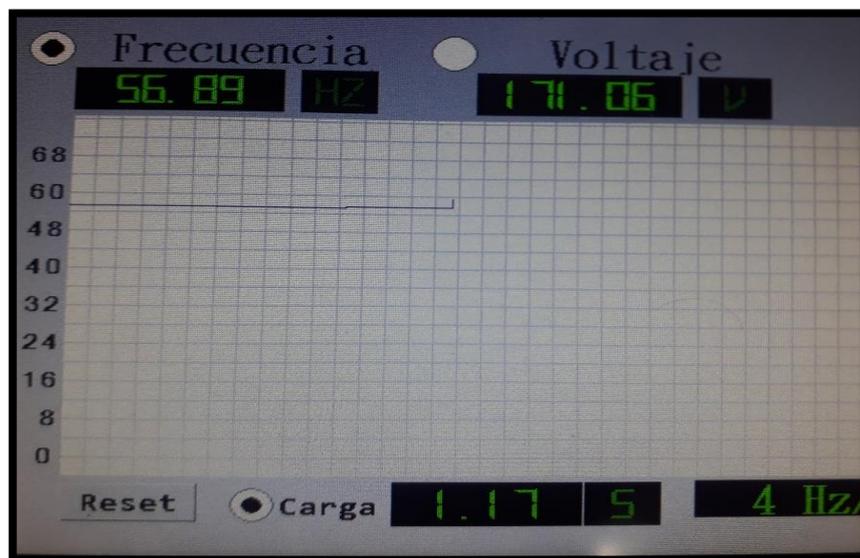


Figura 5.33. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de 573.02Ω.

Se realiza el control del sistema manualmente, con los niveles nominales tanto de voltaje y frecuencia. Y se emplea para el tercer caso una carga inductiva X_{L3} de 286,51 ohmios por cada fase. Los siguientes datos obtenidos en el generador síncrono suministrando esta carga son los siguientes y se lo representa de forma gráfica en la figura 5.34:

Voltaje: 153 V.

Velocidad: 1702 rev/min.

Corriente: 0,4 A.

Frecuencia: 56,75 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 2,32 seg.



Figura 5.34. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de 286.51Ω .

Para el cuarto caso se emplea dos inductancias en paralelo por cada fase de 1146,055 y 573,02 ohmios. Se realiza el control del sistema manualmente, con los niveles nominales tanto de voltaje y frecuencia. Y se emplea para el cuarto caso una carga inductiva X_{L4} de 382,014 ohmios por cada fase. Los siguientes datos obtenidos en el generador síncrono suministrando esta carga son los siguientes y se lo representa de forma gráfica en la figura 5.35:

Voltaje: 161,96 V.

Velocidad: 1706 rev/min.

Corriente: 0,3 A.

Frecuencia: 56,86 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 1,16 seg.



Figura 5.35. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de 382.014Ω .

Para el quinto caso se emplea dos inductancias en paralelo por cada fase de 573,02 y 286,51 ohmios. Se realiza el control del sistema manualmente, con los niveles nominales tanto de voltaje y frecuencia. Y se emplea para el quinto caso una carga inductiva X_{L5} de 191 ohmios por cada fase. Los siguientes datos obtenidos en el generador síncrono suministrando esta carga son los siguientes:

Voltaje: 137 V.

Velocidad: 1695 rev/min.

Corriente: 0,6 A.

Frecuencia: 56,51 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 4,66 seg.



Figura 5.36. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de 191 Ω .

Para el sexto caso se emplea tres inductancias en paralelo por cada fase de 1146,05 y de 573,02 y 286,51 ohmios. Se realiza el control del sistema manualmente, con los niveles nominales tanto de voltaje y frecuencia, y se emplea para el sexto caso una carga inductiva X_{L6} de 163,72 ohmios por cada fase. Los siguientes datos obtenidos en el generador síncrono suministrando esta carga son los siguientes:

Voltaje: 127 V.

Velocidad: 1691 rev/min.

Corriente: 0,7 A.

Frecuencia: 56,38 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 5,82 seg.



Figura 5.37. Respuesta de operación del generador a una carga inductiva por fase de 163.72Ω .

Al inyectar una carga inductiva se observa un aumento y una disminución de frecuencia pero en pequeña proporción, en donde el sistema comienza oscilar, debido a que las cargas inductivas consumen y entregan potencia reactiva al sistema.

Puesto que las variaciones en la potencia reactiva es menos sensible a cambios en la frecuencia y afecta localmente la magnitud de la tensión.

5.6.1.3. Modelo de Carga Resistiva e Inductiva

Un sistema eléctrico de potencia en gran parte la carga instalada de los usuarios finales es resistiva inductiva, es así que para el estudio se realiza el análisis mediante la variación de distintos valores de impedancias para observar el comportamiento del generador.

La impedancia es la resistencia en los circuitos de corriente alterna y posee tanto magnitud como ángulo de fase, para lo cual se modela una primera impedancia con una resistencia de 1200 ohmios y un inductor de 3.2 Henrys en serie.

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2\pi(57\text{Hz})(3.2\text{H})$$

$$X_L = 1146,055 \Omega$$

La impedancia resultante es:

$$Z = R + j(X_L - X_C)$$

$$Z_1 = 1200\Omega + j(1146,055 - 0)\Omega$$

$$Z_1 = 1200\Omega + j1146,055\Omega$$

$$Z_1 = 1659,34 ; 43,68^\circ [\Omega]$$

Los siguientes datos obtenidos en el generador síncrono suministrando la carga $1200 \Omega + j1146,055 \Omega$ son los siguientes:

Voltaje: 182 V.

Velocidad: 1689 rev/min.

Frecuencia: 56,30 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 2,33 seg.



Figura 5.38. Respuesta de operación del generador a una carga R, L por fase de $1200 \Omega + j1146,055 \Omega$.

Una segunda impedancia con una resistencia de 600 ohmios y un inductor de 1.6 henrios en serie.

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2\pi(57\text{Hz})(1.6\text{H})$$

$$X_L = 573,02 \Omega$$

La impedancia resultante es:

$$Z = R + j(X_L - X_C)$$

$$Z_2 = 600\Omega + j(573,02 - 0)\Omega$$

$$Z_2 = 600\Omega + j573,02 \Omega$$

$$Z_2 = 829,66 ; 43,68^\circ [\Omega]$$

Los siguientes datos obtenidos en el generador síncrono suministrando la carga $600 \Omega + j573,02 \Omega$ son los siguientes:

Voltaje: 173 V.

Velocidad: 1701 rev/min.

Frecuencia: 56,70Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 3,49 seg.

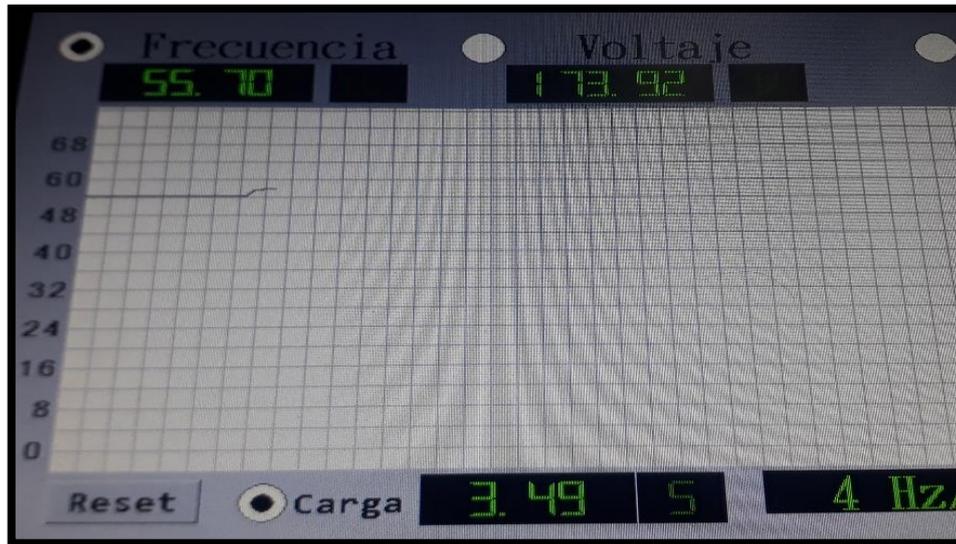


Figura 5.39. Respuesta de operación del generador a una carga R, L por fase de $600 \Omega + j573.02 \Omega$.

Una tercera impedancia con una resistencia de 300 ohmios y un inductor de 0.8 henrios en serie.

$$\begin{aligned}X_L &= 2\pi fL \\X_L &= 2\pi(57\text{Hz})(0.8\text{H}) \\X_L &= 286,51 \Omega\end{aligned}$$

La impedancia resultante es:

$$\begin{aligned}Z &= R + j(X_L - X_C) \\Z_3 &= 300\Omega + j(286,51 - 0)\Omega \\Z_3 &= 300\Omega + j286,51 \Omega \\Z_3 &= 414,83; 43,68^\circ [\Omega]\end{aligned}$$

Los siguientes datos obtenidos en el generador síncrono suministrando la carga $300 \Omega + j286,51 \Omega$ son los siguientes:

Voltaje: 161,18 V.

Velocidad: 1612 rev/min.

Frecuencia: 53,75 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 4,65 seg.



Figura 5.40. Respuesta de operación del generador a una carga R, L por fase de $300\Omega + j286.51 \Omega$.

Una cuarta impedancia con una resistencia de 1200 ohmios, una inductancia de 3,2 Henrios y capacitancia de 0,0000022 Faradios en serie por cada fase en una conexión en estrella.

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2\pi(57\text{Hz})(3,2\text{H})$$

$$X_L = 1146,055 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi(57\text{Hz})(0,0000022 \text{ F})}$$

$$X_C = 1269,17 \Omega$$

La impedancia resultante es:

$$Z = R + j(X_L - X_C)$$

$$Z_3 = 300\Omega + j(1146,055 - 1269,17)\Omega$$

$$Z_3 = 300\Omega - j123,11 \Omega$$

Los siguientes datos obtenidos en el generador síncrono suministrando la carga $300 \Omega - j123,11 \Omega$ son los siguientes:

Voltaje: 187 V.

Velocidad: 1671 rev/min.

Frecuencia: 55,73 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 1,16 seg.

Al inyectar toda la capacidad de los bancos de carga tanto resistiva, inductiva y capacitiva en el generador se obtienen los siguientes datos:

Voltaje: 145 V.

Velocidad: 1253 rev/min.

Frecuencia: 41,77 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 11,63 seg.

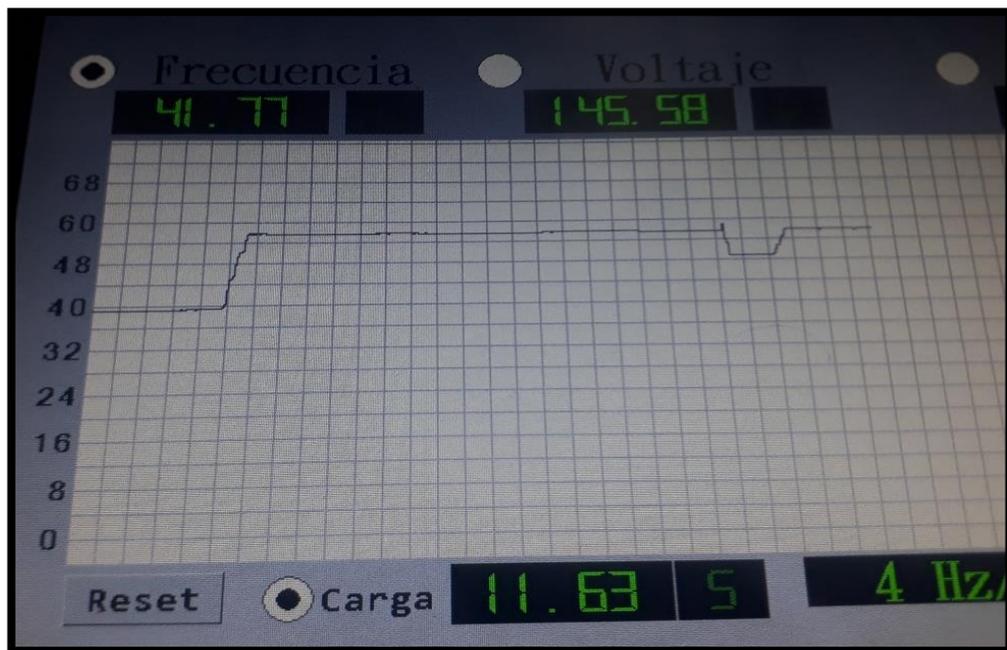


Figura 5.41. Respuesta de operación del sistema de generación con una carga máxima en serie R, L, C.

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

5.6.2. Análisis en el Sistema de Generación de 5 kW

En el laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi se tiene un sistema de generación a escala para realizar diferentes practicas relacionadas a la generación de energía eléctrica, el cual cuenta con un generador de 5000 W, con un voltaje alterno trifásico de 220 V, de 2 polos y 3600 rpm.

Para impulsar el generador, este cuenta con motor de inducción tipo jaula de ardilla de 5 Hp, 3540 rpm y 240 V acoplado directamente al eje del generador con sus respectivos soportes metálicos para evitar posibles vibraciones como se muestra en la figura 5.42.

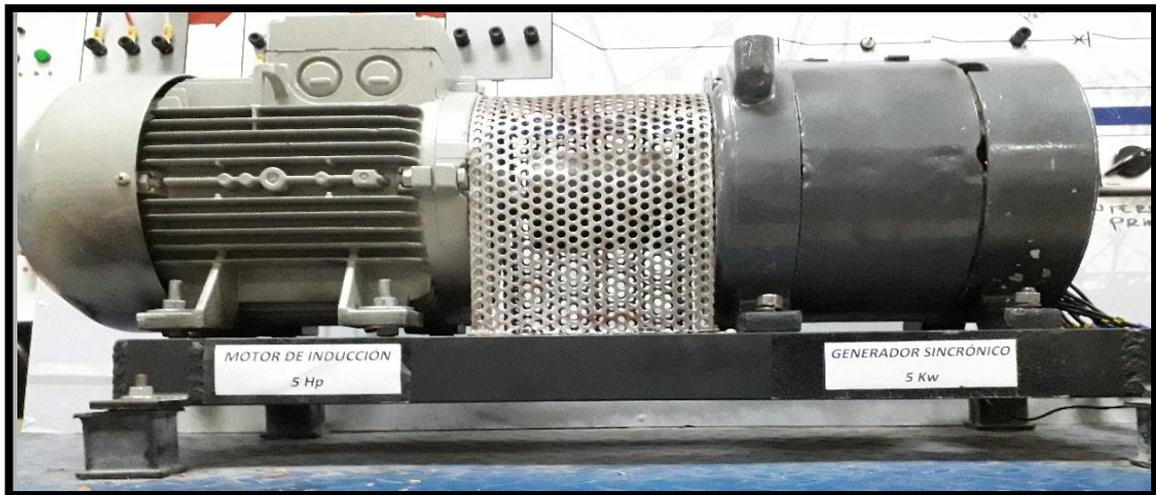


Figura 5.42. Grupo Motor Generador.

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

El diseño de la propuesta está enfocado al comportamiento de la frecuencia en dicho grupo de generación por lo cual los equipos de medición están desarrollados en función de estos parámetros de operación, por lo cual se debe tener en cuenta la potencia y voltaje de generación en caso de realizar análisis y pruebas en otros grupos de generación.

5.6.2.1. Cálculo de revoluciones por minuto del generador.

La velocidad de un generador síncrono está directamente relacionada a la frecuencia y al voltaje generado, para lo cual se realiza el cálculo de las r. p. m tomando en cuenta el número de polos y la velocidad nominal para entender el comportamiento que tiene la frecuencia al aumentar o disminuir la velocidad del mismo es así que utilizando la ecuación 3.2 de la velocidad mecánica del generador, se procede a calcular.

$$f = \frac{np \cdot rpm}{120}$$

Tabla 5.2. Cálculo de la frecuencia del generador con diferentes velocidades.

VELOCIDAD (RPM)	FRECUENCIA (Hz)
3600	60
3650	60,833
3550	59,167
3500	58,333

3450	57,500
3400	56,667
3350	55,833
3300	55,000
3250	54,167
3200	53,333
3150	52,500
3100	51,667
3050	50,833
3000	50

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

El sistema está diseñado para medir la frecuencia en un rango de 0 a 68Hz y la velocidad de 0 a 3800 rpm.

Para el desarrollo del proyecto se ha utilizado los programas Nextion Editor, para la creación de la interfaz gráfica y la configuración de la pantalla Nextion, además del programa Arduino para su respectiva programación del Arduino Nano, el mismo que será encargado de obtener los datos del generador, como son: voltaje, frecuencia y velocidad RPM; para luego poder visualizarlos en la pantalla Nextion. Para analizar el comportamiento de la frecuencia se emplea el medidor de frecuencia diseñado en el grupo de generación de 5 kW para lo cual se estabiliza el sistema a valores nominales de 60 Hz y 220 V. Para la toma de señales de tensión desde el generador hasta la pantalla se emplea para este análisis Línea 1 y Línea 2.

