

# MEDICIÓN DE CONTENIDO DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN CORRIENTES Y TENSIONES EN B.T. EN EL INSTITUTO DE CARDIOLOGÍA DE CORRIENTES, Y COMPARACIÓN CON RESOLUCIONES ENRE

Luis Alberto Esquivel (\*)

## RESUMEN

En este trabajo se muestran el análisis de los resultados de medición de contenido de distorsión armónica en tensiones y corrientes, realizada con un registrador Fluke 1735 en cada uno de los tres interruptores de acometida en Baja Tensión de la instalación eléctrica del Instituto de Cardiología “Juana Francisca Cabral” de la Ciudad de Corrientes. El proceso de medición se extendió por 24 hs para el registro de armónicas en cada uno de los puntos de medición.

Los valores de armónicos obtenidos en los puntos de medición se comparan con los valores máximos admisibles establecidos en las Resoluciones ENRE 99/97 y ENRE 184/2000. La determinación de la situación de los valores medidos en relación dichos límites permite la evaluación cualitativa del estado de la instalación del Instituto, específicamente en lo que respecta a armónicas de tensión y corriente.

El autor cursa el 5º año de Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la UNNE.

Es presente es un resumen del trabajo que él presentará a la Cátedra Proyecto Final.

**Lugar de Trabajo:** Instituto de Cardiología de Corrientes “Juana Francisca Cabral”.

## 1.1- DISTORSIÓN ARMÓNICA, DEFINICIONES.

La distorsión armónica es producida por el empleo de dispositivos no lineales, donde la corriente no es proporcional con la tensión aplicada, como puede verse en la Fig. 1.1:

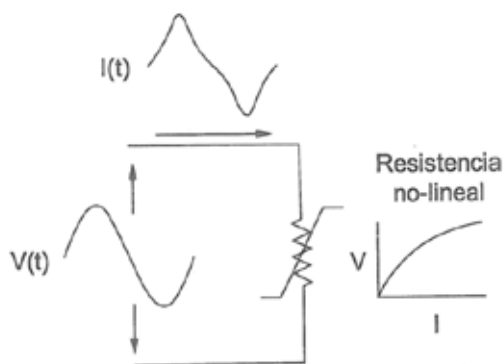


Fig. 1.1: Generación de corriente distorsionada por resistencia no lineal

(\*) Ingeniería Eléctrica. FaCENA – UNNE. aluisesquivel@gmail.com - TEL: +54 (0379) 154 777123 - DOMICILIO DEL AUTOR: Los Charrúas N° 3187. Corrientes Capital. CP 3400

Una onda periódica puede siempre ser descompuesta en una serie de funciones senoidales (armónicas) de frecuencias que son múltiplos enteros de la fundamental más una componente de corriente continua, denominada Serie de Fourier, en honor

al matemático que describió el concepto.

Cada una de las componentes citadas posee magnitud, fase y secuencia.

La Fig. 1.2 muestra un ejemplo simple de descomposición típica:

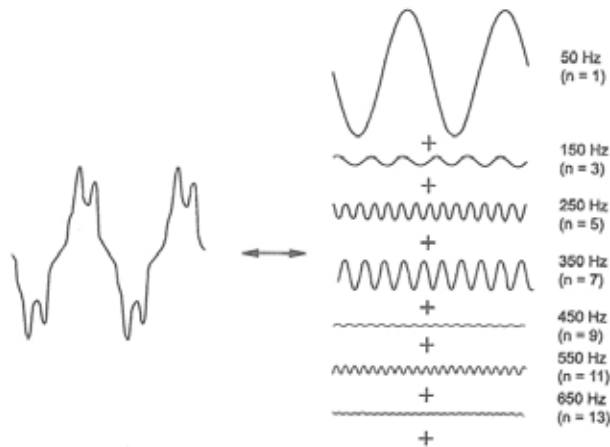


Fig. 1.2: Descomposición en armónicas de una onda distorsionada típica

La expresión analítica del enunciado de Fourier es la siguiente:

$$U(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n C_i \cdot \text{sen}(i \cdot \omega t + \varphi_i)$$

Donde:

$i$ : orden de la armónica 1,2,3,...,n.

$a_0$ : amplitud de la componente de continua.

$C_i$ : amplitud de la componente de orden  $i$ .

$\omega$ : frecuencia angular,  $\omega=2\pi f$  con  $f$ : frecuencia fundamental

$\varphi_i$ : ángulo de fase de la armónica  $i$ .

La representación de la distorsión de onda como sumatoria de armónicas individuales, permite.

- Que en una red lineal cada componente armónica pueda tratarse en forma individual.
- Para cada componente puedan utilizarse las herramientas clásicas de Corriente alterna
- La descomposición armónica es compatible con los instrumentos de medición.
- La fijación de límites tolerables individuales de perturbación por armónica.

## 1.2- VALOR EFICAZ, THD Y TDD.

La medida más común para cuantificar la presencia de armónicas es el THD (Distorsión Armónica Total), que indica el contenido armónico de una onda, pudiendo tratarse de tensión o corriente.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} M_h^2}}{M_1} \cdot 100$$

Donde  $M_h$  es el valor eficaz de la componente armónica de orden  $h$  de la magnitud  $M$ .

