

Measurement of frequency versus load variations using a generation prototype

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

X.A. Proaño¹ W.P. Guamán¹ M.A. Cerna¹ L.M. Jiménez¹

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi, Carrera de Ingeniería Eléctrica, Latacunga, Ecuador
E-mail: marlon.cerna6@utc.edu.ec; leoncio.jimenez4@utc.edu.ec; xavier.proano@utc.edu.ec; wilian.guaman@utc.edu.ec

Abstract

In the research carried out, the basics of Power-frequency control in a synchronous generator were addressed in order to know the behavior of the frequency before load variations of the generation system in real time; By using these principles, a visualization, monitoring and data acquisition module was developed for the measurement of frequency, speed and voltage, using an Arduino Nano board and the Nextion screen to evaluate the effects produced in the system. To do this, the voltage wave behavior was studied to determine the duration of each cycle, by using a reducing transformer and an electronic circuit which allows converting the sine wave into a square wave capable of being processed, allowing to obtain the duration time of each cycle and through the crossings by zero, obtain the linear graph of the frequency and in turn measure the duration time of the transients. Because the frequency varies with any disturbance of the load, it was necessary to make a practice model to understand the variables that are immersed in the control P.F. that is why in the experimental stage when injecting a resistive load in the generating group of the LabVolt module it was found that the frequency decreases by 60% of its nominal value and stabilizes in a time of 10 seconds in said value, due to the load increase directly affecting the frequency.

Index terms – frequency; voltage; arduino; nextion; transients.

Resumen

En la investigación realizada se abordaron los fundamentos de control de Potencia-frecuencia en un generador síncrono con el objeto de conocer el comportamiento de la frecuencia ante variaciones de carga del sistema de generación en tiempo real; mediante la utilización de estos principios 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 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.

Palabras clave – frecuencia; voltaje; arduino; nextion; transitorios.

Recibido: 15-11-2019, Aprobado tras revisión: 31-07-2020

Forma sugerida de citación: X.A. Proaño, W.P. Guamán, M.A. Cerna y L.M. Jiménez, “Medición de la frecuencia frente a variaciones de carga utilizando un prototipo de generación”, *ÑAWPAY Revista Técnica Tecnológica*, vol. 2, no. 1, pp. 14-22, 2020

1. INTRODUCCIÓN

La frecuencia es uno de los temas más estudiados 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 suministro eléctrico 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 trabajo está enfocado en el diseño y en la construcción de un prototipo que permita la medición, visualización y adquisición de datos en tiempo real del comportamiento de la frecuencia en el grupo motor-generator.

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

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. Todas las pruebas experimentales se realizan en los laboratorios de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi con el objeto de comprender la relación entre la potencia generada-demandada y la frecuencia de la red.

2. ANÁLISIS TEÓRICO

2.1. Sistema de generación eléctrica

Un sistema de generación está constituido por varios elementos tales como generadores síncronos, turbinas, regulador de velocidad y sistemas de control, cada uno cumple con una función específica para que la frecuencia y voltaje se encuentren dentro de los límites establecidos por las diferentes regulaciones, y así poder brindar un servicio de energía eléctrica generada de calidad para garantizar el correcto funcionamiento de los elementos eléctricos y electrónicos de la red. La demanda de un sistema eléctrico de potencia varía conforme las horas del día, es por ello que, en un sistema de generación aislado al existir un cambio brusco en la potencia activa demandada, como consecuencia se produce una variación de frecuencia que afecta directamente a todo el sistema y es por ello que esta debe ser controlada en el menor tiempo posible para evitar la pérdida total del sistema.

2.2. Generador Síncrono

Los generadores síncronos o alternadores son máquinas sincrónicas que se usan para convertir la potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna. También podemos afirmar que es el elemento básico para

ejercer el control frecuencia- potencia en un sistema eléctrico.

2.2.1. Velocidad de rotación de un generador síncrono

En los sistemas eléctricos de potencia los generadores son, por definición 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 [1].

$$f = \frac{p}{2} * \frac{n}{60} = \frac{p}{2} fm \text{ (Hz)} \quad (1)$$

Donde:

f = Frecuencia eléctrica en Hz.

η = Velocidad del campo magnético en (rpm)

p = Número de polos.

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

2.2.2. 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 [2].

2.3. Frecuencia eléctrica

La frecuencia de la onda de tensión debe permanecer dentro de unos límites estrictos para que el suministro eléctrico se realice en condiciones de calidad aceptables [3].

