

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA Y EL  
DESBALANCE DE TENSIÓN MEDIANTE EL USO DE  
HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Suárez D., Marcos J.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2006

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **EVALUACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA Y EL DESBALANCE DE TENSIÓN MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

Profesor Guía: Ing. Vanessa Carlson  
Tutor Industrial: Ing. Zulay Romero

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Suárez D., Marcos J.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2006


## CONSTANCIA DE APROBACIÓN


Caracas, 05 de mayo de 2006

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Marcos J., Suárez D., titulado:

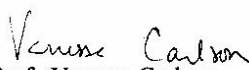
### “EVALUACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA Y EL DESBALANCE DE TENSIÓN MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

  
Prof. Julio Molina  
Jurado

  
Prof. Nerio Ojeda  
Jurado



  
Prof. Vanessa Carlson  
Prof. Guía

**Suárez D., Marcos J.**

**EVALUACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA Y EL  
DESBALANCE DE TENSIÓN MEDIANTE EL USO DE  
HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

**Prof. Guía: Ing. Vanessa Carlson. Tutor Industrial: Ing. Zulay Romero. Tesis.  
Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica.  
Ingeniero Electricista. Opción: Potencia. Institución: CVG EDELCA. 2006. 117h.  
+ anexos.**

**Palabras Claves:** Distorsión Armónica, Desbalance de Tensión, *Power Factory*, *ATPDraw*.

**Resumen.** Se realiza una comparación entre los programas *Power Factory* y *ATPDraw*, en lo que a la evaluación del desbalance de tensión y la distorsión armónica se refiere, de tal forma que la herramienta más adecuada sea elegida para la simulación y estudio de tales fenómenos.

También se efectúa una discusión con respecto a los modelos, métodos y criterios que deben utilizarse para efectuar simulaciones en ambas herramientas; considerando para esto diferentes escenarios de estudio presentes en la red de CVG EDELCA. A partir de los resultados obtenidos, se efectúa una comparación de los mismos, de manera de obtener los argumentos necesarios que permitan realizar una elección entre los programas empleados.

Por último, se estudian las características principales de diferentes normas utilizadas para el control del desbalance de tensión y la distorsión armónica, con el fin de recomendar aquellos indicadores que permitan limitar las perturbaciones ocasionadas por estos fenómenos al sistema.

# ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN .....	iii
RESUMEN.....	iv
ÍNDICE GENERAL .....	v
LISTA DE TABLAS .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS.....	3
CAPÍTULO I.....	4
<i>DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA</i> .....	4
1.1 Índices de Distorsión Armónica .....	6
1.2 Métodos de Análisis de Armónicos.....	8
1.2.1 Métodos de Análisis de Armónicos en el dominio de la frecuencia .....	9
1.2.2 Métodos Iterativos .....	17
1.2.3 Métodos de Análisis de Armónicos en el dominio del tiempo .....	18
1.2.4 Flujo de Carga Armónico .....	19
CAPÍTULO II .....	21
<i>DESBALANCE DE TENSIÓN EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA</i> .....	21
2.1 Índices de Desbalance de Tensión.....	22
2.2 Metodologías de Análisis .....	26
CAPÍTULO III.....	28
<i>ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DISTINTAS NORMAS UTILIZADAS     PARA LA EVALUACIÓN DEL DESBALANCE DE TENSIÓN Y LA     DISTORSIÓN ARMÓNICA</i> .....	28
3.1 Normas IEEE.....	28
3.1.1 Límites de Desbalance de Tensión .....	30
3.1.2 Mediciones de Desbalance de Tensión .....	31

3.1.3	Límites de Distorsión de Corriente .....	31
3.1.4	Límites de Distorsión de Tensión .....	34
3.1.5	Mediciones de Armónicos .....	35
3.2	Normas IEC.....	35
3.2.1	Niveles de compatibilidad en sistemas de baja tensión .....	38
3.2.2	Niveles de compatibilidad en sistemas de media tensión .....	39
3.2.3	Niveles de compatibilidad en sistemas industriales.....	40
3.2.4	Niveles de emisión en sistemas de baja tensión.....	42
3.2.5	Niveles de emisión en sistemas de media y alta tensión.....	49
3.2.6	Niveles de emisión en sistemas industriales.....	50
3.2.7	Mediciones de Desbalance de Tensión.....	52
3.2.8	Mediciones de Armónicos .....	53
3.3	Normas emitidas por otros organismos .....	54
3.4	Comparación de las normas internacionales y regionales .....	57
3.5	Normas recomendadas a ser aplicadas por CVG EDELCA .....	65
3.5.1	Norma recomendada sobre Desbalance de Tensión.....	65
3.5.2	Norma recomendada sobre Distorsión Armónica.....	67
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>69</b>
<b><i>MODELACIÓN RECOMENDADA DE LOS ELEMENTOS COMPONENTES DE LA RED ELÉCTRICA PARA EL DESBALANCE DE TENSIÓN Y LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN ATPDRAW Y POWER FACTORY.....</i></b>		<b>69</b>
4.1	Líneas de transmisión .....	71
4.2	Motores de Inducción .....	72
4.3	Transformadores.....	76
4.4	Filtros y baterías de condensadores .....	79
4.5	Modelos de carga lineal.....	81
4.6	Modelos de cargas no lineales .....	84
4.6.1	Modelo de horno de arco .....	84
4.6.2	Modelo del Rectificador/Inversor .....	86
4.6.3	Modelo del Compensador.....	87

<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>89</b>
<b><i>LINEAMIENTOS PARA EL ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL DESBALANCE DE TENSIÓN Y LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LOS PROGRAMAS ATPDRAW Y POWER FACTORY</i></b> .....	
5.1 Análisis y simulación de la Distorsión Armónica .....	90
5.1.1 Selección del punto de común acoplamiento (PCC).....	90
5.1.2 Identificación de las fuentes generadoras de armónicos .....	91
5.1.3 Elección del tipo de modelación del sistema .....	92
5.1.4 Representación de los componentes de la red eléctrica .....	93
5.1.5 Extensión del modelo del sistema .....	94
5.1.6 Elección de los parámetros de interés.....	94
5.1.7 Simulación de Distorsión Armónica.....	95
5.1.8 Procedimiento para aplicar los límites de Distorsión Armónica.....	96
5.2 Análisis y simulación del Desbalance de Tensión.....	98
<b>CAPÍTULO VI</b> .....	<b>100</b>
<b><i>ESCENARIOS DE ESTUDIO: APLICACIONES A SISTEMAS EQUIVALENTES PRESENTES EN LA RED DE CVG EDELCA</i></b> .....	
6.1 Sistema de Transmisión Sur .....	102
6.1.1 Características del sistema.....	103
6.1.2 Criterios asumidos para la simulación .....	103
6.1.3 Análisis y comparación de resultados.....	105
6.1.4 Conclusiones y comentarios .....	106
6.2 Sistema Regional B .....	106
6.2.1 Características del sistema.....	107
6.2.2 Criterios asumidos para la simulación .....	108
6.2.3 Análisis y comparación de resultados.....	109
6.2.4 Conclusiones y comentarios .....	110
6.3 Subestación “Jose 115kV” .....	111
6.3.1 Características del sistema.....	111
6.3.2 Criterios asumidos para la simulación .....	112
6.3.3 Análisis y comparación de resultados.....	112
6.3.4 Conclusiones y Comentarios .....	113
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>114</b>

<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>116</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>118</b>
<b>BIBLIOGRAFÍAS .....</b>	<b>125</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>126</b>
<b>ANEXO N°1.....</b>	<b>130</b>
<b><i>FUNDAMENTO TEÓRICO SOBRE DISTORSIÓN ARMÓNICA.....</i></b>	<b><i>130</i></b>
A.1.1 Secuencia de fase de los armónicos.....	130
A.1.2 Respuesta del sistema de potencia ante la presencia de armónicos .....	132
A.1.3 Fuentes generadoras de armónicos .....	136
A.1.4 Efectos de la distorsión armónica .....	140
A.1.5 Mecanismos de mitigación .....	144
<b>ANEXO N°2.....</b>	<b>150</b>
<b><i>FUNDAMENTO TEÓRICO SOBRE DESBALANCE DE TENSIÓN.....</i></b>	<b><i>150</i></b>
A.2.1 Fuentes Generadoras de Desbalance .....	150
A.2.2 Efectos sobre el sistema eléctrico .....	153
A.2.3 Mecanismos de mitigación .....	161
<b>ANEXO N° 3.....</b>	<b>164</b>
<b><i>HERRAMIENTAS UTILIZADAS .....</i></b>	<b><i>164</i></b>
A.3.1 <i>Power Factory</i> de DIGSILENT .....	164
A.3.2 Alternative Transient Program ( <i>ATP</i> ).....	167
A.3.3 Comparación entre parámetros de entrada en <i>Power Factory</i> y <i>ATPDraw</i> .....	171
<b>ANEXO N° 4.....</b>	<b>179</b>
<b><i>GRÁFICAS Y RESULTADOS DE ESCENARIOS DE ESTUDIO .....</i></b>	<b><i>179</i></b>
A.4.1 Sistema de Transmisión Sur .....	179
A.4.2 Sistema Regional B .....	189
A.4.3 Subestación “Jose 115kV” .....	199



## LISTA DE TABLAS

3.1	Límites de Distorsión Armónica en la corriente .....	33
3.2	Límites de Distorsión Armónica en la tensión .....	34
3.3	Niveles de Compatibilidad para tensiones armónicas en redes de baja tensión .....	38
3.4	Niveles de Compatibilidad para tensiones armónicas en redes de media tensión .....	39
3.5	Niveles de Compatibilidad para tensiones armónicas en sistemas industriales .....	41
3.6	Niveles de Compatibilidad para Desbalance de Tensión en sistemas industriales .....	42
3.7	Límites de corrientes armónicas para equipos Clase A .....	43
3.8	Límites de corrientes armónicas para equipos Clase C .....	44
3.9	Límites de corrientes armónicas para equipos Clase D .....	44
3.10	Límites de corrientes para conexión simplificada .....	46
3.11	Límites de emisión de corrientes armónicas para equipos trifásicos balanceados .....	47
3.12	Límites de emisión de corrientes armónicas en equipos trifásicos y monofásicos desbalanceados .....	47
3.13	Niveles de Compatibilidad para Desbalance de Tensión según CIGRE .....	55
3.14	Niveles de Compatibilidad para tensiones armónicas según CIGRE .....	57
3.15	Intervalos de medición utilizados por diferentes normas para el estudio del Desbalance de Tensión .....	59
3.16	Objetivos y límites de Desbalance de Tensión utilizados por diferentes normas regionales e internacionales .....	60
3.17	Intervalos de medición utilizados por diferentes normas para evaluar la Distorsión Armónica....	62
3.18	Comparación de las componentes individuales de tensión armónica .....	63
3.19	Niveles de Planificación sugeridos para desbalance de tensión .....	66
3.20	Niveles de Compatibilidad sugeridos para desbalance de tensión.....	67
4.1	Parámetros requeridos para la representación de Líneas de Transmisión .....	72
4.2	Parámetros requeridos para la representación de Motores de inducción trifásicos .....	75
4.3	Parámetros requeridos para la representación de Transformadores .....	78
4.4	Parámetros requeridos para la representación de filtros .....	80
4.5	Parámetros requeridos para la representación de cargas lineales .....	83
4.6	Parámetros requeridos para la representación de Rectificadores/Inversores en Power Factory ....	87
4.7	Parámetros requeridos para la representación de Compensadores (SVC) en Power Factory .....	88

