

Análisis de Calidad de Energía en la Interconexión Eléctrica con Colombia

A. López †

H. Ortiz ‡

† Corporación Eléctrica del Ecuador – Unidad de Negocio TRANSELECTRIC

‡ Escuela Politécnica Del Ejército

Resumen— Este trabajo tiene por objetivo dar a conocer los resultados de la verificación del cumplimiento de las normas y regulaciones nacionales e internacionales de calidad de energía en la Interconexión Eléctrica con Colombia a 230 kV. Para esto, en la primera parte del documento se presenta, como marco teórico, información de los conceptos, fenómenos, eventos y normativas asociadas a la calidad de energía. En base a los conceptos teóricos se plantea el alcance, límites y demás parámetros considerados para el análisis de calidad de energía propuesto. El análisis se realiza comparando los datos históricos obtenidos de los medidores instalados en la subestación frontera Pomasqui, con los límites establecidos en las diferentes normativas consideradas. Finalmente se presentan los resultados de cumplimientos e incumplimientos en los puntos de medición, con las respectivas conclusiones y recomendaciones.

Palabras clave— Calidad de Energía, equipos de medición, Interconexión Eléctrica.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto de interconexión con Colombia nació de la necesidad del Ecuador de cubrir la creciente demanda energética del país, sobre todo en los meses de estiaje, y evitar así los racionamientos de energía eléctrica. En la actualidad, Ecuador dispone de dos puntos de interconexión con Colombia, el primero a un voltaje de 138 kV con una capacidad de 345 MW entre las subestaciones de Tulcán (Ecuador) y Panamericana (Colombia) y el segundo a un voltaje de 230 kV con una capacidad de 500 MW entre las subestaciones de Pomasqui (Ecuador) y Jamondino (Colombia) constituido por cuatro circuitos.

Considerando que actualmente, no existen detalles de aspectos relacionados con los parámetros de medición de calidad de la energía, que formen parte del Reglamento para Transacciones Internacionales de Electricidad vigente en el Ecuador, se ha visto la necesidad de realizar el análisis de calidad de energía de la interconexión eléctrica con Colombia a 230

kV, con el objeto de conocer la calidad del producto recibido y tomar medidas correctivas, tanto técnicas como de regulación, de ser necesario.

2. MARCO TEÓRICO

De acuerdo a [3], Calidad de Energía es la combinación de calidad de voltaje y calidad de corriente, envolviendo la interacción entre el sistema y la carga. La calidad de voltaje concierne a la desviación de la forma de onda de voltaje del ideal voltaje sinusoidal de magnitud constante y frecuencia constante. Calidad de corriente es un término complementario y se refiere a la desviación de la forma de onda de corriente de la ideal corriente sinusoidal de magnitud constante y frecuencia constante. La calidad de voltaje envuelve el desempeño de los sistemas de potencia hacia la carga, mientras la calidad de corriente envuelve la reacción de la carga al sistema de potencia.

2.1. Fenómenos asociados a la Calidad de Energía

Los fenómenos que afectan la calidad de energía comprenden todas las desviaciones de corriente o voltaje de su estado ideal. Los parámetros que definen la onda ideal son descritos e ilustrados en la Tabla 1 y la Fig. 1 respectivamente.

Tabla 1: Parámetros ideales de la forma de onda

Frecuencia	60 ciclos por segundo
Amplitud	Según norma: 69, 138, 230 o 500 kv para nivel de transmisión
Forma de onda	Sinusoidal pura
Continuidad	Energía disponible siempre
Desbalance o asimetría	Alimentación eléctrica balanceada (trifásicos)

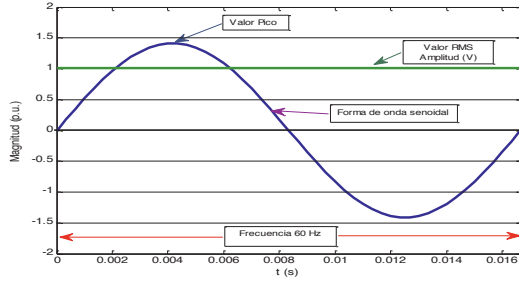


Figura 1: Forma ideal de onda de voltaje

2.1.1. Variaciones de la Magnitud del Voltaje

Son los incrementos o caídas de voltaje con respecto a un determinado valor nominal, que no exceden los valores de 0.9 a 1.1 p.u., como se observa en la Fig. 2.

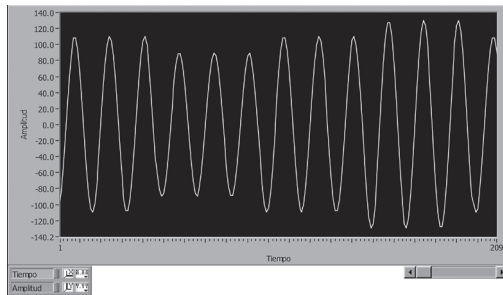


Figura 2: Variación de magnitud de voltaje

2.1.2. Variaciones de la Frecuencia de Voltaje

Los cambios en la frecuencia de su valor estable de 60 Hz., ilustrados en la Fig. 3, se deben principalmente al desbalance entre la carga y las unidades de generación o a la frecuencia inestable de las fuentes.

