

MEDICION DE NIVELES DE DISTORSION EN BAJA Y MEDIA TENSION DE ONDAS ARMONICAS EN SEP

Ing. Marcial Núñez

Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Asunción

Paraguay

RESUMEN

El aumento progresivo de las cargas no lineales conectadas a los sistemas eléctricos, las cuales pueden introducir niveles significativos de distorsión armónica, hace que el análisis de los impactos de los armónicos en los componentes de los sistemas eléctricos, así como en la calidad del suministro, vaya tomando cada día mayor relevancia.

En el presente trabajo se presentan los resultados de una serie de mediciones de niveles de distorsión armónica existentes en la red de distribución de ANDE, con el objetivo de contar con un indicativo preliminar del estado de la contaminación armónica existente en la red nacional. Las mediciones fueron realizadas tanto en la red de media como de baja tensión, presentándose posteriormente una comparación con los límites establecidos en la norma de referencia en el tema, específicamente, con los valores recomendados por la IEEE 519 – 1992 “Prácticas Recomendadas y Requerimientos para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia” [1].

De igual forma, se ha realizado una revisión de los conceptos fundamentales sobre armónicos, incluyendo las herramientas matemáticas utilizadas para su tratamiento, prestando especial atención a las definiciones existentes de factores de potencia, de forma a poder evaluar el impacto que los armónicos tendrían en la facturación de energía eléctrica. Para el efecto, presentan simulaciones realizadas en un programa desarrollado en Scilab, en las cuales se reproducen las señales de tensión y corriente de cargas típicas y reales, con el objeto de evaluar los posibles impactos que pueden tener en la medición de energía eléctrica el tratamiento indebido de los armónicos. A partir de las evaluaciones realizadas, se presentan algunas recomendaciones para estudios posteriores, así como la necesidad de una posible revisión del Pliego Tarifario de la ANDE.

PALABRAS CLAVES

Armónicos, Distorsión Total Armónica de tensión, Distorsión total Armónica de corriente, Potencia activa media, Potencia aparente, Factor de potencia fundamental o de desplazamiento, Factor de potencia verdadero.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más comunes que afectan a la calidad de la energía en sistemas eléctricos es la deformación de la onda con relación a la onda senoidal pura, la cual es producida en gran medida por el fenómeno denominado “Distorsión Armónica”, el cual afecta tanto a la empresa proveedora de la energía eléctrica como a los consumidores finales.

La tensión a suministrar al usuario y la corriente resultante de sus equipos deberían ser ondas senoidales perfectas, de 50 Hz para nuestro sistema eléctrico, sin embargo, las cargas no lineales presentes en el sistema eléctrico causan distorsión en las formas de ondas de corriente y tensión. Estas cargas producen corrientes no senoidales a pesar de ser abastecidas por una tensión senoidal pura. La distorsión de corriente provoca a su vez, al fluir a través de las impedancias del sistema, una distorsión de tensión [2].

Tradicionalmente, el estudio de los armónicos se realizaba para analizar el comportamiento particular de cargas no lineales especiales, conectadas en un punto del sistema y sólo se evaluaba su impacto en forma local; pero con el crecimiento del sistema eléctrico se requiere observar el impacto de las cargas que producen armónicos, no sólo en el punto de conexión, sino en otros puntos del sistema, para determinar claramente las características de la señal de tensión que se ofrece a los usuarios de una red eléctrica y especialmente las medidas correctivas que sean necesarias, en caso de superar límites establecidos por las normas.

Hace unos pocos años, no se tenían mayores problemas con las cargas de los usuarios, sin embargo, la actual utilización casi masiva de dispositivos de electrónica de potencia, como rectificadores y convertidores, produce una creciente preocupación por los armónicos en las redes eléctricas.

La presencia de armónicos tiene varios efectos, pudiendo resaltarse en general el aumento de pérdidas tanto en los circuitos magnéticos y eléctricos, como consecuencia de la presencia de componentes armónicos de altas frecuencias. Pueden ocasionar una perturbación inaceptable sobre la red de distribución de energía eléctrica, causar el recalentamiento de motores, cables, transformadores, capacitores y otros equipamientos, así como mal funcionamiento de equipos de comunicación, control, protección y medición.

