

GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LA FRECUENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

XM Compañía de Expertos en Mercados S.A E.S.P – Empresa del grupo ISA

Dirección: Calle 12 Sur N. 18-168 Medellín - Colombia
Código Postal: 8915
Teléfono: (04) 3252270
Fax: (04) 3170848
E-Mail: info@XM.com.co

Autores:

PABLO HERNÁN CORREDOR	<i>phcorredor@ XM.com.co</i>
JORGE ENRIQUE GÓMEZ C.	<i>jegomez@ XM.com.co</i>
RICAUARTE PRÉSIGA DUQUE	<i>rjpresiga@ XM.com.co</i>
LUIS JULIÁN ZULUAGA L.	<i>ljzuluaga@ XM.com.co</i>
JORGE ESTEBAN TOBÓN V.	<i>jetobon@ XM.com.co</i>

PALABRAS-CLAVE: Calidad de potencia, flicker, sags, swells, oscilaciones de potencia, estabilidad de frecuencia, estabilidad de pequeña señal.

RESUMEN – La calidad en el suministro de la potencia eléctrica (CPE) es una característica de servicio inherente, irrenunciable y necesaria para facilitar el desarrollo tecnológico y la competitividad de las regiones y de los países. Además, ante la evidencia de la vulnerabilidad de las cargas industriales, comerciales y residenciales frente a las perturbaciones, el tema de calidad de la potencia exige una mayor atención. Paralelamente, la gestión del operador del sistema resultaría infructuosa sin la participación efectiva de los agentes para mantener la calidad de la potencia dentro de un marco de referencia, y sin el seguimiento apropiado para tomar acciones de mejoramiento, tanto a niveles de transmisión como de distribución.

Cuando los recursos del sistema de potencia se ponen a disposición de los usuarios, se realiza el seguimiento a la frecuencia y a la tensión de suministro para evaluar la interacción frente a fenómenos provenientes del sistema de potencia, de los usuarios o de fenómenos externos. Los disturbios en el sistema son variaciones generalmente temporales en la tensión o en la frecuencia que pueden causar mala operación o fallas en equipos.

Para medir, detectar y analizar las perturbaciones en los sistemas eléctricos de potencia es necesario disponer de herramientas apropiadas. Consecuentemente, para realizar gestión en la calidad de la potencia, XM, compañía que opera y administra el mercado energético del Sistema Eléctrico Colombiano y las interconexiones con países vecinos, desarrolló y puso en operación metodologías y equipos de medición y detección de fenómenos que afectan la frecuencia y la tensión. Por lo tanto, el propósito de

este trabajo consiste en describir brevemente las metodologías, desarrollos, resultados y experiencias logradas con estas herramientas actualmente en operación.

1. INTRODUCCIÓN

El término calidad de potencia se emplea en general para calificar las dos principales variables de un sistema eléctrico: la tensión y la frecuencia.

Establecida la continuidad de suministro, para la gestión de la calidad de la potencia se establecen calificadores de la forma de la onda de tensión para juzgar las desviaciones de forma y frecuencia y evaluar el impacto sobre la carga de los usuarios o sobre la operación del sistema de potencia [1, 2]. De allí, se identifican acciones de mejoramiento en el sistema de potencia o en la carga frente a fenómenos controlables, y acciones de mitigación frente a fenómenos no controlables [3].

La calidad de la potencia está influenciada por perturbaciones de diversa naturaleza, fenómenos electromagnéticos, electromecánicos, falla de equipos, características no lineales de la carga, y conexión y desconexión de fuentes de potencia activa y reactiva, entre otros. XM ha ganado esta experiencia en la operación del sistema eléctrico de potencia, y realiza aportes a la calidad tanto en generación y transmisión como en la distribución.

Para la gestión de la calidad de la potencia, se parte de una condición ideal de operación del sistema con un régimen sinusoidal puro de 60 Hz, con ondas de tensión y corriente con amplitudes constantes y normalmente en fase, como se ilustra en la Figura 1. Con este objetivo, XM desarrolló y puso en operación metodologías y equipos de medición y detección de fenómenos que afectan la frecuencia y la tensión a nivel de transmisión y distribución, realizando la

medición en los diferentes niveles de tensión y para frecuencias nominales de 50 o 60 Hz.