5.6.2.2. Pruebas en vacío

El grupo generador motor no cuenta con un sistema automático de regulación de frecuencia y voltaje generado, por lo cual este cuenta con un potenciómetro de control de velocidad del motor y un sistema de excitación externo que varía de 0 a 31.5 Vcc y una corriente máxima admisible por el generador de 500 mA.

Para obtener un voltaje generado, se procede a variar el voltaje y corriente de excitación hasta llegar a un voltaje nominal de 220 V dándonos como resultado un voltaje de 20.1 Vcc y una Corriente de 0.33 A necesarios para estabilizar el sistema. Al encender el sistema de generación

este tarda 5.89 segundos en estabilizarse a una frecuencia mínima de 59.48 Hz y un voltaje generado de 216.56 V a 3248 rpm como se muestra en la figura 5.43.



Figura 5.43. Respuesta de operación del generador en condiciones normales.

Para obtener la banda de frecuencia en la cual opera el generador se utiliza el potenciómetro de control de velocidad del motor hasta su valor máximo, dando como resultado una frecuencia máxima en vacío de 62,97 Hz a un voltaje generado de 228,78 V a 3536 rpm en un tiempo de 3,17 segundos hasta estabilizarse como se muestra en la figura 5.44.

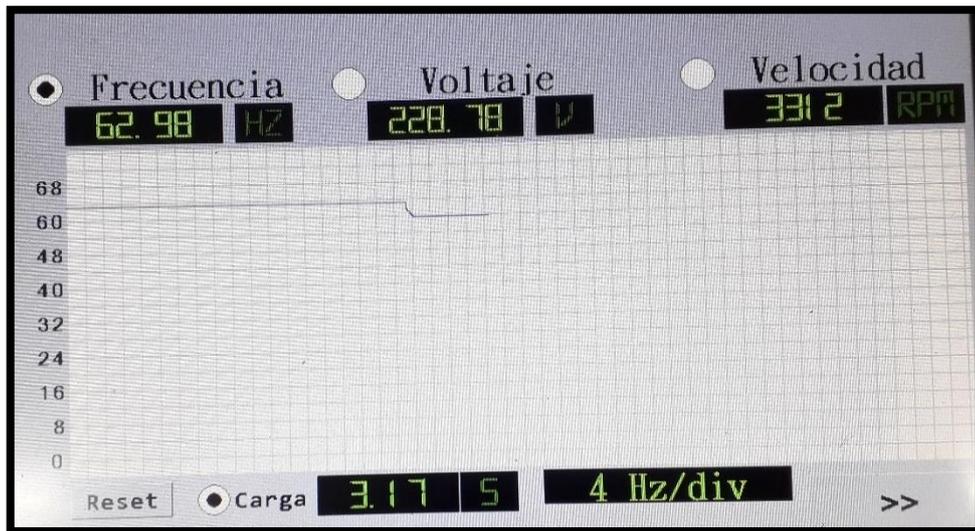


Figura 5.44. Frecuencia máxima del generador.

Debido a que la frecuencia está estrechamente relacionado con la velocidad de giro del generador y al voltaje generado se puede observar en la figura 5.45 los tres parámetros en tiempo real para realizar diferentes comparaciones.

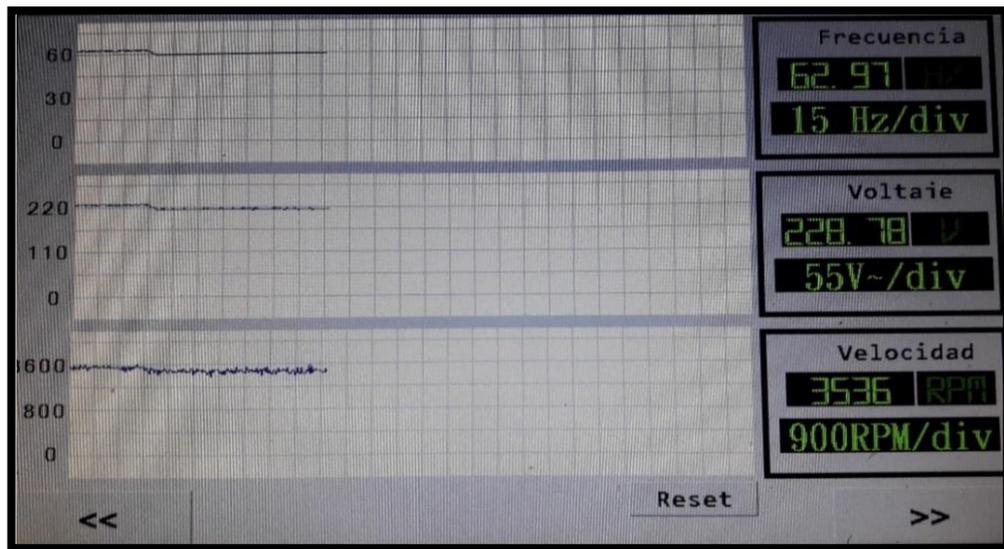


Figura 5.45. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad.

En la gráfica anterior se observa que la frecuencia voltaje y velocidad se mantienen estables debido a que están trabajando en condiciones normales y en la figura 5.46 se detalla el tiempo de duración de cada ciclo de frecuencia el cual es de 16.62 ms cuando tenemos una frecuencia mínima de 59.47 Hz y en la figura 5.47, se detalla los datos de operación del sistema con un tiempo de 15.88 ms a una frecuencia máxima de 62.98 Hz.

	F (Hz)	T (ms)	Vac (V)	Vel. (RPM)
1	59.47	16.82	214.74	3304.00
2	59.47	16.81	215.26	3360.00
3	59.47	16.81	217.08	3220.00
4	59.46	16.82	216.04	3234.00
5	59.46	16.82	216.82	3290.00
6	59.47	16.82	217.34	3248.00
7	59.47	16.81	216.56	3304.00
8	59.47	16.81	216.82	3465.00

Figura 5.46. Duración del ciclo de la frecuencia mínima y datos de operación del sistema.

	F (Hz)	T (ms)	Vac (V)	Vel. (RPM)
1	62.98	15.88	224.88	3402.00
2	62.98	15.88	225.66	3402.00
3	62.98	15.88	225.40	3402.00
4	62.97	15.88	224.10	3458.00
5	62.98	15.88	224.62	3507.00
6	62.98	15.88	226.18	3332.00
7	62.98	15.88	225.14	3444.00
8	62.98	15.88	225.40	3402.00

Figura 5.47. Duración del ciclo de la frecuencia máxima T (ms) y datos de operación del sistema.

5.6.2.3. Pruebas con carga resistiva balanceadas de 85 Ω

Para este análisis se emplea una carga resistiva disponible en el laboratorio de la carrera de ingeniería eléctrica que consta de dos cargas resistiva de 85 Ω a 1800 W e inductiva de 0.10 H a 2117 VAR de (Juan Velasco y Hernán Acosta). Para lo cual se estabiliza el sistema a una frecuencia de 60 Hz y voltaje generado de 220 V a 3486 rpm, luego de inyectar dicha carga se Obtiene los siguientes resultados como se muestra la siguiente figura 5.48, donde se ocasiono una caída de frecuencia a 59.93 Hz provocando un transitorio con una duración de 1,19 segundos hasta estabilizarse en dicho valor.



Figura 5.48. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva de 85 Ω .

En la figura 5.49, se observa que luego de inyectar una carga resistiva el voltaje disminuye entre 173 y 175 V debido a que circula una corriente en el devanado del generador lo que ocasiona una caída de voltaje en la propia resistencia interna de generador que se resta de su fuerza electro motriz dando como resultado que el voltaje en los bornes del generador sea menor al momento de suministrar a una carga y también existe un frenado del mismo. Es por ello la importancia de realizar un control potencia frecuencia y regular el sistema de excitación para recuperar al sistema en valores nominales de operación.

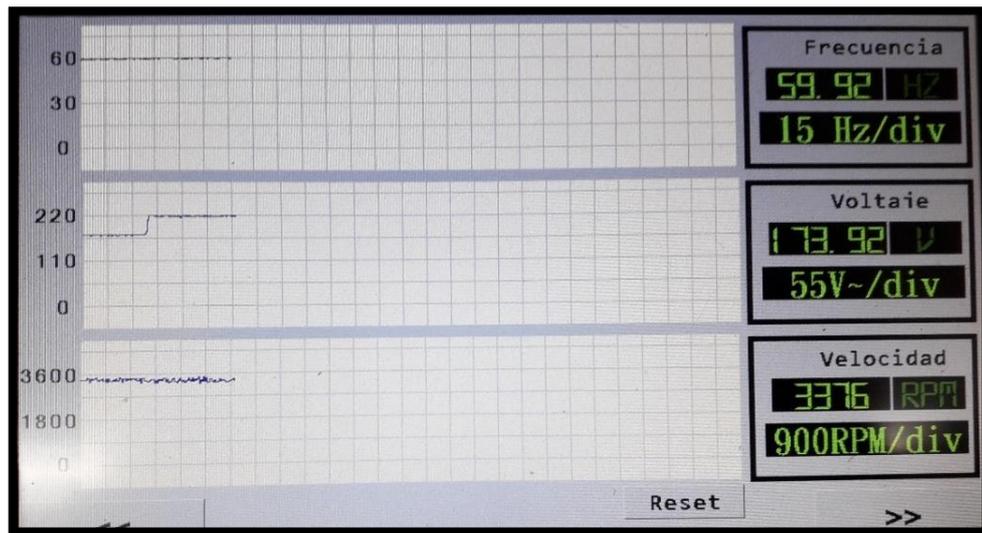


Figura 5.49. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad a una carga resistiva de 85 Ω .

En la figura 5.50, se detalla la operación en tiempo real del generador en la se obtiene el tiempo de duración del ciclo de 16,69 ms verificando que a menor frecuencia mayor es el tiempo de duración del periodo de la onda de voltaje.

	F (Hz)	T (ms)	Vac (V)	Vel.(RPM)
1	59.92	16.69	173.92	3360.00
2	59.93	16.69	175.48	3276.00
3	59.92	16.69	173.66	3318.00
4	59.92	16.69	173.92	3320.00
5	59.92	16.69	172.88	3318.00
6	59.92	16.69	174.18	3220.00
7	59.92	16.69	174.96	3304.00
8	59.92	16.69	174.96	3374.00

Figura 5.50. Duración del ciclo de la frecuencia T (ms) y datos de operación del sistema.

También se detalla la respuesta de potencia entregada por el generador al momento de inyectar carga resistiva comprobando que existe una mayor entrega de potencia activa y un consumo de reactivos, lo que ocasiona una caída de voltaje de 20% y 0.11% en la frecuencia, reflejando que a pequeñas cargas no se afecta la frecuencia como se muestra en la tabla 5.3. Las variaciones en la potencia activa afectan principalmente a la frecuencia del sistema.

Tabla 5.3 Datos de operación del generador con carga resistiva de 85 Ω .

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)	3,6	3,8	3,6	3.7
Factor de potencia	1	1	1	1
Potencia activa (W)	370	341	350	1106
Potencia reactiva (VAr)	-26	-27	-35	-76
Potencia Aparente (VA)	364	388	364	1094
Voltaje (V)	175	175	175	175

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

5.6.2.4. Pruebas con carga resistiva balanceada de 85 Ω y de 112 Ω

Para este análisis se emplea una carga resistiva de 58.76 Ω resultado de la conexión en paralelo, para lo cual se estabiliza el sistema a una frecuencia de 60 Hz y voltaje generado de 220 V a 3486 rpm, luego de inyectar dicha carga se obtiene los siguientes resultados como se muestra la siguiente figura 5.51, donde se ocasiono una caída de frecuencia a 59.93 Hz provocando un transitorio con una duración de 2,01 segundos hasta estabilizarse en dicho valor debido a la cantidad de potencia demandada por la carga lo que ocasiona un mayor tiempo en estabilizarse el generador.

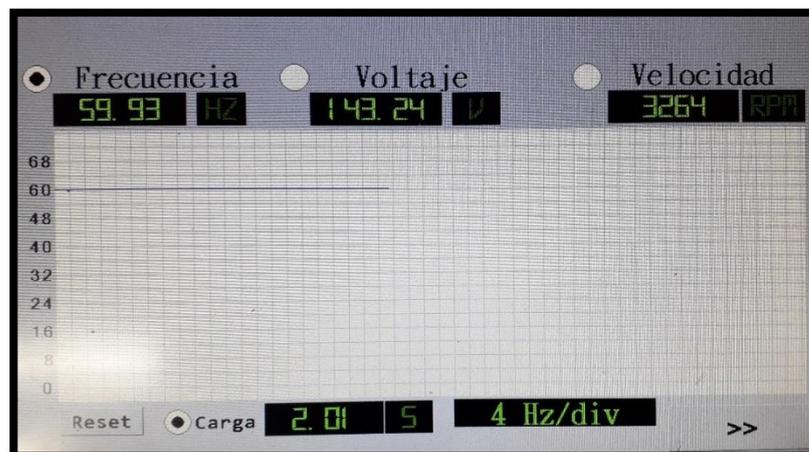


Figura 5.51. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva de 58.76 Ω .

En la figura 5.52, se observa que luego de inyectar una carga resistiva el voltaje disminuye a 143,24 V debido a las razones antes mencionadas.



Figura 5.52. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad a una carga resistiva de 58.76Ω .

En la figura 5.53, se detalla la operación en tiempo real del generador en la se obtiene el tiempo de duración del ciclo de 16,68 ms verificando que a menor frecuencia mayor es el tiempo de duración del periodo de la onda de voltaje.

	F (Hz)	T (ms)	Vac (V)	Vel. (RPM)
1	59.93	16.69	140.90	3248.00
2	59.92	16.69	141.94	3262.00
3	59.94	16.68	142.72	3346.00
4	59.93	16.69	143.50	3360.00
5	59.93	16.69	143.24	3260.00
6	59.93	16.69	144.02	3276.00
7	59.93	16.69	142.46	3180.00
8	59.93	16.68	141.94	3304.00

Figura 5.53. Duración del ciclo de la frecuencia T (ms) y datos de operación del sistema.

También se detalla la respuesta de potencia entregada por el generador en la tabla 5.4 al momento de inyectar carga resistiva comprobando que existe una menor entrega de potencia activa debido a la disminución del voltaje generado y un mayor consumo de reactivos, lo que

ocasiona una caída de voltaje de 34% y 0.12% en la frecuencia, reflejando que la propia inercia del motor acoplado al generador no permite decaer en gran proporción a la velocidad lo que ocasiona que la frecuencia se estabilice de forma inmediata.

Tabla 5.4. Datos de operación del generador con carga resistiva 58.76Ω

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)	4,3	4,4	4,3	4,5
Factor de potencia	0,99	0,99	0,99	0,99
Potencia activa (W)	311	374	381	1066
Potencia reactiva (VAr)	-48	-45	-25	-100
Potencia Aparente (VA)	315	330	331	1068
Voltaje (V)	143,24	143,24	143,24	143,24

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

5.6.2.5. Pruebas con carga balanceada resistiva de 85Ω e inductiva de 0.10 H

Para este análisis se emplea una carga resistiva de 85Ω e inductiva de 0.10 H , para lo cual se estabiliza el sistema a una frecuencia de 60 Hz y voltaje generado de 220 V a 3486 rpm , luego de inyectar dicha carga se obtiene los siguientes resultados como se muestra la siguiente figura 5.35, donde se ocasiono una caída de frecuencia a 59.98 Hz provocando un transitorio con una duración de 2 segundos hasta estabilizarse en dicho valor debido a la demanda de la carga inductiva lo que provoca que el generador inyete mayor cantidad de reactivos.

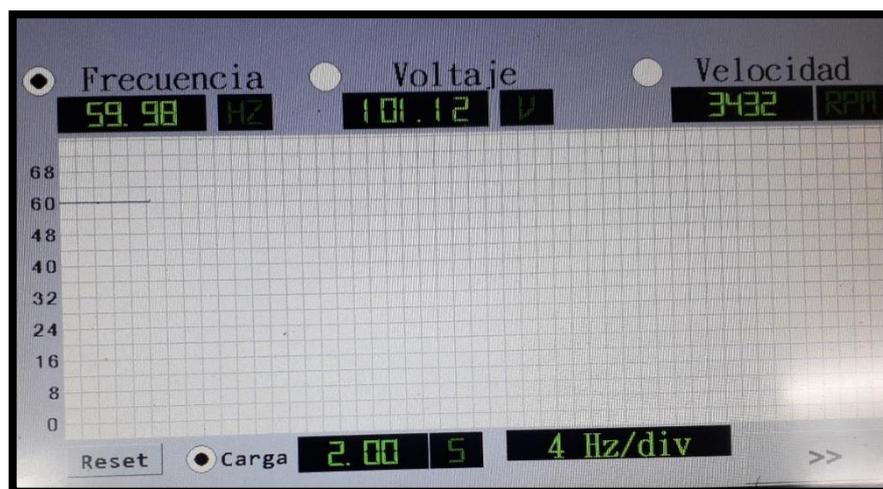


Figura 5.54. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva e inductiva.