En este sentido, los armónicos tienen un impacto directo en el cálculo del factor de potencia total de la instalación, que a su vez puede incidir en el cálculo de la facturación del consumo de la energía eléctrica dependiendo de la legislación vigente, lo que hace necesaria una revisión de los conceptos de factor de potencia ante la presencia de armónicos.

Este trabajo presenta un conjunto de mediciones realizadas en la red de distribución del sistema metropolitano de la ANDE con el objetivo de tener una indicación preliminar del grado de contaminación armónica existente en el sistema nacional, así como realizar un estudio de los posibles impactos de los armónicos en las redes eléctricas, tanto desde el punto de vista técnico como comercial.

Con el trabajo se busca también contribuir en un tema de limitado estudio y tratamiento en el ámbito técnico nacional, y el cual se espera vaya tomando mayor relevancia en virtud al importante aumento de cargas no lineales.

2. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE NIVELES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ANDE

Dado los efectos que pueden producir los armónicos en la red eléctrica, tanto en el desempeño de los equipos como potencialmente en la facturación, resulta importante determinar la presencia de armónicos en la red de distribución e instalaciones de usuarios del sistema eléctrico nacional.

Por ello se presenta un conjunto de mediciones de niveles de distorsión armónica, tanto de tensión como de corriente, en distintos puntos de la red de media y baja tensión de la red de ANDE. Restricciones en cuanto a la disponibilidad de recursos para efectuar las mediciones, han obligado a limitar el número de mediciones efectuadas. No obstante, se estima que los resultados obtenidos pueden ser indicativos para efectuar

XI SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay
24, 25 y 26 de Setiembre de 2014

conclusiones preliminares y orienten la elaboración de planes de estudios y mediciones a fin de determinar el desempeño del sistema en lo referente a armónicos.

Para ello, se han llevado adelante el conjunto de mediciones de distorsión armónica de tensión y corriente en las instalaciones indicadas a continuación:

- **Red de Media Tensión (23 kV):** barras de la Subestaciones de San Lorenzo, Barrio Parque y Guarambaré.
- **Red de Baja Tensión (380 V):** transformador de 200 kVA de puesto de distribución de la ANDE; usuario industrial con transformador de 300 kVA; hospital público con transformador de 200 kVA y usuario residencial con transformador de 100 kVA.

Se utilizaron 2 analizadores de redes, propiedad de la ANDE y proveídos por el Departamento de Mediciones y Protecciones. En media tensión se utilizó el analizador trifásico de energía de la calidad de energía eléctrica Fluke, en tanto que en baja tensión se utilizó un analizador de energía eléctrica Dranetz Power Platform PP1.

Si bien la norma recomienda realizar mediciones como mínimo por un periodo de 72 horas en el punto de acople común, por restricciones de disponibilidad de los instrumentos, los periodos han sido alterados conforme se resume en la tabla a continuación:

Tabla I. Mediciones realizadas

Medición realizada	Nivel de Tensión	Periodo de medición	Analizador utilizado
Usuario Residencial	380 V	23/03/2012 - 24/03/2012	Dranetz
Hospital	380 V	01/04/2012 - 02/04/2012	Dranetz
Usuario Industrial	380 V	27/09/2012 - 29/09/2012	Dranetz
Subestación San Lorenzo	23 kV	18/10/2012 - 19/10/2012	Fluke 435
Subestación Barrio Parque	23 kV	10/12/2012 - 17/12/2012	Fluke 435
Subestación Guarambaré	23 kV	17/12/2012 - 19/12/2012	Fluke 435
PD ANDE	380 V	28/04/2013 - 29/04/2013	Dranetz

En Media Tensión se obtuvieron los valores de la distorsión armónica de corriente, tanto total como individual. En Baja Tensión se obtuvieron los valores de distorsión armónica de corriente, total e individual; así como los valores de distorsión armónica de tensión total e individual.

En la tabla II y III se muestran valores representativos encontrados, de manera tal que se pueda observar la contaminación en el sistema eléctrico estudiado y evaluar algunos de los casos utilizando la norma IEEE 519.