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Onda sinusoidal a frecuencia fundamental y 2 <sup>da</sup> , 3 <sup>ra</sup> , 4 <sup>ta</sup> y 5 <sup>ta</sup> armónica.....	5
1.2	Red de N puertos.....	9
1.3	Curva típica de la impedancia armónica Thevenin para diferentes condiciones del sistema.....	12
1.4	Curva típica de la Función de Transferencia de Tensión.....	13
1.5	Gráfico típico de un espectro de la magnitud de la tensión armónica en función del orden de armónico.....	15
4.1	Modelo de línea de transmisión en <i>Power Factory</i> y <i>ATPDraw</i> .....	71
4.2	Modelo básico del motor asincrónico en <i>Power Factory</i> .....	73
4.3	Modelo del rotor para motores de doble jaula en <i>Power Factory</i> .....	73
4.4	Circuito equivalente para representar una máquina asincrónica en <i>ATPDraw</i> .....	74
4.5	Circuito equivalente por fase para representar transformadores de dos arrollados en <i>Power Factory</i> .....	77
4.6	Circuito equivalente por fase para representar transformadores en <i>ATPDraw</i> .....	77
4.7	Representación de elementos compensadores en <i>Power Factory</i> .....	79
4.8	Modelo general de la carga en <i>Power Factory</i> .....	81
4.9	Modelo de carga general en <i>ATPDraw</i> (a) R-L y (b) CIGRÉ.....	83
4.10	Diagrama de una instalación asociada a un horno de arco.....	85
4.11	Característica tensión-corriente del arco asociada al modelo propuesto.....	86
4.12	Modelo del Rectificador/Inversor en <i>Power Factory</i> .....	86
4.13	Modelo del Compensador (SVC) en <i>Power Factory</i> .....	87
5.1	Selección del PCC.....	90
5.2	Procedimiento general para la realización de estudios de armónicos según IEEE 519.....	97

## INTRODUCCIÓN

Los estudios relacionados con la calidad del servicio eléctrico son de gran importancia para el análisis y diseño de los sistemas de potencia. Por tal motivo, para conducir dichas tareas se hace necesario el uso de herramientas que permitan identificar y aportar soluciones a los problemas que puedan existir para diferentes condiciones de operación del sistema.

En este sentido, las simulaciones son un instrumento de gran trascendencia, no sólo por ser una opción económica para el control y planificación de sistemas, sino también por su versatilidad y confiabilidad (siempre que los modelos utilizados sean precisos).

Debido a que en la actualidad existen una gran variedad de programas diseñados para realizar estudios de este tipo, el hecho de poder identificar la herramienta que permita ejecutar tales funciones de la manera más simple y efectiva (tomando en cuenta variables como el tiempo necesario para aportar soluciones y la exactitud de los resultados obtenidos) es una labor de gran relevancia.

En el presente trabajo se evalúan las posibilidades de las herramientas *ATPDraw* y *Power Factory* para el análisis y estudio de los fenómenos de distorsión armónica y desbalance de tensión; para ello se realizarán simulaciones en configuraciones equivalentes a sistemas presentes en la red de CVG EDELCA, que fueron seleccionados con la finalidad de abarcar las distintas partes componentes del sistema eléctrico (centrales generadoras, sistemas de transmisión y puntos de suministro) y la mayor cantidad de niveles de tensión, tomando en cuenta las posibles fuentes de distorsión armónica y desbalance de tensión conectadas al sistema. Diferentes modelos para cargas lineales y no lineales son estudiados, de manera de establecer aquellos que mejor reflejen el comportamiento real del sistema.

Una vez efectuadas las simulaciones, se realiza una comparación de los resultados obtenidos en ambos programas, para así poder brindar una recomendación sobre cual es la herramienta más adecuada para el análisis de cada fenómeno, dependiendo del entorno en el cual se lleve a cabo el mismo.

El informe está estructurado en cuatro partes principales. Los dos primeros capítulos están dedicados a brindar una pequeña introducción sobre los fenómenos en los que se centra el estudio, describiendo así la manera en la cual pueden cuantificarse los mismos y también diferentes metodologías existentes para su análisis.

Un análisis comparativo entre diferentes normas con validez regional e internacional que tratan sobre la distorsión armónica y el desbalance de tensión se realiza en el tercer capítulo; para así recomendar distintos indicadores que regulen dichos eventos y permitan el funcionamiento óptimo de los equipos en el sistema.

Los capítulos cuarto y quinto establecen los modelos que serán utilizados en las simulaciones por ambas herramientas (parámetros de entrada, ventajas de los modelos presentes en una herramienta respecto de la otra, etc.) y la metodología sugerida para realizar dichos estudios, analizando factores como la identificación de las fuentes causantes de las perturbaciones, la extensión mínima de los sistemas a simular y la elección de los parámetros de interés para dicha simulación.

Finalmente, en el sexto capítulo se describen las simulaciones efectuadas en los escenarios de trabajo, los componentes que conforman dichos escenarios y además se realiza una discusión sobre los resultados obtenidos para los diferentes casos de estudio.

## **OBJETIVOS**

El proyecto consiste en realizar un análisis comparativo de dos (2) herramientas computacionales (*ATPDraw* 4.0 y *Power Factory* 13.1.253 de DIGSILENT) utilizadas para evaluar la distorsión armónica y el desbalance de tensión. Este análisis tomará como referencia los criterios y metodologías sugeridas en las normas internacionales para la evaluación de estos fenómenos y se realizarán simulaciones de sistemas que contemplen en su esquema cargas no lineales y operación de arranque de motores. Se tomará como referencia algún esquema equivalente al existente en el sistema de transmisión Sur y de la zona de Guayana de CVG EDELCA.

### **Objetivos específicos**

- Definir la metodología, criterio y herramienta computacional más adecuada para la evaluación de los desbalances de tensión.
- Dar recomendaciones a CVG EDELCA sobre la norma de desbalance de tensión a ser utilizada.
- Definir la metodología, criterio y herramienta computacional más adecuada para la evaluación armónica.
- Dar recomendaciones a CVG EDELCA sobre la norma de distorsión armónica a ser utilizada.

## CAPÍTULO I

### DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA

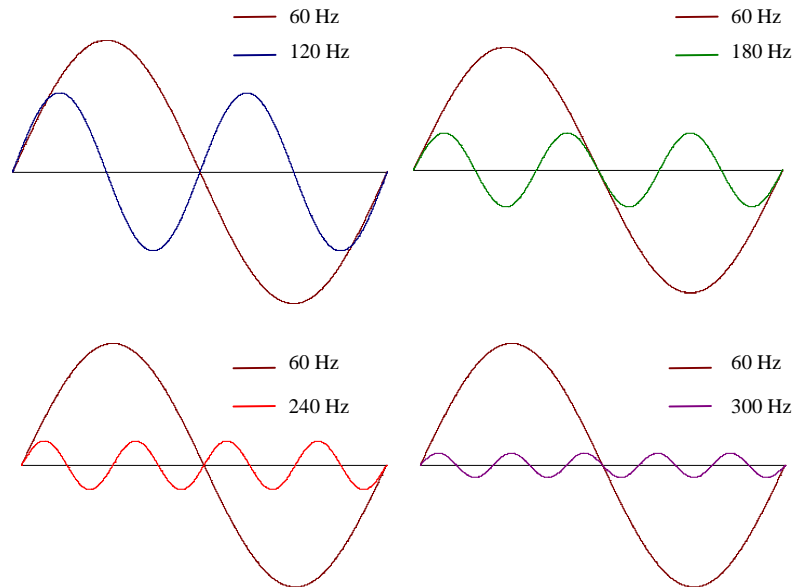
En los sistemas de potencia, los armónicos son una forma matemática de interpretar la distorsión periódica en la forma de onda de la tensión y la corriente en régimen permanente, ya que lo ideal es que la misma sea una sinusoidal perfecta, aunque esto sea prácticamente imposible de lograr en la realidad debido a la distorsión que producen las características no lineales de cargas, materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

Los armónicos se definen como tensiones o corrientes sinusoidales con frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia de suministro. En este sentido, pueden clasificarse en armónicos característicos y no característicos. Los armónicos característicos son aquellos cuya frecuencia es un múltiplo entero impar de la frecuencia fundamental, producidos generalmente por los convertidores de potencia. Por otra parte, en los armónicos no característicos la frecuencia es un múltiplo entero par de la frecuencia fundamental, y se generan cuando el ciclo de la onda no es simétrico (el semiciclo negativo es diferente al positivo). Por lo que para un sistema de 60 Hz, las armónicas son formas de onda sinusoidales con una frecuencia expresada por:

$$f_{arm} = n * 60 [\text{Hz}] \quad (1.1)$$

Cuando la frecuencia sea un múltiplo no entero de la frecuencia fundamental, se estará en presencia de los llamados interarmónicos, que son producidos principalmente por hornos de arco eléctrico.

La Figura 1.1 muestra una forma de onda sinusoidal de 60 Hz acompañada de varias formas de onda de diferentes frecuencias, obtenidas variando los valores de  $n$  en la ecuación (1.1).



**Figura 1.1 Onda sinusoidal a frecuencia fundamental y 2<sup>a</sup>, 3<sup>ra</sup>, 4<sup>a</sup> y 5<sup>a</sup> armónica.**

Usualmente, para analizar matemáticamente el comportamiento de esta distorsión se aplica el análisis de Fourier, que en términos generales y aplicado a los sistemas de potencia establece que: dada una señal de tensión o corriente periódica de frecuencia  $f$  que presenta una cierta distorsión en su forma de onda, esta distorsión puede ser representada por una sumatoria infinita de ondas sinusoidales, las cuales presentan una amplitud dada y una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia fundamental  $f_1$ ; estas sinusoidales de frecuencia múltiplo de la fundamental se definen como armónicos [1].