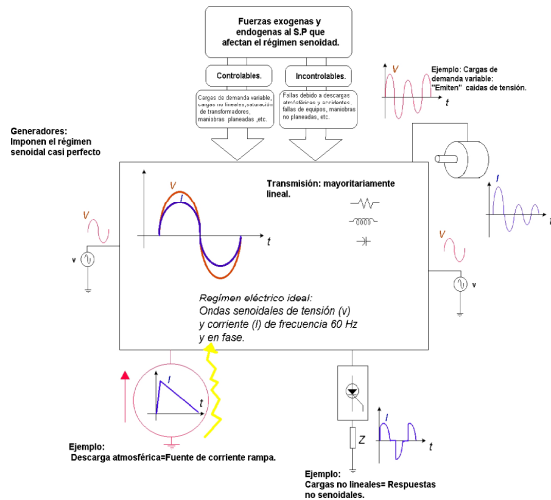


FIG 1. Referencia para la gestión de la potencia [3]

2. CALIDAD DE LA POTENCIA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Según la regulación vigente, el operador de la red es el responsable por la calidad de la potencia y del servicio suministrado a los usuarios conectados a su sistema, y por lo tanto, es necesario establecer criterios de calidad de la potencia y continuidad del servicio con el propósito de dar garantías mínimas, definir indicadores mínimos de calidad, y establecer inclusive criterios de responsabilidad y compensación frente al servicio prestado. En Colombia, diversas resoluciones emitidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) establecen el marco de referencia para la calidad de la potencia, como los códigos de operación, planeación, reglamento de distribución y otras resoluciones complementarias.

Las perturbaciones que afectan la frecuencia, la amplitud y forma de onda de la tensión y la simetría del sistema trifásico provienen del sistema de potencia, de los usuarios o de fenómenos atmosféricos y condiciones ambientales, y presentan duraciones desde fracciones de ciclo, varios ciclos y aún algunos segundos y minutos, siendo además, periódicos o aperiódicos según su naturaleza. Consecuentemente, por su duración, magnitud y contenido espectral, la Guía IEEE 1159-1995 los clasifica en siete categorías:

- Variaciones de frecuencia
- Transitorios electromagnéticos
- Variaciones de corta duración (Sags, Swells)

- Variaciones de larga duración (Interrupciones, bajas tensiones, sobretensiones)
- Desbalances
- Distorsión de la forma de onda
- Fluctuaciones de tensión (Flicker)

Conviene recordar que la frecuencia, por su naturaleza inercial, es una característica global del sistema y para su seguimiento una red de medición apropiada requiere pocas estaciones de medida, mientras que la tensión presenta una naturaleza puramente local en función de la perturbación y de las fuentes de potencia reactiva, y por lo tanto, para su seguimiento requiere múltiples equipos de medición según la cobertura deseada.

3. GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LA FRECUENCIA

a) Frecuencia

Según la regulación vigente, la frecuencia nominal del sistema Colombiano es de 60 Hz y su rango de variación, en condiciones normales de operación, comprende una franja de calidad 59.8-60.2 Hz. Frente a perturbaciones, estados de emergencia, déficit energético y períodos de restablecimiento, la frecuencia puede variar entre 57.5 y 63.0 Hz por un período de quince (15) segundos.

Para realizar la gestión de la calidad de la frecuencia, XM desarrolló metodologías e instaló un conjunto de registradores en subestaciones y centros de control, y los integró a la red WAN (Wide Area Network) de Interconexión Eléctrica –ISA-.

b) Oscilaciones electromecánicas y la frecuencia

Las oscilaciones de potencia han alcanzado mayor importancia en la medida que se han extendido las interconexiones por su impacto sobre la operación de los sistemas. Adicionalmente, una oscilación del sistema puede afectar la calidad de la potencia. Evidentemente, este fenómeno modula la tensión y la corriente en sus amplitudes y produce variaciones en la frecuencia. La caracterización de los modos de oscilación es competencia de la estabilidad de pequeña señal [2]. Varias técnicas y herramientas se han desarrollado con este propósito, el análisis modal y la identificación modal [1, 3]. El análisis modal es una herramienta de simulación, mientras que la identificación modal está fundamentada en el procesamiento de datos registrados provenientes de simulaciones o de medidas de tiempo real. Estas dos técnicas se complementan mutuamente.

Un modo de oscilación se caracteriza por su frecuencia, el factor de amortiguamiento y los generadores que participan en él.

4. GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LA TENSIÓN

La calidad del servicio de la energía eléctrica se mide teniendo en cuenta dos grandes aspectos: calidad de suministro y calidad de potencia. Las variables usadas para evaluar la calidad de suministro son la cantidad de interrupciones y su duración y con ellas se califica la presencia o no del servicio (ausencia de tensión). La CREG ha reglamentado lo relacionado con la continuidad del servicio de energía eléctrica, estableciendo límites y metodologías de compensación a los usuarios por el incumplimiento de los límites de suministro fijados para los operadores de red.

La CREG, siguiendo los lineamientos europeos, reglamenta en Colombia la Calidad de Potencia - CPE - como "...el conjunto de calificadores de fenómenos inherentes a la forma de onda de la tensión, que permiten juzgar el valor de las desviaciones de la tensión instantánea con respecto a su forma y frecuencia estándar, así como el efecto que dichas desviaciones pueden tener sobre los equipos eléctricos u otros sistemas." [7]

En esta norma establece la tensión como única medida determinante para evaluar la CPE, exigiendo a las empresas prestadoras del servicio u operadores de red, fuentes lo suficientemente fuertes y de buena calidad que le permitan al usuario el uso libre de la energía.

De igual forma, esta norma fija seis variables/indicadores como calificadores únicos de la CPE, estos son: THDV (Distorsión Armónica Total de Voltaje), desbalances (relación entre el voltaje de secuencia negativa y el voltaje de secuencia positiva), hundimientos y picos, continuidad del servicio, desviación estacionaria de la tensión RMS, y PST (Perceptibilidad de Corto Tiempo).

a) Oscilaciones electromecánicas y calidad de la tensión.

En general, una oscilación de potencia se ve reflejada como una modulación en amplitud de la forma onda del voltaje (figura 2). Esta modulación afecta a los indicadores básicos de la CPE, produciendo alarmas y provocando el registro de fenómenos derivados o asociados como Picos (Swell's), Hundimientos (Sags) y valores de PST elevados (Flicker) presentado confusión en el momento de análisis al tratar de identificar la fuente de dicho fenómeno. Al igual que las oscilaciones de potencia, los fenómenos descritos anteriormente son considerados como modulaciones en amplitud de la forma de onda y por tanto, una oscilación de potencia podría ser considerada como un fenómeno que afecta la calidad de la potencia.

Este documento describe una manera rápida de identificar oscilaciones de potencia a partir de las medidas de frecuencia en sistemas de distribución y cómo estas pueden afectar las mediciones de la CPE.

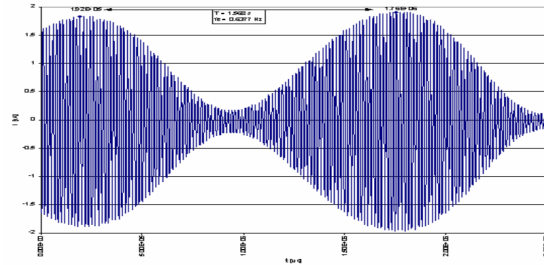


FIG 2. Medida del voltaje modulada por una oscilación de potencia

5. RED PARA MONITOREO DE LA FRECUENCIA Y CARACTERIZACIÓN DE OSCILACIONES F@OSNET

Con el desarrollo de software propio integrado con hardware para el monitoreo de la frecuencia del sistema en tiempo real y en modos fuera de línea, XM instaló un conjunto de registradores de frecuencia en puntos estratégicos de la red eléctrica y los integró a la WAN, conformando una red denominada F@OSnet, como lo ilustra la Figura 3, agregando funcionalidades WEB para facilitar la supervisión.

A partir de mediciones de tensión en redes de subtransmisión y distribución, y aún en puntos de suministro al usuario final (tomacorrientes a 110 o 220 voltios), F@OSnet registra la frecuencia con una tasa de muestreo hasta del orden de 120 muestras por segundo, y mediante funciones adicionales, detecta e identifica oscilaciones de potencia en tiempo real.



FIG 3. Red de monitoreo de frecuencia y caracterización de oscilaciones, F@OSnet

a) Metodología de identificación modal

A partir de los registros se determinan los modos de oscilación en tiempo real o fuera de línea, de la respuesta transitoria del sistema ante perturbaciones. El algoritmo implementado en F@OSnet incorporó herramientas de uso común para la identificación

modal, tomadas de técnicas de procesamiento de señales, entre las que se resaltan la transformada de Fourier, la transformada Wavelet, el análisis espectral, el método de Prony con sus variantes y las correlaciones temporales, entre otras.