Tabla II. Valores representativos de Distorsión Armónica Total de Tensión (TDHV)

Distorsión armónica de tensión (en porcentaje de la fundamental)			
Mediciones	Nivel de Tensión	TDHV (%)	Fase
Subestación SLO *	23 kV	-	-
Subestación GUA *	23 kV	-	-
Subestación BPA *	23 kV	-	-
PD ANDE	380 V	1	A
Usuario Industrial	380 V	4	A
Hospital público	380 V	2,05	B
Usuario Residencial	380 V	2,09	A

* Mediciones no disponibles

XI SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay
24, 25 y 26 de Setiembre de 2014

Tabla III. Valores representativos de Distorsión Armónica de Corriente (THDI)

Distorsión armónica de corriente (en porcentaje de la corriente fundamental)										
Mediciones	Nivel de Tensión	THDI	Fase	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°
Subestación SLO	23 kV	3,82	C	0,92	3,53	1,02	0,16	0,36	-	-
Subestación GUA	23 kV	2,33	C	0,76	1,75	1	0,32	0,19	-	-
Subestación BPA	23 kV	2,4	C	0,41	0,88	-	-	-	-	-
PD ANDE	380 V	15,21	A	10	5,8	3	2,5	2,7	1,5	0,4
Usuario Industrial	380 V	47,94	A	11,2	45,38	7,7	6,6	11,53	2,9	0,6
Hospital público	380 V	18,71	B	11,6	9,4	6,1	5,3	5,2	6,4	1,7
Usuario Residencial	380 V	18,39	B	9,9	9	3,5	4,2	4,8	4	1,6

Para los casos de **media tensión** se toma como valor representativo de THDI y de las corrientes armónicas individuales el promedio de todas las medidas obtenidas, durante el transcurso de la medición para cada caso. Se observa que:

- Todos los puntos medidos presentan contaminación armónica de corriente.
- El mayor valor de THDI se da en la Subestación de San Lorenzo (3,82 %).
- Las Subestaciones de San Lorenzo y Guarambaré presentan valores de corrientes armónicas impares (3, 5, 7, 9, 11), con predominancia de la 5ta armónica en ambos casos
- La Subestación de Barrio Parque presenta valores de corrientes armónicas impares (3 y 5) comparables.

En **baja tensión** el valor de THDI y de las corrientes armónicas individuales corresponden al percentil 95. El valor indicado del percentil 95 significa que el 95% por ciento de las veces en el transcurso de la medición el valor del THDI y de las corrientes armónicas individuales ha sido menor o igual al valor correspondiente calculado en cada caso.

Para las cargas indicadas en baja tensión, se realiza la comparación de los valores obtenidos con los valores límites recomendados por la norma IEEE 519. Se toma como valor de comparación el valor correspondiente al percentil 95 %, pues los análisis indican que los valores mínimo y máximo no reflejan en general el comportamiento de las distorsiones armónicas debido a que estos valores pueden corresponder a estados no permanentes, y por tanto, se puede subestimar el efecto de los armónicos (caso valor mínimo) o bien sobrevalorarlos (en el caso del valor máximo). Si bien, el análisis se centra en la evaluación de unos índices en particular, la distorsión armónica total y el contenido de las corrientes armónicas individuales (ambos en porcentaje de la corriente fundamental), se debe resaltar que éstos índices no pueden ser considerados como una representación exacta de la calidad de servicio del sistema eléctrico estudiado. Para que dicha representación sea exacta se requiere más de un indicador. Sin embargo, dado el objetivo del trabajo de efectuar una evaluación preliminar indicativa del nivel de distorsión existente en la red de ANDE, se considera pertinente utilizar el valor de distorsión armónica total para sintetizar su desempeño.

Las tablas IV, V, y VI muestran los resultados de la comparación de los valores obtenidos en las mediciones contra los límites recomendados por la norma.

XI SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay
24, 25 y 26 de Setiembre de 2014

Tabla IV. Comparación de resultados con límites de distorsión total permitidos por IEEE 519.

Usuario	PD ANDE - Corriente			PD ANDE - Tensión		
	Fases	THDI95 (%)	Limite IEEE 519 (%)	Excede	THDV95 (%)	Limite IEEE 519 (%)
Fase A	15,91	8	SI	1,06	5	NO
Fase B	6,32	8	NO	0,94	5	NO
Fase C	7,98	8	NO	0,99	5	NO

Tabla V. Comparación de resultados con límites de distorsión total permitidos por IEEE 519.