En la figura 5.55, se observa que luego de inyectar una carga resistiva e inductiva el voltaje disminuye a $101,12 \text{ V}$.

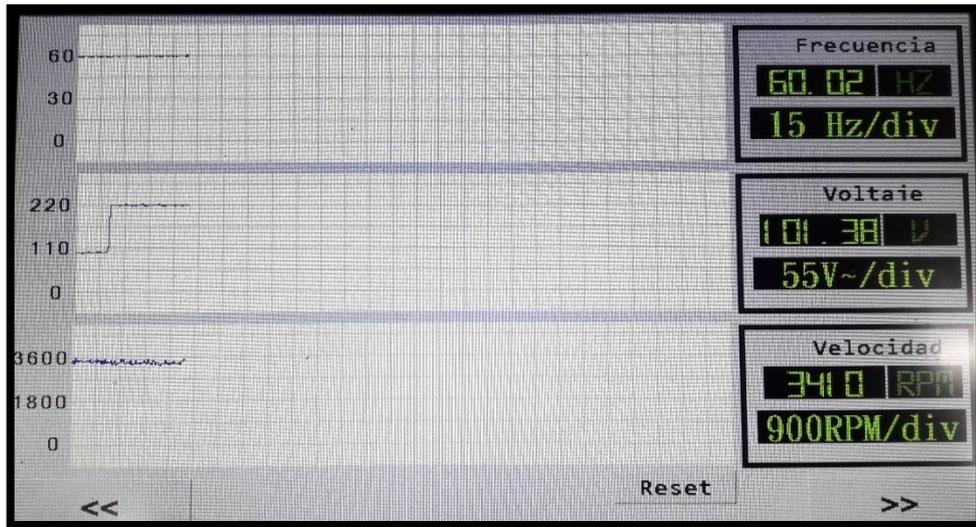


Figura 5.55. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad a una carga resistiva e inductiva.

En la figura 5.56, se detalla la operación en tiempo real del generador en la se obtiene el tiempo de duración del ciclo de 16,67 ms verificando que a mayor frecuencia menor es el tiempo de duración del periodo de la onda de voltaje.

	F (Hz)	T (ms)	Vac (V)	Vel. (RPM)
1	59.98	16.67	101.90	3402.00
2	59.98	16.67	100.60	3374.00
3	59.98	16.67	101.90	3346.00
4	59.98	16.67	101.38	3374.00
5	59.98	16.67	101.38	3346.00
6	59.97	16.67	102.68	3332.00
7	59.98	16.67	102.16	3388.00
8	59.98	16.67	101.64	3388.00

Figura 5.56. Duración del ciclo de la frecuencia T (ms) y datos de operación del sistema.

También se detalla la respuesta de potencia entregada por el generador en la tabla 5.5 al momento de inyectar carga resistiva e inductiva comprobando que existe menor consumo de potencia activa debido a la disminución del voltaje generado producto de la carga inductiva, lo que ocasiona la disminución del factor de potencia y existe una mayor caída de voltaje de 54% y 0.03% en la frecuencia. Las variaciones en la potencia reactiva es menos sensible a cambios en la frecuencia y afecta localmente la magnitud de la tensión.

Tabla 5.5. Datos de operación del generador con carga resistiva e inductiva de 58.76Ω

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)	3,2	3,3	3,1	3,4
Factor de potencia	0,76	0,76	0,76	0,76
Potencia activa (W)	113	160	123	414
Potencia reactiva (Var)	124	92	113	337
Potencia Aparente (VA)	195	166	202	546
Voltaje (V)	101,12	101,12	101,12	101,12

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

5.6.3. Pruebas con cargas desbalanceadas al sistema de generación de 5kW

5.6.3.1. Pruebas con carga resistiva R2 de 42Ω a 1000 W a las líneas L2 y L3

Para este análisis se emplea una carga resistiva $R2 = 42 \Omega$ conectada en la línea L2-L3 para lo cual se estabiliza el sistema a una frecuencia de 60 Hz y voltaje generado de 220 V a 3486 rpm, luego de inyectar dicha carga se obtiene los siguientes resultados como se muestra la siguiente figura 5.57, donde se ocasiono una caída de frecuencia a 59,96 Hz provocando un transitorio con una duración de 0,99 segundos hasta estabilizarse en dicho valor.

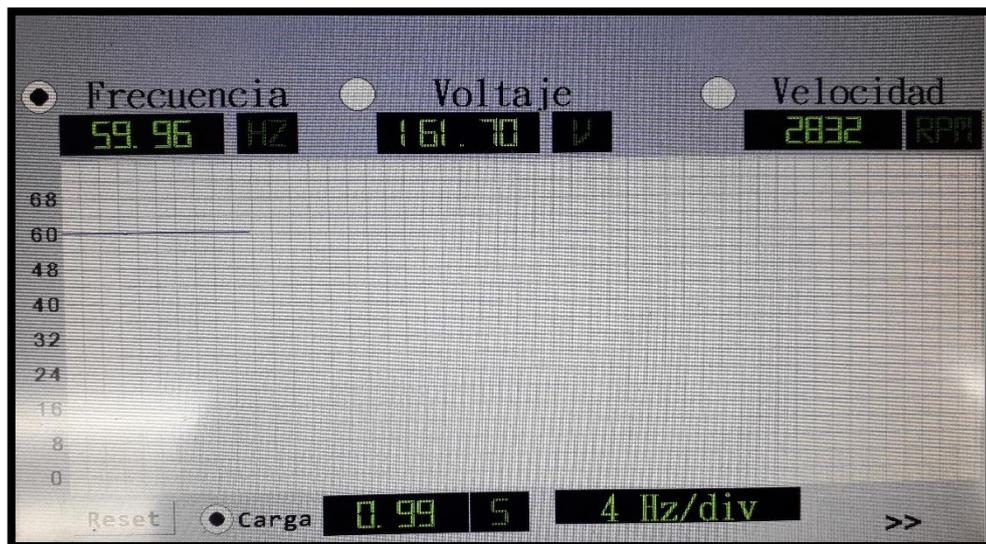


Figura 5.57. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva de 42Ω .

En la figura 5.58, (medición de voltaje en la L2 y L3 en el prototipo) se observa que luego de inyectar una carga resistiva el voltaje disminuye 187 y 190 V entre fases producto de inyectar

carga en la línea dos y tres donde la línea uno mantiene un voltaje de 207 V sin ser afectado en gran proporción .



Figura 5.58. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad a una carga resistiva de 42 Ω.

En la figura 5.59, se detalla la operación en tiempo real del generador en la se obtiene el tiempo de duración del ciclo de 16.68 ms.

	F (Hz)	T (ms)	Vac (V)	Vel. (RPM)
1	59.96	16.68	194.98	3304.00
2	59.96	16.68	194.72	3290.00
3	59.96	16.68	196.28	3290.00
4	59.96	16.68	196.54	3234.00
5	59.96	16.68	195.24	3276.00
6	59.95	16.68	195.24	3206.00
7	59.96	16.68	193.94	3262.00
8	59.95	16.68	195.76	3332.00

Figura 5.59. Duración del ciclo de la frecuencia T (ms) y datos de operación del sistema.

También se detalla la respuesta de potencia entregada por el generador al momento de inyectar carga resistiva comprobando que existe una mayor entrega de potencia activa en las líneas 2 y 3 y un consumo de reactivos en la línea 3, como se muestra en la tabla 5.6.

Tabla 5.6. Datos de operación del generador con carga resistiva de 42 Ω .

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)	0	5	5	5
Factor de potencia	0	0.85	0.85	0.85
Potencia activa (W)	0	427	534	946
Potencia reactiva (VAr)	0	247	-334	-57
Potencia Aparente (VA)	0	485	625	1107
Voltaje (V)	187	190	207	197

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

5.6.3.2. Pruebas con carga resistiva R2 y R4 de 42 Ω a 1000 W a las líneas L1, L2, L3

Para este análisis se emplea dos cargas resistivas de 42 Ω respectivamente conectada R2 en la línea L2-L3 y R4 en L1-L3, para lo cual se estabiliza el sistema a una frecuencia de 60 Hz y voltaje generado de 220 V a 3486 rpm, luego de inyectar dicha carga se obtiene los siguientes resultados como se muestra la siguiente figura 5.60, donde se ocasiono una caída de frecuencia a 59,94 Hz provocando un transitorio con una duración de 2,18 segundos hasta estabilizarse en dicho valor.



Figura 5.60. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva R2 y R4.

En la figura 5.62, se observa que luego de inyectar una carga resistiva el voltaje disminuye a 155 V en las tres fases producto de una carga balanceada.

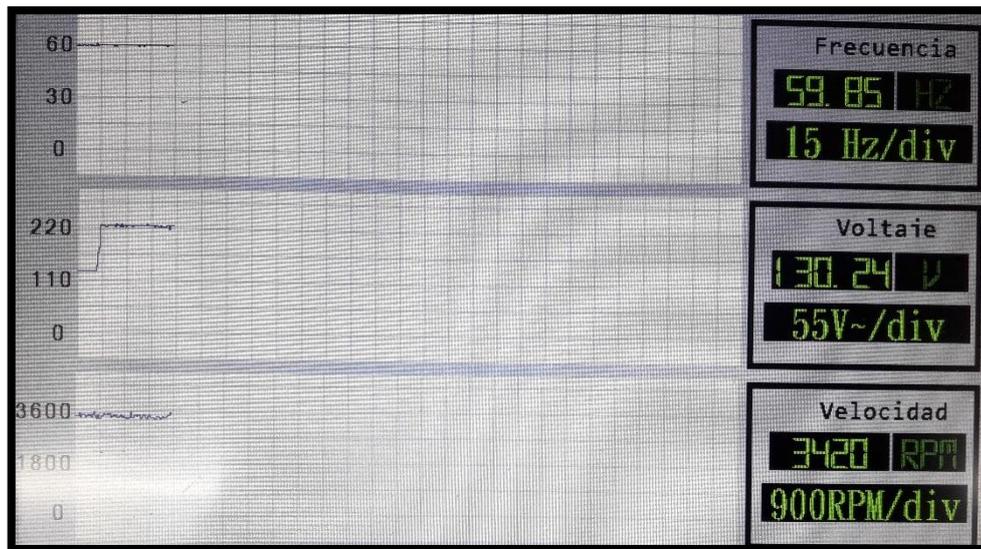


Figura 5.61. Respuesta de frecuencia, voltaje y velocidad a una carga resistiva R2 y R4.

También se detalla la respuesta de potencia entregada por el generador al momento de inyectar carga resistiva comprobando que existe entrega de potencia activa equilibrada por parte del generador, como se muestra en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Datos de operación del generador con carga resistiva de R2 y R4.

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)	3,7	3,6	6,2	5
Factor de potencia	0,85	0,82	1	0,91
Potencia activa (W)	292	249	501	1200
Potencia reactiva (VAr)	-176	160	-90	-64
Potencia Aparente (VA)	351	306	527	1173
Voltaje (V)	155	145	156	154

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

5.6.3.3. Prueba con carga resistiva R2, R3 y R4 a 42 Ω y 1000 W a las líneas L1, L2, L3

Para este análisis se emplea dos cargas resistivas de 42 Ω respectivamente conectada R2 en la línea L2-L3, R4 en L1-L3 y R3 en L1-L2, para lo cual se estabiliza el sistema a una frecuencia de 60 Hz y voltaje generado de 220 V a 3486 rpm, luego de inyectar dicha carga se obtiene los siguientes resultados como se muestra la siguiente figura 5.62, donde se produce una caída de frecuencia a 59,95 Hz provocando un transitorio con una duración de 4.37 segundos hasta estabilizarse en dicho valor.

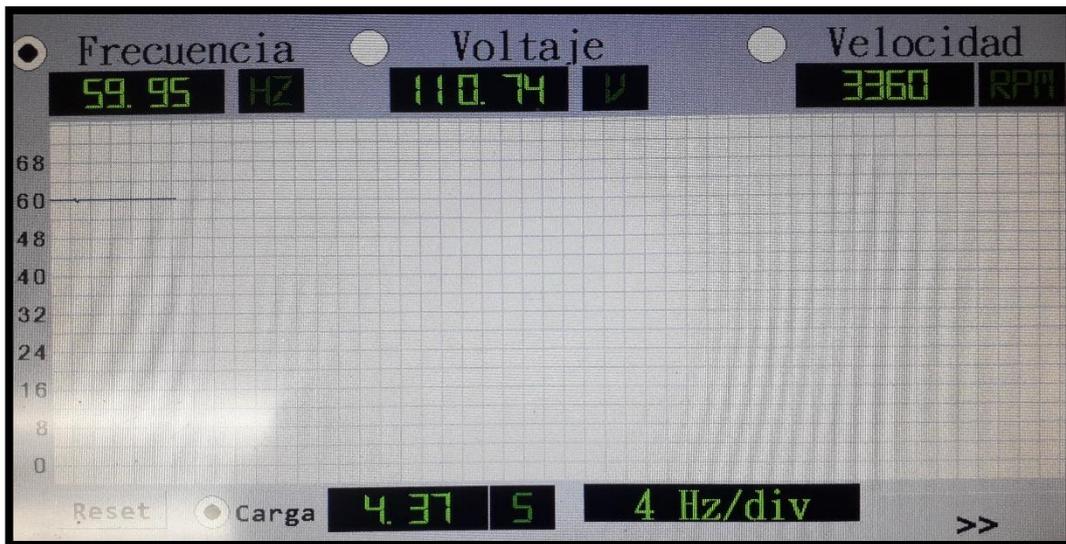


Figura 5.62. Respuesta de frecuencia con una carga resistiva R2-R3 y R4.

También se detalla la respuesta de potencia entregada por el generador al momento de inyectar carga resistiva comprobando que existe un consumo de potencia reactiva por el generador donde la potencia activa es inferior debido a la caída de voltaje en las tres líneas y por ende el factor de potencia depende del balanceo de cargas lo cual no afecta a este factor, como se muestra en la tabla 5.8.

Tabla 5.8. Datos de operación del generador con carga resistiva R2-R3 y R4.

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)	4,5	4,8	4,8	4,8
Factor de potencia	0,99	0,99	0,99	0,99
Potencia activa (W)	291	297	303	892
Potencia reactiva (VAr)	-59	-60	-48	-145
Potencia Aparente (VA)	297	297	307	920
Voltaje (V)	111	111	111	111

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

5.6.3.4. Prueba con carga inductiva en la línea L2 y L3

Para este análisis se emplea una carga inductiva conectada en la línea L2 y L3, para lo cual se estabiliza el sistema a una frecuencia de 60 Hz y voltaje generado de 220 V a 3486 rpm, luego de inyectar dicha carga se obtiene los siguientes resultados como se muestra la siguiente figura 5.63, donde se verifica que el sistema oscila entre 60 Hz y 60,02 Hz sin estabilizarse.

	F (Hz)	T (ms)	Vac (V)	Vel.(RPM)	F. Calculada
1	60.02	16.66	139.08	3260.00	54.00
2	60.02	16.66	139.34	3290.00	54.00
3	60.02	16.66	139.60	3276.00	54.00
4	60.02	16.66	139.08	3300.00	55.00
5	60.02	16.66	140.38	3304.00	55.00
6	60.02	16.66	139.60	3486.00	58.00
7	60.02	16.66	139.34	3304.00	55.00
8	60.03	16.66	139.34	3304.00	55.00

Figura 5.63. Duración del ciclo de la frecuencia T (ms) y datos de operación del sistema con L1

También se detalla la respuesta de potencia entregada por el generador al momento de inyectar carga inductiva, existe mayor entrega de potencia reactiva por generador, como se muestra en la tabla 5.9.

Tabla 5.9. Datos de operación del generador con carga inductiva L1.

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)	0	2,5	2,5	2,5
Factor de potencia	0	0,40	0,68	0,54
Potencia activa (W)	0	-96	162	63
Potencia reactiva (VAr)	0	201	161	366
Potencia Aparente (VA)	0	235	227	462
Voltaje (V)	168	161	166	167

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

5.6.3.5. Prueba con carga resistiva y estabilización del sistema en frecuencia y voltaje

Luego de estabilizar el sistema a frecuencia de 60 Hz y aun voltaje de 220 V se inyecta una carga resistiva de 42Ω donde la frecuencia decae en 59,95 Hz y el voltaje a 197 V, para lo cual mediante el potenciómetro de control de velocidad del motor se estabiliza la frecuencia a rangos nominales en un tiempo de 2,37 segundos, por siguiente se estabiliza el voltaje a 220 V variando el sistema de excitación en 27 Vcc y una corriente de 0.43 A, como se muestra en la figura 5.64 y 5.65.

