

# Diseño e implementación de un Registrador de Disturbios de frecuencia para análisis dinámico de sistemas eléctricos de potencia

M. D. Dávila

C. E. Landázuri

*Universidad Politécnica Salesiana*

**Resumen—** Diseño e implementación de un equipo de precisión para registrar la frecuencia de la red eléctrica en la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur de la ciudad de Cuenca. Descripción de las aplicaciones relacionadas con el equipo en el análisis dinámico de sistemas eléctricos de potencia y en redes de medición de frecuencia.

**Palabras Clave—** Red de medición de Frecuencia, Registrador de Disturbios de Frecuencia, Diseño electrónico, Análisis dinámico de Sistemas de Potencia

**Abstract—** The design and implementation of a precision recorder to be used for the electric network of the Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (Regional South Center Electricity Company) in the city of Cuenca is presented in this paper. A description of the equipment applications for dynamic analysis of electric power systems and grid frequency measurement is also depicted.

**Index Terms—** Grid Frequency Measurement, Frequency Disturbance Recorder, Electronic Design, Dynamic Analysis of Power Systems.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el presente ensayo se tratará el diseño eléctrico y electrónico de un prototipo registrador de disturbios de frecuencia para la red de distribución de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. de la ciudad de Cuenca. En el primer capítulo se tratará el diseño electrónico tanto a nivel de software como de firmware y hardware, el diseño del equipo en función de las necesidades de la empresa, partiendo de la condición de construir un equipo de precisión, con características superiores a las ofrecidas en el mercado y de bajo costo.

En el segundo capítulo se revisa el diseño del software de control y visualización del equipo, así también como las características de análisis diseñadas para el caso. Se realiza un análisis descriptivo de las características de precisión y operación logradas con el diseño planteado.

Por último, en el tercer capítulo se revisará las aplicaciones de equipos similares en redes inteligentes de medición de frecuencia, las cuales se aplican en mercados eléctricos en competencia, y en sistemas de más de un generador que puedan controlar la frecuencia del sistema. Se describen de las aplicaciones referentes al diseño logrado como son: Medición de frecuencia para la red de distribución de la Centro Sur, aplicación para una red de medición de frecuencia nacional, esquemas de alivio de carga en base a datos en tiempo real, análisis de frecuencia inter-área.

## 2. DISEÑO ELECTRÓNICO DE HARDWARE, FIRMWARE Y SOFTWARE

El diseño del Registrador de Disturbios de frecuencia constituye un desarrollo a medida, basado en la necesidad de la empresa de la medición de frecuencia en la red de distribución. Los frecuencímetros comerciales analizados no cumplen con las características de precisión y visualización requeridas, por lo que se realizó un diseño integral para esta aplicación. Los aspectos más importantes del diseño se tratarán a continuación. Los requerimientos de diseños planteados por la CENTROSUR fueron los siguientes:

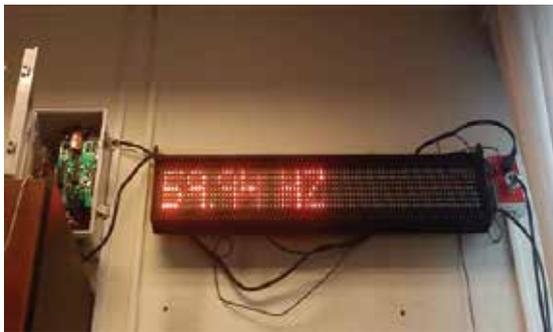
- Diseño de un equipo de medición y registro de frecuencia de precisión en la red eléctrica en baja tensión.
- El equipo debe comunicarse con un software de aplicación mediante el protocolo USB<sup>1</sup>, y registrar la frecuencia en un dispositivo de memoria.
- El equipo debe mantener un registro de frecuencia con información sobre la hora y fecha de la medición. Esta información horaria debe obtenerse mediante un GPS<sup>2</sup>.
- El equipo debe diseñarse teniendo en cuenta la optimización de recursos, y alcanzar el menor costo posible de construcción e implementación.

Con estos requisitos en consideración, se diseñó el prototipo del registrador de frecuencia (fig.1). El cual

<sup>1</sup> Universal Serial Bus o bus serial universal

<sup>2</sup> Global Positioning System o sistema de posicionamiento global

consta de dos partes: La caja de control donde se alberga el circuito electrónico y los elementos de comunicación, y una matriz de LEDs<sup>3</sup> para la visualización de la frecuencia del sistema.