Usuario	INDUSTRIAL - Corriente			HOSPITAL - Corriente			RESIDENCIAL - Corriente		
	Fases	THDI95 (%)	Limite IEEE 519 (%)	Excede	THDI95 (%)	Limite IEEE 519 (%)	Excede	THDI95 (%)	Limite IEEE 519 (%)
Fase A	47,94	8	SI	12,9	8	SI	15,52	15	SI
Fase B	42,23	8	SI	18,71	8	SI	18,39	15	SI
Fase C	42,23	8	SI	11,11	8	SI	12,99	15	NO
Fases	THDV95 (%)	Limite IEEE 519 (%)	Excede	THDV95 (%)	Limite IEEE 519 (%)	Excede	THDV95 (%)	Limite IEEE 519 (%)	Excede
Fase A	4	5	NO	2,15	5	NO	2,09	5	NO
Fase B	3,93	5	NO	2,05	5	NO	2,03	5	NO
Fase C	3,85	5	NO	1,82	5	NO	1,81	5	NO

Tabla VI. Comparación de resultados con límites de distorsión individuales permitidos por IEEE 519.

Corrientes armónicas individuales (en porcentaje de la corriente fundamental)										
Mediciones	Fase	3°	Limite IEEE 519 (%)	Excede	5°	Limite IEEE 519 (%)	Excede	7°	Limite IEEE 519 (%)	Excede
		PD ANDE	A	10	7	SI	5,8	7	NO	3
Usuario Industrial	A	11,2	7	SI	45,38	7	SI	7,7	7	SI
Hospital público	B	11,6	7	SI	9,4	7	SI	6,1	7	NO
Usuario Residencial	B	9,9	12	NO	9	12	NO	3,5	12	NO
Mediciones	Fase	9°	Limite IEEE 519 (%)	Excede	11°	Limite IEEE 519 (%)	Excede	13°	Limite IEEE 519 (%)	Excede
PD ANDE	A	2,5	7	NO	2,7	3,5	NO	1,5	3,5	NO
Usuario Industrial	A	6,6	7	NO	11,53	3,5	SI	2,9	3,5	NO
Hospital público	B	5,3	7	NO	5,2	3,5	SI	6,4	3,5	SI
Usuario Residencial	B	4,2	12	NO	4,8	5,5	NO	4	5,5	NO

Las cargas de los consumidores presentan contaminación armónica de corriente significativa. Se observa la predominancia de la 5ª armónica dentro del espectro armónico presente. El consumidor industrial ha mostrado valores bien superiores a los demás consumidores analizados.

3. EVALUACIÓN DE POTENCIAL IMPACTO DE ARMÓNICOS EN LA MEDICIÓN Y FACTURACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Considerando el nivel de armónicos encontrados en el sistema eléctrico, y que las definiciones de potencia eléctrica del pliego tarifario de la ANDE [3] están claramente formuladas para ondas de tensión y corriente puramente sinusoidales, se analiza el eventual impacto que tendrían los armónicos en la medición de los valores de tensión y corriente, así como de potencia eléctrica. La consideración de los armónicos para dichos cálculos requiere una modificación de las definiciones de potencia eléctrica actualmente utilizadas.

El Pliego de Tarifas N° 20, de la ANDE, define cuanto sigue:

- **Factor de potencia medio del mes:** Valor que resulte dividiendo el consumo de energía activa por la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de la energía activa más el cuadrado de la energía reactiva.
- **Penalización:** En caso que el valor del factor de potencia medio mensual del cliente resulte inferior a 0,92 el precio del kilovatio – hora (energía activa) se aumentará a razón de 4 % por cada centésimo del valor del factor de potencia medio mensual inferior a 0,92 para todas las categorías. Cuando el factor de potencia medio mensual del cliente resulte inferior a 0,80; el mismo debe corregir su instalación hasta alcanzar, por lo menos, dicho valor. Si así no lo hiciere, la ANDE suspenderá el suministro.

A partir de esta definición, y considerando que la fórmula del cálculo de factor de potencia varía para condiciones no sinusoidales, puede concluirse que el Pliego Tarifario vigente no tiene un tratamiento adecuado de los armónicos.