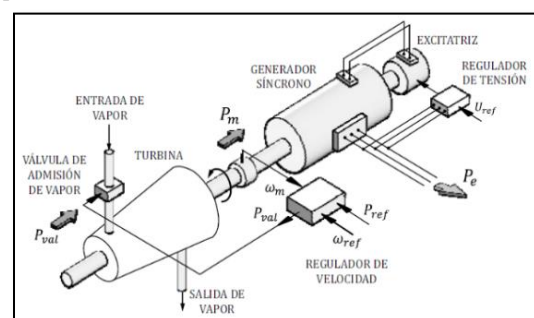


Figura 1. Controles de frecuencia y tensión en un grupo turbina-generator.

La frecuencia de la red es el resultado del equilibrio entre la generación y el consumo en tiempo real. Requiere un

ajuste permanente de la generación para adaptarse a la demanda.

2.3.1. Equilibrio entre Demanda y Generación

En régimen permanente todos los generadores síncronos de una red eléctrica funcionan en sincronismo, es por ello que 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 mientras un sistema opera en régimen permanente, la potencia mecánica entrante al sistema desde las turbinas es igual a la potencia eléctrica consumida por las cargas, descontando las pérdidas. Para un incremento de demanda solo puede obtenerse de la energía cinética almacenada en las maquinas rotativas.

La reducción de la energía cinética en los generadores síncronos equivale a la disminución de su velocidad de giro, de modo que cae la frecuencia eléctrica del sistema. Un sistema de control que regule la potencia mecánica entrante a los generadores síncronos, de manera que la frecuencia del sistema se mantenga estable al variar la demanda. Este sistema de control existe en todos los sistemas eléctricos y trata de mantener una frecuencia de referencia que depende de cada sistema.

2.3.2. Regulación primaria, secundaria y terciaria

Como la frecuencia eléctrica está ligada al balance de potencia activa en el sistema eléctrico, suele hablarse indistintamente de control de frecuencia, control de potencia, o control de frecuencia-potencia [3].

El control de frecuencia debe conseguir que se mantenga el equilibrio entre generación y demanda. Además de que, se mantenga la frecuencia de referencia en el sistema y se cumplan los compromisos de intercambio de energía con las áreas vecinas. Para cumplir estos objetivos, el control frecuencia-potencia se organiza en tres niveles: primario, secundario y terciario.

El control primario es el más rápido, operando en un margen de tiempo de entre 2 y 20 segundos. Actúa de forma local en cada generador síncrono, atendiendo a la velocidad de giro del eje. La rapidez de este control está limitada por la propia inercia de los generadores. Luego, el control secundario opera en un margen de tiempo de entre 20 segundos y 2 minutos. Actúa en el ámbito del área de control, atendiendo a la frecuencia y al intercambio de potencia con las áreas vecinas. Finalmente, el control terciario opera en un margen de superior a 10 minutos. Actúa en el ámbito de un sistema eléctrico extenso, buscando un reparto de cargas que asegure suficientes reservas de energía [4].

2.4. 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, que es emitida por un diodo led que satura un componente electrónico, normalmente en forma de fototransistor [5].

2.5. Medición de velocidad RPM

Para registrar la velocidad del motor en revoluciones por minuto (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 Fig. 2.

Estos pulsos son contados mediante los cruces por cero, 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 ecuación 2.

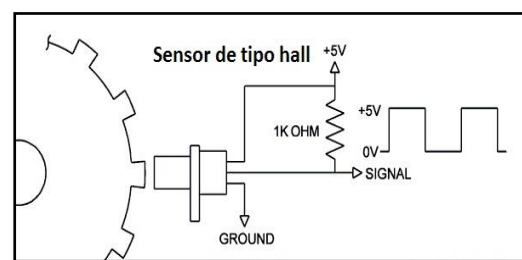


Figura 2. Señal de pulsos generada por el sensor de efecto hall

$$rpm = (60 * 1000 / \text{pulsesperturn}) / (\text{millis}() - \text{timeold}) * \text{pulses}; \quad (2)$$

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, se obtendrá la cantidad de RPM del generador.

3. DESARROLLO

3.1. Medición de frecuencia

De manera similar que, en la medición de RPM, se utiliza el cruce por cero de la señal alterna generada de la red eléctrica para detectar la frecuencia del sistema.

Para la detección de cruce por cero se ha implementado un circuito detallado en la siguiente Fig. 3.

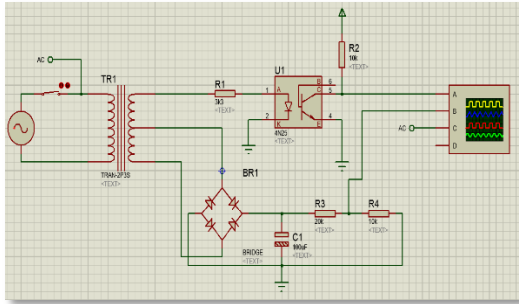


Figura 3. Circuito de detección de cruce por cero.