Como la mayoría de los elementos conectados a la red están diseñados para operar con tensiones sinusoidales, la presencia de armónicos puede dar lugar a diversos problemas en el funcionamiento y operación del sistema, tales como, aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición,

mal funcionamiento de protecciones, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros (ver Anexo No. 1). Estos efectos dependerán principalmente de las características de la respuesta en frecuencia del sistema.

La magnitud de la distorsión armónica en los sistemas de potencia es producto de dos factores básicamente, la característica no lineal de los equipos o cargas conectadas al sistema y la característica de respuesta del sistema [2]. Los niveles de esta distorsión pueden caracterizarse por el espectro completo de armónicos, el cual consiste de las magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónica individual.

En las siguientes secciones se describen los índices utilizados con mayor frecuencia para la cuantificación de la calidad de potencia en términos de la distorsión armónica y las metodologías más comunes para el análisis de sistemas en presencia de dicha perturbación.

### **1.1 Índices de Distorsión Armónica [1]**

Con el fin de evaluar el nivel de distorsión armónica introducido por las cargas o equipos no lineales en los sistemas de potencia, se utilizan diferentes índices que han sido elaborados para establecer niveles de referencia para que las compañías eléctricas y clientes puedan vigilar el nivel de distorsión en sus redes. Los índices que son empleados con más frecuencia son:

- **Factor de distorsión armónica total (THD<sup>1</sup>):** el THD de la corriente y la tensión es utilizado para medir porcentualmente la desviación de una onda periódica sinusoidal con contenido armónico con respecto a una onda periódica sinusoidal pura, se expresa como:

---

<sup>1</sup> THD: Total Harmonic Distortion



$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (1.2)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (1.3)$$

donde:

$V_1$  e  $I_1$ : valor rms de la tensión y corriente a la frecuencia fundamental.

$V_h$  e  $I_h$ : valor rms de la tensión y corriente a la frecuencia armónica  $h$ .

Para tensiones balanceadas trifásicas, la tensión línea a tierra es la usada en la fórmula, y en consecuencia el THD será el mismo en cada fase; por otro lado, para tensiones desbalanceadas será posible calcular el THD por fase del sistema. Entre las propiedades más importantes del índice THD se tienen:

1. Para una onda sinusoidal perfecta a frecuencia fundamental, el THD es cero.
2. Un THD de 5% es frecuentemente usado como una línea divisoria entre alta y baja distorsión<sup>2</sup>.
3. La distorsión individual para la tensión y la corriente para un determinado armónico es  $V_h/V_1$  e  $I_h/I_1$  respectivamente.

- **Distorsión de demanda total (TDD<sup>3</sup>):** definida como la distorsión de corriente total, se expresa como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100\% \quad (1.4)$$

---

<sup>2</sup> Este valor debe ser interpretado con suma precaución, ya que 5% de distorsión armónica en los sistemas de transmisión y subtransmisión es demasiado alto para ser tolerado, a diferencia de los sistemas de distribución donde este valor es fácilmente tolerable.

<sup>3</sup> TDD: Total Demand Distortion

Donde  $I_L$  es la máxima demanda de carga (para demandas con duración de 15 a 30 minutos) a la frecuencia fundamental en el punto de común acoplamiento (PCC) entre el sistema y la carga generadora de armónicos.

- **Factor de influencia telefónica (TIF<sup>4</sup>):** es una medida usada para describir el origen del ruido telefónico, a partir de las tensiones y corrientes armónicas en los sistemas de potencia. Está definido como:

$$TIF_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (w_h V_h)^2}}{V_{rms}} \quad (1.5)$$

$$TIF_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (w_h I_h)^2}}{I_{rms}} \quad (1.6)$$

Donde  $w_h$  es un factor de ponderación que toma en cuenta los efectos de audio y acoplamiento inductivo a la frecuencia del armónico correspondiente.

## 1.2 Métodos de Análisis de Armónicos

Para el estudio y análisis de armónicos en los sistemas de potencia existen diversos métodos, que básicamente pueden diferenciarse entre aquellos basados en la simulación en el dominio de la frecuencia y la simulación en el dominio del tiempo.

Cada uno de estos métodos posee distintas características, las cuales los harán más adecuados para diferentes situaciones, dependiendo, entre otros factores, de las variables más importantes en estudio y la información disponible del sistema en cuestión.

---

<sup>4</sup> TIF: Telephone Influence Factor

### 1.2.1 Métodos de Análisis de Armónicos en el dominio de la frecuencia [3]

Existe un gran número de métodos para el análisis de armónicos en el dominio de la frecuencia. Los de uso más difundido son: el barrido o muestreo en frecuencia, la penetración armónica y el flujo de carga armónico. Cada una de estas técnicas utiliza un modelo basado en la matriz de admitancias del sistema y pueden emplearse para una representación monofásica o trifásica de los componentes de la red.

La metodología empleada en el desarrollo de modelos de matriz de admitancia está basada en la teoría de redes con múltiples puertos (ver Figura 1.2). Por ejemplo, los modelos basados en la matriz de admitancia de secuencia positiva son desarrollados a partir de los parámetros de una red de dos puertos; análogamente, aquellos modelos en donde se consideran múltiples fases serán desarrollados a partir de los parámetros de una red de múltiples puertos.

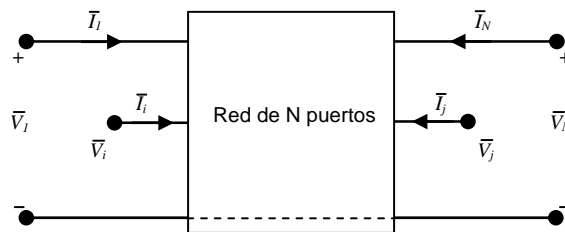


Figura 1.2 Red de  $N$  puertos

En este tipo de modelos, los sistemas suelen ser generalmente limitados únicamente a elementos pasivos por simplicidad; sin embargo, es posible incluir ciertas fuentes dependientes, siempre y cuando esta dependencia pueda ser representada por una relación de admitancias. De este modo, para describir el comportamiento de las redes de  $N$  puertos se empleará la Matriz de Admitancias Compleja (ecuación 1.7).

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_j \\ \bar{I}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{11} & \bar{y}_{1i} & \bar{y}_{1j} & \bar{y}_{1N} \\ \bar{y}_{i1} & \bar{y}_{ii} & \bar{y}_{ij} & \bar{y}_{iN} \\ \bar{y}_{j1} & \bar{y}_{ji} & \bar{y}_{jj} & \bar{y}_{jN} \\ \bar{y}_{N1} & \bar{y}_{Ni} & \bar{y}_{Nj} & \bar{y}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_j \\ \bar{V}_N \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Esta ecuación puede escribirse de manera más reducida como  $[\mathbf{I}] = [\mathbf{Y}_{\text{BUS}}] [\mathbf{V}]$ .

Los elementos de la matriz de admitancia compleja (definidos para una determinada frecuencia), pueden ser calculados a partir de la definición de admitancia, como se muestra en la ecuación (1.8):

$$\bar{y}_{ij} = \frac{\bar{I}_i}{\bar{V}_j} \quad (1.8)$$

Este procedimiento para determinar la matriz  $[\mathbf{Y}]$ , forma la columna vertebral de la mayoría de los algoritmos basados en la formulación de la matriz de admitancia, ya que estos pueden ser aplicados directamente al sistema de potencia completo. Para el análisis armónico, la matriz de admitancia debe ser formulada para cada frecuencia de interés, y esta debe ser construida a partir de los elementos RLC correspondientes a los modelos de líneas de transmisión, transformadores, cargas y otros equipos componentes de la red eléctrica.

A continuación se señalan y describen los principales métodos de análisis armónico en el dominio de la frecuencia.

- **Métodos de análisis de barrido en frecuencia**

El barrido en frecuencia es usado para caracterizar la respuesta del sistema de potencia en función de la frecuencia; el término barrido proviene de la variación

sistemática de la frecuencia desde un valor inicial  $f_i$  hasta un valor final  $f_F$ . El análisis de barrido en frecuencia se obtiene resolviendo la ecuación (1.7) para todas las frecuencias de interés, donde los componentes de la matriz de admitancias deben calcularse para cada uno de estos valores de frecuencia.

En este sentido, existen dos tipos de análisis de barrido en frecuencia comúnmente utilizados; ambos son especialmente útiles para identificar posibles condiciones de resonancia serie o paralelo presentes en el sistema, y para determinar el posible impacto que implicaría la conexión de bancos de condensadores, compensación serie, cargas productoras de armónicos, etc.

- **Barrido en Frecuencia:** Usualmente, el barrido en frecuencia es el primer paso en estudios de distorsión armónica. Este se basa en una simple inyección de corriente en el modelo de admitancias  $Y_{BUS}$  del sistema, seguido por la solución de la ecuación (1.7) para un determinado rango de frecuencias. Asumiendo que esta inyección de corriente tiene lugar en el nodo  $i$  de la Figura 1.2, la ecuación (1.7) puede resolverse para determinar las tensiones en cada uno de los distintos nodos de la red.

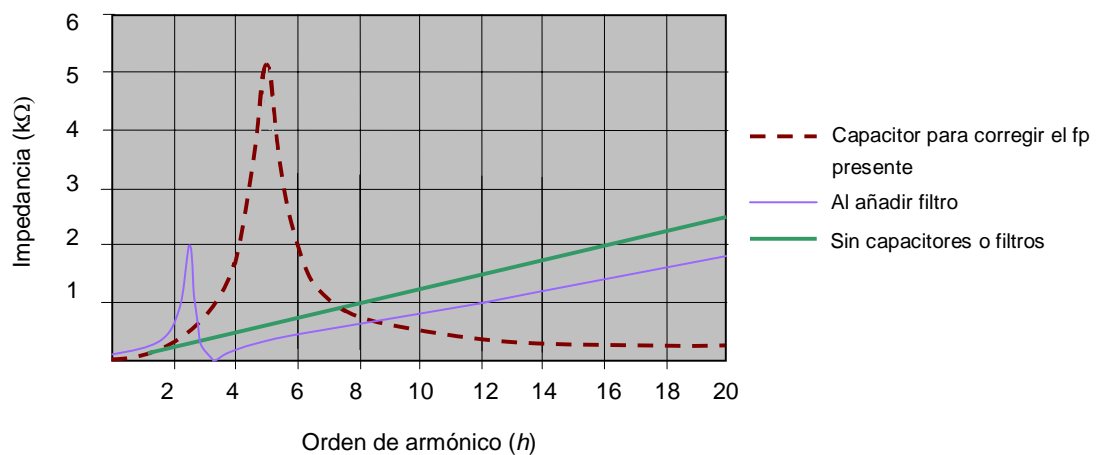
Si al nodo  $i$  (ver Figura 1.2) se le inyecta una corriente con valor de  $1\angle 0^\circ$  (A o p.u), el valor de la tensión obtenida representa la impedancia armónica

Thevenin de transferencia vista desde el nodo  $i$  (ya que  $[Y] = \frac{[I]}{[V]}$ ). Dado que

el modelo  $Y_{BUS}$  del sistema contiene únicamente elementos lineales, puede aplicarse el principio de linealidad para escalar los resultados obtenidos de 1 (A o p.u) a cualquier valor deseado. Este escalamiento puede ser aplicado para estimar las tensiones armónicas que se producirán en cualquier barra del sistema.