Se resalta que el factor de potencia es un indicador que busca de alguna manera medir la “eficiencia” del consumo. Así, un bajo factor de potencia indica elevados requerimientos de capacidad (corriente) de los equipos para un bajo consumo de potencia activa (útil), Por ello la desconsideración de los armónicos en las mediciones puede inducir a un dimensionamiento erróneo del sistema eléctrico, así como a su operación técnicamente no optimizada.

A los fines de evaluar el posible impacto en la facturación, se ha desarrollado una rutina en el programa **SCILAB 5.4.0** [4], versión libre, que implementa un algoritmo de simulación de mediciones de tensión, corriente, potencia activa, potencia aparente y factor de potencia, pretendiendo simular a un medidor de energía eléctrica. Para el efecto se utiliza la transformada de Fourier (FFT), que para el caso de una señal periódica, la transformada de Fourier $F(\omega)$ es discreta. Con esta herramienta matemática se hallan las componentes armónicas, reconstruyendo las señales de tensión y corriente, ambas con contenido armónico hasta el orden 25, y a partir de estos valores se realizan los diferentes cálculos deseados. En este caso se utiliza una ventana de análisis de 20 ms, utilizándose una frecuencia de muestreo de 2500 Hz.

Se analizan en total 9 casos (simulaciones):

- Los casos 1, 2 y 3 se analizan cargas con ondas de tensión y corriente con distintas condiciones de contaminación armónica extraídos de la literatura.
- Los casos 4 (PD ANDE) y 5 (Hospital) se realizan utilizando los valores de tensión y corriente obtenidos en las mediciones realizadas. Como las tres fases presentan características similares se toma los valores de la fase que presenta mayor contenido de contaminación armónica a fin de visualizar la influencia de la misma en el cálculo de los parámetros eléctricos.
- Los casos 6 (Notebook), 7 (Refrigerador), 8 (Balastro electrónico) y 9 (Equipo de sonido) se realizan utilizando valores de tensión y corriente obtenidos en la medición de armónicos en aparatos electro – electrónicos de uso en los hogares [5] y corresponden a casos de cargas aisladas.

En las simulaciones se analiza el efecto de considerar diferentes definiciones de factor de potencia. Los resultados de las simulaciones se muestran en las tablas VII y VIII.

XI SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay
24, 25 y 26 de Setiembre de 2014

Tabla VII. Valores de tensión y corriente obtenidos en la simulación.

	Casos	THDI (%)	THDV (%)	Valor exacto (*)	Valor que debería ser medido considerando espectro armónico (**)	Valor que debería ser medido considerando exclusivamente componente fundamental (***)	Error (%) entre (**) y (***)
Tensión eficaz (V)	Caso 1	31,62	0	220	220	220	0
	Caso 2	0	18,027	223,546	223,546	220	1,612
	Caso 3	31,62	18,027	223,546	223,546	220	1,612
	Caso 4	16,914	0,696	222,406	222,406	222,401	0,002
	Caso 5	22,23	1,475	224,49	224,49	224,46	0,013
	Caso 6	11,29	1,195	220,395	220,395	220,38	0,007
	Caso 7	11,137	1,19	220,715	220,715	220,7	0,007
	Caso 8	137,21	1,06	220,492	220,492	220,48	0,005
	Caso 9	41,265	2,545	220,631	220,631	220,56	0,032
Corriente eficaz (A)	Caso 1	31,62	0	3,708	3,708	3,535	4,89
	Caso 2	0	18,027	3,535	3,535	3,535	0
	Caso 3	31,62	18,027	3,708	3,708	3,535	4,89
	Caso 4	16,914	0,696	18,755	18,755	18,493	1,42
	Caso 5	22,23	1,475	20,11	20,11	19,6312	2,44
	Caso 6	11,29	1,195	0,259	0,259	0,257	0,78
	Caso 7	11,137	1,19	0,661	0,661	0,657	0,61
	Caso 8	137,21	1,06	0,2048	0,2048	0,12	70,67
	Caso 9	41,265	2,545	0,0298	0,0298	0,0275	8,36

Con relación a las mediciones de tensión, se observa que para todos los casos, el valor de la tensión eficaz (*) y (**) son iguales. En el caso 1, que no posee THDV los valores de tensión eficaz (*), (**), (***) son iguales. Para los casos del 2 – 9, que presentan THDV, se observa que: El valor de la tensión eficaz considerando exclusivamente la fundamental es menor que el valor eficaz real. El valor eficaz calculado considerando el espectro armónico es igual al valor exacto. La diferencia depende directamente de la contaminación armónica existente en cada caso.