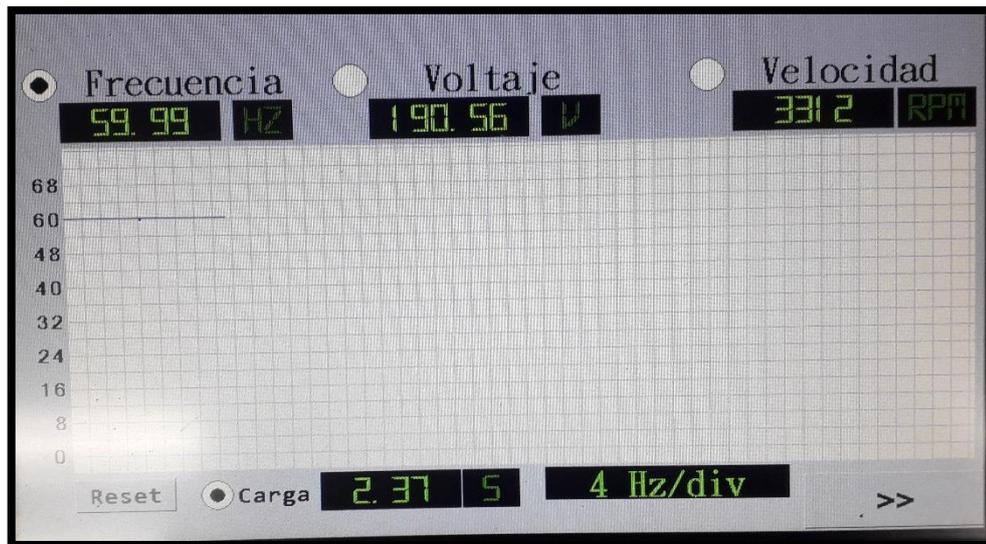


Figura 5.64. Respuesta de frecuencia por medio de la recuperación.

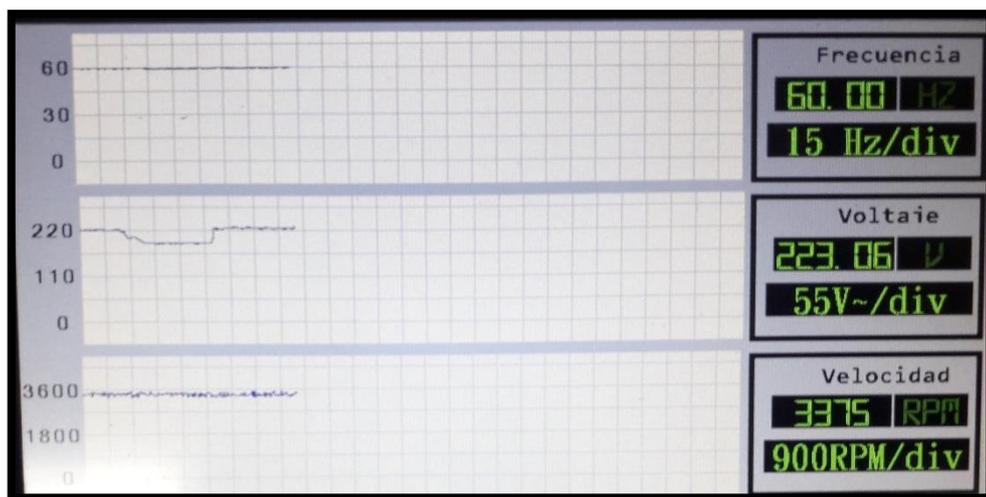


Figura 5.65. Estabilización del sistema en rangos nominales de operación.

Con los parámetros en valores nominales se inyecta otra carga resistiva R3 donde la frecuencia decae a 59,90 Hz en un tiempo de 2,18 segundos y el voltaje en 192 V por lo cual en la tabla 5.10, se detalla la respuesta de operación del sistema luego de estabilizarse y en la tabla 5.11, se detalla la operación del sistema al incrementar la carga.

Tabla 5.10. Datos de operación del generador luego de estabilizar el sistema.

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)	0	6	6	6
Factor de potencia	0	0,86	0,87	0,86

Potencia activa (W)	0	534	678	1204
Potencia reactiva (VAr)	0	313	-399	-70
Potencia Aparente (VA)	0	632	784	1400
Voltaje (V)	213	216	234	220

Tabla 5.11. Datos de operación del generador luego de estabilizar e inyectar carga.

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)	3,9	7,7	5,1	6,5
Factor de potencia	0,85	1	0,87	0,93
Potencia activa (W)	351	757	524	1650
Potencia reactiva (VAr)	197	-87	-280	-167
Potencia Aparente (VA)	405	762	606	1768
Voltaje (V)	176	189	192	185

Elaborado por: Cerna M., Jiménez L.

5.6.4. Análisis de la banda de operación de la frecuencia $\pm 10\%$ en módulo

Lab-Volt

Mediante la utilización del módulo de Lab-Volt, primero se estabiliza el sistema con parámetros tanto en voltaje y frecuencia, asumiendo que el sistema está en condiciones óptimas para suministrar energía eléctrica a la demanda existente. Por lo cual el generador síncrono utilizado para el análisis sin carga muestra los siguientes valores:

Voltaje: 190 V.

Velocidad: 1710 rev/min

Frecuencia: 57 Hz.

Para verificar el comportamiento del generador se desarrolló un sistema que permite graficar la banda de operación de frecuencia en un $\pm 10\%$ con el objeto de detectar la alta y baja frecuencia con sus respectivos leds de alarma donde el led rojo representa una baja frecuencia y el led verde una alta frecuencia contribuyendo a entender las respectivas regulaciones de frecuencia en un sistema de generación. Para lo cual se emplea en este caso una carga resistiva R_6 de 171.43 ohmios por cada fase, en la figura 5.66, se detalla los datos de operación del sistema, los siguientes valores obtenidos en el generador síncrono suministrando esta carga son los siguientes:

Corriente: 0,7 A.

Frecuencia: 48.97 Hz.

Producto de inyectar dicha carga se observa en la figura 5.66, se enciende el indicador de alarma de baja frecuencia (led verde) por el aumento de carga y se obtiene como resultado una frecuencia de 48.97 Hz lo que provoca el accionamiento de la alarma de baja frecuencia debido a que supera el mínimo de la banda de operación de 52 Hz.

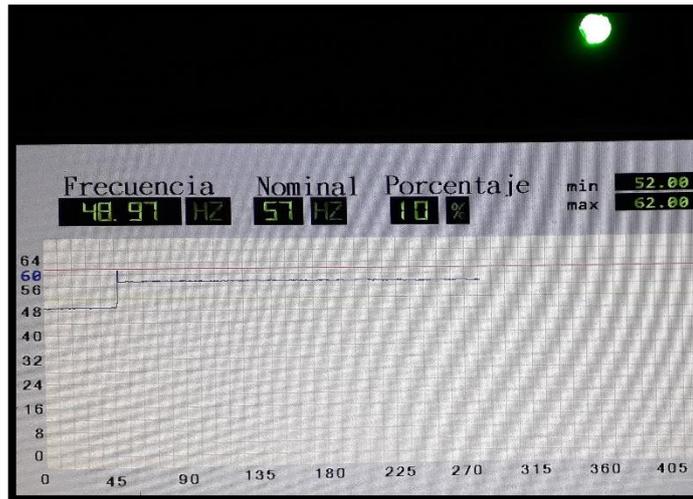


Figura 5.66. Indicador de baja frecuencia cuando supera la banda mínima de operación de 52Hz.

Para este análisis se setea a una frecuencia nominal de 50Hz con un porcentaje de banda de operación de +/- 10% con una carga inyectada de 171.43 Ω y así simular un rechazo de carga, lo que provoca un aumento de la potencia mecánica y por ende la frecuencia, lo que ocasiona el accionamiento del indicador de alta frecuencia superando la banda de operación máxima de 55 Hz.

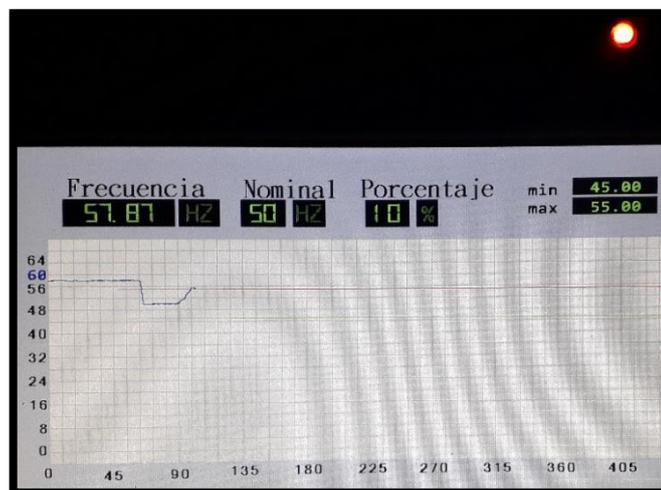


Figura 5.67. Indicador de alta frecuencia cuando supera la banda de operación máxima de 55Hz.

Por medio de esta banda de operación permite comprender o analizar las distintas regulaciones de frecuencia en el sistema de generación.

6. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTO

6.1. Presupuesto

Una vez finalizada la propuesta tecnológica en la tabla 6.12 se muestra los valores correspondientes al diseño y construcción del sistema de medición de frecuencia.

Tabla 6.12. Costos del proyecto.

Elementos	Costos Directos (USD)
Pantalla Nextion 7 pulgadas	\$180
Arduino Nano	\$25
Sensor de efecto Hall	\$15
Transformador 220/12 V AC	\$5
Materiales electrónicos	\$30
Caja de soporte	\$15
Varios	\$50
Subtotal	\$320

Elementos	Costos Indirectos (USD)
Resistencias sumergibles 1500W	\$80
Condensador de 50 μ f	\$20
Inductancia de 0.12 H	\$20
Estructura metálica	\$200
Sistema de Excitación	\$150
Interruptores apaga chispas	\$100
Impresiones	\$100
varios	\$200
Banda de acople para motor marca DAYCO serie 15340	\$5
Subtotal	\$875

Total	\$1,195
--------------	----------------

6.2. Análisis de Impactos

El presente proyecto está enfocado al análisis de parámetros operativos de un sistema de generación de forma gráfica que permite la adquisición de datos en tiempo real de la frecuencia voltaje y revoluciones del sistema. Este sistema es capaz de medir el tiempo de duración de los transitorios de frecuencia y voltaje provocados en el sistema producto de la variación de carga.

Este sistema de medición contribuirá al desarrollo prácticas a los estudiantes, facilitando la comprensión de las variables que interactúan en el sistema de generación para el estudio del comportamiento de la frecuencia ante perturbaciones de carga.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Para visualizar el comportamiento de la frecuencia en el generador fue necesario el estudio de la onda de voltaje generado para determinar la duración del tiempo de cada ciclo y así mediante la programación Arduino con la interacción en la pantalla Nextion se obtuvo las distintas graficas de frecuencia, voltaje y velocidad de forma lineal en tiempo real.
- Por medio del comportamiento de la señal de voltaje emitida por el generador fue necesario la utilización de un transformador reductor de 220/12 VAC Rms, y así mediante un optoacolador convertir la señal senoidal en una onda cuadrada, capaz de ser procesada por el Arduino para obtener el tiempo de duración de cada ciclo por medio de los cruces por cero logrando graficar la frecuencia.
- Debido a que la frecuencia varia ante cualquier perturbación de la carga fue necesario la visualización de la duración de los transitorios por medio de la pantalla Nextion, ya que la frecuencia es inversamente proporcional a la carga, es decir que para cualquier aumento de carga la frecuencia disminuye o viceversa.
- Durante la etapa de experimentación para el desarrollo de la guía práctica se realizaron distintas pruebas entre ellas se inyectó diferentes tipos de carga donde la velocidad del generador de 5kW no se ve afectada en gran magnitud debido a la configuración del variador de frecuencia, que no permite el aumento o decremento de la frecuencia en una banda de operación de 59,48 Hz y 62,97 Hz.

- El caso más relevante ocurre al inyectar una carga resistiva en el generador del Lab-Volt de 172 ohmios por fase consumiendo una potencia trifásica de 230 W provocando una caída de frecuencia en un 60% de la nominal provocando un transitorio con una duración de 9,30 seg.
- Al inyectar una carga resistiva de 42 ohmios por cada fase en el generador de 5kW se comprueba que la frecuencia disminuye en un 0,08% de su valor nominal provocando un transitorio con una duración de 4,37 segundos en estabilizarse a 59,95 Hz.
- Al inyectar una carga resistiva de 42 ohmios por cada fase en el generador se comprueba una caída de voltaje de un 49,54% en los bornes del mismo, puesto que en todo el análisis realizado se observó que el voltaje se ve afectado en gran proporción, debido a que existe una caída de potencial en la propia resistencia interna del generador que resta de su fuerza electromotriz.
- Para obtener la velocidad del generador se optó por la utilización de un sensor de efecto Hall, que permite censar los campos magnéticos de 6 imanes de neodimio acoplados en el eje del rotor por medio de una rueda para obtener la velocidad del mismo, el cual por la cantidad de datos procesados varía en un rango de error del 5%.
- El factor de potencia se ve mayormente afectado en las cargas inductivas debido a que las bobinas absorben mayor potencia reactiva lo cual afecta directamente a la potencia útil del generador lo que no sucede en las cargas resistivas en donde no se ve afectado el factor de potencia pero si el voltaje siendo mayor el consumo de potencia útil.

7.2. Recomendaciones

- Para realizar los análisis de frecuencia en los sistemas de generación es importante tomar solo señales de dos fases del sistema de generación, para lo cual este sistema de medición y adquisición de datos está dimensionado para una potencia de 5 kW a una corriente nominal de 8 A.
- Se debe suministrar una fuente de voltaje 5Vcc a una corriente máxima de 1A, constante al sistema de medición de frecuencia debido a que este prototipo dispone de elementos

electrónicos y ayuda a obtener mediciones con mayor exactitud.

- Para realizar el experimento de laboratorio propuesto referente al control de potencia frecuencia se debe realizar de una forma adecuada las conexiones para evitar errores y así obtener mejores resultados de tal manera poder visualizar como actúa un generador síncrono ante una variación de carga.
- Es importante seguir las instrucciones y no realizar ningún otro tipo de conexiones es así que para realizar cualquier análisis se debe estabilizar el sistema a una frecuencia nominal mediante la variación de potencia mecánica y luego estabilizar el voltaje de generación mediante la variación de la corriente de excitación para posterior inyectar carga.

8. REFERENCIAS

- [1] F. M. Gonzalez, «Introducción a los Sistemas de Transmisión,» Longatt, Mayo 2007. [En línea]. Available: http://fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/LT_1/Intro2007.pdf. [Último acceso: Miercoles Junio 2018].
- [2] M. d. R. Álvarez, Comparación de estrategias de control de sistemas de almacenamiento de energía para aportar a la regulación de frecuencia, Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, 2016.
- [3] A. Goran, Dynamics and Control of, Zúrich: ETH, 2012.
- [4] N. Gómez, Regulación de frecuencia en sistemas de potencia que integran fuentes de energía renovables, mediante un controlador PI e imitación inercial, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- [5] D. Rodriguez, Criterios, Metodología y Desarrollo de un esquema de rechazo de carga por mínima frecuencia para el Sistema Eléctrico Peruano, Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2014.
- [6] ARCONEL, «Procedimientos de despacho y operación,» 2015.
- [7] P. Ledesma, «Regulación de frecuencia y potencia,» Madrid, 2008.
- [8] M. A. Pernía, «Máquinas Síncronas,» Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristóbal , 2011.

- [9] A. Vázquez, «Principio del funcionamiento de Alternadores,» Universidad Nacional de Piura , Piura , 2013.
- [10] N. Beyru, «Máquinas Eléctricas,» Universidad Veracruzana, México, 2012.
- [11] J. Grainger y W. Stevenson Jr, Analisis de Sistemas de Potencia, Mexico: McGrawHill, 2001.
- [12] F. Casares de la Torre, «Onda Alterna Senoidal,» McGrawHill, Mexico, 2010.
- [13] L. Vargas, «Sistemas de Excitación de Máquinas Síncronas,» Universidad de Chile , Santiago de Chile, 2005.
- [14] G. Hidalgo y G. Paguay, «Reducción de Pérdidas de Energía Eléctrica en los alimentadores,» EPN, Quito, 2009.
- [15] F. Redondo Quintela y R. Redondo Melchor, «electricidad.usal.es,» Universidad de Salamanca, 25 Junio 2017. [En línea]. Available: http://electricidad.usal.es/Principal/Circuitos/Comentarios/Temas/EnergiaReactiva.pdf?fclid=IwAR1iwF7-OknKbT_fjBsBQc0yEeyF4YhNv-caTS62cPm3iogCXoHJ-eaZwW0. [Último acceso: 6 11 2018].
- [16] J. M. Ruiz Gutiérrez, «Manual de programación Arduino,» Creative Commons, San Fransisco, California, USA, 2017.
- [17] O. Gerrero Orozco, Analisis al Optoacoplador, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [18] D. Shetty, Guia practica de Sensores, España : Stanford , 2011.
- [19] S. Santos, «Random Nerd Tutorials,» 08 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://randomnerdtutorials.com/nextion-display-with-arduino-getting-started/>. [Último acceso: 12 Octubre 2018].
- [20] J. Lucero y J. Ñauta, Diseño e implementación de un Sistema de Control de voltaje y frecuencia de un Sistema Eléctrico de Potencia a Escala para la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca , 2016.