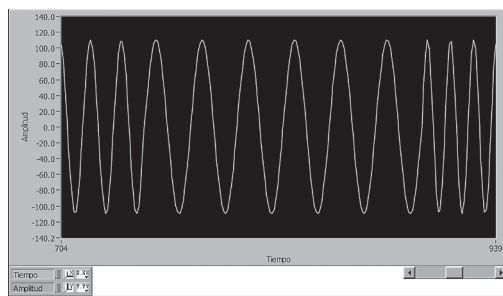


Figura 3: Variaciones de frecuencia de voltaje

2.1.3. Variación del Factor de Potencia

Idealmente las ondas de voltaje y corriente deben estar en fase lo que implica un factor de potencia igual a la unidad y la ausencia de consumo de energía reactiva. Mientras este valor más se acerque a la unidad se habla de mayor eficiencia del sistema de transporte y menor costo del sistema de potencia. Este fenómeno se puede observar en la Fig. 4.

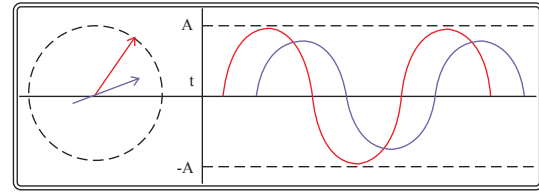


Figura 4: Variación factor de potencia

2.1.4. Desbalance de Voltaje

Se da en los sistemas trifásicos cuando los valores RMS de voltaje o la diferencia de ángulos entre fases consecutivas de voltaje no son iguales. El fenómeno se observa en la Fig. 5.

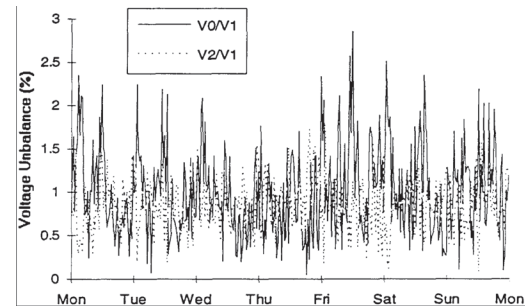


Figura 5: Desbalance de voltaje en una semana

El índice considerado para el análisis de este fenómeno es el **Desbalance de secuencia negativa o factor de desbalance de voltaje** que es el cociente de las componentes de voltaje de secuencia negativa y positiva. Esta índice toma en consideración magnitudes y ángulos de los voltajes de línea o fase.

$$VUF = \frac{|V_-|}{|V_+|} \quad (1)$$

La IEC en [10] proporciona un método práctico para la determinación de este factor basado en los valores RMS de los voltajes fundamentales de líneas:

$$VUF = \frac{\sqrt{I - \sqrt{I - 3\varepsilon}}}{\sqrt{I + \sqrt{I - 3\varepsilon}}} \quad (2)$$

donde,

$$\varepsilon = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (3)$$

2.1.5. Distorsión Armónica de Voltaje y Corriente

Una onda sinusoidal periódica puede ser descrita como la suma de varias ondas sinusoidales con frecuencias múltiples a la fundamental. A estas componentes se las denomina "Componentes Armónicas" y son las causantes de la "Distorsión

Armónica”. En la Fig. 6 se puede observar la onda a frecuencia fundamental (60 Hz), las componentes armónicas y la resultante.

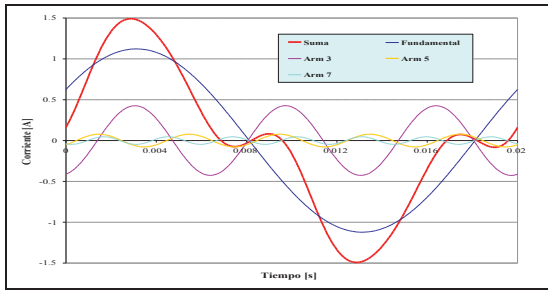


Figura 6: Onda Resultante por presencia de armónicos

La distorsión en la onda de tensión se traduce en una variación de sus características de frecuencia y amplitud nominal, y en una forma de onda diferente a la sinusoidal.

Los armónicos generados en un punto de un sistema de potencia pueden propagarse por kilómetros a través de las líneas de transmisión.

Para la caracterización de los armónicos existen varios índices, de los cuales en este trabajo se han considerado:

- Factor armónico de la n-ésima armónica (HF_n): es una medida de la contribución individual de esa armónica, se define así

$$HF_n = \frac{V_{on}}{V_{o1}} \quad (4)$$

para $n > 1$ donde V_1 es el valor eficaz (rms) de la componente fundamental, y V_{on} es el valor eficaz de la n-ésima componente armónica.

- Distorsión armónica total (THD-Total Harmonic Distortion): es una medida de la coincidencia de formas entre una onda y su componente fundamental, se define como:

$$THD = \frac{1}{V_{o1}} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{on}^2} \quad (5)$$

- Distorsión Total de Demanda (TDD-Total Demand Distortion): Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de corriente de la carga. Es importante porque al realizar mediciones relacionadas con armónicos de corriente en los sistemas eléctricos es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los

equipos ya que la energía distorsionante que fluye es baja también.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} = \frac{THD}{I_L} \times I_C \quad (6)$$

donde,

I_n = Magnitud de la armónica individual

n = orden armónico

I_L = demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los 12 últimos meses o puede estimarse.

I_C = corriente de carga

2.1.6. Bajo Voltaje

Son caídas de tensión RMS, los de corta duración denominados “voltage sags” o “voltage dips” ilustrados en la Fig. 7 y los de larga duración que son propiamente los “undervoltage”. En general se producen por maniobras en los sistemas de potencia o aumento de carga.