El THD es una medida del valor eficaz, expresada en por ciento. En Argentina y países vecinos se lo denomina Tasa de Distorsión Total: TDT.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} M_h^2}}{M_{\max}} \cdot 100$$

La Distorsión Total de Demanda (TDD) indica el contenido armónico de la corriente, en relación porcentual a la máxima corriente demandada registrada durante el período de estudio.

Esta última definición es importante para evitar sobredimensionar el problema, como en el caso típico de la corriente

El THD de la tensión es una medida significativa, pero el de la corriente puede ser muy alto pero no afectar al sistema debido a lo pequeño de la corriente total. Por esto, surge el TDD:

te en vacío de un transformador con un elevado contenido de armónicas, pero que afecta solo ligeramente al sistema.

Un armónico de orden particular, también se puede normalizar con respecto a la fundamental o al máximo registrado durante el período en estudio.

## 2. NORMATIVA ARGENTINA.

En nuestro medio la Calidad de Potencia se comenzó a reglamentar a partir de la "Ley N° 24.065 de Energía Eléctrica", promulgada en el año 1992.

Esta ley fue seguida por el Decreto N° 1398/92 reglamentario de la Ley N° 24.065. En ella se señala que:

*"Los criterios para determinar las especificaciones mínimas de calidad de la electricidad que se coloque en el sistema de transporte y/o distribución deberán ajustarse a las nor-*

*mas técnicas, que a tales fines, establezca el ENTE NACIONAL REGULADOR DE LA ELECTRICIDAD". [Artículo 26]*

*El ENTE REGULADOR "deberá estimular las inversiones en construcción y mantenimiento de instalaciones. Mediante descuentos en la facturación a usuarios finales en caso que el distribuidor no dé cumplimiento a las normas de calidad de servicio establecidas en su contrato de concesión". [Artículo 41].*

En este Decreto se definen los conceptos de Calidad de Servicio, Calidad del Producto y Calidad de Servicio Co-

mercial. También se establece que el concesionario es quien determina, a su criterio los trabajos e inversiones que escatime necesarios para dar cumplimiento a las normas establecidas por el ENRE.

El ENRE debe instruir al concesionario que realice las campañas de medición, y organice base de datos con los resultados de esta campaña.

### 2.1. RESOLUCIÓN ENRE 99/97 (Control a los usuarios).

Resulta de particular interés para este trabajo lo siguiente:

-El límite de emisión individual para corrientes armónicas se obtiene para cada intensidad armónica y se determina en función de la potencia contratada y el nivel de tensión. Según el tipo de usuario, los límites se dan en amperes para BT y potencia contratada menor a 10 KW, o en valores porcentuales para potencias mayores. Estos porcentajes se especifican para el orden de cada armónica en particular, de acuerdo a la tabla siguiente

Orden de la armónica (n)	Intensidad armónica máxima (A)	Usuarios BT y MT, Intensidad Armónica, como % de la corriente	Usuarios AT, Intensidad armónica máxima, como % de la corriente
<b>Impares no múltiplos de 3</b>			
5	2,28	12	6,0
7	1,54	8,5	5,1
11	0,66	4,3	2,9
13	0,42	3,0	2,2
17	0,26	2,7	1,8
19	0,24	1,9	1,7
23	0,20	1,6	1,1
25	0,18	1,6	1,1
>25	4,5/n	0,2+0,8x25/n	0,4
<b>Impares múltiplos de 3</b>			
3	4,6	16,6	7,5
9	0,8	2,2	2,2
15	0,30	0,6	0,8
21	0,21	0,4	0,4
>21	4,5/n	0,3	0,4
<b>Pares</b>			
2	2,16	10,0	10,0
4	0,86	2,5	3,8
6	0,6	1,0	1,5
8	0,46	0,8	0,5
10	0,37	0,8	0,5
12	0,31	0,4	0,5
>12	3,68/n	0,3	0,5
TDTI (en %)	---	20,0	12,0

Tabla 2.1: Límites de armónicas de corrientes, en función de la tensión de suministro.

Entre los considerandos de la Resolución citada se enuncia lo siguiente:

*“...el Límite de Emisión Individual para cada usuario tiene una probabilidad de 5% de ser superado”.*

NOTA: Para este trabajo es de sumo interés la columna sombreada. Esta columna es la que se aplicará para diagnosticar el estado de la instalación eléctrica en estudio, en cuanto al contenido de distorsión armónica de corriente emitida por el usuario.

- Con el considerando que se nombró se

permite que el 5% de las mediciones sean mayores que los límites que se presentó en la Tabla 2.1. En términos estadísticos, esta tabla expone los percentiles 95 máximos admisibles, es decir, del total de valores medidos, el 95% del deben ser menores que los que figuran en la Tabla 2.1.