ANEXOS

ANEXO I: Programación en la plataforma Arduino

```
#include <SoftwareSerial.h> // para usar un puerto digital como puerto de comunicacion.
#include <Nextion.h> // Libreria de la pantalla
SoftwareSerial nextion(8,9); //TX-RX
Nextion myNextion(nextion,9600);

/// Variables //////////////////////////////////////
#define hall_sensor 2 //Pin 2, donde se conecta el sensor de efecto hall
#define polos 2 //cantidad de polos del generador
unsigned int rpm = 0; // Revoluciones por minuto calculadas.
volatile byte pulses = 0; // Número de pulsos leídos por el Arduino en un segundo
unsigned long timeold = 0; // Tiempo
unsigned int pulsesperturn = 6; // Número de muescas que tiene el disco del encoder.
static volatile unsigned long debounce = 0; // Tiempo del rebote.
float desv=100, prom=0,acum=0;
///variables frecuencia
unsigned long previousMillis = 0; // Medir tiempo entre ciclos
float voltaje=0; //Medir Voltaje de entrada
float freq=0,variable=0,desv_max=0,desv_min=0; //medir frecuencia
volatile unsigned long previousMicros=0; //
volatile unsigned long duration=0; // accumulates pulse width
volatile unsigned int pulsecount=0; //
unsigned int ii=0,contf=0,cont_graf=0;
//////////variables transitorio
float tiempo_tran=0,t_tranFreq=0,t_tranVol=0,t_tranRpm=0;
unsigned long tiempo_ini=0;
unsigned long tiempo_fin=0;
bool flag_ini=0, flag_graf=1;
bool transi_button= 0,mat_llena=0;
float registro_freq[2]={0,0};
float registro[4]={0,0,0,0};
byte graficos_freq[270]={0};
byte graficos_vol[270]={0};
```

```

byte graficos_rpm[270]={0};
byte
trasIni_freq=0,trasfin_freq=270,trasIni_vol=0,trasfin_vol=270,trasIni_rpm=0,trasfin_rpm=27
0;
//////////contador freceuncia
bool
pant1_1=0,pant1_2=0,pant1_3=0,pant2_1=0,pant2_2=0,pant2_3=0,pant2_4=0,pant2_5=0,pant
t2_6=0;
void freqCounterCallback()
{
    unsigned long currentMicros = micros();
    duration += currentMicros - previousMicros;
    previousMicros = currentMicros;
    pulsecount++;
}
//// Configuración del Arduino //////////////////////////////////////
void setup(){
    Serial.begin(9600); // Configuración del puerto serie
    myNextion.init(); // inicializar la pantalla
    pinMode(hall_sensor, INPUT); // Configuración del pin nº2
    attachInterrupt(0, counter, RISING); // Configuración de la interrupción 0, donde esta
conectado.
    attachInterrupt(1, freqCounterCallback, RISING);
    pulses = 0;
    rpm = 0;
    timeold = 0;
    pinMode(4, OUTPUT);
    pinMode(5, OUTPUT);
    digitalWrite(4,LOW);
    digitalWrite(5,LOW);
}
//// Programa principal //////////////////////////////////////
void loop(){

```

```
Serial.print("EID");
pant1_1= myNextion.getComponentValue("p1_r0");
pant1_2= myNextion.getComponentValue("p1_r1");
pant1_3= myNextion.getComponentValue("p1_r2");
pant2_1= myNextion.getComponentValue("p2_r0");
pant2_2= myNextion.getComponentValue("p2_r1");
pant2_3= myNextion.getComponentValue("p2_r2");
pant2_4= myNextion.getComponentValue("p2_r3");
pant2_5= myNextion.getComponentValue("p2_r4");
pant2_6= myNextion.getComponentValue("p2_r5");
transi_button= myNextion.getComponentValue("p1_r3");
pantalla();
```

```
if (millis() - timeold >= 100){ // Se actualiza cada 100 milisegundos
    noInterrupts(); //Don't process interrupts during calculations // Desconectamos la
interrupción para que no actúe en esta parte del programa.
```

```
    rpm = (10000)/ (millis() - timeold)* pulses; // Calculamos las revoluciones por minuto
    timeold = millis(); // Almacenamos el tiempo actual.
```

```
    //Serial.print("RPM:");Serial.print(rpm,DEC); Serial.print(" Pulso:");
    // Serial.println(pulses,DEC);
```

```
    pulses = 0; // Inicializamos los pulsos.
```

```
    interrupts(); // Restart the interrupt processing // Reiniciamos la interrupción
```

```
    previousMillis = timeold;
```

```
    if(duration!=0)
```

```
        freq = 1e6 / float(duration) * (float)pulsecount;
```

```
    else
```

```
        freq=0;
```

```
    //Serial.print("frecuencia:");Serial.print(freq,DEC); Serial.print(" duracion:");
```

```
    //Serial.print(duration,DEC); Serial.print(" Pulso:");
```

```
    //Serial.println(pulsecount,DEC);
```

```
    voltaje=analogRead(2);
```

```
    //Serial.print("Voltaje_bits: ");
```

```

//Serial.println(voltaje);
//Serial.print("Voltaje 'V': ");
if(voltaje>5)
voltaje=float(voltaje*0.26)+20,57-((voltaje*0.000010265)*voltaje);
else
voltaje=0;
//Serial.println(voltaje);
duration = 0;
pulsecount = 0;
registro[0]=freq;
registro[1]=1000.0/(1.0*freq);
registro[2]=float(voltaje);
registro[3]=rpm;
if(transi_button){

registro_freq[contf]=variable;
contf+=1;
//Serial.print("Contando: ");
//Serial.println(contf);
if(contf>1){
contf=0;
prom=0;
acum=0;
for(int ji=0;ji<2;ji++)
prom=registro_freq[ji]+prom;
prom=prom/2.0;
for(int ji=0;ji<2;ji++)
acum=((registro_freq[ji]-prom)*(registro_freq[ji]-prom))+acum;
acum=acum/2.0;
desv=sqrt(acum);
/*for(int ji=0;ji<2;ji++){
Serial.print("Dato");
Serial.println(registro_freq[ji]);
}
}

```

```

    }
    Serial.print("Desv:");
    Serial.println(desv);
    Serial.print("Prom:");
    Serial.println(prom);*/
}
if(desv>desv_max && flag_ini==0 ){

    flag_ini=1;
    tiempo_ini = micros();
    ///Guardo los momentos segun cont_graf donde se inicia los transitorios para poder
graficarlos
    if(pant1_1)
        trasIni_freq=cont_graf;
    if(pant1_2)
        trasIni_vol=cont_graf;
    if(pant1_3)
        trasIni_rpm=cont_graf;
    //////////////////////////////////////
}
if(flag_ini){
    if(desv<=desv_min){
        flag_ini=0;
        tiempo_fin = micros();
        tiempo_tran=(tiempo_fin-tiempo_ini)/1000000.0;
        ///Guardo los momentos segun cont_graf donde se finalizaron lso transitorios para poder
graficarlos
        if(pant1_1){
            trasfin_freq=cont_graf;
            t_tranFreq=tiempo_tran;
        }
        if(pant1_2){
            trasfin_vol=cont_graf;

```

```

        t_tranVol=tiempo_tran;
    }
    if(pant1_3){
        trasfin_rpm=cont_graf;
        t_tranRpm=tiempo_tran;
    }
    //////////////////////////////////////
}
}

//Serial.println("*****Preparado");

}

}
if(flag_graf==1){
    int freq_graf=20+int(freq*(4.0/3.0));
    int volt_graf=20+int(voltaje*(4.0/11.0));
    int rpm_graf=20+int(rpm*(1.0/45.0));
    graficos_freq[cont_graf]=freq_graf;
    graficos_vol[cont_graf]=volt_graf;
    graficos_rpm[cont_graf]=rpm_graf;
    cont_graf++;
    if(cont_graf>270){
        cont_graf=0;
        mat_llena=1;
    }
}
}

///Fin de programa principal //////////////////////////////////////
////////////////////////////////////Función que cuenta los pulsos buenos //////////////////////////////////////
void counter(){
    if( digitalRead (hall_sensor) && (micros()-debounce > 50) && digitalRead (hall_sensor) ) {

```

```
// Vuelve a comprobar que el encoder envia una señal buena y luego comprueba que el tiempo es superior a 1000 microsegundos y vuelve a comprobar que la señal es correcta.
```

```
    debounce = micros(); // Almacena el tiempo para comprobar que no contamos el rebote que hay en la señal.
```

```
    pulses++;} // Suma el pulso bueno que entra.
```

```
    else ; }
```

```
////////// Actualizar datos en pantalla
```

```
void pantalla(){
```

```
    //Serial.print("Boton Transitorio :");
```

```
    //Serial.println(transi_button);
```

```
    //myNextion.sendCommand("page1");
```

```
    myNextion.pageId();
```

```
    String mensaje=myNextion.listen();
```

```
    char nex_buffer[20];
```

```
    char nex_buffer_2[20];
```

```
    char nex_buffer_3[20];
```

```
    int a=mensaje.toInt();
```

```
    int freq_plot=0;
```

```
    int rpm_plot=0;
```

```
    int volt_plot=0;
```

```
    switch (a) {
```

```
        case 1:
```

```
            flag_graf=1;
```

```
            freq_plot=15+int(freq*(60.0/17.0));
```

```
            volt_plot=15+int(voltaje);
```

```
            rpm_plot=15+int(rpm*(0.06));
```

```
            if (pant1_1){
```

```
                sprintf(nex_buffer,"add 1,0,%i",freq_plot);
```

```
                desv_max=0.09;
```

```
                desv_min=0.01;
```

```

    variable=freq;}
else if(pant1_2){
    sprintf(nex_buffer,"add 1,0,%i",volt_plot);
    //desv_max=1.5;
    //desv_min=0.5;
    desv_max=0.09;
    desv_min=0.01;
    variable=voltaje;}
else if(pant1_3)
    sprintf(nex_buffer,"add 1,0,%i",rpm_plot);
myNextion.sendCommand(nex_buffer);
myNextion.setComponentText("p1_t1",String(float(freq)));
// myNextion.setComponentText("p1_t1",String(float(cont_graf)));
myNextion.setComponentText("p1_t2",String(float(voltaje)));
myNextion.setComponentText("p1_t3",String(rpm));
myNextion.setComponentText("p1_t4",String(float(tiempo_tran)));
flag_graf=1;
break;
case 2:
    digitalWrite(4,LOW);
digitalWrite(5,LOW);
flag_graf=1;
freq_plot=20+int(freq*(8.0/3.0));
volt_plot=20+int(voltaje*(8.0/11.0));
rpm_plot=20+int(rpm*(2.0/45.0));
if (pant2_1){
    sprintf(nex_buffer,"add 1,0,%i",int(freq_plot));
    myNextion.setComponentText("p2t1",String(float(freq)));
}
else if(pant2_2)
{
    sprintf(nex_buffer,"add 1,0,%i",int(volt_plot));
    myNextion.setComponentText("p2t1",String(float(voltaje)));
}

```

```

    }
    else if(pant2_3)
    {
        sprintf(nex_buffer,"add 1,0,%i",int(rpm_plot));
        myNextion.setComponentText("p2t1",String((rpm)));
    }

    if (pant2_4){
        sprintf(nex_buffer_2,"add 2,0,%i",int(freq_plot));
        myNextion.setComponentText("p2t2",String(float(freq)));
    }
    else if(pant2_5){
        sprintf(nex_buffer_2,"add 2,0,%i",int(volt_plot));
        myNextion.setComponentText("p2t2",String(float(voltaje)));
    }
    else if(pant2_6){
        sprintf(nex_buffer_2,"add 2,0,%i",int(rpm_plot));
        myNextion.setComponentText("p2t2",String((rpm)));
    }

    myNextion.sendCommand(nex_buffer);
    myNextion.sendCommand(nex_buffer_2);

break;
case 4:
    digitalWrite(4,LOW);
digitalWrite(5,LOW);
    if(flag_graf==1){
        graficar_datos();
        flag_graf=0;
        /*freq_plot=20+int(freq*(4.0/3.0));
        volt_plot=20+int(voltaje*(4.0/11.0));
        rpm_plot=20+int(rpm*(1.0/45.0));
        sprintf(nex_buffer,"add 1,0,%i",int(freq_plot));
        sprintf(nex_buffer_2,"add 2,0,%i",int(volt_plot));

```

```

sprintf(nex_buffer_3,"add 3,0,%i",int(rpm_plot));

Serial.print("RPM: ");
Serial.print(rpm);

myNextion.sendCommand(nex_buffer);
myNextion.sendCommand(nex_buffer_2);
myNextion.sendCommand(nex_buffer_3);*/
}
break;

case 3:
flag_graf=1;
float freqmin,freqmax;
int nom_freq,por_freq;
nom_freq= myNextion.getComponentValue("p5_t2");
por_freq= myNextion.getComponentValue("p5_t3");
freqmax=nom_freq+(por_freq*nom_freq/100);
freqmin=nom_freq-(por_freq*nom_freq/100);
myNextion.setComponentText("p5_t1",String(float(freq)));
myNextion.setComponentText("p5_t5",String(float(freqmax)));
myNextion.setComponentText("p5_t4",String(float(freqmin)));

if(freq>freqmax)
    digitalWrite(5,HIGH);
else
    digitalWrite(5,LOW);
if(freq<freqmin)
    digitalWrite(4,HIGH);
else
    digitalWrite(4,LOW);

freqmax=(freqmax*11/3)+3;
freqmin=(freqmin*11/3)+3;
nom_freq=(nom_freq*11/3)+3;

```

```

freq_plot=15+int(freq*(64.0/17.0));
sprintf(nex_buffer,"add 1,0,%i",int(freq_plot));
myNextion.sendCommand(nex_buffer);

if(freqmax<268){
sprintf(nex_buffer,"line 51,%i,784,%i,RED",int(385-freqmax),int(385-freqmax));
myNextion.sendCommand(nex_buffer);
}
/*if(nom_freq<268){
sprintf(nex_buffer,"line 51,%i,784,%i,BLUE",int(385-nom_freq),int(385-nom_freq));
myNextion.sendCommand(nex_buffer);
}*/
if(freqmin<268){
sprintf(nex_buffer,"line 51,%i,784,%i,GREEN",int(385-freqmin),int(385-freqmin));
myNextion.sendCommand(nex_buffer);
}
break;

case 5: flag_graf=1;
digitalWrite(4,LOW);
digitalWrite(5,LOW);
for(int jj=0;jj<4;jj++){
char dato[10];
sprintf(dato,"t%i_%i",ii+1,jj+1);

myNextion.setComponentText(dato,String(registro[jj]));
}
ii++;
if (ii>7)
ii=0;

break;
}
}

```

```

void graficar_datos(){
    char buffer_nex[20];
    int lim=270;
    float min_freq=1000;
    float max_freq=0;
    float min_vol=1000;
    float max_vol=0;
    float min_rpm=80000;
    float max_rpm=0;
    if(mat_llena==0)
        lim=cont_graf;
    for (int i=0;i<lim;i++){
        if(graficos_freq[i]<min_freq)
            min_freq=graficos_freq[i];
        if(graficos_freq[i]>max_freq)
            max_freq=graficos_freq[i];
        if(graficos_vol[i]<min_vol)
            min_vol=graficos_vol[i];
        if(graficos_vol[i]>max_vol)
            max_vol=graficos_vol[i];
        if(graficos_rpm[i]<min_rpm)
            min_rpm=graficos_rpm[i];
        if(graficos_rpm[i]>max_rpm)
            max_rpm=graficos_rpm[i];

        for (int j=0;j<2;j++){
            sprintf(buffer_nex,"add 1,0,%i",int(graficos_freq[i]));
            myNextion.sendCommand(buffer_nex);
            sprintf(buffer_nex,"add 2,0,%i",int(graficos_vol[i]));
            myNextion.sendCommand(buffer_nex);
            sprintf(buffer_nex,"add 3,0,%i",int(graficos_rpm[i]));
            myNextion.sendCommand(buffer_nex);

        }
    }
}

```

```
}
```

```
myNextion.setComponentText("p3_n0",String((min_freq-20)*(3.0/4.0)));  
myNextion.setComponentText("p3_n1",String((max_freq-20)*(3.0/4.0)));  
myNextion.setComponentText("p3_n2",String(t_tranFreq));  
myNextion.setComponentText("p3_n3",String((min_vol-20)*(11.0/4.0)));  
myNextion.setComponentText("p3_n4",String((max_vol-20)*(11.0/4.0)));  
myNextion.setComponentText("p3_n5",String(t_tranVol));  
myNextion.setComponentText("p3_n6",String((min_rpm-20)*(45.0)));  
myNextion.setComponentText("p3_n7",String((max_rpm-20)*(45.0)));  
/*sprintf(buffer_nex,"line %i,%i,%i,%i,RED",10,100,11,101);  
myNextion.sendCommand(buffer_nex);  
sprintf(buffer_nex,"line %i,%i,%i,%i,BLUE",52+trasIni_freq*2,10,52+trasIni_freq*2,139);  
myNextion.sendCommand(buffer_nex);  
sprintf(buffer_nex,"line  
%i,%i,%i,%i,GREEN",52+trasfin_freq*2,10,52+trasfin_freq*2,139);  
myNextion.sendCommand(buffer_nex);  
sprintf(buffer_nex,"line %i,%i,%i,%i,BLUE",52+trasIni_vol*2,150,52+trasIni_vol*2,279);  
myNextion.sendCommand(buffer_nex);  
sprintf(buffer_nex,"line %i,%i,%i,%i,GREEN",52+trasfin_vol*2,150,52+trasfin_vol*2,279);  
myNextion.sendCommand(buffer_nex);*/
```

```
}
```