**Figura 1: Registrador de frecuencia instalado en el centro de contacto de la CENTROSUR**

El circuito electrónico diseñado consta de las siguientes características principales:

- Visualización de frecuencia mediante una matriz de LEDs.
- Comunicación mediante Ethernet y USB.
- Obtención de hora y fecha mediante GPS
- Registro de hora y fecha con RTC<sup>4</sup>.
- Registro de frecuencia en memoria SD<sup>5</sup>.

El diseño del registrador de frecuencia se basa en dos circuitos principales, uno de control y comunicación, y otro dedicado a la adquisición de la señal, detección de cruce por cero para la medición de frecuencia, y filtrado. El circuito de control tiene dos microcontroladores encargados del funcionamiento total del equipo. El microcontrolador principal permite la comunicación del equipo con el computador, además realiza la labor de adquisición de datos del GPS y la escritura en la memoria SD. El diseño de firmware en ambos microcontroladores se detalla a continuación:

## 2.1. Diseño de Firmware<sup>6</sup>

El diseño del firmware en el equipo se lo realizó en dos microcontroladores cada uno programado en lenguaje Basic para la fácil comprensión y mantenimiento del personal encargado.

<sup>3</sup> Light Emitting Diode o diodo emisor de luz.

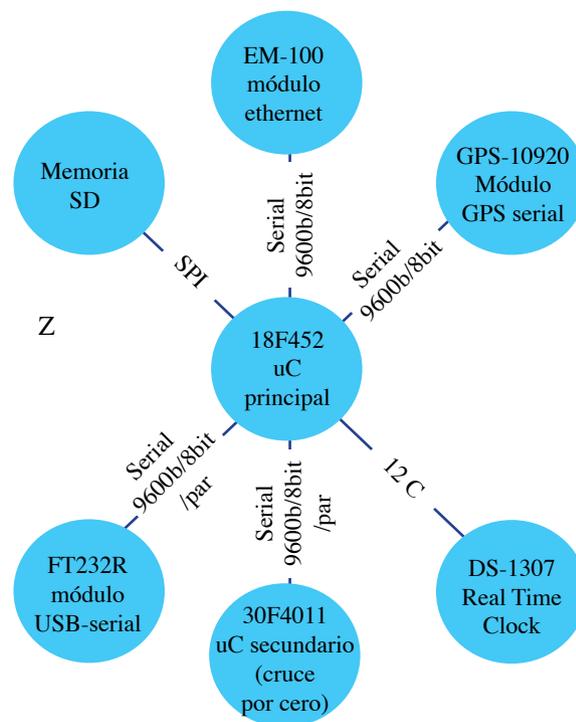
<sup>4</sup> Real Time Clock o reloj de tiempo real. Es un circuito integrado de memoria que graba la hora y fecha.

<sup>5</sup> Secure Digital. Memoria extraíble de uso común en dispositivos electrónicos de consumo.

<sup>6</sup> El firmware es el código de programación que se utiliza en los microcontroladores.

## a) Microcontrolador Principal

El microcontrolador que actúa como principal en el equipo es el PIC18F452 de Microchip [1] (de ahora en adelante llamado U1). Se encuentra funcionando a 20MHz, y es el encargado de controlar la comunicación con los módulos USB, Ethernet, GPS, RTC y SD. Además interviene en la comunicación con el microcontrolador de cruce por cero. El diseño se basa en un diagrama de conexiones en estrella (fig.2) y la comunicación utilizada entre los módulos es del tipo serial. El firmware utilizado en el microcontrolador principal coordina las tareas de comunicación del equipo (fig.3), para lo cual se programaron subrutinas de lectura de frecuencia y lectura de los datos del GPS y del RTC, la escritura y lectura de la memoria SD, el control del módulo Ethernet, y del módulo USB.