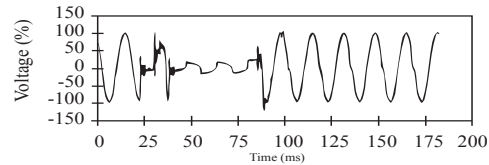


Figura 7: Bajo voltaje instantáneo “Sag”

2.1.7. Sobrevoltaje

Se los clasifica de acuerdo a su duración e intensidad, así, si son de gran magnitud y poca duración se los denomina “transientes de voltaje” u “oleada de voltaje”. Un swell el aumento del voltaje por sobre del 110% del valor nominal, por una mitad de ciclo y hasta un minuto, en la Fig. 8 se puede observar esta perturbación. Estos eventos pueden causar mal funcionamiento y acelerar el desgaste de los equipos.

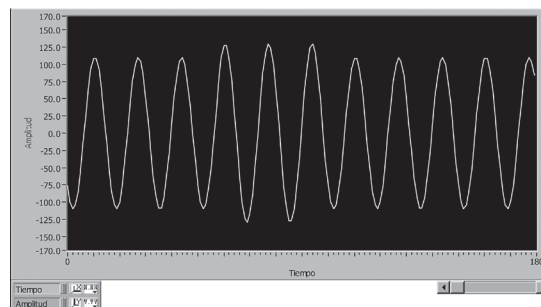


Figura 8: Sobrevoltaje de corta duración – Swell

2.2. Normas y Regulaciones de Calidad de Energía

En [12], indica que una norma es un documento establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido, que establece, para uso común y repetido, reglas y directrices o características para ciertas actividades o sus resultados, con el fin de conseguir un grado óptimo de orden en un contexto dado.

Las normativas tomadas en cuenta para este estudio son:

2.2.1. Normalización IEC- Comisión Electrotécnica Internacional

La IEC agrupa los estándares referentes a “Compatibilidad Electromagnética” en las siguientes categorías:

- General (IEC 61000-1-x): Contiene consideraciones generales, terminología y definiciones fundamentales.
- Ambiente (IEC-61000-2-x): Define las características del ambiente en donde se van a instalar los equipos.
- Límites de emisión e inmunidad (IEC 61000-3-x): Define los límites permisibles de perturbaciones que pueden ser ocasionadas por los equipos conectados en el sistema de potencia.
- Técnicas de ensayo y de medida (IEC 61000-4-x): Provee directivas detalladas para los equipos de medición y procedimientos de pruebas.
- Guías de mitigación e instalación (IEC 61000-5-x): Guía detallada de los equipos de protección, tales como filtros, acondicionadores de energía, supresores de sobretensión, etc.
- Normas genéricas y de productos (IEC-61000-6-x): Definen los niveles de inmunidad requeridos por los equipos específicos y generales en diferentes ambientes.

2.2.2. Estándar Europeo EN50160 – CENELEC

Describe la electricidad como un producto y proporciona las principales características del voltaje entregado por un sistema de potencia en condiciones normales de operación.

Este estándar proporciona definiciones los siguientes parámetros definidos en el mismo:

- Voltaje de alimentación
- Voltaje nominal del sistema Un

- Voltaje declarado
- Condiciones normales de operación
- Huecos de Tensión
- Interrupción de alimentación (Accidental o no prevista)
- Variaciones de Frecuencia
- Variaciones de Tensión
- Variaciones rápidas de tensión

2.2.3. Normalización Americana IEEE - Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónicos (IEEE)

La normalización americana para Calidad de Energía se basa en las “Prácticas Recomendadas” y la “Guía de Aplicación”, donde las más importantes son las siguientes:

- IEEE 1250-1995: IEEE Guía para la energización de equipos sensibles a los disturbios momentáneos de voltaje que ocurren en un sistema de potencia.
- IEEE 1346-1998: Prácticas recomendadas para la evaluación de la compatibilidad de los Sistemas Eléctricos de Potencia.
- IEEE 1159-1995: Prácticas Recomendadas para el Monitoreo de Calidad de Energía.
- IEEE 519-1992: Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia-
- IEEE Emerald Book: colección de las mejores prácticas para la energización y conexión a tierra de equipo electrónico usado en aplicaciones industriales y comerciales.

2.2.4 Regulación No. CONELEC – 003/08: Calidad del transporte de electricidad y del servicio de transmisión y conexión al sistema nacional interconectado [8]

Esta regulación se aplica al Transmisor operador del Sistema Nacional de Transmisión (SNT), a los Agentes que prestan servicios de transporte de electricidad, a las Empresas Distribuidoras y Grandes Consumidores conectados directamente a los sistemas de transmisión en el SNI.

Las interconexiones internacionales, no forman parte del ámbito de aplicación de esta Regulación, sin embargo esta regulación se ha considerado como referente en este análisis.

En esta regulación la calidad de la potencia y del servicio de transmisión y conexión en el SNI, se evalúa considerando los parámetros siguientes:

Calidad de la potencia:

- Nivel de voltaje.
- Contenido armónico de voltaje.
- Balance de voltajes.
- Contenido armónico de corriente.
- Balance de corrientes.
- Factor de potencia de la carga.

Calidad del servicio de transmisión y conexión:

- Duración de las interrupciones.
- Frecuencia de interrupciones.

3. DEFINICIONES DEL ESTUDIO

3.1. Equipos utilizados

Para el análisis de calidad de energía en la interconexión con Colombia se ha utilizado los medidores ION 7600 y 7650 instalados en la subestación Pomasqui en cada uno de los cuatro circuitos de interconexión.