ANEXO II. Construcción del sistema de medición y pruebas realizadas

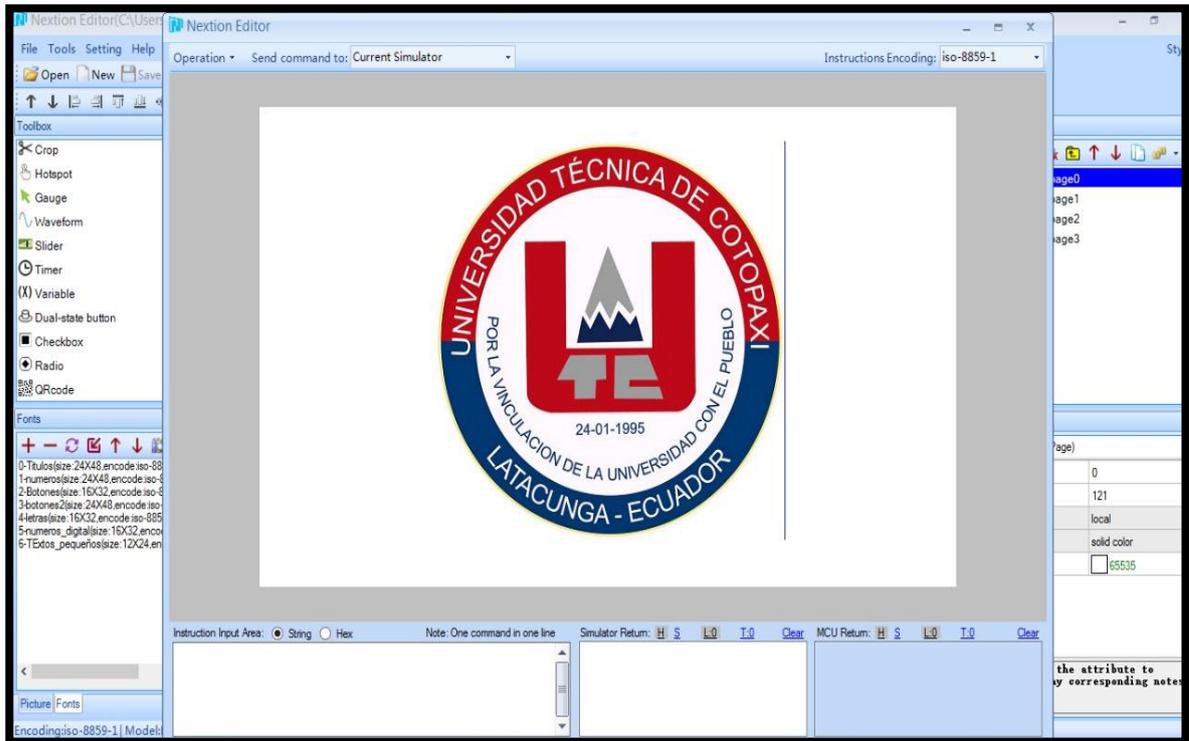


Figura II.1. Diseño de páginas en Nextion Editor.

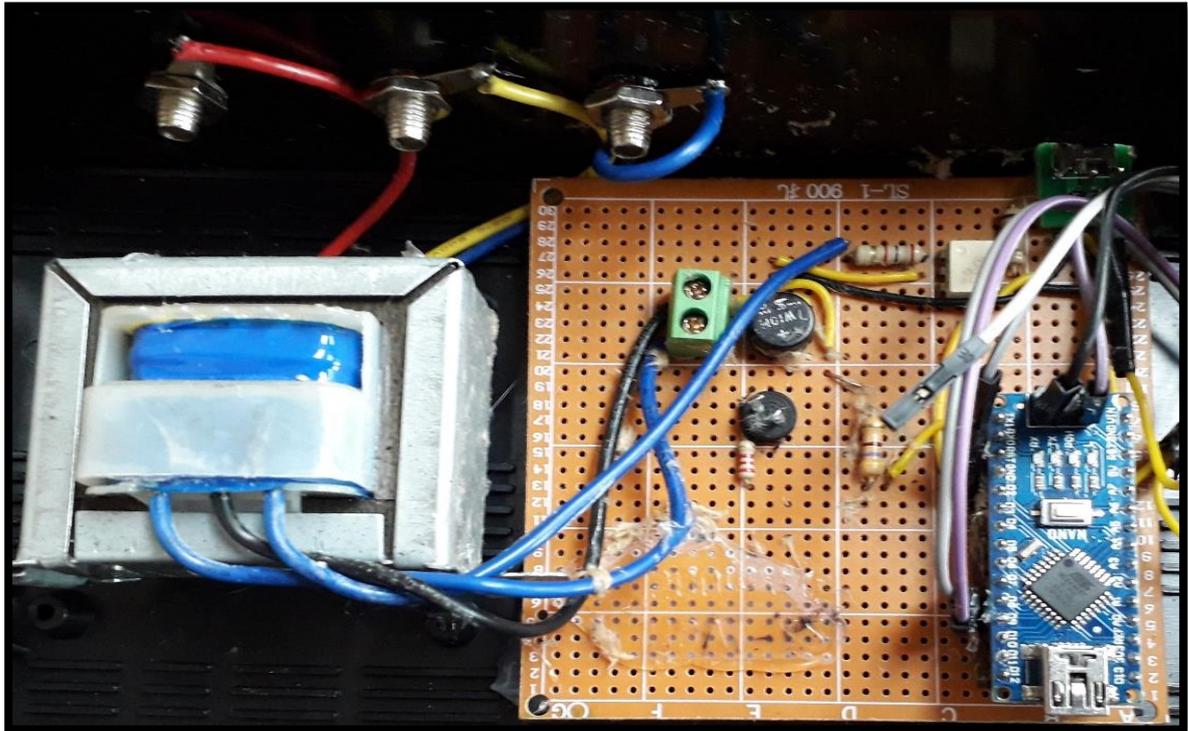


Figura II.2. Montaje y fijación de los dispositivos electrónicos.



Figura II.3. Pantalla de medición de frecuencia diseñada.



Ingeniería Eléctrica

Tema: Medición de la frecuencia frente a variaciones de carga utilizando un prototipo de generación.

Autores:
-Marlon Cerna
-Leoncio Jiménez

Tutor:
Ing. Xavier Alfonzo
Proaño Maldonado
Mg. C.

Figura II.4. Pantalla de presentación.



Figura II.5. Pruebas en el modula Lab-Volt.



Figura II.6. Control de frecuencia a la nominal.



Figura II.7. Toma de datos de operación del sistema de generación.



Figura II.8. Pruebas de funcionalidad del sistema de generación.

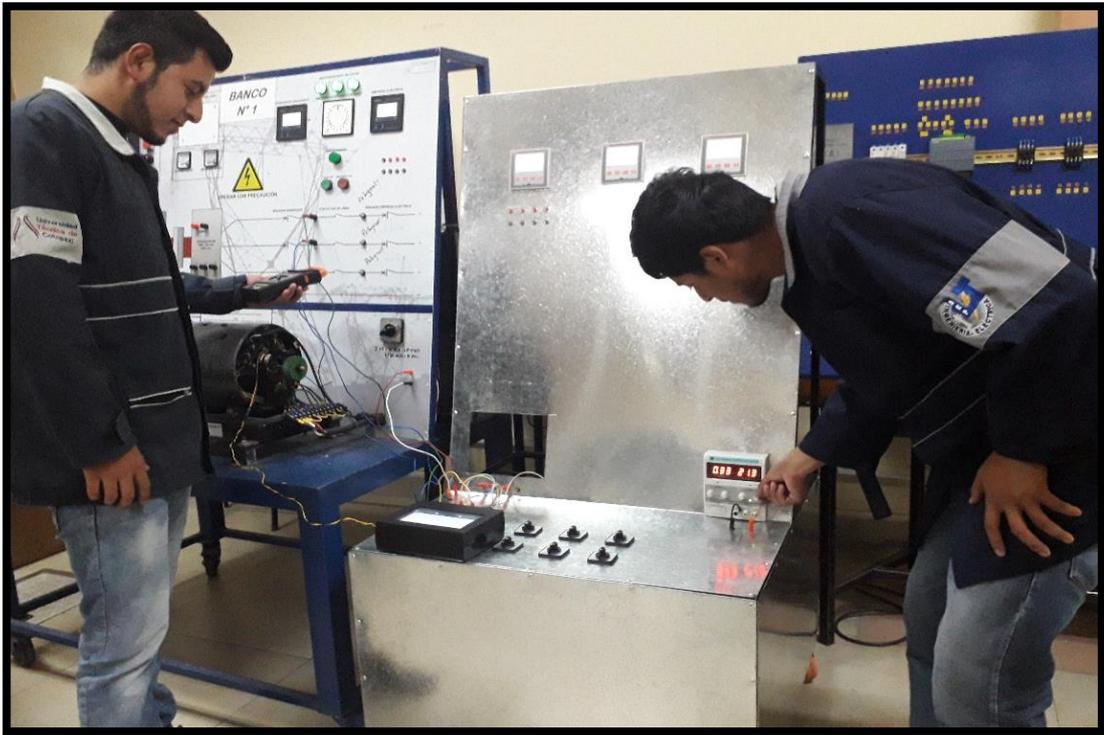


Figura II.9. Inyección de corriente de campo para la generación.

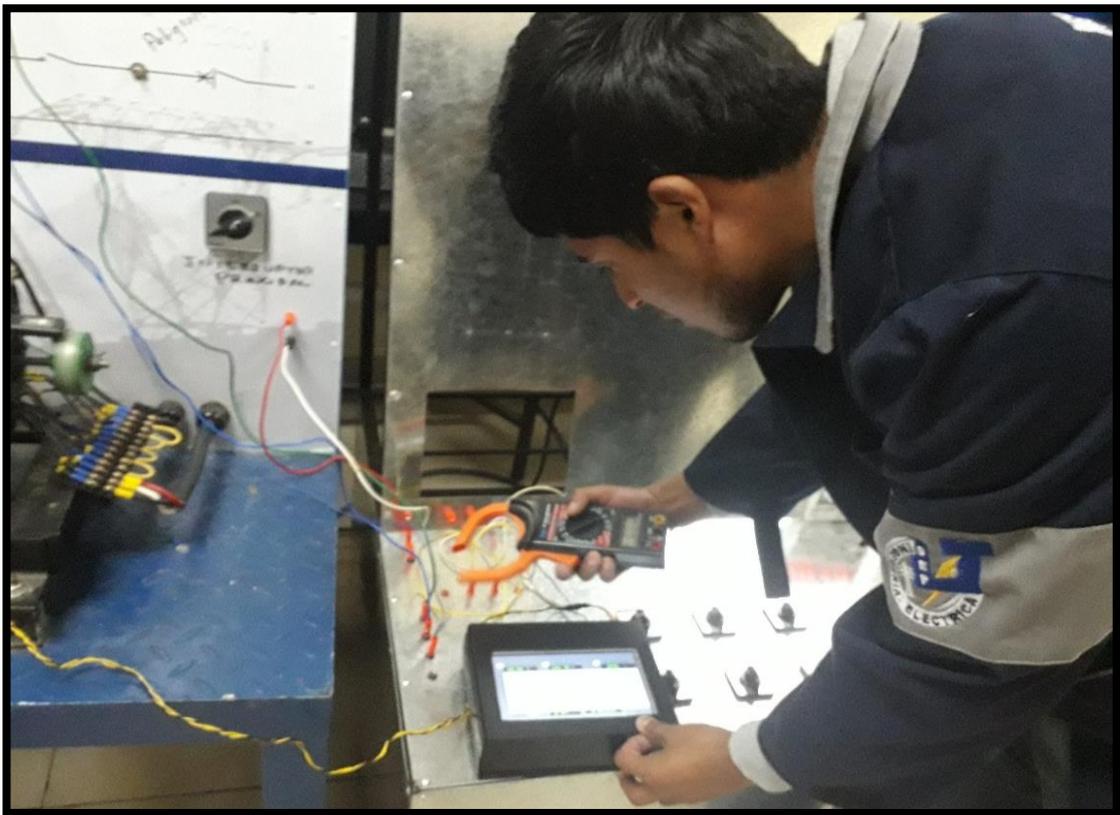


Figura II.10. Comprobación de datos por medio de la pantalla.

ANEXO III. Manual de uso del sistema de medición de frecuencia

El sistema de visualización, medición y adquisición de datos de frecuencia, velocidad y voltaje está diseñado para el sistema de generación (motor – generador) a escala disponibles en el laboratorio de ingeniería eléctrica, este prototipo de medición es capaz de realizar análisis en otros generadores de forma que permite obtener datos de operación de los mismos en tiempo real, lo cual contribuye al análisis de la estabilidad de los parámetros de forma gráfica cuando existe variaciones de carga.

1. Fuente de alimentación del sistema de medición de frecuencia

La alimentación al sistema de medición de frecuencia se lo realizara a través de un cargador de batería con las siguientes características entrada 100-240V AC a 60 Hz, con un voltaje de salida a 5 Vcc que debe ser suministrada de forma continua al prototipo durante el análisis que se realice en los sistemas de generación y máximo a una corriente de 1 A.

2. Forma de conexión del sistema de medición con el generador

El sistema de medición y adquisición de datos, se debe tomar la señal de dos fases cualesquiera que se desee analizar para lo cual se detalla en el siguiente figura III.11.

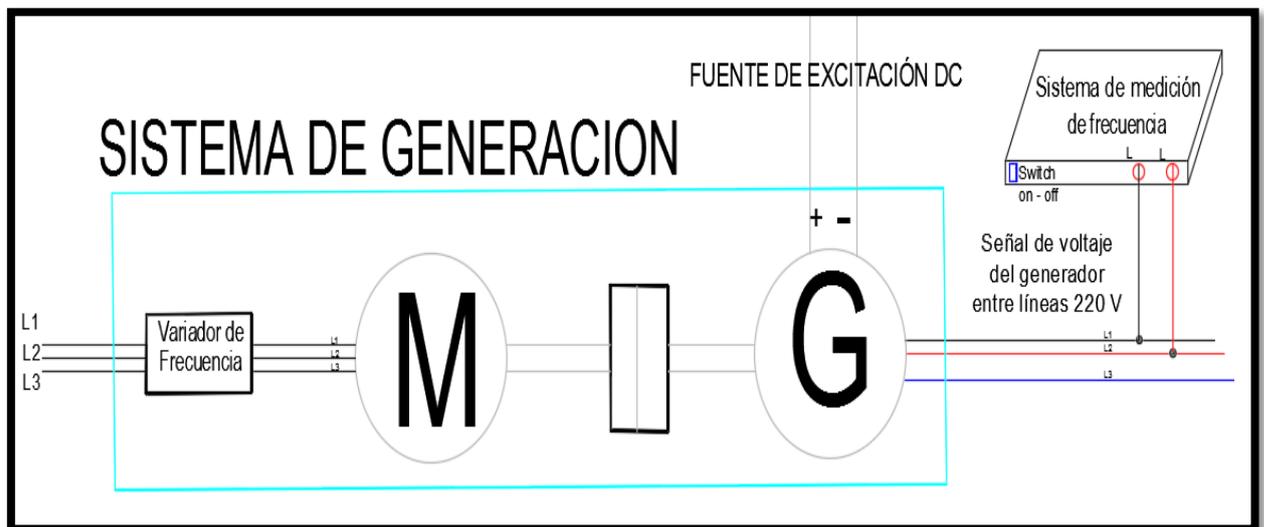


Figura III.11. Sistema de medición de frecuencia conectado a las dos fases.

3. Funcionalidad del sistema de medición de frecuencia

El equipo está diseñado en 4 pantallas, distribuidas respectivamente en donde la primera está enfocada directamente a la frecuencia y a medir el tiempo del transitorio provocado por la variación de la misma producto de inyectar carga, para lo cual se debe pulsar el botón carga

para empezar a medir los transitorios provocados en el sistema de generación como se muestra en la figura III.12.