Como se detalla en la Fig. 3, el optoacoplador 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 Fig. 4, 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.

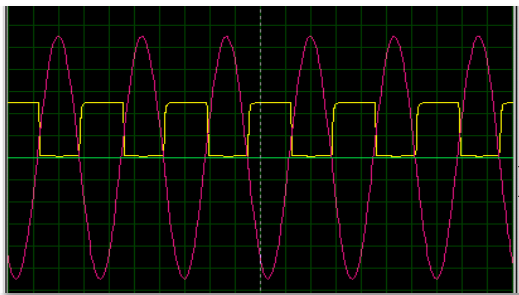


Figura 4. Señales muestreadas.

Mediante la onda del tren de pulsos se puede determinar la frecuencia del sistema al considerar el número de veces que la onda cruza por cero entregando como resultado la frecuencia medida de la señal alterna generada.

3.2. Medición del voltaje

Para poder medir el voltaje VAC que entrega el generador, 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 100µF. Obteniendo como resultado la siguiente forma de onda como se muestra en la Fig. 5.

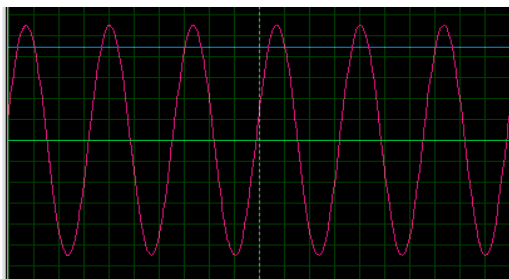


Figura 5. Señal púrpura. - Señal a la salida del transformador con

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 4.

$$voltaje = float(voltaje * 0.26) + 20,57 - ((voltaje * 0.000010265) * voltaje) \quad (4)$$

Donde:

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

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.

3.3. Banda de operación con indicadores de Baja y Alta Frecuencia

Para verificar el comportamiento del generador se desarrolló un sistema que permite graficar la banda de operación de frecuencia en un +/- 5% hasta 50% de desviación 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, este modelo permite setear la frecuencia nominal y porcentaje de desviación de la frecuencia a la que se desea trabajar por medio de un click como se muestra en la Fig. 6.

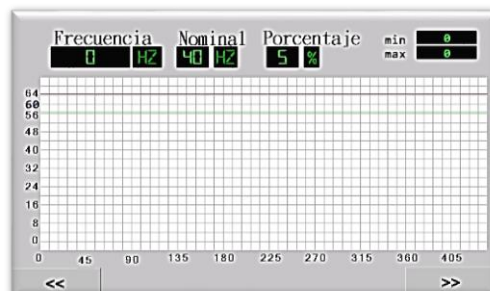


Figura 6. Banda de operación.

4. RESULTADOS

Para visualizar los efectos que se producen en un sistema de generación ante la variación de potencia demandada se realiza un Experimento de Laboratorio con la ayuda del Módulo Lab- Volt, para realizar el control de potencia y frecuencia.

4.1. Modelo del Generador Síncrono en un Sistema de Potencia Aislado

El modelo del sistema de potencia aislado es el modelo básico del generador en este tipo de sistema el generador alimenta a un área de servicio local (no tiene interacción con otras áreas del sistema), por lo que regula la frecuencia de esa área. En la Fig. 7 se representa un generador alimentando una carga local:

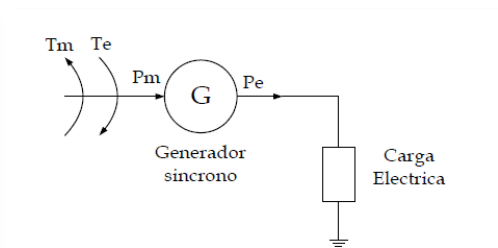


Figura 7. Generador síncrono en un área aislada alimentando una carga local.

En este tipo de sistema de generación se establece tanto la frecuencia y voltaje de generación. En el país la frecuencia nominal del Sistema Nacional Interconectado es 60 Hz, a un voltaje de 13,8 kV, en los bornes de generación.



Figura 8. Motor/alternador síncrono.

Para el control de potencia-frecuencia se utiliza un motor alternador síncrono Fig. 8, del módulo Lav-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.