**Figura 2: Diagrama de conexiones entre el microcontrolador principal y los módulos de comunicación**

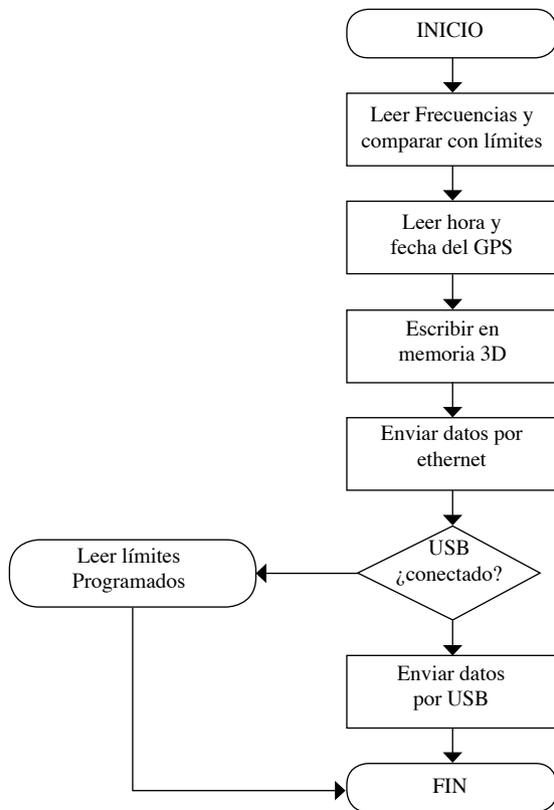


Figura 3: Diagrama de flujo principal

Para la actualización automática de la hora y fecha utilizada para los históricos de frecuencia, se utilizó un Módulo GPS-10920 Venus [2] (fig. 4). Este módulo permite la adquisición de datos de hora y fecha en formato NMEA<sup>7</sup> de manera serial, con lo que el usuario puede interpretar directamente la trama requerida para la programación.

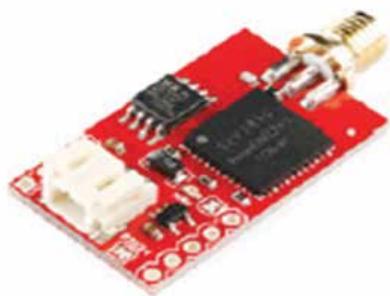


Figura 4: Módulo GPS-10920 [2]

Para la comunicación USB entre el equipo y un computador, se utilizó un convertor serial-USB FT232R [3] (fig.5). Es un módulo ampliamente utilizado en el mercado, por lo que el mantenimiento del mismo se puede realizar fácilmente. Es un convertor serial-USB transparente, permitiendo

<sup>7</sup> National Marine Electronics Association. Es un formato de datos utilizado en módulos GPS donde se expresa la hora, fecha, y posición del equipo.

enviar datos entre el microcontrolador principal y la aplicación de control en LabView.

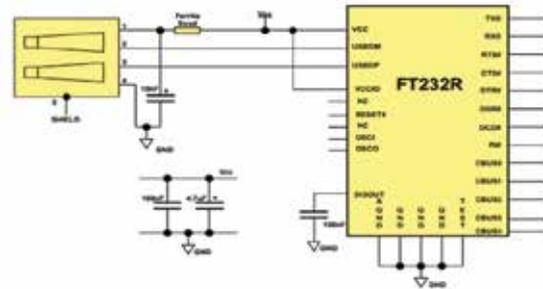


Figura 5: Diagrama de conexión básico del FTDI FT232R [3]

### b) Microcontrolador secundario

El microcontrolador secundario utilizado es el DsPIC30F4011 de microchip [4] (de ahora en adelante nombrado U2), el cual funciona a 80MHz. U2 se encarga de capturar la frecuencia de la red mediante múltiples entradas tanto analógicas como digitales. Al funcionar a altas frecuencias, permite una resolución óptima para la aplicación puntual requerida. U2 tiene solamente dos tareas dentro del diseño, capturar la frecuencia en todas sus entradas obteniendo el promedio de las mismas, y enviar el dato de frecuencia por su puerto serial a U1 (fig.6).