6. EQUIPOS DE MEDICIÓN PARA EL SEGUIMIENTO CPE.

XM desarrolló una solución para el monitoreo de la CPE, el equipo desarrollado fue diseñado para cumplir a cabalidad las normas internacionales más relevantes en cuanto a calidad de la potencia y adicionalmente, su desarrollo estuvo enfocado a proveer una solución con un alto estándar técnico y económicamente viable. Este equipo cumple con los requerimientos de la CREG para medir la calidad de la CPE.

Es así como uno solo de los equipos desarrollados por XM puede generar los reportes exigidos por el ente regulador, sin necesidad de hardware y/o software adicional. Si se dispone de un sistema de telecomunicaciones adecuado, el equipo es capaz de enviar directamente la información vía mail o ésta puede ser fácilmente extraída a través de cualquier periférico y/o sistemas de telecomunicaciones de que dispone cada unidad. Figura 4.

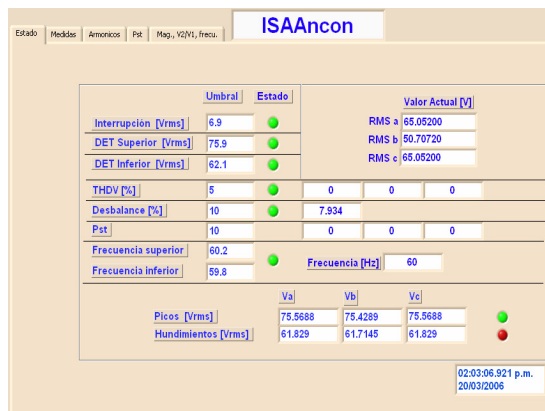


FIG 4. Interfase del sistema para monitoreo de la CPE

El equipo permite a los operadores de red contar con una solución integrada a los registradores de frecuencia y con las características exigidas a los equipos de medición para el seguimiento de la tensión. Las unidades para la gestión de la tensión incluyen: Sistema de adquisición de datos y evaluación del indicador THDV para el barraje, medición de la relación entre el voltaje de secuencia negativa y el voltaje de secuencia positiva ($V(2) / V(1)$), hundimientos y picos, de acuerdo con el Estándar IEC 61000-4-30 (2003-02), la desviación estacionaria de la tensión RMS (duración superior a 1 minuto) y el indicador PST de acuerdo con el Estándar IEC-61000-4-15 (2003-02).

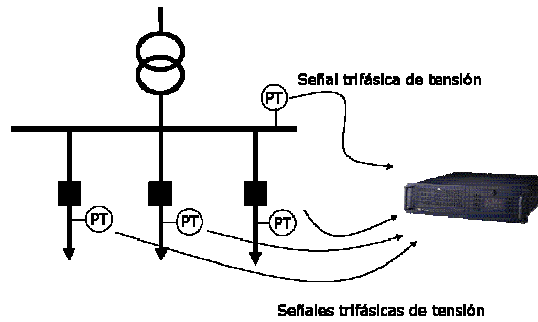


FIG 5. Esquema del sistema de monitoreo de CPE

7. RESULTADOS EN LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA

Diferentes condiciones operativas del sistema integrado Ecuador-Venezuela-Colombia han generado oscilaciones de potencia. En algunos casos se han presentado disparos de unidades de generación, en otros casos apertura de las interconexiones, y en casos extremos y por situaciones de cascada, algunas áreas han colapsado, afectando adversamente la calidad del suministro de potencia.

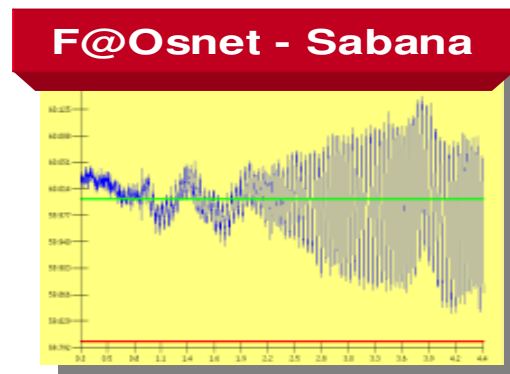


FIG 6. Respuesta de la frecuencia durante una oscilación registrada a través de F@OSnet

F@OSnet le ha permitido a los operadores, mediante el monitoreo del comportamiento de la frecuencia, establecer el comportamiento dinámico del sistema de potencia, como lo ilustran las Figuras 6 y 7.