Al ir variando la frecuencia utilizada en la solución de la ecuación (1.7) a lo largo de un rango determinado de frecuencias ( $f_i$  hasta  $f_F$ ), el resultado es un vector (magnitud y fase) para cada frecuencia. Al graficar esta serie de vectores se obtiene una curva que proporciona una indicación visual excelente de las posibles condiciones de resonancia; la forma de dicha curva estará relacionada con la presencia o no de elementos compensadores (tales como bancos de condensadores para la corrección del factor de potencia, filtros, etc.) en el sistema bajo estudio.

Un ejemplo de este tipo de gráfica se muestra en la Figura 1.3. La resonancia en paralelo, la cual está asociada con altas impedancias a los flujos de corrientes armónicas, aparece como crestas o picos en la gráfica. Por otra parte, la resonancia serie, la cual está asociada con bajas impedancias a los flujos de corrientes armónicas, aparece como valles. Adicionalmente, se observa el comportamiento de la curva para diferentes escenarios de estudio.



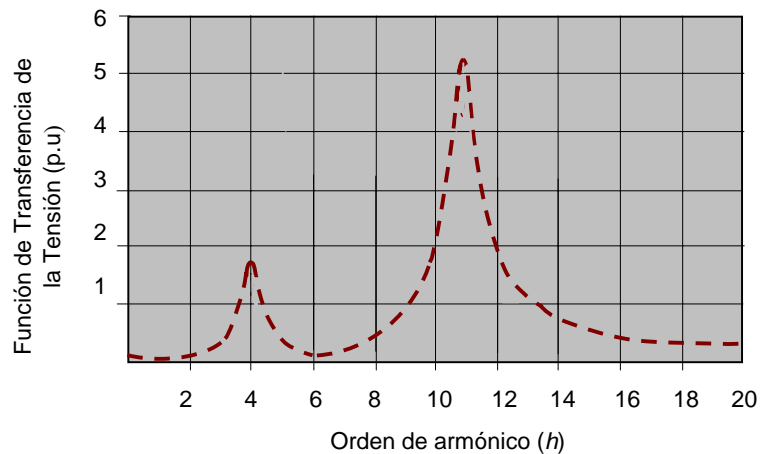
**Figura 1.3** Curva típica de la impedancia armónica Thevenin para diferentes condiciones del sistema

Esta técnica es a menudo utilizada para evaluar los potenciales impactos que implicaría la conexión de futuras cargas productoras de armónicos.

- ***Función de Transferencia de Tensión:*** El segundo tipo de barrido en frecuencia es llevado a cabo de igual forma que al descrito con anterioridad, pero ahora se inyectará al nodo  $i$  del sistema una **fente de tensión** de  $1\angle 0^\circ$  (V o p.u), para luego aplicar la ecuación (1.7) en un rango determinado de frecuencias. Las tensiones resultantes representan la *Función de Transferencia de Tensión* del nodo  $i$ .

Nótese que aunque los métodos de barrido en frecuencia son similares en lo que a su técnica de cálculo se refiere, al procedimiento de aplicar una fuente de tensión sobre un determinado nodo del sistema se le denomina *Función de Transferencia de Tensión*; esto se hace con la finalidad de permitir que el término *Barrido en Frecuencia* se asocie con la inyección de corrientes en un nodo.

Al igual que en el *Barrido en Frecuencia*, en el análisis de la *Función de Transferencia de Tensión* también puede utilizarse una gráfica para representar la situación en estudio (ver Figura 1.4).



**Figura 1.4** Curva típica de la *Función de Transferencia de Tensión*

Las crestas y valles presentes en la gráfica indican a que frecuencia se producen las amplificaciones y atenuaciones en la tensión.

- **Métodos de análisis basados en fuentes de corriente**

Los métodos basados en fuentes de corriente, también conocidos como modelo Norton, son los utilizados de manera más común para el análisis de armónicos; estos también se basan en el uso de la matriz de admitancias del sistema.

En este método las cargas no lineales se representan como una inyección de corriente (en el nodo correspondiente), usando un espectro de armónicas de magnitud y fase conocida<sup>5</sup>. De manera más específica, las cargas no lineales son representadas utilizando una suma de corrientes donde cada entrada en la sumatoria corresponde a un término en la serie de Fourier de frecuencia conocida.

Una vez conocido el vector espectral (magnitud y ángulo de fase de cada armónico de interés) para cada carga no lineal, el método de análisis basado en fuentes de corriente se puede descomponer en los siguientes pasos:

1. Formular el modelo de la matriz de admitancias del sistema de potencia, incluyendo la contribución de todas las fuentes y cargas lineales. La frecuencia debería ser consistente con una de las dadas en los vectores de corriente en la serie de Fourier para las cargas no lineales; ya que de no ser así, la inyección de corrientes armónicas por parte de las cargas no lineales no tendría ningún efecto sobre la red en estudio.
2. Construir el vector de inyección de corrientes, a partir de cada vector de corriente armónica para las cargas no lineales.
3. Resolver la ecuación (1.7) para determinar las tensiones en todas las barras del sistema. La frecuencia asociada con estos fasores de tensión es la misma a la usada en la construcción de la matriz de admitancia.

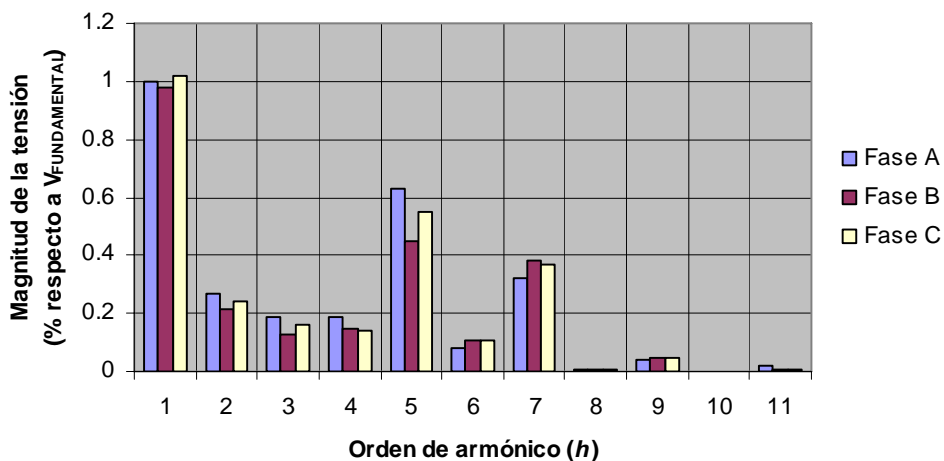
---

<sup>5</sup> Este espectro de corrientes armónicas puede ser el característico para una determinada carga, o puede estar basado en mediciones para diferentes condiciones de operación.



Los pasos indicados anteriormente se comienzan a aplicar con la frecuencia más baja representada en alguno de los vectores de corrientes armónicas, y se repiten para cada una de las frecuencias presentes en todos los modelos de cargas no lineales.

El resultado obtenido después de concluido el análisis basado en el método de inyección de corrientes es un conjunto de tensiones para cada barra del sistema, donde por lo general sólo se representa la magnitud del vector (en forma porcentual con respecto de la magnitud de la tensión de la componente fundamental) en función de la frecuencia (véase Figura 1.5).



**Figura 1.5** Gráfico típico de un espectro de la magnitud de la tensión armónica en función del orden de armónico

Debido a la naturaleza lineal del problema (recordemos que las no linealidades fueron representadas como una inyección de corrientes), puede aplicarse el principio de superposición. Por lo tanto, los términos de cada vector de tensión corresponden a los coeficientes de la serie de Fourier de la tensión en el dominio del tiempo. Si se desea entonces obtener la forma de onda de tensión en el dominio del tiempo para una determinada barra del sistema, esta podría construirse a partir del espectro de tensión mostrado con anterioridad; así como

también a partir de la forma de la onda de tensión en el dominio del tiempo, (a través de la transformada de Fourier) podría construirse el espectro de tensiones.

En estudios donde se presenta sólo una carga no lineal (o donde una carga no lineal es dominante por encima del resto), los ángulos de fase que se introducen en el vector de corrientes armónicas (para ser inyectado en un determinado nodo) no son importantes. Sin embargo, en sistemas con múltiples cargas no lineales, el hecho de despreciar el efecto de los ángulos de las corrientes armónicas puede llevar a resultados imprecisos.

Esto se debe a que dependiendo de los ángulos de fase utilizados, los efectos de múltiples fuentes de armónicos pueden incrementarse o cancelarse. Por lo tanto, ignorar los ángulos de fase puede llevar a resultados muy pesimistas u optimistas, según sea el caso.

Este método tiene como ventaja sobre el método de barrido en frecuencia que:

- Sólo se evalúa un rango discreto de frecuencias (únicamente aquellas de interés para el estudio que se esté llevando a cabo).
- Los resultados obtenidos pueden compararse directamente contra los límites de distorsión especificados en el sistema.

Por otro lado, entre las desventajas de usar el método de inyección de corrientes armónicas se tienen:

- El uso del espectro típico de corrientes armónicas le resta generalidad al estudio, ya que se excluyen condiciones de operación tales como: niveles de carga distintos al nominal, distorsión elevada y desbalances.
- Se requiere que la carga no lineal (perturbadora) sea muy grande, de tal manera que su efecto sobre el sistema pueda apreciarse.

### 1.2.2 Métodos Iterativos [4]

La inyección de armónicos por parte de las distintas cargas no lineales existentes en la red, será en general, función de las diferentes fuentes de armónicos presentes en el sistema y de las condiciones de operación del mismo. Por lo tanto, resultados realmente precisos sólo pueden obtenerse resolviendo un sistema de ecuaciones no lineales de manera iterativa que describa el régimen permanente o estado estacionario considerando las relaciones existentes entre las distintas fuentes generadoras de armónicos presentes en el sistema.

Recordemos que en el método basado en fuentes de corriente, la contribución de cada fuente es constante e independiente de las condiciones de operación del sistema para todas las frecuencias. De esta forma, el estado estacionario del sistema es descrito de forma substancial, pero no completa, por las tensiones armónicas presentes en la red.