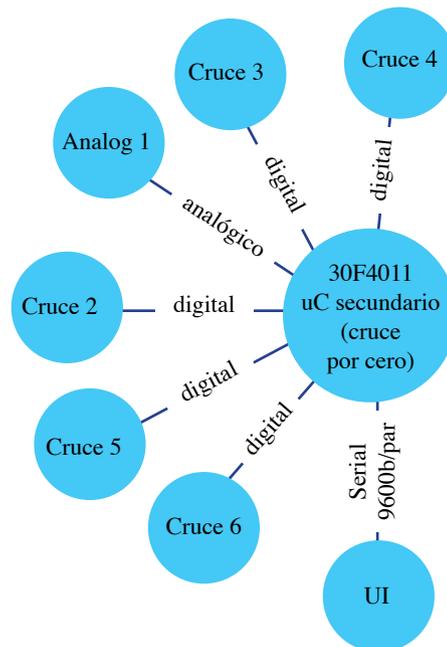


Figura 6: Diagrama de conexión del microcontrolador secundario U2

El firmware utilizado en el microcontrolador secundario coordina las tareas de medición de cruces por cero mediante una entrada analógica y una digital, compara los resultados de ambas entradas y obtiene un promedio de la frecuencia medida (fig.7).

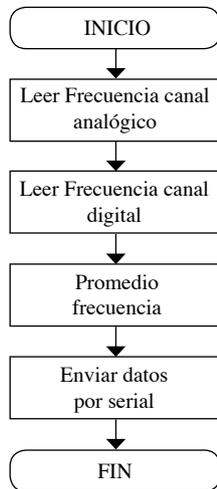


Figura 7: Diagrama de flujo para el microcontrolador U2

## 2.2. Diseño de hardware

La placa de control se diseñó en función de las hojas de aplicación de los diferentes integrados utilizados. Se procuró mantener el diseño con un factor de forma de placa de entrenamiento, es decir, dejando los pines de microcontroladores y módulos conectados a peinetas, lo cual permite el posterior análisis de las señales utilizadas (fig.8).

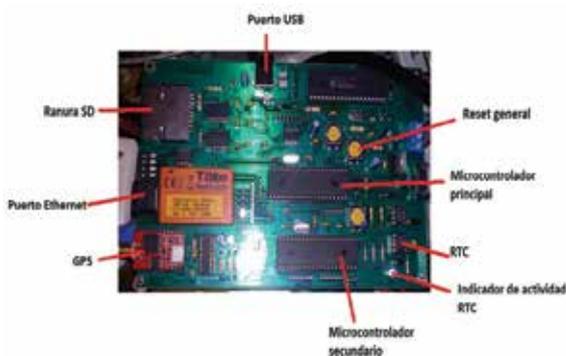


Figura 8: Placa de control

A continuación se explicarán los esquemas en bloques más importantes.

### a) Comunicación GPS

El módulo GPS se conecta al microcontrolador principal mediante un puerto serial virtual creado en el compilador y se cuenta con una batería de respaldo para el arranque rápido del módulo. El diseño de la placa de control se realizó considerando la conexión de una antena externa (fig.9).



Figura 9: Ubicación del módulo GPS en la placa de control

### b) Comunicación Ethernet

El módulo Ethernet se conecta a U1 mediante un Puerto serial por hardware, además se provee al usuario de LEDs de visualización para observar el correcto funcionamiento del módulo (fig.10).

### a) Comunicación USB

La comunicación de U1 con el módulo USB se realiza mediante un puerto serial virtual creado en el compilador. Se utiliza una peinetita de configuración para medir las señales de comunicación (fig.11).

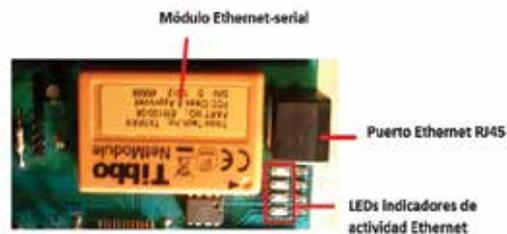


Figura 10: Ubicación del módulo Ethernet-serial en la placa de control

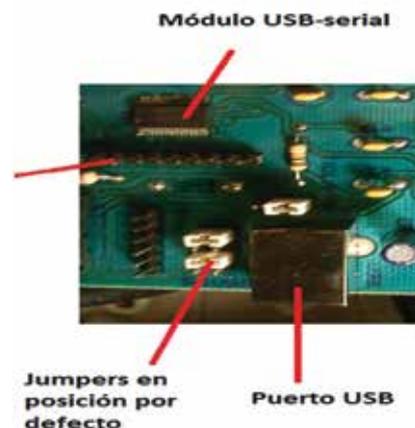


Figura 11: Ubicación del módulo serial-USB

### b) Comunicación con la memoria SD

Con el objetivo de almacenar históricos de frecuencia, se utiliza una memoria SD, la cual se comunica con U1 mediante un puerto serial por hardware. Se utilizan además dos circuitos integrados para la conversión de niveles lógicos de 3.3 voltios (LVTTTL) a 5 voltios (TTL) (fig.12).