Con relación a las mediciones de corriente, se observa que para todos los casos, el valor de la corriente eficaz (*) y (**) son iguales. Para el Caso 2 que no presenta THDI, el valor eficaz de la corriente (*), (**) y (***) son iguales. En los casos 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 que presentan distorsión armónica se observa que el valor eficaz midiendo exclusivamente la fundamental es menor que el valor eficaz real. Al considerar el espectro armónico, el valor eficaz es igual al valor real.

XI SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay
24, 25 y 26 de Setiembre de 2014

Tabla VIII. Valores de potencia activa media, potencia aparente y factor de potencia obtenidos en la simulación.

	Casos	THDI (%)	THDV (%)	Valor exacto (*)	Valor que debería ser medido considerando espectro armónico (**)	Valor que debería ser medido considerando exclusivamente componente fundamental (***)	Error (%) entre (**) y (***)
Potencia activa media (W)	Caso 1	31,62	0	550	550	550	0
	Caso 2	0	18,027	550	550	550	0
	Caso 3	31,62	18,027	590,76	590,76	550	7,41
	Caso 4	16,914	0,696	3562,164	3562,164	3561,854	0,01
	Caso 5	22,23	1,475	3634,401	3634,401	3628,707	0,16
	Caso 6	11,29	1,195	53,324	53,324	53,3	0,045
	Caso 7	11,137	1,19	93,285	93,285	93	0,306
	Caso 8	137,21	1,06	23,2	23,2	23,087	0,489
	Caso 9	41,265	2,545	4,178	4,178	4,148	0,723
Potencia aparente (VA)	Caso 1	31,62	0	815,781	815,781	777,817	4,881
	Caso 2	0	18,027	790,355	790,355	777,817	1,612
	Caso 3	31,62	18,027	828,93	828,93	777,817	6,571
	Caso 4	16,914	0,696	4171,39	4171,39	4112,87	1,423
	Caso 5	22,23	1,475	4514,59	4514,59	4406	2,465
	Caso 6	11,29	1,195	57,085	57,085	56,722	0,64
	Caso 7	11,137	1,19	146,042	146,042	145,13	0,628
	Caso 8	137,21	1,06	45,166	45,166	26,659	69,421
	Caso 9	41,265	2,545	6,582	6,582	6,082	8,221
Factor de potencia	Caso 1	31,62	0	0,674	0,674	0,707	-0,033
	Caso 2	0	18,027	0,695	0,695	0,707	-0,012
	Caso 3	31,62	18,027	0,712	0,712	0,707	0,005
	PD ANDE	16,914	0,696	0,854	0,854	0,866	-0,012
	Hospital	22,23	1,475	0,805	0,805	0,823	-0,018
	Caso 6	11,29	1,195	0,934	0,934	0,94	-0,006
	Caso 7	11,137	1,19	0,638	0,638	0,642	-0,004
	Caso 8	137,21	1,06	0,513	0,512	0,866	-0,354
	Caso 9	41,265	2,545	0,634	0,634	0,682	-0,048

Con relación a las mediciones de potencia activa media, los casos 1 y 2 se corresponden con casos en que una de las magnitudes, la tensión o la corriente carece de contenido armónico, o sea, tiene exclusivamente componente fundamental. Se observa que para estos dos casos los valores de la potencia activa media (*), (**) y (***) son iguales; esto se debe a que en el cálculo de la potencia activa se realiza con la fórmula propuesta por Budeanu [6], y sólo existe incremento en el caso que, la tensión como corriente presenten armónicos del mismo orden. Para los casos del 3 al 9 que presentan distorsión armónica de corriente y tensión, los valores de potencia activa media mantienen la siguiente relación (*) = (**) > (***), esto responde que en este caso se tiene armónicos de tensión y corriente del mismo orden, por lo que el valor de potencia activa media (***) aumenta en porcentaje igual al valor representado en error, para cada caso.