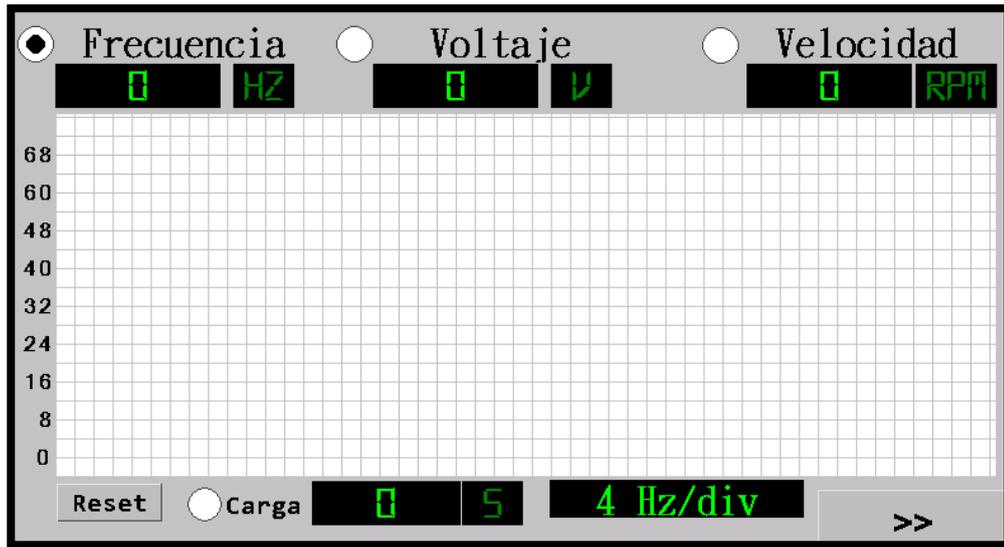


Figura III.12. Pantalla uno que permite medir el transitorio al activar.

En la pantalla dos está destinada a facilitar comparaciones de las curvas de operación del sistema de generación así como también sus datos para lo cual se debe seleccionar la opción que se desee analizar como se muestra en la figura III.13 y la pantalla cuatro permite hacer análisis entre las tres curvas guardando el historial de operación del sistema para posterior indicar los transitorios mínimos y máximos de cada señal, como se muestra en las siguientes figuras III.14.

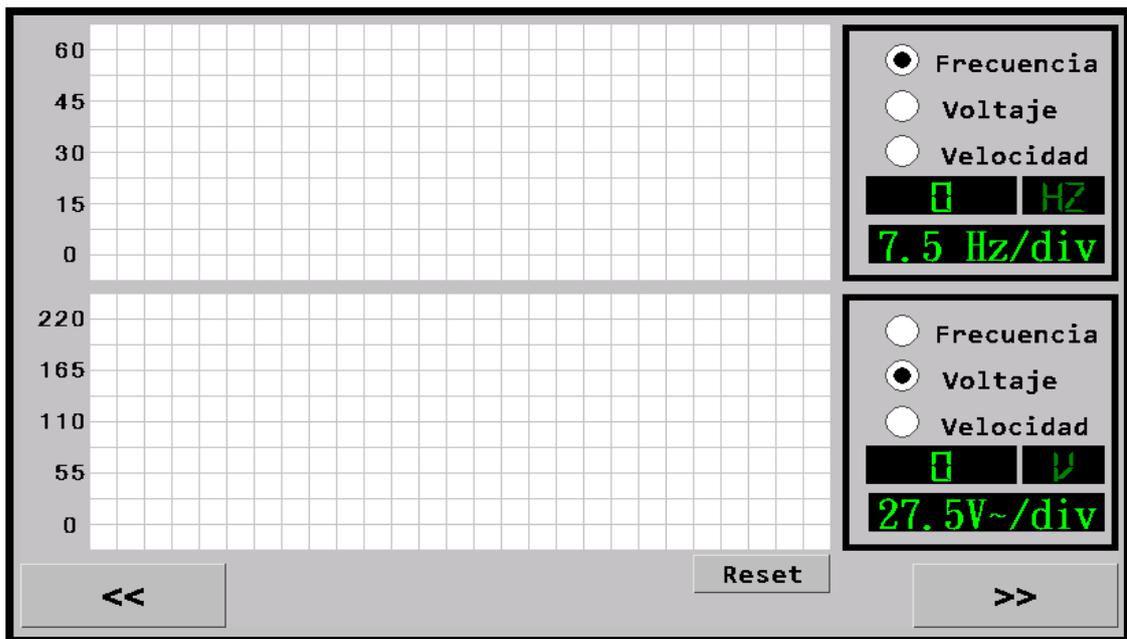


Figura III.13. Pantalla dos que permite al análisis entre dos curvas con sus valores.

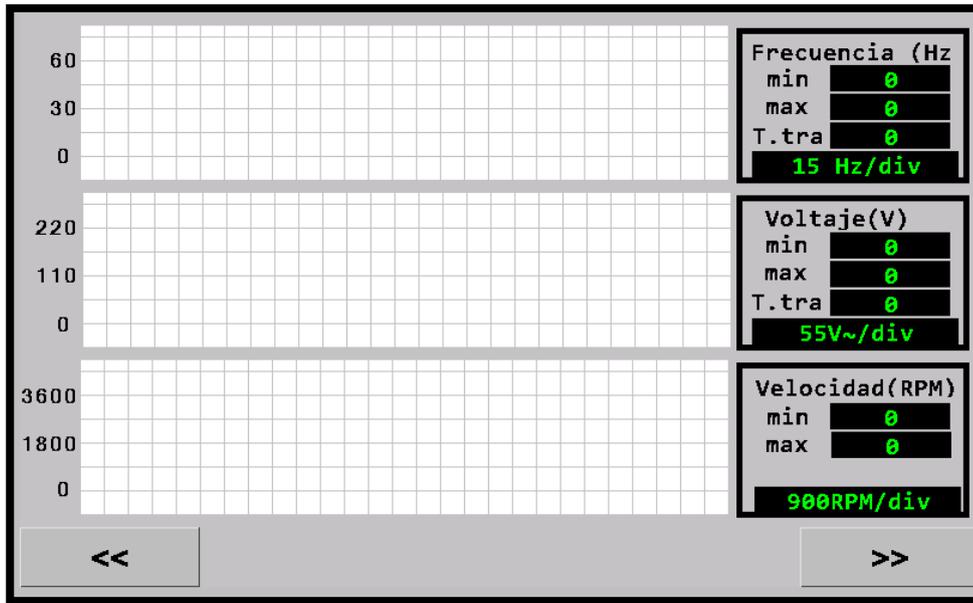


Figura III.14. Pantalla dos que permite al análisis entre tres curvas con sus valores y tiempo de transitorios máximos y mínimos.

En la pantalla tres permite determinar una desviación de frecuencia que se desee analizar en un rango de +/- 5% a 50% de desviación el cual permite simular una baja frecuencia y una alta frecuencia por medio de la activación de dos leds (línea roja led rojo; línea verde led verde), así como se muestra en la figura III.15.

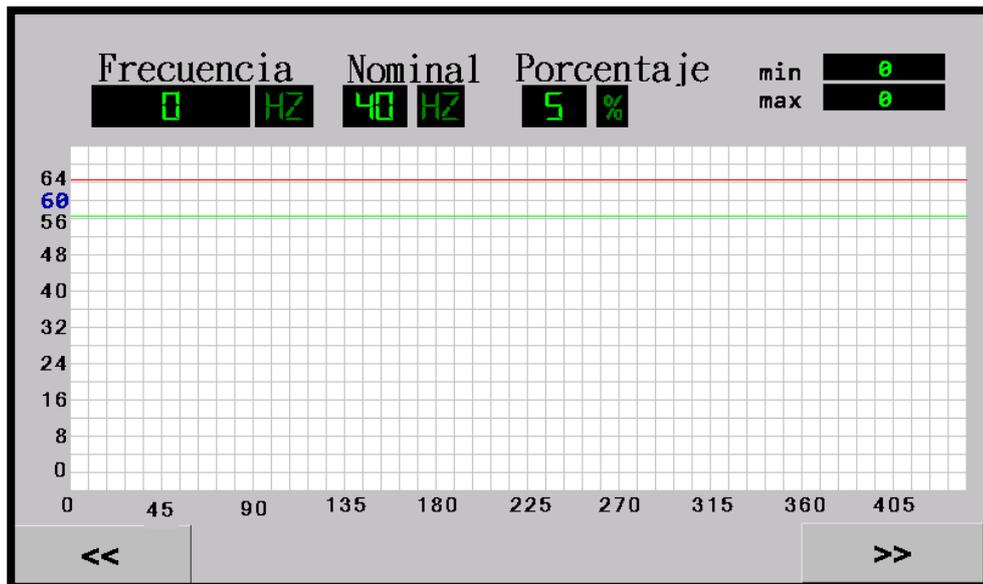


Figura III.15. Banda de frecuencia a 5% de desviación.

En esta misma pantalla nos permite setear la frecuencia nominal dando un click en un rango de 40Hz a 65Hz a la cual se desee trabajar así como también nos permite setear el porcentaje de

desviación de +/- 5% a +/- 50% de la frecuencia a la que se desea trabajar las cuales pueden ser editadas de acuerdo a su necesidad así como se muestra en la figura III.16.

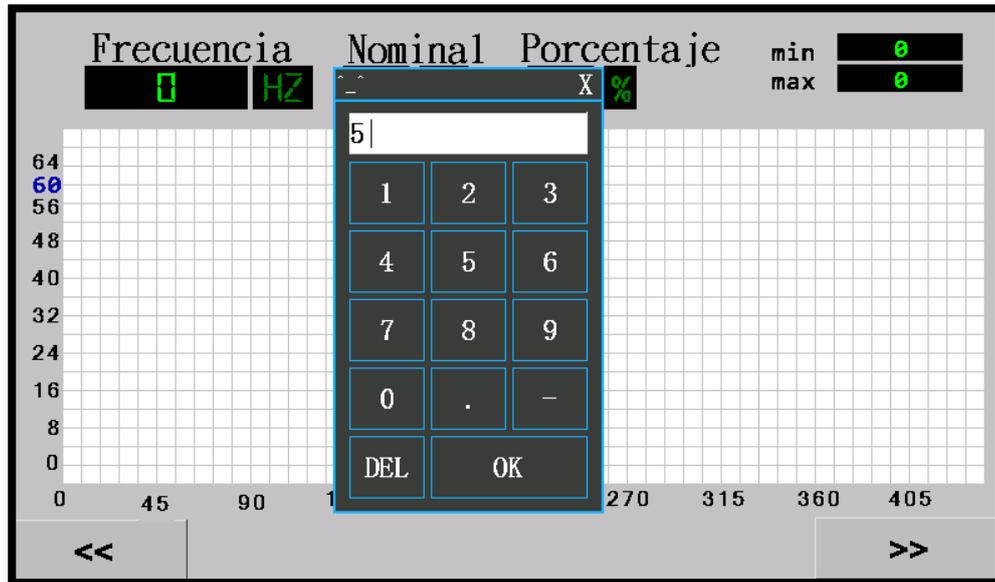


Figura III.16. Forma de editar la frecuencia nominal y el porcentaje de desviación.

Por último la pantalla cuatro detalla datos en tiempo real de operación del sistema de generación para lo cual en la primera columna obtiene la frecuencia la segunda columna detalla el tiempo que se demora un ciclo medido en ms, la columna tres detalla el voltaje AC, la columna cuatro detalla la velocidad en rpm, y la columna cinco detalla la frecuencia calculada en relación a la velocidad con el número de polos esta información se actualiza cada 100 ms, como se muestra en la figura III.17.

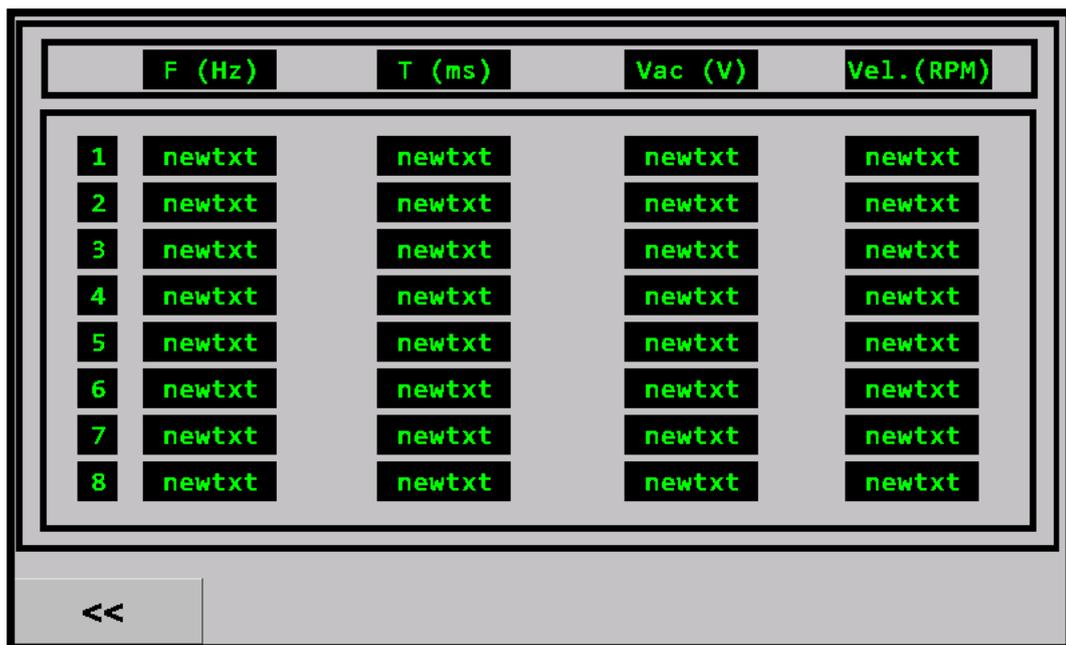


Figura III.17. Adquisición de datos en tiempo real.

4. Precauciones al utilizar sistema de medición de frecuencia

- Se debe tener precaución con la fuente de alimentación que suministra al sistema de medición ya que solo se debe suministrar 5Vcc y máximo a una corriente de 1 A.
- Al momento de analizar voltajes procure no sobrepasar los 250 V y una frecuencia superior a 70 Hz, debido a que las señales que toma el Arduino provocaría errores en las mediciones y ocasionar daños en los dispositivos electrónicos.
- El dispositivo está diseñado para analizar dos fases para lo cual se debe conectar en las líneas que se desea realizar el estudio.
- No realizar ningún tipo de conexión en el generador cuando el sistema de medición se encuentre conectado a sus terminales.
- Procure setear los rangos de operación después que el sistema se haya estabilizado en frecuencia.

ANEXO IV. EXPERIMENTO DE LABORATORIO I

CONTROL DE POTENCIA –FRECUENCIA EN EL MODULO LABVOLT DE UN MOTOR GENERADOR SÍNCRONO

Objetivos:

Evaluar el comportamiento de un generador ante los incrementos de carga, para visualizar las variaciones de frecuencia por medio de equipos de medición.

Observar cómo influye la fuerza mecánica en el control de frecuencia y la corriente de excitación en el control de voltaje ante un incremento de carga en un sistema aislado.

Exposición

La frecuencia y el voltaje deben permanecer dentro de unos límites estrictos para que el suministro eléctrico se realice en condiciones de calidad aceptables. Las distintas variaciones de carga en un sistema, producen un cambio de frecuencia alejadas del valor nominal que a su vez pueden provocar el mal funcionamiento de diversos equipos industriales o domésticos. La frecuencia de un sistema eléctrico está estrechamente relacionada con el equilibrio entre generación y carga. En régimen permanente todos los generadores síncronos de una red eléctrica funcionan en sincronismo, es decir, la frecuencia de giro de cualquiera de ellos multiplicada por el número de pares de polos es precisamente la frecuencia eléctrica del sistema, Si en un momento dado aumenta la carga, es decir la potencia eléctrica demandada en el sistema, entonces aumenta el par electromagnético en los generadores, estos comienzan a frenarse y la frecuencia eléctrica disminuye progresivamente, a medida que se vaya inyectando carga al generador ya sea resistiva pura o inductiva o ambas a la vez debe suceder lo siguiente.

Cuando al motor generador no se le proporciona corriente de campo a través de la excitatriz el generador no genera energía eléctrica solo funciona como motor.

A medida que se conecte carga el generador disminuirá su velocidad teniendo una caída de frecuencia considerable que después se tendrá que compensar para que vuelva a trabajar bajo condiciones normales.

A cualquier velocidad del motor las corrientes y el par desarrollado tomaran valores entre ambos extremos.

Instrumentos y equipos

Módulo de fuente de alimentación (0-120/208V, 3 ϕ c-a /5A)	(EMS 8821)
Módulo de fuente de alimentación (0-120V, c-d /8A).	(EMS 8821)
Modulo Motor/alternador síncrono.	(EMS 8912)
Modulo Motor Jaula de ardilla de cuatro polos.	(EMS 8725)
Cables de Conexión	(EMS 8941)
Banda de sujeción	(EMS 8942)
Módulo de carga resistiva	(EMS 8034)
Módulo de carga inductiva	(EMS 3487)
Multímetro	
Pinza Amperimetrica	
Sistema de visualización, medición y adquisición de datos de frecuencia.	

Procedimientos

Advertencia: ¡En este experimento de laboratorio se manejan altos voltajes! ¡No haga ninguna conexión cuando la fuente esté conectada! ¡La fuente debe desconectarse después de hacer cada medición!