Figura 12: Ubicación de la interfaz con la memoria SD

### 2.3. Diseño del software de control

El frecuencímetro permite la comunicación con un software de control en el computador. El software se diseñó en LabView 2010, permitiendo una interfaz de usuario de altas prestaciones (fig.13). Nos permite visualizar los límites de frecuencia, alarmas, frecuencia medida y hora del equipo. Además el software es la herramienta de análisis encargada de visualizar los históricos de frecuencia guardados en la memoria SD del equipo (fig.14).

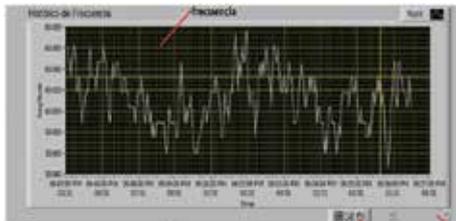


Figura 13: Ventanas del software de monitoreo

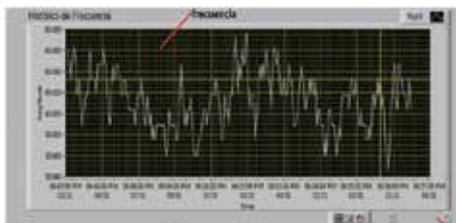


Figura 14: Ventana análisis

### 2.4. Características Técnicas finales

El diseño a medida del registrador de disturbios de frecuencia de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. de la ciudad de Cuenca tiene las siguientes características técnicas:

- Microcontrolador principal: PIC18f452 a 20MHz
- Microcontrolador para cruce por cero: DSPIC30F4011 a 80MHz
- Comunicación USB mediante módulo FTDI FT232R
- Comunicación Ethernet mediante módulo Tibbo Em-100
- Sincronización de hora y fecha mediante módulo GPS

- Reloj de tiempo real incorporado
- Recopilación de históricos de frecuencia mediante memoria SD
- Precisión de +/-15mHz
- Software de visualización en tiempo real, y de análisis de históricos en LabView

## 3. APLICACIONES EN REDES DE MEDICIÓN DE FRECUENCIA

En los sistemas eléctricos de potencia el control de frecuencia es una actividad fundamental para mantener la estabilidad del sistema y evitar un apagón general en el caso de variaciones de carga. Para el control de la frecuencia se utilizan equipos de medición en cada unidad de generación con el fin de responder a dichas variaciones de carga compensando la alimentación de la máquina síncrona. Para tener una idea global de las aplicaciones de un equipo de medición de frecuencia con las características del prototipo diseñado en este ensayo debemos conocer las implicaciones de la variación de frecuencia en pequeña escala.

El conocimiento general que tenemos del SNI<sup>8</sup> nos indica que la frecuencia es la misma en todo el sistema, y es dictada por la central hidroeléctrica Hidropaute. Además conocemos que existen pequeñas variaciones de frecuencia (fig.15), las cuales se compensan con el AGC<sup>9</sup> existente y el control primario de frecuencia de las máquinas síncronas. Estas variaciones de frecuencia se encuentran en el orden de los milihercios, y normalmente no interfieren con la estabilidad del SNI pues si las frecuencias entre generadores son muy grandes, el control de frecuencia hace que las unidades de menor potencia sean las que se desconecten primero.

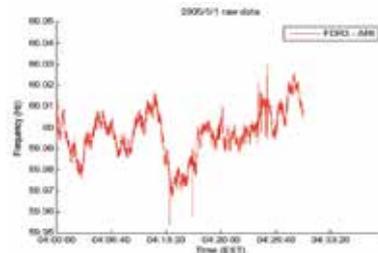


Figura 15: Variaciones de frecuencia comunes en un sistema eléctrico de potencia [5]

Este escenario cambiar cuando la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair entre en funcionamiento pues tendríamos dos grandes generadores disputando el control de frecuencia, es decir, podríamos pensar en un AGC de dos áreas principales. Así, por la cercanía, Hidropaute podría influir de mayor manera en la frecuencia de la zona

<sup>8</sup> Sistema Nacional Interconectado

<sup>9</sup> Control Automático de Generación

sur del país, mientras que Coca Codo Sinclair podría tener mayor influencia en la zona norte. Por lo tanto las frecuencias inter-área (o en este caso se puede analizar como inter-generadores) deben permanecer muy próximas para evitar la salida de sincronismo de las maquinas.