## 2.2- RESOLUCIÓN ENRE 184/2000 (control a las distribuidoras).

Los niveles de referencia para las armónicas de tensión que no deben ser superados en más del 5% del período de medición se muestran en la tabla siguiente

Impares no múltiplos de 3		Impares múltiplos de 3		Pares	
Orden de la armónica (n)	Nivel de referencia de la armónica (en % de la fundamental)	Orden de la armónica (n)	Nivel de referencia de la armónica (en % de la fundamental)	Orden de la armónica (n)	Nivel de referencia de la armónica (en % de la fundamental)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2+0,5 \times 25/n$				
Tasa de Distorsión Total: TDT 8%					

Tabla 2.1: Límites de armónicas de tensión en red para suministros en baja tensión

## 3- UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN

Las mediciones se efectuaron aguas abajo de cada uno de los bancos de capacitores de corrección del factor de potencia. Estos

puntos son los de acometida, desde la Red de Distribución a la Instalación Eléctrica del instituto.

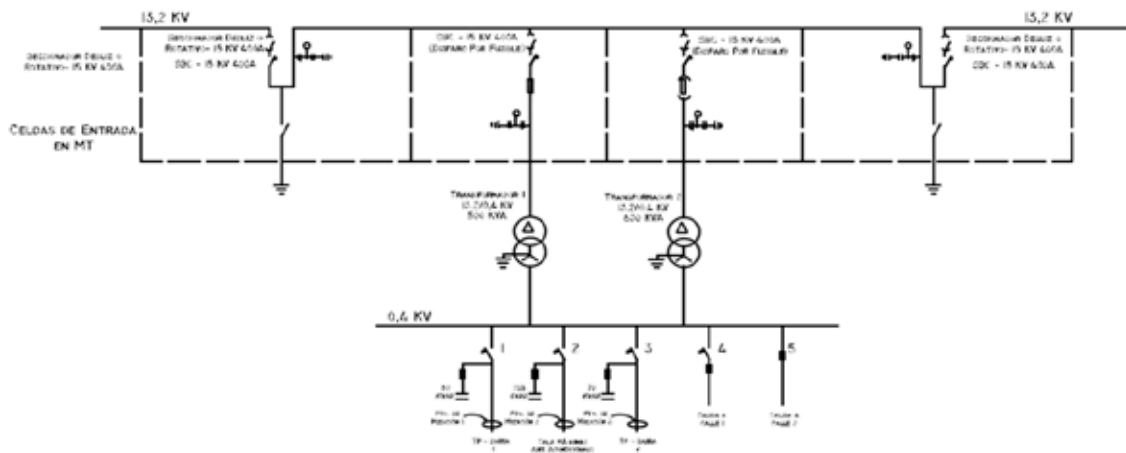


Fig. 4.1: Diagrama unifilar. Puntos de medición

#### 4. TRATAMIENTO DE DATOS

Para la aplicación de los pasos matemáticos, se diseñaron hojas de cálculo en Excel. Con estas hojas también se busca la comparación de los armónicos individuales de forma mecánica y objetiva, con respecto a las Resoluciones ENRE nombradas. Así se evita la incursión en errores, altamente probables ya que se cuenta con un número muy grande de datos.

Estas hojas pueden ser aplicadas, sin necesidad de modificación, en mediciones y comparaciones futuras con las Resoluciones ENRE 99/97 y 184/200.

En los libros de Excel nombrados como “Análisis de Armónicos de Corrientes”, se tienen 5 hojas:

- **Armónicos:** aquí se importaron los datos desde el software Power Log de FLUKE. Se presentan los armónicos individuales de corriente (en relación con la componente fundamental), indicando: día y hora de medición, magnitud de armónico, orden de armónico (desde la 2° hasta la 50°) y fase a la que corresponde (L1, L2, L3).
- **Corrientes:** los datos de esta hoja

también fueron importados directamente de Power Log. Se presentan los valores mínimo, medio y máximo de corriente medidos dentro de intervalos de 30 segundos, indicando también día y hora de medición, y fase a la que corresponde (L1, L2, L3).

- **H:** en esta hoja se convierte la magnitud que compara cada armónico con la fundamental, en la magnitud que la relaciona con la corriente máxima medida en el período de estudio.
- **Percentil:** en esta hoja se comparan los valores medidos con la Norma. Se calcula el Percentil 95 de cada armónica (definido en la NOTA del punto 2.1), en la columna C, y se lo compara con los armónicos máximos admisibles por Norma ENRE 99/97 que se transcribieron en la columna D.

Aquí se incluyó, en la columna E, la proposición lógica “Cumple con la Norma”. En caso de que la respuesta sea afirmativa, en la intersección de la fila correspondiente a cada armónico con la columna E aparece la expresión “SI”, sombreada en color verde. En caso contrario aparece la leyenda “NO”, sombreada de color rojo. De esta forma se muestra, a simple vista, si algún armónico es mayor al máximo admitido.