Conecte el circuito que se ilustra en la siguiente figura IV.16., usando los módulos EMS de motor jaula de ardilla de cuatro polos, fuente de alimentación c-a observe que los tres devanados del estator estén conectados a la salida trifásica variable de la fuente de alimentación terminales 4,5 y 6.

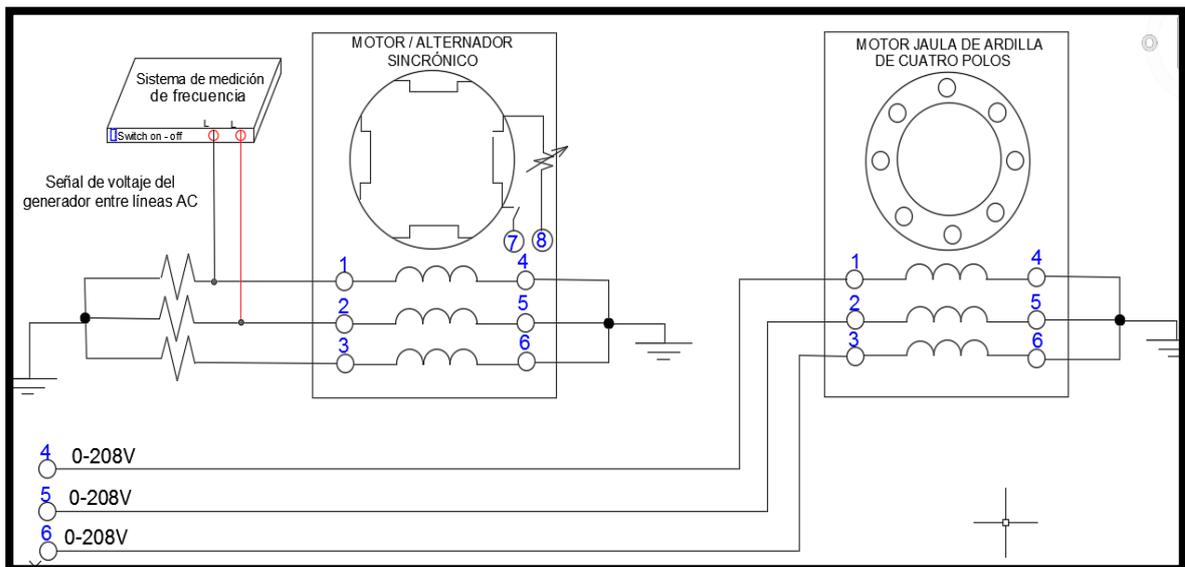


Figura IV.16. Conexión del sistema de visualización de frecuencia y motor alternador.

- a) Acople la motor jaula de ardilla de cuatro polos al motor/ alternador síncrono por medio de la banda.
- b) Conecte a los terminales de la excitatriz del motor alternador síncrono a la fuente de c-d terminales 8 y N.
- c) Asegúrese que los terminales del estator se encuentre aterrizado como se muestra en el Anexo.
- d) Conecte la fuente la fuente de alimentación al motor jaula de ardilla de cuatro polos y ajuste la frecuencia $f= 50$ Hz el motor debe girar a una velocidad considerable.
- e) Conecte la fuente de c-c a la excitatriz del motor/alternador síncrono y ajuste el voltaje $E1= 150V$. el motor y generador deben girar a una velocidad considerable.
- f) Conecte las dos fases del sistema de generación al sistema de visualización, medición y adquisición de datos de la frecuencia, voltaje y velocidad como se muestra en el Anexo anterior.

Mida y anote a que revoluciones de encuentra operando bajo las condiciones aplicadas anteriormente sin uso de carga.

RPM

Proceso de inyección de carga resistiva

1. Con el uso del módulo de carga resistiva ingresar las cargas en el siguiente orden, asegúrese que los terminales las cargas se encuentren aterrizadas.
2. Ingrese al sistema una carga resistiva de $R1=1200\Omega$ por fase a corriente de 0.1A.
3. Mida por medio del sistema de visualización las RPM y determine a que frecuencia se encuentra operando el sistema.

RPM

f

V

4. Una vez obtenida las mediciones recupere al sistema para que vuelva a operar bajo condiciones normales definidas al inicio tomando en cuenta que la frecuencia se recupera variando el voltaje del motor jaula de ardilla ósea la fuerza mecánica y a su vez el voltaje variando la corriente de campo.

5. Del mismo modo aplicar una carga de $R2=600 \Omega$ a 0.2 A por fase, desconectando la resistencia de 1200 Ω . Mida bajo estas condiciones como se encuentra operando el sistema.

RPM

f

V

6. Recupere al sistema bajo condiciones nominales y aplicar una carga de $R_3=300 \Omega$ a 0.4 A por fase desconectando la carga de 600Ω y mida bajo estas condiciones como se encuentra operando el sistema tomando la máxima potencia del sistema con esta última carga.

RPM

f

V

7. Recupere al sistema bajo condiciones nominales y aplicar una carga en paralelo de 600Ω a 0.2 A y 1200Ω a 0.1 A, por fase desconectando la carga de 300Ω y mida bajo estas condiciones como se encuentra operando el sistema, calcule frecuencia y resistencia total.

RPM

f

V

RT

8. Recupere al sistema bajo condiciones nominales y aplicar una carga en paralelo de 600Ω a 0.2 A y 300Ω a 0.4 por fase desconectando la carga de 1200Ω y mida bajo estas condiciones como se encuentra operando el sistema, calcule frecuencia y resistencia total.

RPM

f

V

RT

9. Recupere al sistema bajo condiciones nominales y aplicar una carga en paralelo de 600Ω a 0.2 A y 300Ω a 0.4 y 1200Ω a 0.1 A. por fase y mida bajo estas condiciones como se encuentra operando el sistema con la carga total, calcule frecuencia y resistencia total.

RPM

f

V

RT

Bajo el criterio de control de potencia frecuencia

¿Qué efectos se producen en el sistema al introducir cargas resistivas?.....

Proceso de inyección de carga inductiva

10. Con el uso el módulo de carga inductiva ingresar las cargas en el siguiente orden, asegúrese que los terminales las cargas se encuentren aterrizadas y ponga al sistema bajo condiciones iniciales. Repetir el mismo proceso que se empleó en cargas resistivas, para cargas inductivas de $L1=1146,055\Omega$, $L2=573.02\Omega$ y $L3=286.51 \Omega$ y medir en cada proceso.

RPM

f

V

XT

Bajo el criterio de control de potencia frecuencia

¿Qué efectos se producen en el sistema al introducir cargas inductivas?.....

Proceso de inyección de carga resistiva e inductiva

11. Con el uso el módulo de carga resistiva inductiva ingresar las cargas en el siguiente orden, asegúrese que los terminales las cargas se encuentren aterrizadas y ponga al sistema bajo condiciones iniciales antes de iniciar el proceso.

12. Ingrese al sistema una carga resistiva equivalente de $Z1=1659.34\Omega$ por fase a corriente de 0.1A.

13. Mida por medio del sistema de visualización y multímetro las RPM y determine a que frecuencia se encuentra operando el sistema.

RPM

f

V

14. Una vez obtenida las mediciones recupere al sistema para que vuelva a operar bajo condiciones normales definidas al inicio tomando en cuenta que la frecuencia se recupera variando el voltaje y a su vez el voltaje variando la corriente de campo.

15. Del mismo modo aplicar una carga equivalente $Z2=829.66 \Omega$ a 0.2 A por fase, desconectando la de 1659,34 Ω . Mida bajo estas condiciones como se encuentra operando el sistema calcule la frecuencia.

RPM

f

V

16. Recupere al sistema bajo condiciones nominales y aplicar una carga equivalente de $Z_3=414.83 \Omega$ a 0.4 A por fase desconectando la carga de 829.66Ω y mida bajo estas condiciones como se encuentra operando el sistema tomando la máxima potencia del sistema con esta última carga calcule la frecuencia.

RPM

f

V

17. Recuperar al sistema bajo condiciones nominales y aplicar una carga en paralelo del mismo orden que en el caso de cargas resistivas. Por medio de ello determinar en cada caso de cargas resistivas. Por medio de ello determinar en cada caso frecuencia y Z_T en cada caso.

RPM

f

V

Prueba de conocimientos

¿Qué tipo de mecanismos de excitación se emplean en los generadores síncronos?

.....
.....
.....
.....

¿Cuáles son las principales variables que son controladas para hacer el control de potencia frecuencia?

.....
.....
.....

¿Qué tipo de rotores se emplean en las centrales de generación hidráulica y en las térmicas?

.....
.....

¿Qué entiende por estabilidad de frecuencia en los sistemas eléctricos de potencia?

.....
.....
.....

¿Qué puede ocasionar un transitorio o desviación de frecuencia?

.....
.....
.....

¿Qué agente de regulación destina la regulación de frecuencia, cuales son y explique cada una de ellas?

.....
.....
.....

ANEXO V. PRACTICA DE LABORATORIO 2

TEMA: CONTROL DE POTENCIA FRECUENCIA EN UN GRUPO GENERADOR MOTOR DE 5KW

Objetivos

Visualizar el comportamiento de la frecuencia en un grupo motor generador de 5 kW, con el equipo de medición de frecuencia en forma lineal.

Inyectar distintos valores de carga resistiva en el sistema de generación y verificar el comportamiento del voltaje generado, corrientes, potencias.

Exposición

La presente practica de laboratorio permite verificar el comportamiento de un sistema de generación en forma real al momento de cubrir una determinada demanda o un rechazo de carga, lo cual afecta directamente al comportamiento de la frecuencia y voltaje del generador, los cuales deben permanecer dentro de los límites establecidos por los diferentes entes de regulación y para lo cual se realiza un control potencia frecuencia y voltaje a parámetros nominales.

Instrumentos y equipos

Modulo motor generador de 5 kW.

Equipo de medición de frecuencia.

Sistema de excitación 0 -30 V CC.

Módulo de Cargas RLC 6 k VA.

Multímetro.

Cables de conexión.

Procedimiento.

Advertencia: ¡En esta práctica de laboratorio se manejan altos voltajes! ¡No haga ninguna conexión cuando la fuente esté conectada!

Primero verifique los equipos a utilizarse, luego conectar los terminales del sistema de excitación del generador y por siguiente conectar las cargas a las líneas L1, L2, Y L3 del tablero del generador con el módulo de cargas.

Encender el módulo de generación, módulo de visualización de frecuencia y módulo de cargas (interruptores principales).

Poner en marcha el generador y con el potenciómetro de control de velocidad del motor ajustar a una frecuencia de 60 Hz y luego controlar el sistema de excitación a un voltaje generado de 220 V AC (verificar estos valores en las pantallas de monitoreo). Activar el botón “carga” en la pantalla de visualización de frecuencia.

Inyectar una carga resistiva R2 de 42 Ω.

Mida y anote el tiempo de duración de la frecuencia ante la variación de carga resistiva.

Compare las tres graficas de frecuencia velocidad y voltaje del generador y explique los efectos que se producen con la frecuencia, voltaje y velocidad.

Anote los siguientes datos de la pantalla de monitoreo del generador.

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)				
Factor de potencia				
Potencia activa (W)				
Potencia reactiva (VAr)				
Potencia Aparente (VA)				
Voltaje (V)				

Realice un control de la frecuencia a 60 Hz con el potenciómetro de control de velocidad y aun voltaje de 220 V en los bornes del generador.

Inyectar una carga resistiva R2, R3 y R4 de 42 Ω.

Explique las causas y consecuencia del comportamiento de la frecuencia antes la variación de carga resistiva y del tiempo de duración del transitorio.

Compare las tres graficas de frecuencia velocidad y voltaje del generador y explique los efectos que se producen con la frecuencia, voltaje y velocidad.

Anote los siguientes datos de la pantalla de monitoreo del generador.

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)				
Factor de potencia				
Potencia activa (W)				
Potencia reactiva (VAr)				
Potencia Aparente (VA)				
Voltaje (V)				

Realice una comparación entre las dos tablas del comportamiento de la potencia activa y reactiva ante las variaciones de carga y anote los efectos encontrados.

Prueba de conocimientos

¿Qué tipo de mecanismos de excitación se emplean en los generadores síncronos?

.....
.....
.....

¿Cuáles son las principales variables que son controladas para hacer el control de potencia frecuencia?

.....
.....
.....

¿Qué tipo de rotores se emplean en las centrales de generación hidráulica y en las térmicas?

.....
.....
.....

¿Qué entiende por estabilidad de frecuencia en los sistemas eléctricos de potencia?

.....
.....
.....

¿Qué puede ocasionar un transitorio o desviación de frecuencia?

.....
.....

ANEXO VI. PRACTICA DE LABORATORIO 3

TEMA: COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA ANTE VARIACIONES CARGA RESISTIVA EN UN GRUPO GENERADOR MOTOR DE 5KW.

Objetivos.

Visualizar el comportamiento de la frecuencia en un grupo motor generador de 5 kW, con el equipo de medición de frecuencia en forma lineal.

Inyectar distintos valores de carga resistiva en el sistema de generación y verificar el comportamiento del voltaje generado, corrientes, potencias.

Exposición

Para que la electricidad pueda ser utilizada en nuestros hogares para efectuar las distintas actividades cotidianas, se cumple con distintas regulaciones y normas para garantizar la calidad de energía. Es por ello que la presente práctica de laboratorio permite verificar el comportamiento de un sistema de generación en forma real al momento de cubrir una determinada demanda o un rechazo de carga, lo cual afecta directamente al comportamiento de la frecuencia y voltaje del generador.

Instrumentos y equipos.

Modulo motor generador de 5 kW.

Equipo de medición de frecuencia.

Sistema de excitación 0 -30 V CC.

Módulo de Cargas RLC 6 k VA.

Multímetro.

Cables de conexión.

Procedimiento.

Advertencia: ¡En esta práctica de laboratorio se manejan altos voltajes! ¡No haga ninguna conexión cuando la fuente esté conectada!

Primero verifique los equipos a utilizarse, luego conectar los terminales del sistema de excitación del generador y por siguiente conectar las cargas a las líneas L1, L2, Y L3 del tablero del generador con el módulo de cargas.

Encender el módulo de generación, módulo de visualización de frecuencia y módulo de cargas (interruptores principales).

Poner en marcha el generador y con el potenciómetro de control de velocidad del motor ajustar a una frecuencia mínima y controlar el sistema de excitación a un voltaje generado de 220 V AC (verificar estos valores en las pantallas de monitoreo).

Mida y anote la frecuencia, voltaje y velocidad del generador en vacío.

Frecuencia	
Voltaje	
Velocidad.	

Con el botón de parada del módulo de generación apague el sistema y active el botón “carga” en la pantalla de visualización de frecuencia y encienda el generador.

Verifique el tiempo que tarde el sistema en estabilizarse a mínima frecuencia y el tiempo de duración del ciclo de frecuencia en la pantalla.

Tiempo en estabilizarse el sistema.	
Tiempo de duración del ciclo.	

Carga resistiva R2 de 42 Ω.

Luego de estabilizar el sistema a una frecuencia de 60 Hz y a un voltaje de 220 V inyectar una carga resistiva R2 de 42 Ω.

Explique las causas y consecuencia del comportamiento de la frecuencia antes la variación de carga resistiva.

Compare las tres graficas de frecuencia velocidad y voltaje del generador y explique los efectos que se producen con la frecuencia, voltaje y velocidad. Explique la caída de voltaje en los bornes del generador.

Anote los siguientes datos de la pantalla de monitoreo del generador.

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)				
Factor de potencia				
Potencia activa (W)				
Potencia reactiva (VAr)				

Potencia Aparente (VA)				
Voltaje (V)				

Explique el comportamiento de la potencia activa y reactiva en el generador.

Carga resistiva R2, R3 y R4 de 42 Ω.

Luego de estabilizar el sistema a una frecuencia de 60 Hz y a un voltaje de 220 V inyectar una carga resistiva R2, R3 y R4 de 42Ω.

Explique las causas y consecuencia del comportamiento de la frecuencia antes la variación de carga resistiva y del tiempo de duración del transitorio.

Compare las tres graficas de frecuencia velocidad y voltaje del generador y explique los efectos que se producen con la frecuencia, voltaje y velocidad.

Anote los siguientes datos de la pantalla de monitoreo del generador.

PARAMETROS	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Total
Intensidad (A)				
Factor de potencia				
Potencia activa (W)				
Potencia reactiva (VAr)				
Potencia Aparente (VA)				
Voltaje (V)				

Explique el comportamiento de la potencia activa y reactiva en el generador.

Prueba de conocimientos

¿Qué tipo de mecanismos de excitación se emplean en los generadores síncronos?

.....

¿Cuáles son las principales variables que son controladas para hacer el control de potencia frecuencia?

.....

¿Qué tipo de rotores se emplean en las centrales de generación hidráulica y en las térmicas?

.....
.....
.....

¿Qué entiende por estabilidad de frecuencia en los sistemas eléctricos de potencia?

.....
.....
.....

¿Qué puede ocasionar un transitorio o desviación de frecuencia?

.....
.....
.....

¿Qué agente de regulación destina la regulación de frecuencia, cuales son y explique cada una de ellas?

.....
.....
.....