El efecto de tener múltiples generadores de gran potencia que pueden disputar el control de frecuencia, es que momentáneamente existan varias frecuencias dentro de un mismo sistema nacional interconectado [5]. Esto no quiere decir que el sistema funcione en frecuencias muy separadas unas de otras, sino que conforme añadimos más precisión a los sistemas de medición, se observa una variación de frecuencia considerable (fig. 16).

En la figura 16 se muestra la distribución de las diferentes frecuencias a las que trabaja el sistema nacional interconectado de Estados Unidos []. La frecuencia nominal es de 60Hz, pero como se observa existen sectores que trabajan desde 59.98Hz (azul) hasta 60.02Hz (rojo), es decir, existe una diferencia de 0.04Hz entre diferentes sectores del sistema. Aunque esta variación no parezca significativa, estudios realizados en el sistema de Estados Unidos [5] demuestran que estas variaciones se dan en eventos como el apagón general del 2011 en la Costa Este (fig. 17).

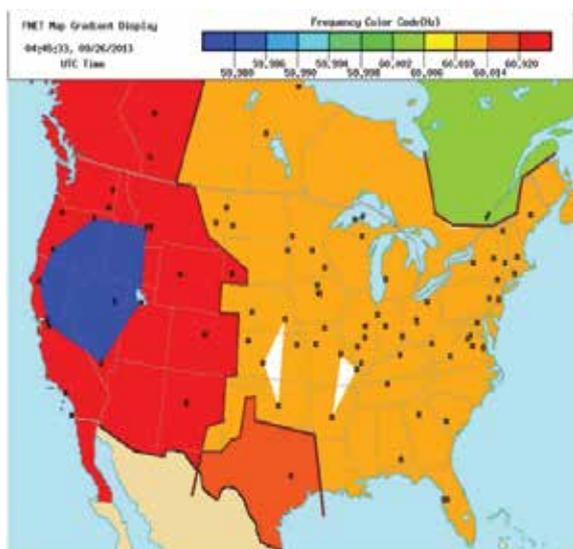


Figura 16: Mapa de frecuencias del sistema de potencia nacional interconectado de Estados Unidos [6]

Como se puede observar en la figura 17, el evento que inicia el apagón causa un aumento de frecuencia (60.170Hz), en ese momento el control primario varía las alimentaciones de las máquinas síncronas logrando una disminución de la frecuencia de los generadores, pero debido a la naturaleza de los sistemas de control y

a la inercia de las masas rotóricas de los generadores, la frecuencia disminuye a niveles normales (60.03Hz) pero las variaciones duran aproximadamente 10 segundos, lo que ocasiona la salida de sincronismo de varios generadores.

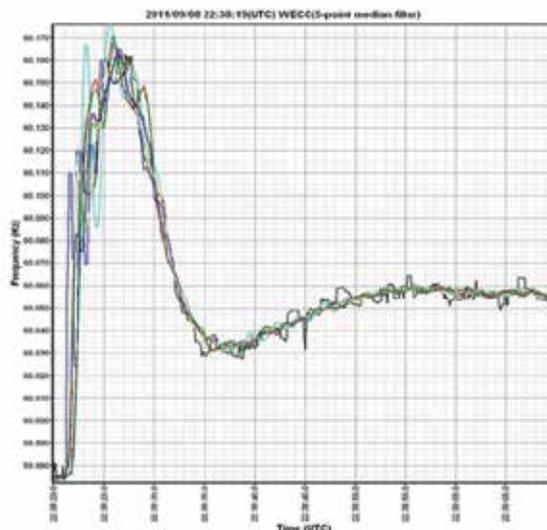


Figura 17: Variación de frecuencia de los generadores en el apagón del 2011 en la Costa Este de Estados Unidos [8]