Uno de los parámetros a controlar es el voltaje nominal, en los bornes de generación para lo cual se debe hacer uso de un sistema de excitación para alcanzar el voltaje de salida,

el sistema de excitación del motor-alternador síncrono 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 Fig. 9, con las siguientes características:

- Voltaje:** 208 V 3F.
- Potencia:** 175 W
- Velocidad:** 1570 r/min.
- Corriente:** 1.2 A.
- Frecuencia:** 60 Hz.



Figura 9. Motor jaula de ardilla de cuatro polos.

Para simular esa variación del caudal de agua que se da lugar en una hidroeléctrica se utiliza una fuente de voltaje en DC 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.

4.2. 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.

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

$$\frac{1}{RT} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \quad (4)$$

$$R_T = 171.43 \Omega$$

Se realiza el control del sistema manualmente, con los niveles nominales tanto de voltaje y frecuencia, y se emplea una carga resistiva R_T de 171.43 ohmios por cada fase, en la Fig. 10, se detalla los datos de operación del sistema, los siguientes valores obtenidos en el generador síncrono suministrando esta carga son los siguientes:

Voltaje: 67,84 V.

Velocidad: 1469 rev/min.

Corriente: 0,7 A.

Frecuencia: 19,0 Hz. Con un periodo por ciclo de 51,28 ms.

Tiempo de duración del transitorio: 12,72 s.

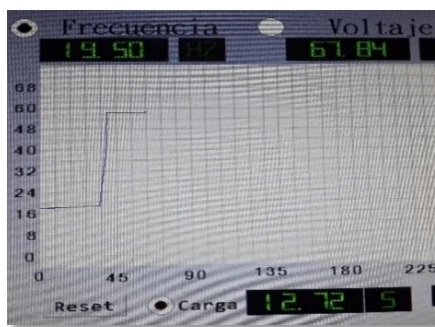


Figura 10. Respuesta de operación del generador a una resistencia por fase de 171.43Ω.

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 s.

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.

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

$$X_L = 2\pi fL \quad (5)$$

$$X_L = 286,51 \Omega$$

La impedancia resultante es:

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (6)$$

$$Z_3 = 414,83 \angle 43,68^\circ [\Omega]$$

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

Voltaje: 173,92 V.

Velocidad: 1612 rev/min.

Frecuencia: 53,47 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 4,64 s.

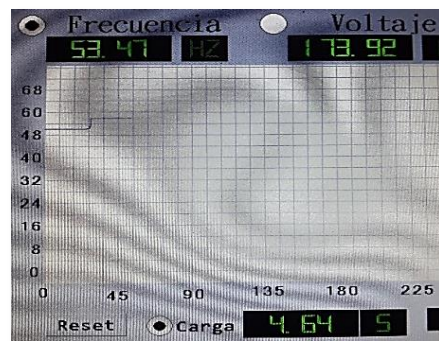


Figura 11. Respuesta de operación del generador a una carga R, L por fase de $300\Omega + j286.51 \Omega$.

4.4. Modelo de Carga Resistiva Capacitiva e Inductiva

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

Se modeló una 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.

$$X_L = 2\pi fL \quad (7)$$

$$X_L = 1146,055 \Omega$$

$$X_C = 1269,17 \Omega$$

La impedancia resultante es:

$$Z = R + j(X_L - X_C) \tag{8}$$

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

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.

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

Voltaje: 150,52 V.

Velocidad: 1253 rev/min.

Frecuencia: 39,70 Hz.

Tiempo de duración del transitorio: 5,80 s.

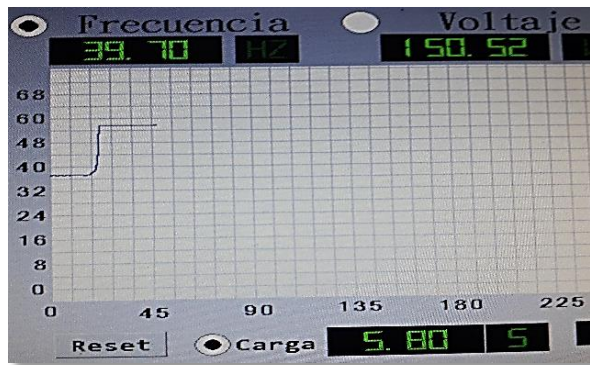


Figura 12. Respuesta de operación del sistema de generación con una carga máxima en serie R, L, C.

4.5. Análisis con la banda de operación

Para verificar el comportamiento del generador se desarrolló un sistema que permite graficar la banda de operación de frecuencia en un +/- 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_T de 171.43 ohmios por cada fase en este análisis se asignó una frecuencia nominal de 57 Hz y una desviación de +/- 10%.

En la Fig. 13, 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.