3.1.1. Principales Características

- Son medidores inteligentes y controladores de dispositivos
- Proveen medidas instantáneas y precisas “TRUE RMS”.
- Poseen funciones avanzadas para medir parámetros de calidad de energía y verificar el cumplimiento de normas.
- Cumplen con los límites de dispositivos digitales Clase A, con precisión clase 0.2.
- Pueden integrar redes de manejo de energía o sistemas SCADA, gracias a la variedad de interfaces de comunicación y protocolos que dispone.

3.1.2. Especificaciones Técnicas

- Nueve (9) canales de medición
- Rango de medida: Tensión 0 – 347 Vrms (L-N), corriente 0 – 20 Arms
- Precisión: clase 0.2. El detalle de la precisión por parámetro se encuentra en las Tablas 3, 2.
- Frecuencia de muestreo: hasta 256 muestras por ciclo
- Medida de armónicos: hasta el 63avo (127avo en el software)
- Medida de transientes: de hasta 65 ms a 60 Hz
- Registro de eventos asociados a sags-swells
- Confiabilidad: medición de los nueve de confiabilidad del sistema monitoreado.
- Memoria local: 4 MB

3.1.3. Características de las entradas de voltaje y corriente para medición

Tabla. 2: Características de entradas de voltaje para medición

Parámetro	Valor
Rango de funcionamiento	0 a 347 voltios RMS (L-N) 0 a 600 voltios RMS (L-L)
Tensión de estado estable	0 a 347 voltios RMS
Tensión de sobrecarga	1500 VAC RMS (continua) y 3250 VAC RMS (por un minuto)
Impedancia de entrada	5 MΩ

Tabla. 3: Características de entradas de corriente para medición

Parámetro	Valor
Entrada Nominal	0 a 20 Amperios RMS
Detección de errores	70 Amperios RMS pico
Impedancia	1.5 mΩ
Carga	0.15 VA @ 20 A RMS
Sobrecarga	500 A RMS durante 1 segundo, no recurrente

3.1.4. Configuración de Medidores

Estos medidores forman parte de una red WAN por medio de la cual se accede a los datos registrados en los mismos y es posible realizar tareas de configuración remota, desde cualquier lugar de la red corporativa de CELEC EP – TRANSELECTRIC, a través de los programas ION ENTERPRICE, ION SETUP y la aplicación WEBMeter. Esta red se ilustra en la Fig. 9.

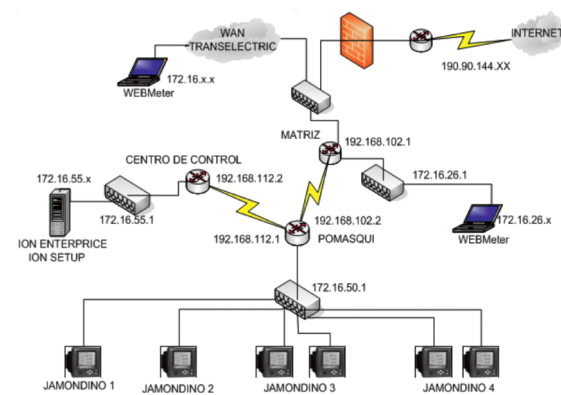


Figura 9: Red de comunicación de los medidores ION-Pomasqui

Para la medición, los equipos han sido conexiados de acuerdo al esquema de 4 hilos en Y, con un transformador de corriente y un transformador de voltaje por fase, de acuerdo al diagrama de la Fig. 10.

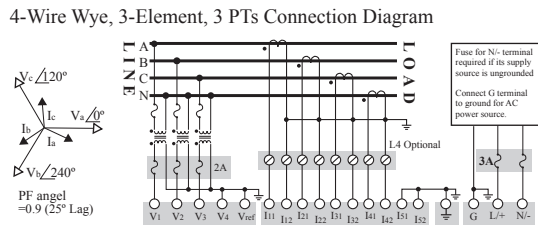


Figura 10: Diagrama de conexiados para medidores ION

Las características de los equipos usados para la medición se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4: Características de los TC's y TP's

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE	TRANSFORMADORES DE VOLTAJE O POTENCIAL
Relación de transformación: 1500/5 A	Relación de transformación: 230kV/115V
Clase/Precisión: 0,2	Burden: 200 VA
	Precisión: 0,2

3.2. Alcance

Se ha realizado una inspección general de calidad de energía en los cuatro circuitos de interconexión con Colombia a 230 kV, esto es, en las bahías Jamondino 1, Jamondino 2, Jamondino 3 y Jamondino 4 de la subestación Pomasqui. Por cuanto no han existido periodos continuos en los que los 4 circuitos se encuentren en operación, para cada uno se indicará la fecha en la que han sido analizados.

Los parámetros tomados en cuenta en este análisis son:

- Nivel de voltaje
- Desbalance de voltaje
- Frecuencia
- Contenido armónico de voltaje
- Contenido armónico de corriente
- Factor de potencia

El registro de los parámetros se lo ha realizado en intervalos de medición de 10 minutos durante un periodo de 7 días continuos en cada circuito.