El análisis descrito en esta sección, también llamado *Dominio Armónico*, puede ser visto como una continuación o complemento de los métodos de análisis en el dominio de la frecuencia, pero modelando las diferentes interacciones entre los elementos no lineales presentes en el sistema.

El *Dominio Armónico* puede considerarse como un marco general de referencia para el análisis de sistemas en estado estable que modela el acoplamiento entre los diferentes armónicos presentes en la red. En este marco de referencia los componentes no lineales son convertidos a equivalentes armónicos Norton y combinados con el resto del sistema para luego resolver el sistema de ecuaciones no lineales resultante de manera iterativa.

Mediante la modelación en el Dominio Armónico pueden encontrarse soluciones a problemas concernientes a variables de control, saturación en el núcleo de transformadores, conmutaciones en equipos de electrónica de potencia, etc. De esta

forma, los aspectos más importantes concernientes a la modelación en el Dominio Armónico del sistema de potencia serán:

- La obtención, forma y precisión de las ecuaciones no lineales que representen el régimen estacionario del sistema.
- El procedimiento iterativo para resolver el sistema de ecuaciones no lineales.

### **1.2.3 Métodos de análisis de Armónicos en el dominio del tiempo**

Los métodos en el dominio del tiempo para el cálculo de la distorsión y propagación de armónicos usan una representación de los elementos componentes del sistema y de las fuentes generadoras de armónicos basadas en su dependencia con respecto del tiempo. En este tipo de métodos, la idea es realizar una simulación del sistema hasta que en este se alcance el régimen permanente o estado estable. Por lo tanto, si los parámetros utilizados para su modelación son correctos, tienden a ser más precisos que los métodos en el dominio de la frecuencia.

Sin embargo, si en la modelación del sistema sólo se incluyen fuentes ideales de tensión o corriente (para representar el aporte de armónicos por parte de los elementos no lineales) y elementos lineales, los métodos iterativos arrojarán resultados tan precisos como los métodos en el dominio del tiempo; esto se debe a que el modelo lineal tiene una representación fasorial y es aplicable el principio de superposición.

Cuando existe la presencia de componentes no lineales y variantes en el tiempo en el modelo del sistema, la manera en la cual las corrientes y tensiones armónicas se propagan e interactúan a través de la red eléctrica puede cambiar significativamente; siendo preferible emplear la modelación en el dominio del tiempo. A continuación se muestran algunas de las situaciones que se presentan con mayor frecuencia en el sistema, cuyos efectos se visualizan mejor mediante el análisis en el dominio del tiempo [5]:

- Bajo condiciones ideales, dispositivos que generan corrientes armónicas (transformadores, convertidores, etc.), producirán armónicos de orden característico; sin embargo, si las condiciones terminales no son ideales (lo que puede considerarse como la regla, más que la excepción) estos dispositivos producirán armónicos de orden no característico.
- La función de conmutación del convertidor de potencia es equivalente a una modulación/demodulación entre las cantidades ac y dc. Esto trae como resultado una interacción entre armónicos de diferente orden. Tales interacciones no son predecibles a través de modelos invariantes en el tiempo. El estudio de este fenómeno es importante, especialmente en sistemas en los cuales es muy probable tener valores de distorsión armónica significativos.
- La compuerta de control de los convertidores de potencia puede interactuar con armónicos en el sistema a través del lazo de sincronización. Esta interacción, combinada con la propiedad de conmutación del convertidor, puede proveer un lazo de realimentación con una ganancia significativa para la amplificación de armónicos.

#### **1.2.4 Flujo de Carga Armónico**

Muchas de las deficiencias presentes en los métodos presentados con anterioridad pueden superarse parcialmente usando una técnica que es conocida como Flujo de Carga Armónico o Harmonic Power Flow (HPF). Los algoritmos de flujo de carga armónico combinan la metodología de las fuentes de corrientes con un algoritmo de flujo de carga convencional.

En esta sección se presenta el método de flujo de carga armónico híbrido, llamado así porque requiere el empleo de una combinación de técnicas en el dominio del tiempo y la frecuencia. De todos los procedimientos propuestos para el análisis de armónicos, este método es el más poderoso, pero también el más complejo [3].

El flujo de carga armónico híbrido utiliza un modelo del sistema de potencia para cada armónico, y representa las cargas no lineales a través de las ecuaciones diferenciales correspondientes en el dominio del tiempo. Este método tiene el siguiente procedimiento:

1. Formular el modelo de la matriz de admitancia del sistema de potencia incluyendo las contribuciones de todas las cargas lineales. La frecuencia debe ser consistente con los vectores de corriente en la serie de Fourier para las cargas no lineales.
2. Dada una estimación inicial de las tensiones del sistema, se lleva a cabo una representación en el tiempo de los modelos de las cargas no lineales hasta alcanzar un valor de régimen permanente.
3. Los resultados obtenidos son transformados al dominio de la frecuencia, donde se calcula el vector de corrientes armónicas a partir del vector de corrientes en estado estacionario para cada una de las cargas no lineales.
4. Estas inyecciones de corrientes se usan entonces para resolver el sistema de potencia en el dominio de la frecuencia (tal y como se describió en el método basado en las fuentes de corrientes) para obtener la tensión en cada barra del sistema (incluyendo el contenido armónico).
5. Los resultados obtenidos son transformados al dominio del tiempo.
6. Este procedimiento se repite en forma iterativa a partir del punto 2 hasta que converge tanto el modelo del sistema en el dominio de la frecuencia, como el modelo de todas las cargas no lineales en estado estacionario en el dominio del tiempo.

Con el flujo de carga armónico híbrido es posible representar funciones de control complejas y patrones de carga con amplio rango de variación en el dominio del tiempo. Sin embargo, debido a su gran capacidad de modelación, el grado de detalle o precisión de los resultados que se obtengan estará sujeto a la disponibilidad de la gran cantidad de datos requeridos para la construcción de un modelo preciso.

## CAPÍTULO II

### DESBALANCE DE TENSION EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA

Otro factor que afecta la calidad del servicio eléctrico en los sistemas de potencia es el desbalance de tensión; condición para la cual las tensiones de un circuito trifásico difieren en magnitud y/o no están desfasadas  $120^\circ$  entre sí.

Esta perturbación puede existir en cualquier parte del sistema, y puede causar numerosos problemas, en especial a motores y a otros equipos inductivos presentes en la red.

Para poder estudiar los circuitos trifásicos que operan bajo condiciones de desbalance de tensión o corriente en un determinado sistema, comúnmente es utilizada la teoría de componentes simétricas o de Fortescue [6]; que en términos generales establece que: el sistema trifásico desbalanceado es descompuesto en una *secuencia positiva o directa*, *secuencia negativa o inversa* y *secuencia cero u homopolar*, generalmente designadas por los subíndices *1*, *2* y *0* respectivamente; donde el desbalance de tensión está definido por la relación entre la componente de secuencia negativa y la componente de secuencia positiva.

Los efectos más dañinos del desbalance de tensión se presentan sobre los motores de inducción; aunque también perjudiciales son los efectos sobre los transformadores, generadores y convertidores de potencia (ver Anexo No. 2).

Con el fin de mejorar y/o disminuir los problemas introducidos por el desequilibrio de tensión, se hace necesario comprender en forma clara y precisa los parámetros y variables que afectan a este tipo de fenómeno. Por esta razón, a lo largo de este capítulo se analizarán las distintas maneras en las que puede cuantificarse el desbalance de tensión y los métodos empleados para su análisis.

## 2.1 Índices de Desbalance de Tensión

El grado o factor de desbalance de tensión presente en un sistema puede calcularse a partir de distintas definiciones comúnmente usadas dependiendo del grado de precisión requerido, a saber:

### Factor de desbalance de tensión de secuencia negativa ( $K_{U2}$ ) [7]

Ampliamente utilizada en los estándares europeos, esta primera definición se origina de la teoría de componentes simétricas; donde el grado de desbalance de tensión de secuencia negativa instantáneo puede ser determinado mediante la proporción entre la componente de secuencia negativa (proveniente principalmente de las corrientes de secuencia negativa producidas por cargas desbalanceadas) y la componente de secuencia positiva:

$$K_{U2} = \frac{U_2}{U_1} * 100\% \quad (2.1)$$

donde:

$U_2$  : Tensión de secuencia negativa

$U_1$  : Tensión de secuencia positiva

Esta definición también es conocida como definición IEC (International Electrotechnical Commission).

Es importante señalar que también es posible determinar el desbalance de corriente como la relación entre la corriente de secuencia negativa ( $I_2$ ) y la corriente de secuencia positiva ( $I_1$ ).



Dependiendo de los valores o mediciones con los cuales se cuente, la ecuación (2.1) puede tomar las siguientes formas:

- En caso de disponer sólo de las lecturas de las tensiones fase-neutro en amplitud y ángulo de fase  $U_{an}$ ,  $U_{bn}$  y  $U_{cn}$ , a partir del sistema desbalanceado, la ecuación para obtener el factor de desbalance se convierte en:

$$K_{U2} = \frac{|U_{an} + a^2U_{bn} + aU_{cn}|}{|U_{an} + aU_{bn} + a^2U_{cn}|} * 100\% \quad (2.2)$$

$$a: e^{j*120^\circ}$$

- A partir de las mediciones de dos tensiones línea-línea en amplitud y fase, el grado de desbalance puede calcularse como:

$$K_{U2} = \frac{|U_{ab} - aU_{bc}|}{|U_{ab} - a^2U_{bc}|} * 100\% \quad (2.3)$$

- Tomando la amplitud de las tensiones línea-línea, el desbalance también puede ser expresado de la siguiente manera:

$$K_{U2} = \frac{U_2}{U_1} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.4)$$

$$\text{donde } \beta = \frac{U_{ab}^4 + U_{bc}^4 + U_{ca}^4}{(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2)^2}$$

Esta última manera de definir el desbalance es la suministrada en CIGRE<sup>6</sup> 1992 36-203 [8].

---

<sup>6</sup> CIGRE: International Council on Large Electric Systems

El significado físico del factor de desbalance de tensión negativo se entiende como el nivel de tensión que intenta hacer girar a un motor de inducción trifásico en dirección opuesta a la establecida por las tensiones de secuencia positiva [9].

En base a la teoría de componentes simétricas; también es posible definir (además del factor de desbalance de tensión de secuencia negativa) el siguiente factor:

### **Factor de desbalance de tensión de secuencia cero ( $K_{U0}$ )**

El grado de desbalance de tensión de secuencia cero puede ser determinado mediante la proporción entre la componente de secuencia cero y la componente de secuencia positiva, expresado como:

$$K_{U0} = \frac{U_0}{U_1} * 100\% \quad (2.5)$$

donde:

$U_0$  : Tensión de secuencia cero u homopolar

$U_1$  : Tensión de secuencia positiva

Las tensiones de secuencia cero son el resultado de las corrientes de secuencia cero (causadas por cargas desbalanceadas) que fluyen por la red. Sin embargo, como las corrientes de secuencia cero no pueden fluir por sistemas sin conexión de tierra, estas no afectan a la mayoría de equipos trifásicos, razón por la cual el factor de desbalance de secuencia cero es de poca utilidad práctica.