FIG 7. Caracterización de oscilaciones de potencia a partir del software para medición de frecuencia y detección de oscilaciones

a) Modos de Oscilación registrados

El seguimiento de la operación del sistema ha permitido caracterizar los modos de oscilación incluidos en la Tabla 1:

Tabla 1. Modos de oscilación electromecánicos registrados

Modos conocidos en el SIN	Frecuencia [Hz]
Colombia - Venezuela	
• Chivor, Guavio y Betania - Gury	0.22
• Costa atlántica aislada - Gury	0.34
Colombia - Ecuador	0.5
Porce - Sistema	0.97
Central - costa	0.7-0.8
Antioquia - Sistema (Ancón - Esmeralda)	0.6 - 0.7 Hz
Sistema Occidental - Sistema Oriental (Betania - Ibaguè)	0.35 Hz

b) Ilustración de algunos modos de oscilación de potencia

La Figura 8 muestra registros de algunos modos de oscilación en la operación del Sistema Colombiano.

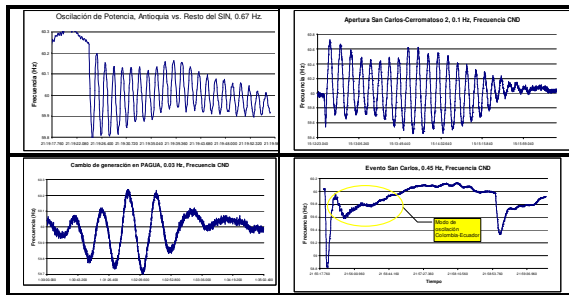


FIG 8. Ilustración de modos de oscilación

c) Caracterización de oscilaciones - Experiencia operativa

Mediante F@OSnet se presenta una caracterización estableciendo frecuencia y amortiguamiento para el período junio 1 – diciembre 31 de 2005, en el cual se presentaron del orden de 5000 oscilaciones de potencia, incluyendo modos de regulación de frecuencia y modos electromecánicos. La Figura 9 ilustra frecuencia versus amortiguamiento, la Figura 10 presenta intervalos de duración de las oscilaciones por período del día, la Figura 11 contiene oscilaciones por período mostrando efectos importantes de las situaciones antes y después del período de máxima demanda diario, y finalmente, la Figura 12 resume el total de oscilaciones por mes en el período de análisis.

Frecuencia Vs Amortiguamiento

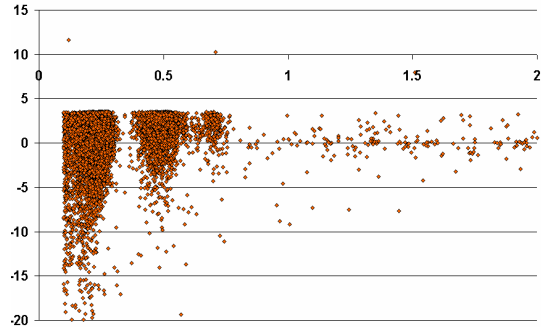


FIG 9. Densidad de oscilaciones de potencia detectadas con amortiguamiento negativo

De la figura identificamos los modos de oscilación predominantes del sistema eléctrico integrado Colombia-Ecuador-Venezuela que corresponden 0.22, 0.45 y 0.7 Hz respectivamente.

De igual forma, en la figura 10 podemos identificar que estas oscilaciones estuvieron presentes durante tiempos menores de 60 segundos en el 97% de los casos.

Duración oscilaciones

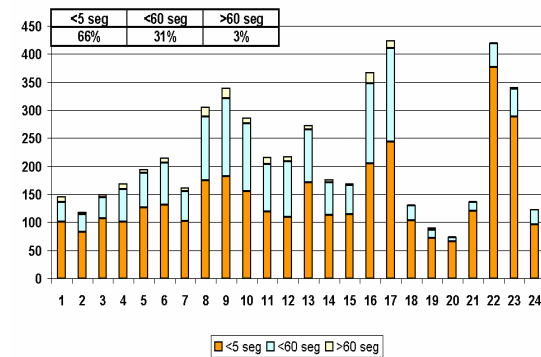


FIG 10. Duración de las oscilaciones de potencia detectadas con amortiguamiento negativo

Como información adicional, se anexa una correlación mostrando la aparición de las oscilaciones electromecánicas versus el período horario (Figura 11) y el mes del año (Figura 12).