3.3. Límites Considerados

Tabla 5: Límites considerados por la IEEE y el CONELEC

PARÁMETRO	NORMA IEEE	REGULACIÓN CONELEC
Nivel de voltaje	±5% del valor nominal	±5% del Valor nominal; esto es, entre 218.5 y 241.5 kV L-L o entre 126.15 y 132.7 kV L-N
Desbalance de voltaje	Considerado normal de 0.5 a 2%	< 1.3 %
Frecuencia	± 0.5 Hz	No indica
Armónicos de voltaje	VTHD máximo de 1.5%, contenido armónico individual máximo de 1%	Se considera los armónicos del 2do al 40vo, los límites son los establecidos en la norma IEEE 519
Armónicos de corriente	TDD<3.75%	Se considera los armónicos del 2do al 30vo, los límites son los establecidos en la norma IEEE 519
Factor de potencia		>0.96

Tabla 6: Límites considerados por la IEC y el CENELEC

PARAMETRO	NORMA EN-50610	NORMA IEC
Nivel de voltaje	±10% por 95% del periodo de medición	±5% del valor nominal
Desbalance de voltaje	< 2%	< 1%
Frecuencia	±1% en el 95% del periodo de medición	±3 %
Armónicos de voltaje	No establecido para alta tensión	THD máximo de 3%, contenido armónico individual máximo de 2%
Armónicos de corriente	No establecido para alta tensión	No indica
Factor de potencia	No indica	No indica

3.4. Datos

La información se ha obtenido de la base de datos ION_Data de ION Enterprise, mediante el aplicativo Web Reporter el cual permite la exportación de datos directamente a formato Excel.

4. RESULTADOS

A continuación se presenta el resumen del análisis realizado en los cuatro circuitos. En los periodos elegidos para cada circuito se ha verificado que no se hayan realizado trabajos de mantenimiento que pudieran alterar el estado normal de operación de los circuitos.

4.1. Análisis en Jamondino 1

El análisis en la bahía Jamondino 1 se lo ha realizado del 1 al 7 de febrero de 2009, el resumen de los resultados consta en las Tablas Nos. 7 a 10.

En las tablas resumen, se puede apreciar que ninguno de los parámetros excede los límites establecidos en las diferentes normativas y regulaciones consideradas. En la bahía Jamondino 1 se presentó un evento de bajo voltaje o “sag”, de una duración aproximada de 4 ciclos en el que la magnitud de voltaje pico de la fase c disminuye a 0.67 p.u. Este evento puede apreciarse en las Fig. 11.

Tabla 7: Resumen de cumplimiento de las norma de calidad de energía EN50160 – Jamondino1

Análisis de Jamondino 1 – Cumplimiento de las norma EN50160				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	59,9998	±1%	0	0,00%
Voltaje (p.u)	1,007	±10% Vnominal	1	0,10%
	1,016		1	0,10%
	1,009		3	0,30%
Desbalance de Voltaje (%)	0,531	< 2%	0	0,00%

Tabla 8: Resumen de cumplimiento de las normas de calidad de energía de la IEEE – Jamondino1

Análisis de Jamondino 1 – Cumplimiento de las norma IEEE				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. De datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	59,9998	± 0.5 Hz	0	0,000%
Voltaje (p.u)	1,007	±5% Vnominal	1	0,099%
	1,016		3	0,298%
	1,009		4	0,397%
Desbalance de Voltaje (%)	0,531	normal de 0.5 a 2%	0	0,000%

Análisis de Jamondino 1 – Cumplimiento de las norma IEEE				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. De datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
THDV(%)	0,830	< 1.5%	14	1,389%
	0,795		38	3,770%
	0,975		35	3,472%
TDD (%)	1,586	< 3.5%	0	0,000%
	1,766		10	1,488%
	1,808		14	2,083%

Tabla 9: Resumen de cumplimiento de las normas de calidad de energía de la IEC – Jamondino1

Análisis de Jamondino 1 – Cumplimiento de las norma IEC				
Parámetro	Valor promedio	Límites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	59,9998	±3 %	0	0,000%
Voltaje (p.u)	1,007	±5% Vnominal	1	0,099%
	1,016		3	0,298%
	1,009		4	0,397%
Desbalance de Voltaje (%)	0,531	< 1%	0	0,000%
THDV(%)	0,830	< 3%	0	1,389%
	0,795		0	3,770%
	0,975		35	0

Tabla 10: Resumen de cumplimiento de la Regulación CONELEC 003-2008 - Jamondino1

Análisis de Jamondino 1 – Cumplimiento de la regulación CONELEC 003-2008				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Voltaje (p.u)	1,007	±5% Vnominal	1	0,099%
	1,016		3	0,298%
	1,009		4	0,397%
Desbalance de Voltaje (%)	0,531	< 1.3 %	0	0,000%
THDV(%)	0,830	< 1.5%	14	1,389%
	0,795		38	3,770%
	0,975		35	3,472%
TDD (%)	1,586	< 3.75%	0	0,000%
	1,766		10	1,488%
	1,808		14	2,083%
Factor de Potencia	0,9932	>0.96	21	2,083%

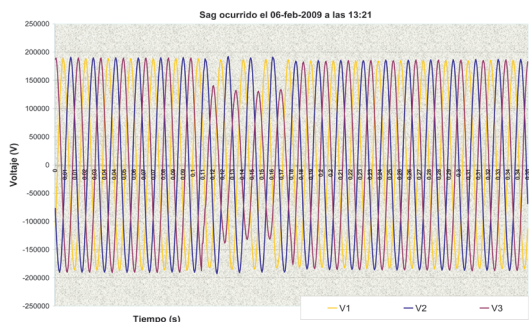


Figura 11: Sag ocurrido en Jamondino 1 a las 13:21

4.2. Análisis en Jamondino 2

El análisis en la bahía Jamondino 2 se lo ha realizado del 24 al 30 de noviembre de 2010, el resumen de los resultados consta en las Tablas Nos. 11 a 14.