### **Desbalance de Tensión de Fase ( $U_V$ ) [10]**

Una manera más simple para estimar el desbalance de tensión, consiste en tomar la máxima desviación al promedio de la magnitud de las tensiones línea-línea, y luego dividirlo por el promedio de las tensiones:

$$U_U = \frac{U_d}{U_P} * 100\% \quad (2.6)$$

donde:

$U_d$  : máxima desviación de tensión, respecto del promedio de  $\{U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}\}$

$U_P$  : tensión promedio de  $\{U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}\}$

A esta forma de calcular el desbalance también se le conoce como definición NEMA (National Electrical Manufacturers Association).

El factor o grado de desbalance calculado según la definición IEC (ecuaciones 2.1 a 2.4) es matemáticamente más riguroso que la definición NEMA; aunque es importante señalar que para desbalances de tensión menores a 5% los resultados son bastante similares.

Por otro lado, para desbalances de tensión mayores a 5%, la definición NEMA puede arrojar errores de hasta 15% con respecto a la definición IEC [11].

Si bien los índices para calcular el desbalance presentados con anterioridad son los más conocidos, otra manera de cuantificar el desbalance de tensión es la siguiente [12]:<sup>7</sup>

$$U_U = \frac{U_{MÁX} - U_{MÍN}}{U_P} * 100\% \quad (2.7)$$

donde:

$U_{MÁX}$  : es la tensión máxima entre fases.

$U_{MÍN}$  : es la tensión mínima entre fases.

$U_P$  : es la tensión promedio.

---

<sup>7</sup> Utilizada en países como Guatemala, Honduras, EL Salvador, Costa Rica, Panamá y Nicaragua.

Cuando se conecta una carga monofásica entre dos fases, y se desea obtener una aproximación del desbalance producido en una determinada barra del sistema, puede utilizarse la siguiente ecuación: [6]

$$U_U \approx \frac{S_L}{S_{SC}} * 100 \quad (2.8)$$

donde:

$S_L$  : es la potencia aparente de la carga

$S_{SC}$  : es el nivel de cortocircuito en barra

Es importante señalar que mientras sea posible debe evitarse el uso de las tensiones línea-neutro en las ecuaciones anteriores, ya que las componentes de secuencia cero pueden dar origen a resultados incorrectos, causando errores mucho mayores a los señalados con anterioridad [9]. También debe tenerse en cuenta que los índices o factores de desbalance deben ser medidos a la frecuencia fundamental del sistema; sino, la contribución de las componentes de secuencia cero y/o secuencia negativa, pueden incrementar el valor del desbalance obtenido, y por ende causar error en la medición, ya que esta contribución no causa el mismo efecto que el desbalance a la frecuencia fundamental en los equipos.

## **2.2 Metodologías de Análisis**

El flujo de carga trifásico es la herramienta más adecuada para realizar estudios de desbalance [13]. Resolver un problema de flujo de carga consiste en obtener la solución eléctrica del sistema en condiciones de régimen permanente, es decir, poder determinar bajo ciertas condiciones de generación y carga, las tensiones, corrientes, flujo de potencia activa y reactiva en aquellas partes del sistema que sean de interés.

El flujo de carga trifásico puede considerarse como una extensión del flujo de carga monofásico en donde hay que tener en cuenta un número considerable de aspectos que lo hagan suficientemente flexible para representar las distintas situaciones asociadas al desequilibrio. Además, el flujo de cargas trifásico constituye el punto de partida del análisis de propagación de armónicos en redes desequilibradas.

Para conducir estudios de flujo de carga debe tenerse en cuenta la diferencia existente entre los sistemas de transmisión y los sistemas de distribución aéreos. En este sentido, los sistemas de transmisión se caracterizan por: desequilibrios despreciables, líneas transpuestas (de gran longitud), alto valor de la razón  $X/R$  y susceptancias capacitivas apreciables en las líneas.

Las redes de distribución, en cambio, presentan características muy particulares entre las cuales se distinguen: topologías radiales, múltiples conexiones (trifásicas, bifásicas y monofásicas), cargas de distinta naturaleza (residenciales, comerciales, etc.), líneas de resistencia comparable a la reactancia (generalmente la razón  $X/R$  tiene un amplio rango de variación, pudiendo llegar a ser bastante menor que uno) y líneas sin transposiciones. Estas particularidades de los sistemas de distribución hacen necesario que el estudio de flujo de potencia se realice mediante métodos de flujo de potencia radial; cuya principal característica es el aprovechamiento de la topología radial de los sistemas de distribución.

Otra manera de calcular el desbalance de tensión es mediante la simulación de una falla línea a línea en la barra de interés del sistema bajo estudio, donde las variaciones en la carga pueden ser simuladas usando diferentes valores de resistencia de falla [14].

## **CAPÍTULO III**

### **ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DISTINTAS NORMAS UTILIZADAS PARA LA EVALUACIÓN DEL DESBALANCE DE TENSIÓN Y LA DISTORSIÓN ARMÓNICA**

En el presente capítulo se presentan las características generales de diferentes estándares de calidad con validez internacional y regional utilizados para el estudio y regulación del desbalance de tensión y la distorsión armónica en los sistemas de potencia; se prestará especial atención a los índices empleados por las normativas para monitorear dichos fenómenos, así como también a los límites más comunes establecidos para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema ante tales perturbaciones.

Como primer paso, se describirán las principales normas que tratan sobre desbalance de tensión y distorsión armónica; estas son las emitidas por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y la International Electrotechnical Commission (IEC).

#### **3.1 Normas IEEE**

En la norma **IEEE 1159-1995 [10]** se da una clasificación general de los distintos fenómenos que afectan la calidad del servicio eléctrico (armónicos, desbalance de tensión, sags, swells, etc.), además de tratar de manera explícita su definición, posibles causas, mecanismos de mitigación, duración, magnitud típica, límites e índices recomendados para cuantificarlos. De igual forma, se da una breve descripción del efecto que se observa sobre distintas cargas ante desviaciones de las condiciones nominales de operación del sistema, estableciendo también métodos para el monitoreo de sistemas de potencia y recomendaciones en cuanto a las técnicas de medición, aplicación e interpretación de los resultados obtenidos.

También se destacan los diferentes equipos empleados para las mediciones de las perturbaciones presentes en el sistema y los requerimientos mínimos que estos deben poseer; así como también el procedimiento general y las consideraciones que deben seguirse al efectuar dichas mediciones. Todo esto con el objetivo de establecer un medio común para caracterizar a las perturbaciones y facilitar el entendimiento entre los distintos sectores que deben tratar con problemas de calidad de servicio eléctrico.

Aunque la IEEE no cuenta con una norma específica para el estudio del desbalance de tensión, en ANSI C84.1-1995 [15] y ANSI/IEEE Std. 141-1986 [16] se encuentra información adicional a la ofrecida en la norma IEEE 1159-1995 [10] con respecto a la definición, límites y evaluación del fenómeno. Es importante resaltar que en la norma ANSI/IEEE Std. 141-1986 [16] también se señala el efecto del desequilibrio de cargas y el arranque de motores sobre la caída de tensión.

Para el estudio de la distorsión armónica, la IEEE publicó la norma **IEEE 519-1991** [17], que presenta en sus primeros capítulos un análisis teórico completo del fenómeno e indica la manera de limitar las perturbaciones causadas por armónicos en los sistemas eléctricos.

Antes de pasar a describir los diferentes límites y valores sugeridos por las normas IEEE para el control del desbalance de tensión y la distorsión armónica, se especificarán los rangos y valores de tensión utilizados por las mismas [15]:

- Baja Tensión (LV):  $U_N \leq 600V$
- Media Tensión (MV):  $2,4kV < U_N \leq 69kV$
- Alta Tensión (HV):  $69kV < U_N \leq 230kV$
- Extra Alta tensión (EHV):  $U_N > 230kV$

donde:  $U_N$  es la tensión nominal del sistema.

### **3.1.1 Límites de Desbalance de Tensión**

En la IEEE 1159-1995 [10] se define el desbalance de tensión como la proporción entre la componente de secuencia negativa y la componente de secuencia positiva; pero sugieren la relación NEMA (ecuación 2.6) como una manera más sencilla de cuantificar el fenómeno.

Se especifica que el valor típico para el desbalance se encuentra entre 0,5 y 2%; sugiriendo este último valor como límite máximo permisible para los diferentes niveles de tensión del sistema.

En la norma ANSI C84.1-1995 también se utiliza la definición NEMA para evaluar el desbalance de tensión, en este se recomienda lo siguiente:

- La compañía de suministro debe diseñar y operar el sistema para limitar el máximo desbalance de tensión a 3% para lecturas tomadas en el medidor de la empresa bajo condiciones de vacío (sin carga).
- Si un sistema eléctrico de suministro opera cerca de los valores límites de tensión señalados, cada nivel de tensión por fase debe estar entre los rangos especificados en la norma.

En este documento también se aclara que de presentarse condiciones de desbalance de tensión a nivel del sistema de distribución, el mismo se incrementará en el punto de utilización.

La diferencia existente entre los límites suministrados en las dos normas (ya que son emitidas por un mismo organismo) se explica por el hecho de que ANSI C84.1-1995 fue desarrollado con el propósito de minimizar el gasto para el consumidor; ya que el hecho de mantener un desbalance de tensión mínimo (por debajo del 2%) trae consigo incrementos en los costos para las empresas de suministro eléctrico y para los



fabricantes de equipos. Para evitar que este aumento se viese reflejado en la tarifa final para el cliente, se fijó el desbalance de tensión en 3% [18].

### **3.1.2 Mediciones de Desbalance de Tensión**

En las normas IEEE mencionadas con anterioridad no se describe ningún método específico para llevar a cabo mediciones asociadas al desbalance de tensión.

En este sentido, ya que la norma ANSI C84.1-1995 hace referencia al derrateo de la capacidad de los motores (para desbalances de tensión mayores a 1%) y el derrateo está asociado al calentamiento en los arrollados del motor, se presume que las mediciones deben estar asociadas a intervalos de larga duración (la manera de definir el desbalance es la dada por la ecuación (2.6)).

### **3.1.3 Límites de Distorsión de Corriente**

Para identificar y describir los límites de distorsión armónica en un sistema de potencia, en IEEE 519 se define el límite de una perturbación como el máximo valor que aparece con una determinada probabilidad de ocurrencia en el entorno electromagnético de un aparato, equipo o sistema. Este es el valor tope al cual los otros niveles tienen que estar referidos, para evitar causar interferencia.