En esta hoja también se presenta el promedio de las tres fases para cada armónico individual. Este cálculo es necesario para el gráfico de barras de las magnitudes de cada armónico individual. De esta forma se facilita la comparación relativa entre ellas

- THDV: aquí se importan los datos directamente desde el software. Se presentan los valores de THD de tensión, que caracteriza al contenido armónico en forma global. Se detallan: fecha y hora de medición, magnitud de THD de cada fase (L1, L2, L3).

También se realiza el cálculo del percentil 95 del THD de tensión de cada fase y se la compara con el máximo admisible por Norma (Resolución ENRE 184/200). Esta comparación se realiza con una proposición lógica similar al explicado en el párrafo anterior.

De esta forma, a simple vista, se tiene el diagnóstico de la potencia provista por la Distribuidora.

## 5.1- RESULTADOS. PUNTO DE MEDICIÓN 1.

De la comparación hecha mediante Excel, surge que desde el Interruptor 1 se inyecta armónicos a la red de distribución por debajo de los máximos admitidos por Resolución ENRE 99/97.

El período de medición comprende desde las 20:48 hs del 28/09/2015 hasta las 23:26 del 29/09/2015.

En la Fig. 6.1 se muestran los Percentiles 95 de los armónicos individuales de corriente registrados. Estas magnitudes surgen del promedio de las tres fases.

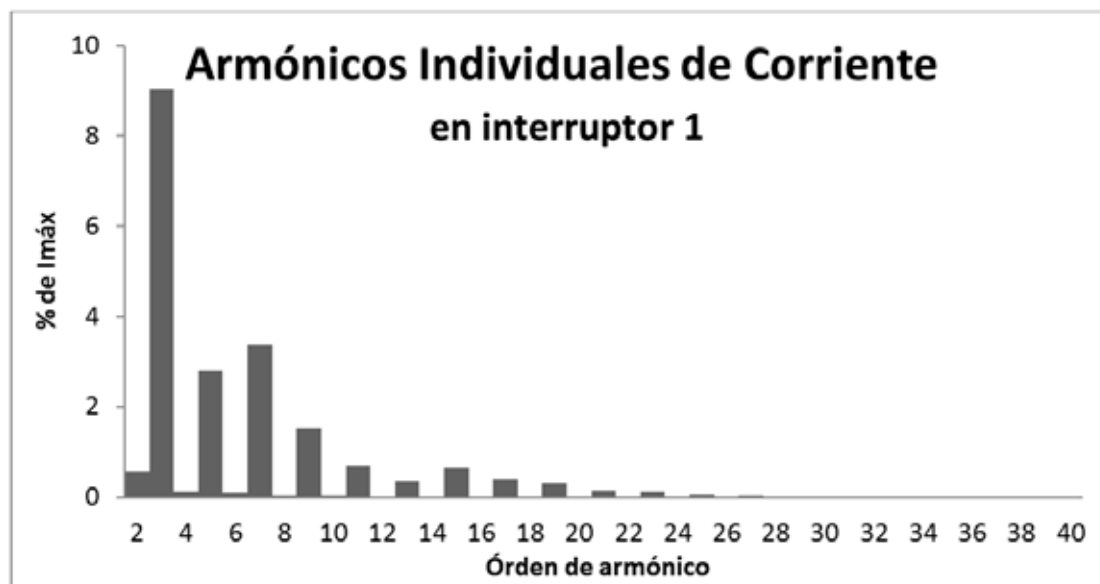


Fig. 6.1: Armónicos individuales de corriente en interruptor 1

Se verifica que el armónico de corriente de orden 3 es el mayor de todos, con una magnitud de 9,04% de la corriente fundamental máxima ( $I_{máx}$ ).

Los armónicos de corriente de orden par no son importantes en magnitud.

En la Fig. 6.2 que sigue se muestra la variación temporal del TDTI durante el período de medición. Como se dijo, esta magnitud cuantifica el contenido armónico global de la corriente.