Total de oscilaciones por período

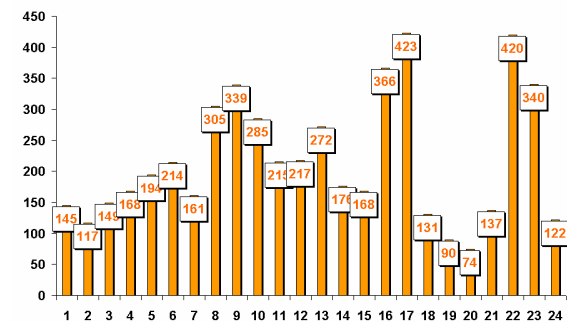


FIG 11. Número de oscilaciones vs. período

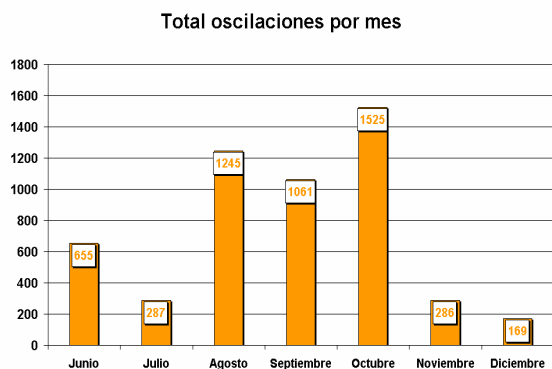


FIG 12. Número de oscilaciones vs. mes

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La calidad en el suministro de la potencia eléctrica es una característica de servicio necesaria para facilitar el desarrollo tecnológico y la competitividad de las regiones. Y es tan evidente el impacto de las perturbaciones sobre la carga que para mantener la calidad de la potencia se requiere una gestión para identificar acciones de mejoramiento en el sistema de potencia o en la carga frente a fenómenos controlables, y acciones de mitigación frente a fenómenos no controlables.

Los principales indicadores de calidad, la frecuencia y la tensión reciben el impacto de las perturbaciones provenientes del sistema de potencia, de los usuarios o de fenómenos externos, presentando variaciones normalmente temporales.

En la gestión de la calidad de la potencia, además de realizar aportes en la operación de la generación y la transmisión, XM desarrolló y puso en operación metodologías y equipos de medición y detección de fenómenos que afectan adversamente la frecuencia y la tensión. En frecuencia, instaló la red de medición de frecuencia y detección de oscilaciones F@OSnet en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). En tensión, XM ha integrado a los registradores de frecuencia las características exigidas a los equipos de medición para el seguimiento de la tensión, conformando unidades para la gestión de la tensión que evalúan THDV, la relación entre el voltaje de secuencia negativa y el voltaje de secuencia positiva ($V(2) / V(1)$), hundimientos y picos, la desviación estacionaria de la tensión RMS con duración superior a 1 minuto, y el indicador PST.

La detección y caracterización de oscilaciones de potencia ha permitido cerrar el ciclo del análisis eléctrico, permitiendo mejorar los procesos de planeación, operación y seguimiento de la operación realizados por el operador del sistema. A partir de registros de frecuencia y F@Osnet se han caracterizado oscilaciones electromecánicas y de

regulación de frecuencia de ocurrencia natural en el sistema de potencia.

El desarrollo de unidades para la gestión de la tensión es una contribución de XM al seguimiento de la calidad de la potencia y un aporte a los operadores de red para cumplir con la exigencia regulatoria de monitoreo del servicio. Los equipos tienen la capacidad de almacenar la información y de generar de forma automática los reportes necesarios.

Se recomienda continuar con el desarrollo de herramientas que faciliten el seguimiento de la operación, la caracterización de la dinámica del sistema de potencia y la gestión de la calidad de la potencia.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] CREG, “Resolución 024, Normas de calidad aplicables a los servicios de distribución de energía eléctrica”, Abril de 2005.
- [2] CREG, “Resolución 070, Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica”, 1998.
- [3] Betancur T. Sara Inés, Díez R. Andrés, Uribe G. Pablo, “Estudio de los principales problemas que afectan la calidad de la potencia eléctrica”, Universidad Pontificia Bolivariana - Facultad de Ingeniería Eléctrica, Medellín 2002.
- [4] XM-CND, Información eléctrica y energética, registros de fallas y registros de frecuencia, Medellín, 2000-200.
- [5] CIER, “F@Osnet - Red de frecuencia y oscilaciones, comportamiento dinámico del sistema eléctrico”, XM – CND (ISA), Uruguay, Octubre / Noviembre / Diciembre de 2005 – N 47.
- [6] Kundur, P., “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill Inc, 1994.
- [7] Comisión de Regulación de Energía y Gas, “Resolución 024-2005”, CREG, Colombia, 2005.