En la norma IEEE 519 (además de profundizar los puntos cubiertos en IEEE 1159-1995) se tratan en detalle los siguientes aspectos en relación a la distorsión armónica:

- Evaluación de las cargas no lineales generadoras de armónicas, haciendo mayor énfasis en los convertidores estáticos y en los rectificadores.
- Modelación de los distintos componentes del sistema para el análisis de armónicos. Estos modelos deben ser bastante precisos en el lado de baja tensión

para sistemas industriales y de distribución, mientras que en el lado de alta tensión, un equivalente de cortocircuito es suficiente.

- Límites de distorsión armónica en la tensión y la corriente para consumidores, plantas industriales y para la empresa que suministra el servicio eléctrico.

Los límites sugeridos por la norma fueron desarrollados a partir de los siguientes objetivos:

- Limitar el grado de perturbación generado por las cargas de clientes individuales, de tal forma que estas no causen niveles inaceptables de desbalance en la tensión del sistema en condiciones normales de operación.
- Limitar la distorsión de tensión ocasionada por la empresa de servicio eléctrico.

Los límites de distorsión armónica recomendados por la norma son evaluados en el punto de común acoplamiento (PCC) entre la empresa de suministro y el cliente. Estos límites son aplicados para cada uno de los siguientes índices:

- Distorsión armónica total en la tensión.
- Distorsión armónica individual en cada una de las componentes armónicas de la tensión.
- Distorsión de demanda total en la corriente.
- Distorsión de demanda individual en cada una de las componentes armónicas de la corriente.

Los objetivos del desarrollo de límites de distorsión de corriente son fijar un máximo para los armónicos individuales de tensión a 3% de la tensión fundamental y el índice de distorsión armónica total ( $THD_V$ ) a 5% para sistemas que no presenten una elevada resonancia paralelo a una de las frecuencias armónicas inyectadas.

Los límites de distorsión de corriente indicados en la Tabla 3.1 asumen que existirá cierto grado de diversidad entre las corrientes armónicas inyectadas por diferentes

usuarios. Estos límites dependerán de la relación entre la carga del cliente y la capacidad de cortocircuito en el PCC.

**Tabla 3.1**  
*Límites de Distorsión Armónica en la corriente [17]*

$U_N \leq 69kV$						
$I_{SC}/I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
$69kV < U_N \leq 161kV$						
<20*	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50-100	5,0	2,25	2,0	1,25	0,35	6,0
100-1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
$U_N > 161kV$						
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0

\* Todos los equipos destinados a la generación de potencia están limitados a estos valores de distorsión de corriente, sin importar su relación de cortocircuito ( $I_{SC}/I_L$ )

Los límites indicados en la Tabla 3.1 están basados en las siguientes premisas:

- $I_{SC}$  es la máxima corriente de cortocircuito en el PCC.
- $I_L$  es la máxima demanda de corriente de la carga (para la componente de frecuencia fundamental) en el punto de común acoplamiento. Esta puede calcularse como el promedio de la máxima demanda de corriente mensual presente en los **últimos doce meses**.
- $h$  es el orden del armónico correspondiente
- $U_N$  es la tensión nominal del sistema
- $TDD$  es la distorsión de demanda total (ecuación 1.4).
- Los límites de las componentes armónicas de orden par están limitadas al 25% de los valores suministrados en la tabla.
- No está permitido que la distorsión de corriente genere una componente de corriente continua.

### 3.1.4 Límites de Distorsión de Tensión

En la Tabla 3.2 se indican los valores límites para la distorsión armónica en la tensión permisibles para diferentes niveles de tensión. Estas son cantidades que la empresa proveedora del servicio eléctrico debe mantener para garantizar la calidad del sistema.

**Tabla 3.2**  
*Límites de Distorsión Armónica en la tensión [17]*

Tensión nominal en el PCC ( $U_N$ )	Distorsión armónica individual de la tensión (%)	Distorsión armónica Total de Tensión THD (%)
$U_N \leq 69kV$	3,0	5,0
$69kV < U_N \leq 161kV$	1,5	2,5
$U_N > 161kV$	1,0	1,5

Los valores indicados en las Tablas 3.1 y 3.2 son los valores máximos permisibles en operación continua. Durante procesos de arranque o situaciones de operación inusuales con duraciones no mayores a una (1) hora, los límites señalados pueden excederse en 50%. En sistemas que utilizan convertidores de más de seis pulsos, los límites pueden incrementarse en un factor de  $\sqrt{\frac{q}{6}}$ ; donde  $q$  es el número de pulsos del convertidor.

Con el fin de esclarecer los puntos tratados en la norma IEEE 519, la IEEE elaboró una guía de aplicación para la misma (**IEEE P519A [19]**), cuya función es proveer ejemplos prácticos acerca de la aplicación de los límites suministrados en IEEE 519.

Los objetivos específicos de la guía de aplicación son:

- Proporcionar un procedimiento general para la evaluación de armónicos para diferentes clases de clientes (industrial, comercial, residencial) y para cuando se añadan distintos equipos al sistema eléctrico.

- Ilustrar mediante ejemplos los diferentes métodos para evaluar los niveles de armónicos en el punto de común acoplamiento (PCC), la dirección del flujo de corrientes armónicas y el cálculo de la demanda de distorsión total (TDD).
- Dar ejemplos de procedimientos para mediciones de tensiones y corrientes armónicas en el PCC. Estos procedimientos deberían señalar las variaciones en el tiempo y las características estadísticas de los niveles de armónicos.
- Ilustrar diferentes métodos para el control de tensiones y corrientes armónicas a nivel del cliente y de la empresa de suministro.

### **3.1.5 Mediciones de Armónicos**

En [17] básicamente se señala el tipo de equipo necesario para las mediciones y análisis de los armónicos en el sistema eléctrico, los requerimientos mínimos que estos deben cumplir (exactitud, ancho de banda, etc.), y la presentación de los datos recolectados, para su posterior análisis.

En cuanto a la duración de la medición, la norma especifica que estas deben ser realizadas dentro de un periodo de tiempo que sea capaz de caracterizar la naturaleza variable de los niveles de armónicos.

## **3.2 Normas IEC**

La norma IEC que evalúa los fenómenos que pueden afectar la compatibilidad electromagnética (EMC<sup>8</sup>) entre las cargas y el sistema eléctrico es la IEC 61000, que es publicada en partes separadas de acuerdo a la siguiente estructura:

---

<sup>8</sup> EMC: la habilidad de un equipo o un sistema de funcionar satisfactoriamente en su medio electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables para cualquier otro equipo situado en el mismo medio [22].

- Parte 1: Consideraciones generales (introducción, principios fundamentales), definiciones y terminología.
- Parte 2: Descripción y clasificación del entorno electromagnético, niveles de compatibilidad.
- Parte 3: Límites de emisión e inmunidad.
- Parte 4: Técnicas para pruebas y mediciones.
- Parte 5: Guías y métodos para la instalación y mitigación de los fenómenos.
- Parte 6: Estándares genéricos.
- Parte 9: Misceláneos.

Cada parte a su vez está subdividida en secciones que se complementan y sirven como referencia para otros documentos de la serie IEC 61000.

La norma IEC 61000 brinda una descripción del entorno electromagnético para perturbaciones en baja frecuencia<sup>9</sup> (norma IEC 61000-2-1 [20]); recomienda el nivel de compatibilidad para sistemas públicos de baja (norma IEC 61000-2-2 [21]) y media tensión (norma IEC 61000-2-12 [22]); así como también para plantas industriales (norma IEC 61000-2-4 [23]).

Los *niveles de compatibilidad* son niveles de perturbación usados como referencia para coordinar los límites de emisión y el nivel de inmunidad de equipos que son parte (o son alimentados) por la red de suministro, de manera de asegurar la compatibilidad electromagnética entre los componentes del sistema [24]. Los niveles de compatibilidad generalmente se basan en la mayor probabilidad de no ser excedidos (por ejemplo 95%), usando distribuciones que representan variaciones en tiempo y espacio de los distintos fenómenos que afectan a la red.

---

<sup>9</sup> El término baja frecuencia no está definido en base a un rango específico de frecuencias, sino para indicar la diferencia relativa en el contenido principal de frecuencia del fenómeno.

Los valores de tensión a los que se hace referencia en las normas IEC 61000 están comprendidos entre los siguientes rangos:

- Baja tensión (LV):  $U_N \leq 1kV$
- Media Tensión (MV):  $1kV < U_N \leq 35kV$
- Alta Tensión (HV):  $35kV < U_N \leq 230kV$
- Extra Alta tensión (EHV):  $U_N > 230kV$

A fin de limitar la distorsión armónica en los sistemas de potencia, la norma IEC recomienda el límite de emisión armónica para aquellos equipos y/o cargas que van a ser conectados a sistemas públicos de baja tensión (normas IEC 61000-3-2 [25] e IEC 61000-3-4 [26]), plantas industriales (norma IEC 61000-2-6 [27]) y evalúa los límites de emisión en equipos y/o cargas de media y alta tensión (norma IEC 61000-3-6 [24]).

Otro límite que se recomienda en la norma IEC 61000-3-6 es el nivel de planificación, que aplica únicamente para sistemas de media y alta tensión. Los *niveles de planificación* son especificados por la empresa de suministro eléctrico para diferentes rangos de tensión y pueden ser considerados como objetivos internos de calidad de servicio que pueden ser usados para evaluar el impacto que producen las cargas conectadas del lado del usuario sobre el sistema eléctrico. En la norma IEC 61000-3-6 [24] se da una definición de niveles de planificación, pero sólo se dan valores indicativos, ya que los niveles de planificación al ser objetivos internos de la empresa pueden variar dependiendo del caso a tratar, la estructura de la red, o de circunstancias externas.

A continuación se analizan cada uno de los límites indicados anteriormente (Niveles de compatibilidad y de emisión) para los distintos niveles de tensión del sistema.

### 3.2.1 Niveles de compatibilidad en sistemas de baja tensión

La norma IEC 61000-2-2 [21] indica valores numéricos para niveles de compatibilidad en sistemas de distribución de baja tensión (corriente alterna) con una tensión nominal de hasta 240 V monofásico o 415 V trifásico, a una frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz. A la hora de especificar niveles de compatibilidad para distorsión armónica, en la norma se señala la importancia de tomar en cuenta el hecho de que el número de fuentes armónicas se está incrementando en los sistemas eléctricos y que por otra parte, la cantidad de cargas puramente resistivas (que actúan como elementos amortiguadores) está decreciendo en relación a la cantidad de cargas totales.