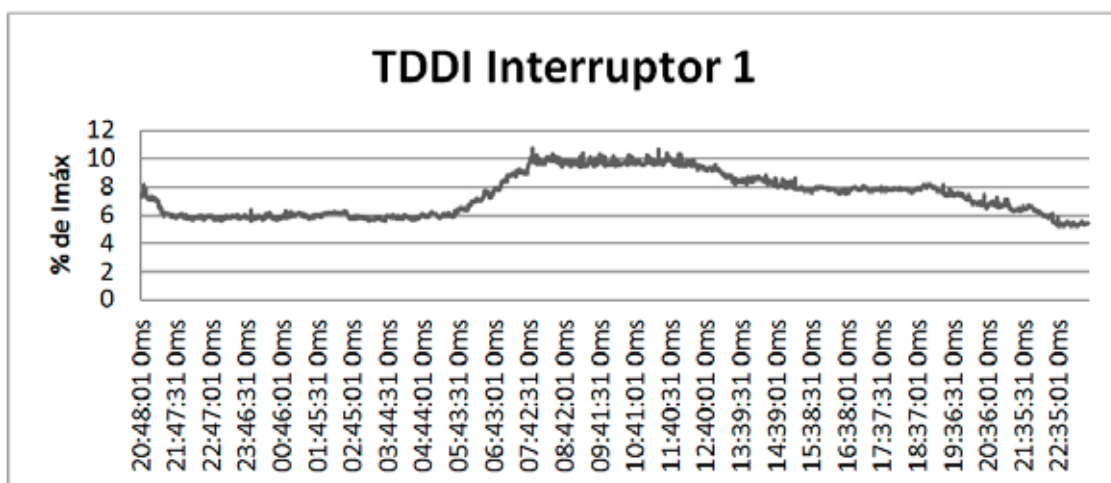


Fig. 6.2: Variación temporal de TDDI en Interruptor 1

Los mayores valores de TDDI se registraron en horas de la mañana, cercano al 10% de la corriente máxima (Imáx). Los menores TDDI se verifican en horas de la noche y la madrugada, a partir de las 21 hs y hasta las 6hs.

De la comparación hecha mediante Excel, surge que en el Interruptor 1 se recibe desde la red, energía con armónicos de tensión debajo del máximo admitido por Nor-

ma ENRE 184/2000.

El período de medición comprende desde las 20:48 hs del 28/09/2015 hasta las 23:26 del 29/09/2015.

En la gráfica que sigue se muestran los Percentiles 95 de los armónicos individuales de tensión registrados. Estas magnitudes de armónicos de tensión surgen del promedio calculado entre las tres fases.

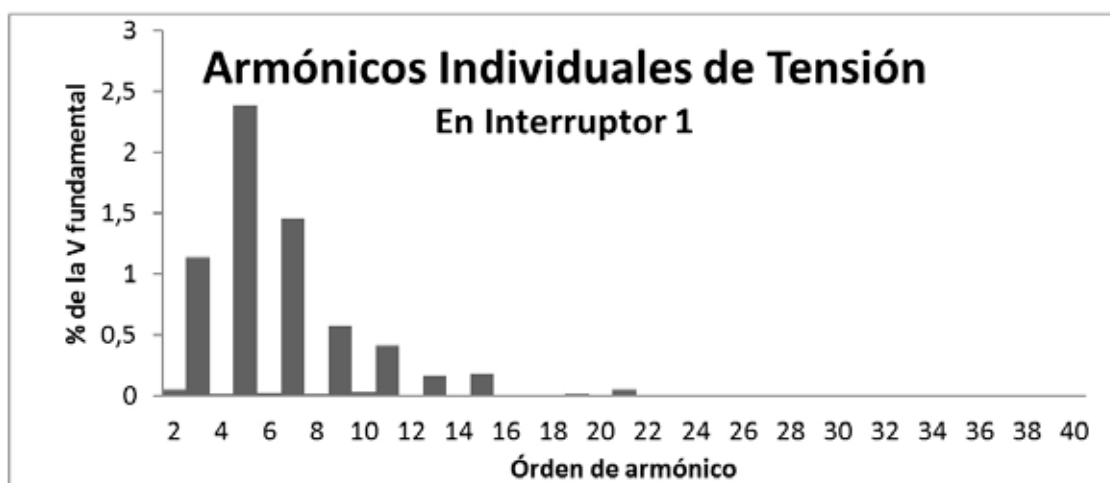


Fig. 6.3: Armónicos individuales de tensión en interruptor 1.



Se verifica que el armónico de tensión de orden 5 es el mayor de todos, con una magnitud de 2,38% de la componente fundamental de 50 Hz.

Los armónicos de tensión de orden par no son importantes en magnitud.

En la gráfica que sigue se muestra la variación temporal del THDV durante el período de medición. Como se dijo, esta magnitud cuantifica el contenido armónico global de la tensión.

Los mayores valores de THDV se regis-

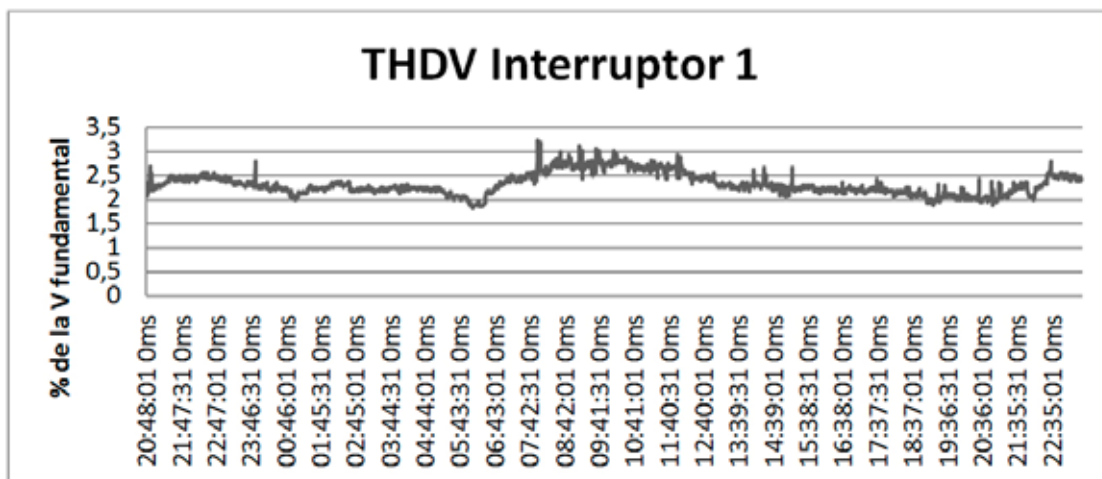


Fig. 6.4: Variación temporal de THDV en Interruptor 1

traron en horas de la mañana, aproximadamente a las 8 hs, cercano al 3% de la componente fundamental de la tensión.