Con relación a las mediciones de potencia aparente, la evaluación de la potencia aparente se analiza considerando los valores eficaces de la tensión y corriente que resultan de (*), (***) y (***), aplicando la fórmula de Budeanu para el cálculo. En todos los casos simulados 1 al 9, los valores de la potencia aparente mantiene la siguiente relación (*) = (**) > (***). Se aprecia que la potencia aparente calculada considerando exclusivamente la componente fundamental es menor al valor real. Cuanto mayor es el contenido de armónico, resultan mayores diferencias y errores asociados. El valor de la potencia aparente aumenta siempre que exista distorsión de tensión o corriente o ambos.

Con relación a las mediciones del factor de Potencia, se observa que para los casos 1, 2, 4, 5, 6, 7 y 9, el valor del factor de potencia obtenido teniendo en cuenta exclusivamente la componente fundamental, es

menor al valor del factor de potencia verdadero. La relación entre los valores obtenidos para estos 8 casos es $(*) = (**)$ < $(***)$. Esta disminución tiene implicancia directa con el contenido armónico que presenta cada uno de los casos. Para el caso 3 la relación entre los valores obtenidos es el siguiente $(*) = (**)$ > $(***)$. Esto responde a que es el único caso en el que se tienen valores de distorsión armónica de tensión y corriente que sobrepasan los límites recomendados, el caso de la tensión (10%) recomendado, además poseen armónicos individuales del mismo orden, lo que implica que los valores de tensión eficaz, corriente eficaz serán mayores que sólo considerando la componente fundamental, por consiguiente los valores de potencia activa media total y potencia aparente aumentarán y como resultado se obtiene un factor de potencia real como relación de éstas. Se observa con claridad que el tratamiento del factor de potencia real del sistema en condiciones no sinusoidales difiere del factor de potencia de desplazamiento. En estas condiciones el cálculo del factor de potencia real del sistema no puede ser obtenido utilizando el triángulo de potencia, pues los valores reales que deberían ser medidos en condiciones no sinusoidales difieren de los valores en condiciones puramente sinusoidales, para el cual está diseñado éste triángulo, se hace necesaria la incorporación del concepto de potencia de distorsión. Todos los casos simulados presentan condiciones no sinusoidales en las que se verifica esta diferencia.

4. CONCLUSIONES

El sistema de distribución analizado ha mostrado niveles de contaminación armónica de corriente bajos en la red de media tensión (23 kV), bien dentro de límites internacionalmente recomendados.

En la red de baja tensión (380 V), se ha observado niveles de contaminación armónica de tensión dentro de los límites recomendados, sin embargo se verificó que la contaminación armónica de corriente excede los límites recomendados en algunos casos.

Los niveles de distorsión armónica de corriente muestran un estado de contaminación, con predominancia de los armónicos de orden impar, compatible con la experiencia de otros países.

Considerando que los niveles de distorsión armónica de tensión son normalmente bajos, se puede apreciar, que no existirán diferencias sustanciales en la medición de la potencia activa considerando todo el contenido de armónico de corriente de la carga o exclusivamente la fundamental.

No obstante, la consideración o no de todo el contenido armónico produce un impacto más significativo en el cálculo del factor de potencia de la carga. Dado que el factor de potencia es utilizado como indicador de la “eficiencia” del consumo de la energía eléctrica, los errores introducidos por la no consideración de los armónicos presentan potenciales impactos en la optimización del sistema eléctrico, así como en las penalidades monetarias contempladas en el Pliego Tarifario de ANDE.

El Pliego Tarifario de ANDE, y la definición de factor de potencia contemplado en éste no tiene un tratamiento adecuado de los armónicos, por lo tanto no existe ningún tipo de penalización.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE; Práctica y requerimientos recomendados por el IEEE para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia; IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems; IEEE Std519-1992; IEEE Press; USA, 1992.
- [2] Parra López, Estrella Esperanza; Análisis de armónicos en sistemas de distribución; Universidad Nacional de Colombia; Facultad de Ingeniería; Unibiblos; Colombia, 2004
- [3] www.ande.gov.py
- [4] www.scilab.org
- [5] Ortiz, Pablo; Mareco, Sebastián; Medición de armónicos en aparatos electro – electrónicos de uso en los hogares; Trabajo Final de Grado de Ingeniería Electromecánica, Universidad Nacional de Asunción, 2007.
- [6] Cortéz, Miguel; Calidad de la Energía Eléctrica; Instituto tecnológico de Puebla; Departamento de Ingeniería y Electrónica; Febrero, 2009.