En esta bahía no se presentaron incumplimientos en el periodo analizado.

Tabla 11: Resumen de cumplimiento de las normas de calidad de energía de la IEEE – Jamondino 2

Análisis de Jamondino 2 – Cumplimiento de las norma IEEE				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. De datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	60,0005	± 0.5 Hz	0	0,000%
Voltaje (p.u)	1,010	±5% Vnominal	0	0,000%
	1,015		0	0,000%
	1,004		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,615	normal de 0.5 a 2%	0	0,000%
THDV(%)	1,239	< 1.5%	28	2,778%
	1,115		35	3,472%
	1,217		43	4,266%
TDD (%)	1,792	< 3.75%	0	0,000%
	1,791		0	0,000%
	1,840		0	0,000%

Tabla 12: Resumen de cumplimiento de las normas de calidad de energía de la IEC – Jamondino2

Análisis de Jamondino 2 – Cumplimiento de las norma IEC				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	60,001	±3 %	0	0,000%
Voltaje (p.u)	1,010	±5% Vnominal	0	0,000%
	1,015		0	0,000%
	1,004		2	0,198%
Desbalance de Voltaje (%)	0,615	< 1%	0	0,000%
THDV(%)	1,239	< 3%	0	0,000%
	1,115		0	0,000%
	1,217		0	0,000%

Tabla 13: Resumen de cumplimiento de las norma de calidad de energía EN50160 – Jamondino2

Análisis de Jamondino 2 – Cumplimiento de las norma EN50160				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	60,001	±1%	0	0,000%
Voltaje (p.u)	1,010	±10% Vnominal	0	0,000%
	1,015		0	0,000%
	1,004		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,615	< 2%	0	0,000%

Tabla 14: Resumen de cumplimiento de la Regulación CONELEC 003/2008 – Jamondino2

Análisis de Jamondino 2 – Cumplimiento de la regulación del Conelec				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Voltaje (p.u)	1,010	±5% Vnominal	0	0,000%
	1,015		0	0,000%
	1,004		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,615	< 1.3 %	0	0,000%
THDV(%)	1,239	< 1.5%	28	2,778%
	1,115		35	3,472%
	1,217		43	4,266%
TDD (%)	1,792	< 3.75%	0	0,000%
	1,791		0	0,000%
	1,840		0	0,000%
Factor de Potencia	0,9935	>0.96	17	1,687%

4.3. Análisis en Jamondino 3

El análisis en la bahía Jamondino 3 se lo ha realizado del 3 al 9 de febrero de 2011, el resumen de los resultados consta en las Tablas Nos. 15 a 18.

Tabla 15: Resumen de cumplimiento de las normas de calidad de energía de la IEEE – Jamondino 3

Análisis de Jamondino 3 – Cumplimiento de las norma IEEE				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	60,0008	± 0.5 Hz	3	0,298%
Voltaje (p.u)	1,009	±5% Vnominal	0	0,000%
	1,013		0	0,000%
	1,010		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,616	normal de 0.5 a 2%	0	0,000%
THDV (%)	1,211	< 1.5%	126	12,500%
	1,230		128	12,698%
	1,260		140	13,889%
TDD (%)	1,449	< 3.75%	0	0,000%
	1,479		0	0,000%
	1,480		0	0,000%

Tabla 16: Resumen de cumplimiento de las normas de calidad de energía de la IEC – Jamondino3

Análisis de Jamondino 3 – Cumplimiento de las normas IEC				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	60,0008	±3 %	0	0,000%
Voltaje (p.u)	1,009	±5% Vnominal	0	0,000%
	1,013		0	0,000%
	1,010		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,616	< 1%	0	0,000%
THDV (%)	1,211	< 3%	0	0,000%
	1,230		0	0,000%
	1,260		0	0,000%

Tabla 17: Resumen de cumplimiento de las norma de calidad de energía EN50160 – Jamondino 3

Análisis de Jamondino 3 – Cumplimiento de las norma EN50160				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	60,0008	±1%	2	0,198%
Voltaje (p.u)	1,009	±10% Vnominal	0	0,000%
	1,013		0	0,000%
	1,010		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,616	< 2%	0	0,000%

Tabla 18: Resumen de cumplimiento de la Regulación CONELEC 003-2008 – Jamondino 3

Análisis de Jamondino 3 – Cumplimiento de la regulación Conelec				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Voltaje (p.u)	1,009	±5% Vnominal	0	0,000%
	1,013		0	0,000%
	1,010		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,616	normal de 0.5 a 2%	0	0,000%
THDV (%)	1,211	< 1.5%	126	12,500%
	1,230		128	12,698%
	1,260		140	13,889%
TDD (%)	1,449	< 3.75%	0	0,000%
	1,479		0	0,000%
	1,480		0	0,000%
Factor de Potencia	0,881313	>0.96	182	18,056%

En las Tablas resumen se puede apreciar que tanto la distorsión armónica total de voltaje como el factor de potencia exceden límites considerados, de acuerdo a las condiciones operativas se ha confirmado que estos fenómenos se han presentado debido a que las líneas de interconexión se encontraban como compensadores capacitivos para la regulación de voltaje, los fenómenos se muestran en las Fig. 13 y 14.

Adicionalmente se presentó un evento de bajo voltaje de una duración de 12 ciclos o 200 ms donde los voltaje fueron de 1 p.u., 0.87 p.u. y 0.89 p.u. La segunda etapa tuvo una duración de 6 ciclos o 100 ms y los voltajes descendieron a 0.85 p.u., 0.87 p.u. y 0.89 p.u. El fenómeno se ha ilustrado en la Fig. 15.