5.2- RESULTADOS. PUNTO DE MEDICIÓN 2

De la comparación hecha mediante Excel, surge que desde el Interruptor 2 se inyecta armónicos a la red de distribución por debajo de los máximos admitidos por

Resolución ENRE 99/97.

El período de medición comprende desde las 17:30 hs del 1/10/2015 hasta las 17:30 hs del 2/10/2015.

En la grafica que sigue se muestran los Percentiles 95 de los armónicos individuales de corriente registrados. Estas magnitudes de armónicos surgen del promedio calculado entre las tres fases.

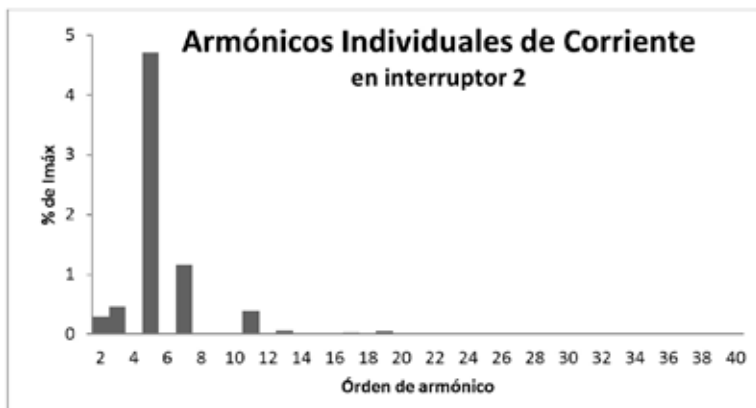


Fig. 6.5: Armónicos individuales de corriente en interruptor 2

Se verifica que el armónico de corriente de orden 5 es el mayor de todos, con una magnitud de 4,71% de la corriente fundamental máxima ( $I_{m\acute{a}x}$ ).

En la gráfica que sigue se muestra la variación temporal del TDDI durante el período de medición. Como se dijo, esta magnitud cuantifica el contenido armónico global de la corriente.

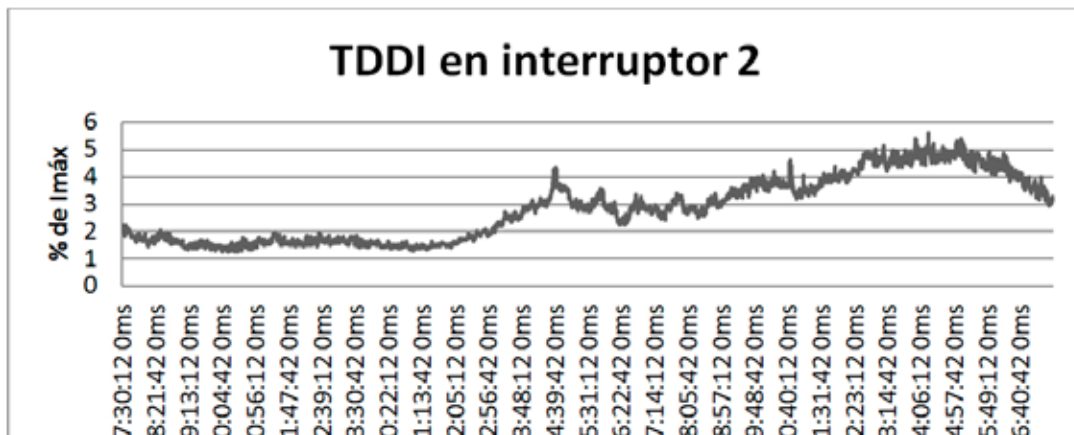


Fig. 6.6: Variación temporal de TDDI en Interruptor 2

Los mayores valores de TDDI se registraron en las primeras horas de la tarde, llegando al 5,63% de la corriente máxima ( $I_{m\acute{a}x}$ ). Los menores TDDI se verifican en horas de la noche y madrugada.

De la comparación hecha mediante Excel, surge que en el Interruptor 2 se recibe de la red, energía con armónicos de tensión debajo del máximo admitido por Norma

ENRE 184/2000.

El período de medición comprende desde las 17:30 hs del 1/10/2015 hasta las 17:30 del 2/10/2015.

En la gráfica que sigue se muestran los Percentiles 95 de los armónicos individuales de tensión registrados. Estas magnitudes de armónicos de tensión surgen del promedio calculado entre las tres fases.