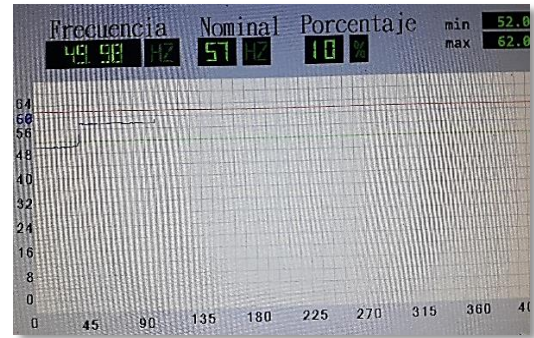


Figura 13. Indicador de baja frecuencia cuando supera la banda mínima de operación de 52Hz.

Producto de inyectar dicha carga se observa en la Fig. 13, 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.

Para este análisis se asigna 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 como se muestra en la Fig. 14.

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

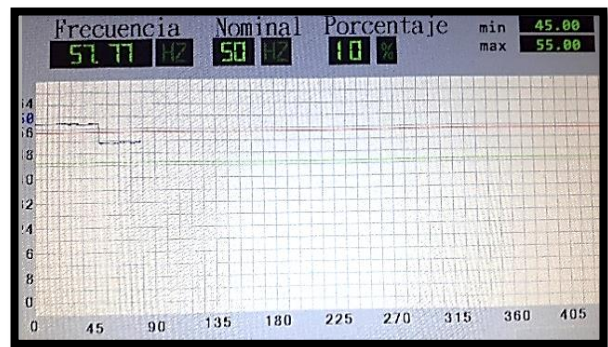


Figura 14. Indicador de alta frecuencia cuando supera la banda de operación máxima de 55Hz.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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 optoacolorador 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 varía ante cualquier perturbación de la carga fue necesaria 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.

Para obtener la velocidad del generador se optó por la utilización de un sensor de efecto Hall, que permite detectar 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%.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Grainger y W. Stevenson Jr, Analisis de Sistemas de Potencia, Mexico: McGrawHill, 2001.
- [2] L. Vargas, «Sistemas de Excitación de Máquinas Sincrónicas,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2005.
- [3] P. Ledesma, «Regulación de frecuencia y potencia,» Madrid, 2008.
- [4] 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.
- [5] O. Gerrero Orozco, Analisis al Optoacoplador, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [6] R. C. Gobernador de Velocidad, Mexico: Universidad Nacional Experimental Antonio José de Sucre, 2012.
- [7] P. Ledesma, «Regulación de frecuencia y potencia,» Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2008.
- [8] G. F. Medina, Análisis y control de frecuencia de sistemas eléctricos de potencia en estado de emergencia., España : Nuevo León, 1995.



Xavier Alfonso Proaño Maldonado.-

Nació en Latacunga el 20 de octubre de 1985, Ecuador. Realizó sus estudios de bachillerato en el colegio Ramón Barba Naranjo, donde obtuvo su título de bachiller en electricidad en el año 2003; Luego realizó sus estudios superiores en la Escuela

Politécnica Nacional, donde se graduó como Ingeniero Eléctrico en el año 2010 en la ciudad de Quito; Finalmente su título de cuarto nivel lo obtiene en la Universidad Técnica de Cotopaxi en la cual se graduó como Magister en Gestión de Energías en el año 2013; su campo de estudio se encuentra relacionado con sistemas eléctricos de potencia.



Wilian Patricio Guamán Cuenca. -

Nació en Riobamba, Ecuador en 1989. Recibió su título de Ingeniero en Electromecánica por la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" en 2013 y su título de Master Universitario en Ingeniería de la Energía por la

Universidad Politécnica de Madrid en 2017. Actualmente trabaja como docente tiempo completo en la carrera de Electricidad de la Universidad Técnica de Cotopaxi y sus campos de investigación están relacionados con el análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia y los Mercados Eléctricos.



Marlon Alexander Cerna Pacheco.-

Nació en Latacunga, Ecuador en 1996. Recibió el título de Bachiller Técnico en Instalaciones Equipos y Maquinas Eléctricas en el Instituto "Ramón Barba Naranjo" en 2013. Su título de Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de

Potencia, lo obtuvo en la Universidad Técnica de Cotopaxi.



**Leoncio Medardo
Jiménez Jiménez.-**

Nació en Salcedo, Ecuador en 1995. Recibió el título de Bachiller Técnico en Instalaciones Equipos y Maquinas Eléctricas en el Instituto “Ramón Barba Naranjo” en 2013. Su título de Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de

Potencia, lo obtuvo en la Universidad Técnica de Cotopaxi.