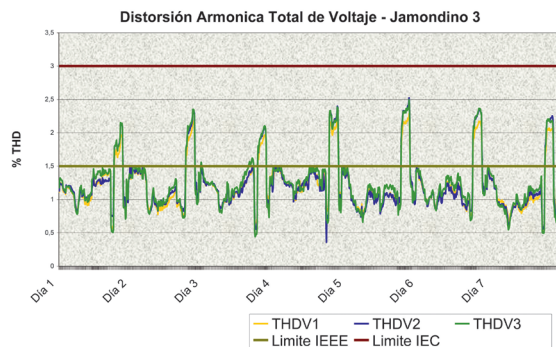


Figura 13: Distorsión Armónica de Voltaje en Jamondino 3

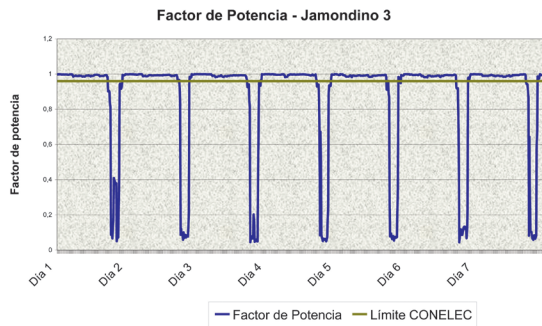


Figura 14: Factor de Potencia en Jamondino 3

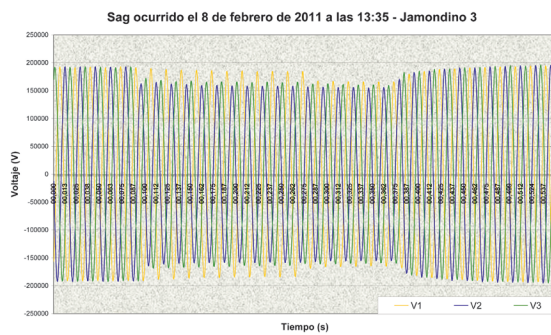


Figura 15: Sag ocurrido en Jamondino 3 el 8 de febrero de 2011

4.4. Análisis en Jamondino 4

El análisis en la bahía Jamondino 4 se lo ha realizado del 24 al 30 de noviembre de 2010, el resumen de los resultados consta en las tablas no. 19 a 22.

Tabla 19: Resumen de cumplimiento de las normas de calidad de energía de la IEEE – Jamondino 4

Análisis de Jamondino 4 – Cumplimiento de las Normas IEEE				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	60,0010	± 0.5 Hz	2	0,198%
Voltaje (p.u)	1,009	±5% Vnominal	0	0,000%
	1,012		0	0,000%
	1,008		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,600	normal de 0.5 a 2%	0	0,000%
THDV (%)	1,175	< 1.5%	127	12,599%
	1,226		137	13,591%
	1,235		143	14,187%
TDD (%)	1,576	< 3.75%	0	0,000%
	1,61296		0	0,000%
	1,61258		0	0,000%

Tabla 20: Resumen de cumplimiento de las normas de calidad de energía de la IEC – Jamondino 4

Análisis de Jamondino 4 – Cumplimiento de las Normas IEC				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	60,0010	±3 %	0	0,000%
Voltaje (p.u)	1,009	±5% Vnominal	0	0,000%
	1,012		0	0,000%
	1,008		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,600	< 1%	0	0,000%
THDV(%)	1,175	< 3%	0	0,000%
	1,226		0	0,000%
	1,235		0	0,000%

Tabla 21: Resumen de cumplimiento de las norma de calidad de energía EN50160 – Jamondino 4

Análisis de Jamondino 4 – Cumplimiento de las Normas IEEE				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Frecuencia (Hz)	60,0010	±1%	1	0,099%
Voltaje (p.u)	1,009	±10% Vnominal	0	0,000%
	1,012		0	0,000%
	1,008		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,600	< 2%	0	0,000%

Tabla 22: Resumen de cumplimiento de la regulación CONELEC 003/2008 – Jamondino 4

Análisis de Jamondino 4 – Cumplimiento de la Regulación CONELEC 003/2008				
Parámetro	Valor promedio	Limites	No. de datos que exceden el limite	Porcentaje de datos que exceden el limite (%)
Voltaje (p.u)	1,009	±5% Vnominal	0	0,000%
	1,012		0	0,000%
	1,008		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,600	< 1.3 %	4	0,397%
THDV (%)	1,175	< 1.5%	127	12,599%
	1,226		137	13,591%
	1,235		143	14,187%
TDD (%)	1,576	< 3.75%	0	0,000%
	1,61296		0	0,000%
	1,61258		0	0,000%
Desbalance de Voltaje (%)	0,87797	>0.96	179	17,758%

En las tablas resumen se puede apreciar que tanto la distorsión armónica total de voltaje como el factor de potencia exceden límites considerados para el periodo de prueba, de acuerdo a las condiciones operativas se ha confirmado que estos fenómenos se han presentado debido a que las líneas de interconexión se encontraban como compensadores capacitivos para la regulación de voltaje.

Adicionalmente se presentó un evento de bajo voltaje de una duración aproximada de 9 ciclos o 150 ms y los voltajes pico de fase descienden a 0.81 p.u., sus forma de onda se ilustran en la Fig. 18.