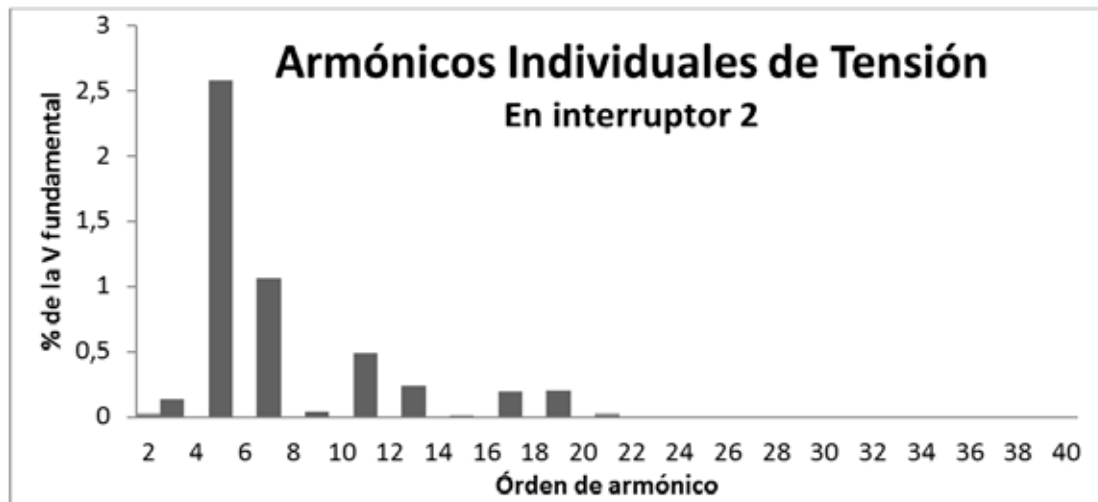


Fig. 6.7: Armónicos individuales de tensión en interruptor 2.

Se verifica que el armónico de tensión de orden 5 es el mayor de todos, con una magnitud de 2,58% con respecto a la componente fundamental de 50 Hz.

En la gráfica que sigue se muestra la variación temporal del THDV durante el período de medición. Como se dijo, esta magnitud cuantifica el contenido armónico global de la tensión .

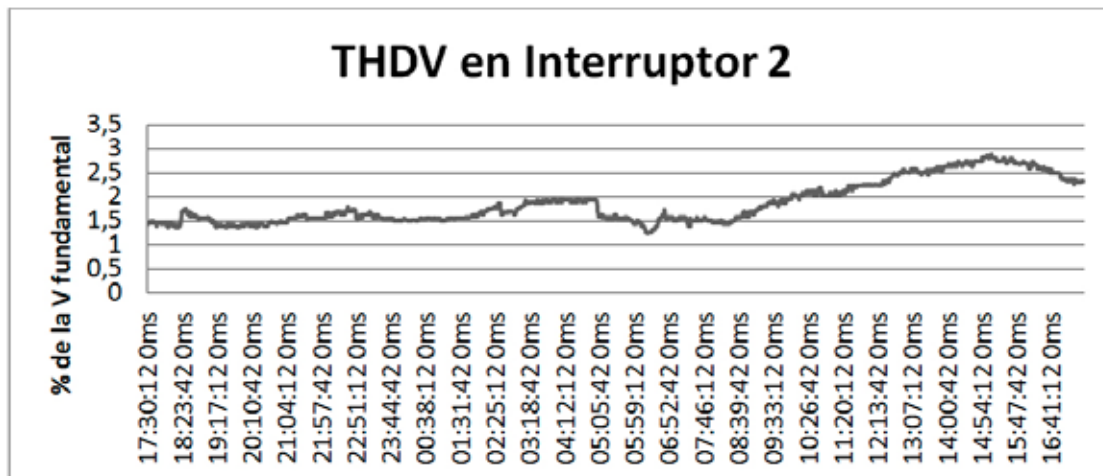


Fig. 6.8: Variación temporal de THDV en Interruptor 2.

Los mayores valores de THDV se registraron en las primeras horas de la tarde, aproximadamente a las 14:40 hs, cercano al 3% de la componente fundamental de la tensión.

por debajo de los máximos admitidos por Resolución ENRE 99/97.

El período de medición comprende desde las 17:50 hs del 3/10/2015 hasta las 17:50 hs del 4/10/2015.

### 5.3- RESULTADOS. PUNTO DE MEDICIÓN 3

De la comparación hecha mediante Excel, surge que desde el Interruptor 3 se inyecta armónicos a la red de distribución

En la grafica que sigue se muestran los Percentiles 95 de los armónicos individuales de corriente registrados. Estas magnitudes de armónicos surgen del promedio calculado entre las tres fases.