Por lo tanto, las variaciones muy pequeñas de frecuencia que no sean adecuadamente informadas al centro de control de energía pueden ocasionar inestabilidad en el sistema de potencia. Este comportamiento del sistema es un estudio nuevo, por lo que, las principales aplicaciones de equipos de medición y registro de frecuencia como el diseñado en el presente ensayo, son las siguientes:

#### a) Medición de frecuencia local

En cuanto a la realidad del sistema de distribución de la ciudad de Cuenca, se tienen dos conexiones al Sistema Nacional Interconectado, pero si estas conexiones fallan, el sistema de distribución funciona como isla. Para el control de frecuencia en esta situación la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. (CENTROSUR) optó por el diseño del prototipo de monitoreo y registro de frecuencia tratado en este ensayo. Pero esta aplicación es la más simple que se puede tratar con un equipo de las características

#### b) Red de frecuencia

En el caso del Ecuador, al mantener una estructura de monopolio en generación, transmisión y distribución, la comunicación de parámetros de frecuencia se realiza directamente sobre la red de telecomunicaciones existente (radiofrecuencia y fibra óptica), donde las mediciones se realizan

en generadores y en subestaciones del sistema de transmisión.

En sistemas muy grandes o que funcionan en competencia de generación (como en el caso de Estados Unidos), se utilizan equipos de medición de frecuencia distribuidos en las redes de cada proveedor, los cuales envían la información sobre dicha medición al centro de control de energía de cada país, es decir, la infraestructura de comunicación es independiente una de otra para cada zona del AGC. Esto ocasiona un inconveniente, pues la información sobre parámetros eléctricos como la frecuencia, pueden demorar mucho tiempo en llegar al centro de control, ya que dependen del despliegue y desempeño de las redes de telecomunicaciones de los proveedores. Este problema ha causado apagones generales por variaciones muy pequeñas de frecuencia.

Para solucionar dicho inconveniente, se creó una red de registradores de frecuencia conocida como FNET (Frequency Monitoring Network o Red de monitoreo de Frecuencia), la cual utiliza la red de telecomunicaciones local [5], es decir, utiliza las plataformas de acceso a internet de la población (fig.18).

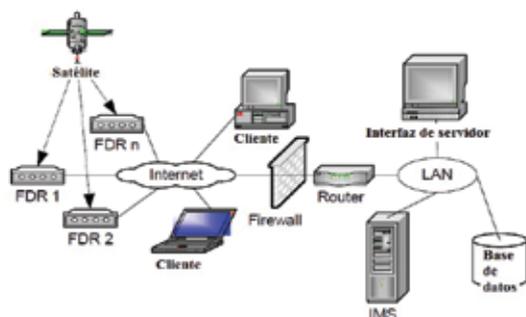


Figura 18: FNET diseñada para el monitoreo de frecuencia del sistema de potencia estadounidense

Esto implica que los equipos de medición de frecuencia se conectan en la red de baja tensión, lo que permite la obtención de parámetros directamente en la carga del sistema, y además logra que se mantenga una independencia del estado de la plataforma de telecomunicaciones de cada proveedor, migrando la comunicación de parámetros a las redes públicas y privadas para servicio de internet [5]. El equipo utilizado recibe el nombre de FDR (Frequency Disturbance Recorder o Registrador de Disturbios de Frecuencia) el cual se diferencia de los PMU (Phasor Measurement Unit o Unidades de Medición de Fasores) pues utiliza la red de internet pública para la comunicación (fig. 19).



Figura 19: Registrador de disturbios de frecuencia [5]

Este modelo de red de medición presenta una ventaja muy importante pues por experiencia las redes de comunicación de las empresas de generación y transmisión pueden fallar en momentos críticos, mientras que la probabilidad de que los sistemas de telecomunicaciones para usuarios privados fallen es muy baja.

### c) Esquemas de alivio de carga con información en tiempo real

Los esquemas de alivio de carga permiten recuperar la frecuencia nominal ante variaciones grandes de carga en el SNI. Estos esquemas se realizan en base a simulaciones del comportamiento del sistema y mediante históricos, lo cual introduce una posibilidad de error. Este error podría disminuirse con un monitoreo en tiempo real del sistema, logrando tomar decisiones con datos instantáneos.