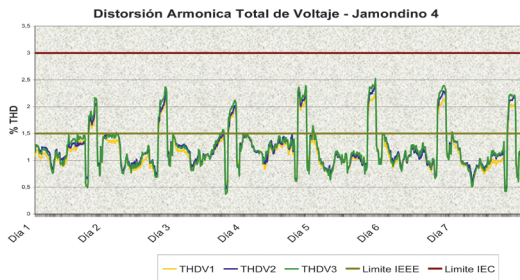


Figura 16: Distorsión Armónica de Voltaje en Jamondino 4

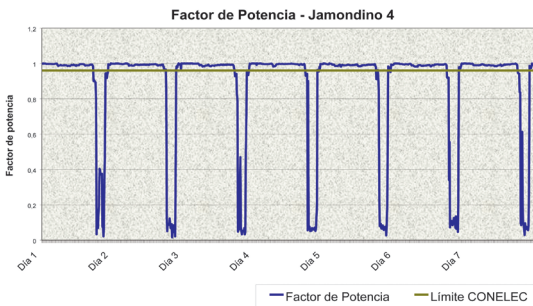


Figura 17: Factor de Potencia - Jamondino 4

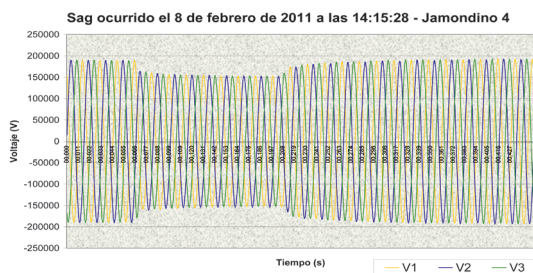


Figura 18: Sag ocurrido en Jamondino 4 el 8 de febrero

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La regulación del CONELEC 003-2008 no ha considerado en su contenido el análisis

de eventos de caída y elevación de voltaje de corta duración (sags y swells)

- Se puede afirmar que los cuatro circuitos de interconexión con Colombia analizados, no presentan problemas de calidad de energía mientras existe importación de energía desde Colombia. Es decir, ninguno de los parámetros analizados excede los límites establecidos en la regulación del CONELEC ni los establecidos en las normativas internacionales.
- Cuando los circuitos se encuentran operando como compensadores capacitivos, sin transmisión de energía, se presentan un considerable incremento de la distorsión total armónica de voltajes y caída en el factor de potencia, predecible considerando que solo existe aporte de reactivos equivalente a una carga no lineal.

5.2. Recomendaciones

- Considerando el incremento de la distorsión total de armónicos de voltaje cuando las líneas a Jamondino operan como compensadores capacitivos, se recomienda realizar un estudio de la afectación causada al transformador 230/138 kV. de la S/E Pomasqui.
- Es recomendable que la Ley de Régimen del Sector Eléctrico incorpore actualizaciones periódicas referentes a normativa y regulaciones para calidad de energía, que incorpore nuevos parámetros, como ejemplo el monitoreo de sags y swells.
- Las empresas dedicadas al negocio de la electricidad deben establecer cronogramas exigentes para la calibración permanente de sus equipos de medición de calidad de energía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Math H. J. Bollen. Understanding Power Quality Problems, Edición 1, Wiley-IEEE Press, New York, 24 de Septiembre de 1994, 528 páginas.
- [2] Pinto, Robert, Calidad de la Energía Eléctrica, Primera Edición, Universitas Libros, Argentina, 2004, 202 páginas.
- [3] K. Bhattacharya, M. Bollen, J. Daalder, Operation of Restructured Power Systems, Kluwer Academic Publisher, 2001, 328 páginas.

- [4] Meléndez, Joaquim; Herraiz, Sergio; Colomer, Joan; “Calidad de la onda de servicio eléctrico”, Revista Soluciones, No. 359, 7 páginas, febrero 2005.
- [5] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality (IEEE Std. 1159-1995). Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 1- 55937-549-3. Estados Unidos, 1995.
- [6] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std. 519-1992). Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 1-55937-239-7. Estados Unidos, 1993
- [7] IEEE recommended practices for powering and grounding sensitive electronic equipment, Std. 1100-1992
- [8] Ecuador, Regulación No. CONELEC - 003/2008: CALIDAD DEL TRANSPORTE DE ELECTRICIDAD Y DEL SERVICIO DE TRANSMISIÓN Y CONEXIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO
- [9] Electromagnetic capability (EMC), Part: General, Section 1: Application and Interpretation of fundamental definitions and terms. IEC 61000-1-1
- [10] IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) – part 4-30 – environment – testing and measurement techniques – power quality measurement methods, Ed.1
- [11] Guía sobre la calidad de onda en las redes eléctricas, <http://www.unesa.es>.
- [12] Flechas Jairo, Seminario de Armónicos en Sistema Eléctricos, Kede Consulting, Quito, 2008.



Ana Lucía López.- Nació en Quito, Ecuador en 1981. Recibió su título de Ingeniera en Electrónica, Automatización y Control de la Escuela Politécnica del Ejército en 2011. Sus campos de interés están relacionados con los procesos de automatización, sistemas y redes de comunicación, sistemas SCADA y calidad de energía.



Hugo Ortiz Tulcán.- Nació en Quito, Ecuador en 1965. Recibió su título de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en 1990. Su formación de postgrado incluye una especialidad en Control Automático en la Universidad de Tel Aviv y una maestría en Gestión de la Calidad en la Escuela Politécnica del Ejército. Sus áreas de interés están relacionadas con la Innovación Tecnológica, la Automática y los Sistemas de Gestión.