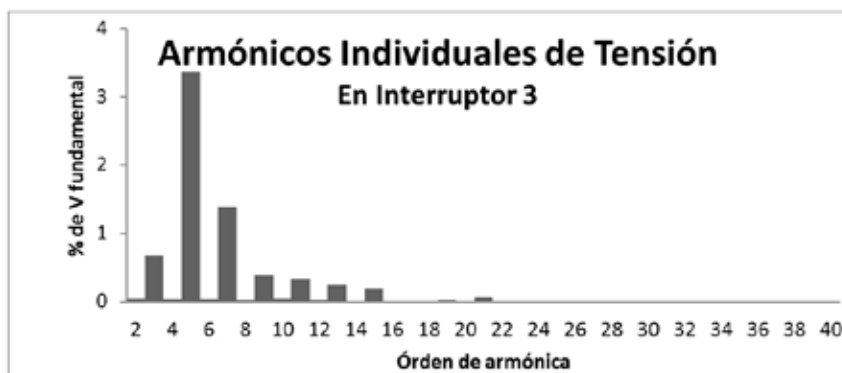


Fig. 6.9: Armónicos individuales de corriente en Interruptor 3

Se verifica que el armónico de corriente de orden 5 es el mayor de todos, con una magnitud de 5,29% de la corriente fundamental máxima (Imáx).

En la gráfica que sigue se muestra la variación temporal del TDDI durante el período de medición. Como se dijo, esta magnitud cuantifica el contenido armónico global de la corriente.

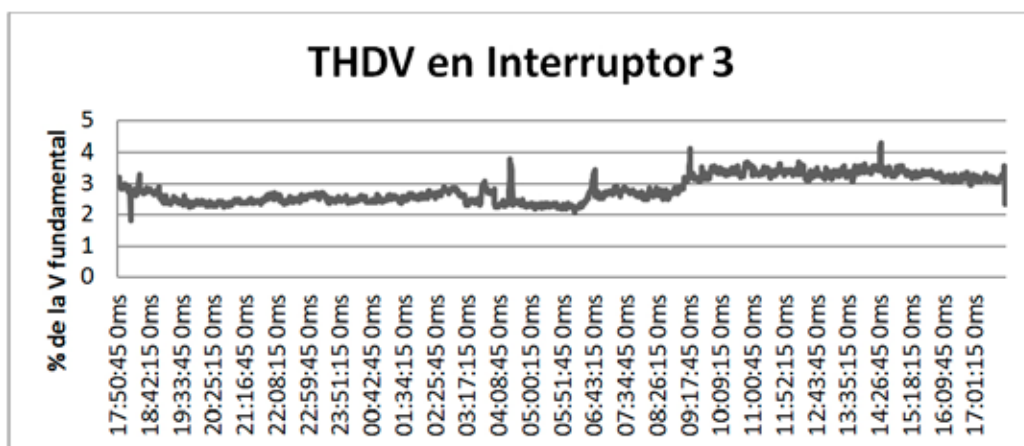


Fig. 4.24: Variación temporal de TDDI en Interruptor 3

Los mayores valores de THDV se registraron en las horas de la mañana, con un aumento marcado a partir de, aproximadamente, las 8:50 hs presentando una meseta en un 3,5% de la componente fundamental de la tensión. Se ve un pico muy significativo a las 14:28 hs, con una magnitud máxima de 4,3%.

## 6. CONCLUSIONES

De acuerdo a los límites establecidos en la Resolución ENRE 99/97, desde la instalación del Instituto de Cardiología “Juana Francisca Cabral”, se emite distorsión armónica de corriente hacia la red de distribución por debajo de los valores máximos admitidos. Tanto en cada armónico individual como en contenido global, en los tres puntos de medición.

De acuerdo a los límites establecidos la Resolución ENRE 184/2000, la Distribuidora que suministra energía eléctrica (DPEC) al Instituto lo hace con contenido de distorsión armónica de tensión con valores por debajo de los máximos admitidos. Tanto en cada armónico individual, como

en contenido global y en los tres puntos de acometida.

Este trabajo representa una metodología para el diagnóstico de una determinada instalación de BT, en cuanto al contenido armónico; teniendo en cuenta los límites establecidos en las Resoluciones citadas. Si bien estas Resoluciones no son de aplicación en la Provincia de Corrientes se los tomó de base de referencia por ser las “más cercanas” geográficamente, al no existir ninguna en vigencia referido a esta materia.

El establecimiento de límites de distorsión armónica de una región en particular debe tener en cuenta las costumbres de los usuarios, los receptores disponibles en el mercado local, la red de Distribución, etc. Es un estudio que debe comprender a todos los sectores del mercado: Usuarios, Distribuidoras, entes Reguladores, etc.

Para el autor, este trabajo es la primera experiencia en gestión (por los trámites para el préstamo del instrumento) y en aplicación de los conocimientos adquiridos a lo largo de su carrera.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Augusto Abreu, “Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución”, ENELVEN.

[2] Juan Carlos Gómez Targarona, “Calidad de Potencia”, Edigar, ISBN 987-97785-2-9.

[3] Resolución ENRE 0099/1997, “Base Metodológica para el Con-

trol de la Emisión de Perturbaciones”.

[4] Resolución ENRE 184/2000, “Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico”.

[5] Sobrevila Marcelo Antonio, “Corrientes Poliarmónicas”, Librería y Editorial Alsina.