Una red de frecuencia distribuida en el país, permitiría la obtención de datos instantáneos de frecuencia para mejorar el histórico en función del sector donde se vaya a aplicar el esquema de alivio de carga, es decir, consistiría en una herramienta de diseño, corrección y planificación para el ingeniero encargado de establecer los esquemas.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El registrador de disturbios de frecuencia diseñado cumple con las características solicitadas por la Centrosur, con lo que el Departamento de Supervisión y Operación cuenta con un instrumento para monitorear la frecuencia de la red eléctrica en caso de funcionamiento como isla. Se observó que la técnica de medición de cruce por cero utilizada, logró una precisión de  $\pm 15$  mHz, lo cual es aceptable para la aplicación requerida, pero insuficiente para análisis más avanzados.

El diseño planteado, permite la medición de frecuencia de la red eléctrica, sin la dependencia del anillo de fibra óptica, o equipos de comunicación propios de la empresa, los cuales en base al historial analizado no siempre cumplen con los criterios de confiabilidad requeridos para un correcto análisis

dinámico de frecuencia. Por lo tanto, la transmisión de datos de medición de frecuencia a través de internet, lograría la transmisión en tiempo real del estado del sistema en el punto de carga, sin la necesidad de una red de comunicación propia.

El diseño tiene características de comunicación que permiten hacer uso de la información adquirida para su utilización dentro de una red inteligente de medición de frecuencia remota directamente en el usuario final. Una red inteligente de frecuencia permite al operador del sistema eléctrico, tomar decisiones de control, basado en el comportamiento dinámico instantáneo del sistema. Las mediciones de frecuencia en la red de baja tensión, permiten un acercamiento más real al comportamiento del sistema, lo que logra un control más apropiado en estudios de esquemas de alivio de carga, y comportamiento dinámico antes de un apagón general (blackout)..

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Microchip Technology Incorporated (2006). "PIC18FXX2 Data Sheet: High-Performance, Enhanced Flash Microcontrollers with 10-Bit A/D". Estados Unidos.
- [2] Sparkfun Electronics (2013). "Venus GPS Logger with SMA Connector". Documento en línea disponible en <https://www.sparkfun.com/products/10920>
- [3] Future Technology Devices International Ltd (2010). "FT232R USB UART IC Datasheet Version 2.10". Documento en línea disponible en [http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf). Estados Unidos.
- [4] Microchip Technology Incorporated (2005). "DSPIC30F4011/4012 Data Sheet: High Performance Digital Signal Controllers". Documento en línea disponible en <http://www.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70135c.pdf>. Estados Unidos.
- [5] Zhan Zhong (2005). "Power Systems Dynamic Monitoring System Design and Applications". Tesis para la obtención del título de Doctor en Filosofía (PhD) en ingeniería eléctrica y computación. Laboratorio de tecnología de

información de sistemas de potencia de la universidad de Tennessee. Virginia, Estados Unidos.

- [6] Laboratorio de tecnología de información de sistemas de potencia de la universidad de Tennessee (2013). "U.S. Frequency Gradient Map". Documento en línea disponible en <http://fnetpublic.utk.edu/gradientmap.html>
- [7] Laboratorio de tecnología de información de sistemas de potencia de la universidad de Tennessee (2013). "World-Wide Frequency Map". Documento en línea disponible en <http://powerit.utk.edu/worldmap/>
- [8] Laboratorio de tecnología de información de sistemas de potencia de la universidad de Tennessee (2013). "Southwest blackout". Documento en línea disponible en <http://fnetpublic.utk.edu/eventsamples/20110908.jpg>



Carlos Emilio Landázuri Paredes.- Nació en Quito, Ecuador en 1979. Recibió su título de Ingeniero en Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana en 2004. Actualmente se encuentra en proceso de obtención de su título de Master en Telemática en la Universidad de Cuenca. Su campo de investigación está relacionado con el área de control y telecomunicaciones para sistemas SCADA, automatización de subestaciones eléctricas y automatización de los sistemas eléctricos de distribución.



Miguel Alberto Dávila Sacoto.- Nació en Cuenca, el 4 de julio de 1988. Ingeniero Electrónico con mención en Sistemas Industriales y Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana en 2012. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Actualmente se desempeña como docente de Instalaciones Eléctricas de Interior, Automatismos y Cuadros Eléctricos, e Instalaciones Automatizadas en Viviendas y Edificios en la Unidad Educativa Técnico Salesiano.