Los niveles de compatibilidad para armónicos individuales en sistemas de baja tensión son los indicados en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3**

*Niveles de Compatibilidad para tensiones armónicas en redes de baja tensión [21]*

Armónicos Impares		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden del armónico (h)	Tensión Armónica (%)	Orden del armónico (h)	Tensión armónica (%)	Orden del armónico (h)	Tensión armónica (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2+(0,5*25/h)$				

Por otro lado, la norma IEC 61000-2-2 para el desbalance de tensión sugiere un nivel de compatibilidad en sistemas públicos de baja tensión de 2%, medidos según la ecuación (2.1).



### 3.2.2 Niveles de compatibilidad en sistemas de media tensión

En la norma IEC 61000-2-12 [22] se especifican los niveles de compatibilidad para sistemas públicos de distribución de media tensión con una tensión nominal comprendida entre 1 kV y 35 kV y una frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz.

La presente norma aplica para sistemas de media tensión que son alimentados por:

- Instalaciones privadas en las cuales los equipos están conectados directamente o a través de transformadores (caso 1).
- Subestaciones supliendo a sistemas públicos de distribución de baja tensión (caso 2).

En la Tabla 3.4 se muestran los niveles de compatibilidad sugeridos por esta norma; estos se aplican en el PCC para el primer caso, y en los terminales de media tensión de la subestación para el segundo caso.

**Tabla 3.4**

*Niveles de Compatibilidad para tensiones armónicas en redes de media tensión [22]*

Armónicos Impares		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden del armónico (h)	Tensión Armónica (%)	Orden del armónico (h)	Tensión armónica (%)	Orden del armónico (h)	Tensión armónica (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,76			12	0,46
23	1,41			14	0,43
25	1,27			16	0,41
>25	2,27*(17/h)- 0,27			18	0,39
				20	0,38
				22	0,36
				24	0,35
				>24	0,2

De igual forma, la norma IEC 61000-2-12 especifica un nivel de compatibilidad del 2% en sistemas públicos de media tensión para el factor de desbalance de tensión de secuencia negativa.

### **3.2.3 Niveles de compatibilidad en sistemas industriales**

La norma IEC 61000-2-4 [23] indica los requerimientos para niveles de compatibilidad en sistemas industriales y sistemas privados. Se entiende por sistemas privados aquellos correspondientes a un solo usuario y desde el cual no se suministra energía eléctrica a otros clientes.

Esta norma aplica en sistemas eléctricos de corriente alterna de media y baja tensión con una frecuencia nominal de 50 Hz/60 Hz, y permite evaluar las perturbaciones que pueden presentarse en el punto interno de acoplamiento (IPC) dentro de plantas industriales o redes privadas.

En esta norma los niveles de compatibilidad están dados considerando tres clases diferentes de entornos electromagnéticos, que son:

Clase 1: Corresponde a entornos electromagnéticos que contienen equipos muy sensibles a las perturbaciones del sistema eléctrico, por lo que tienen niveles de compatibilidad menores a los del sistema de alimentación; por ejemplo: instrumentación de laboratorios tecnológicos, equipos de protección y automatización, computadoras, etc.

Clase 2: Esta clase aplica al punto de común acoplamiento (PCC) y al punto interno de acoplamiento (IPC) en el entorno industrial en general. Los niveles de compatibilidad de esta clase son idénticos a los aplicados para sistemas públicos de tensión.

Clase 3: Está orientada sólo al punto interno de acoplamiento (IPC) en entornos industriales. Tiene niveles de compatibilidad más altos que aquellos en la clase 2 (para algunos fenómenos) y debería considerarse en caso de existir alguna de las siguientes condiciones:

- La mayoría de las cargas se alimentan a través de convertidores.
- Presencia de máquinas de soldar.
- Arranque frecuente de motores grandes.
- Cargas con variaciones o cambios rápidos.

Los niveles de compatibilidad para las tensiones armónicas en sistemas industriales se muestran en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5**  
*Niveles de Compatibilidad para tensiones armónicas en sistemas industriales [23]*

Orden (h)		Clase 1 $U_h(\%)$	Clase 2 $U_h(\%)$	Clase 3 $U_h(\%)$
Armónicos impares	5	3	6	8
	7	3	5	7
	11	3	3,5	5
	13	3	3	4,5
	17	2	2	4
	19	1,5	1,5	4
	23	1,5	1,5	3,5
	25	1,5	1,5	3,5
	>25	$0,2 + \frac{12,5}{h}$	$0,2 + \frac{12,5}{h}$	$5 * \sqrt{\frac{11}{h}}$
Armónicos pares múltiples de 3	3	3	5	6
	9	1,5	1,5	2,5
	15	0,3	0,3	2
	21	0,2	0,2	1,75
	>21	0,2	0,2	1
Armónicos pares	2	2	2	3
	4	1	1	1,5
	6	0,5	0,5	1
	8	0,5	0,5	1
	10	0,5	0,5	1
	>10	0,2	0,2	1
<b>THD</b>		5%	8%	10%

En sistemas industriales, el nivel de compatibilidad para el desbalance de tensión según la norma IEC 61000-2-4 [23] son los mostrados en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6**  
*Niveles de Compatibilidad para Desbalance de Tensión en sistemas industriales [23]*

	Clase 1	Clase 2	Clase 3
$K_{U2} = U_2/U_1$	2%	2%	3%

Con referencia al valor asignado en el IPC para entornos correspondientes a la clase 3, el límite dado se refiere al valor promedio evaluado sobre periodos de observación de 10 minutos. Adicionalmente, la norma hace los siguientes señalamientos:

- La componente instantánea del desbalance de secuencia negativa no debería exceder el 4%.
- Para entornos donde no haya una cantidad sustancial de cargas monofásicas, los niveles de compatibilidad dados para entornos clase 2 pueden aplicarse.

### **3.2.4 Niveles de emisión en sistemas de baja tensión.**

En el presente punto se describen las normas IEC 61000-3-2 [25] e IEC 61000-3-4 [26], que establecen los límites de emisión de corrientes armónicas para equipos a ser conectados en sistemas públicos de baja tensión, cuya corriente nominal de entrada sea menor (o igual) a 16 A y mayor a 16 A respectivamente.

Los límites indicados en la Tabla 3.7 están definidos de manera tal que no excedan los niveles de compatibilidad especificados por la norma IEC 61000-2-2.

Para limitar la emisión de corrientes armónicas, la norma IEC-6100-3-2 agrupa a los equipos que potencialmente causarían distorsión en el sistema de la siguiente forma:

### Clasificación de equipos con corriente nominal menor o igual a 16A

Clase A: Equipos trifásicos balanceados, y todos los equipos que no estén indicados en alguna de las clases siguientes.

Clase B: Herramientas portátiles.

Clase C: Equipos de iluminación, incluyendo los dispositivos reguladores de intensidad.

Clase D: Equipos que tienen una corriente de entrada con una forma de onda particular y potencia activa menor a 600 W, medidas según condiciones de prueba dadas en la misma norma.

NOTA: Independientemente de la forma de onda de la corriente de entrada de los equipos de las Clases B y C, no se considerarán como equipos Clase D.

### *Límites de emisión de corrientes armónicas para equipos con corriente nominal menor o igual a 16 A*

Clase A: Los armónicos de la corriente de entrada no deberían exceder los valores máximos dados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7

*Límites de corrientes armónicas para equipos Clase A [25]*

Orden de armónico ( $h$ )	Límite de corriente armónica (A)
<b>Armónicos impares</b>	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq h \leq 39$	$0,15*(15/h)$
<b>Armónicos pares</b>	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq h \leq 40$	$0,23*(8/h)$

Clase B: Los armónicos de la corriente de entrada no deben exceder los valores suministrados en la Tabla 3.7 multiplicados por un factor de 1,5.

Clase C: Los armónicos de la corriente de entrada para equipos de iluminación no deben superar los límites señalados en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8**

*Límites de corrientes armónicas para equipos Clase C [25]*

Orden de armónico ( $h$ )	Límite de corriente armónica (%)
2	2
3	$30 - fp$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq h \leq 39$	3

Notas:

- El límite de la corriente armónica está expresado como un % respecto de la corriente a frecuencia fundamental.
- $fp$  es el factor de potencia del circuito.

Clase D: Los límites de corrientes armónicas están definidos para condiciones de carga nominal. Los armónicos de la corriente de entrada no deberían exceder los suministrados en la Tabla 3.9; estos límites son válidos para equipos con una potencia activa mayor a 50 W.

**Tabla 3.9**

*Límites de corrientes armónicas para equipos Clase D [25]*

Orden de armónico ( $h$ )	Límite de corriente armónica por watt (mA/W)	Límite de corriente armónica (A)
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
$13 \leq h \leq 39$ (sólo armónicos impares)	$3,85/h$	ver Tabla 4.7

Los valores de las Tablas 3.7 a 3.9 se refieren a corrientes de línea, para cualquier tipo de conexión de la carga.

Si las tensiones de suministro difieren de 230 V o 400 V (línea-neutro o línea-línea), los límites deberán multiplicarse por un factor igual a la tensión del sistema dividido por 230 V o 400 V según sea el caso.

Los límites suministrados en las Tablas 3.7 a 3.9 aplican a armónicos en estado estable. Para armónicos de estado transitorio se tiene:

- Para armónicos transitorios pares de orden  $2 \leq h < 10$  e impares de orden  $3 \leq h < 19$ , los límites indicados pueden excederse por un máximo acumulado de duración de 15 segundos. Asimismo, cualquier observación periódica de 2,5 minutos de duración no debe exceder 1,5 veces los límites señalados.
- Las corrientes armónicas son despreciables cuando su duración no exceda más de unos segundos durante la conexión manual o automática del equipo.

La norma IEC 61000-3-4 especifica los límites de emisión para equipos conectados a sistemas públicos de baja tensión de los siguientes tipos:

- Tensión nominal hasta 240 V, monofásicos de dos o tres hilos;
- Tensión nominal hasta 600 V, trifásicos de tres o cuatro hilos;
- Frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz.
- Se excluyen otros niveles de tensión.

Esta norma también especifica la información requerida que le permite a una empresa de suministro eléctrico evaluar los equipos con respecto a la inyección de corrientes armónicas, y decidir si el mismo es adecuado o no para su instalación en el sistema.

### ***Límites de emisión de corrientes armónicas para equipos con corriente nominal mayor a 16 A***

La norma IEC 61000-3-4 especifica el procedimiento para la medición de las corrientes armónicas en equipos con corriente nominal de entrada por fase mayor a 16 A, y además emplea una serie de etapas de evaluación para decidir si la conexión del equipo al sistema debe ser o no aceptada por la empresa de suministro eléctrico; a saber:

#### **Etapas 1: Conexión simplificada**

Los equipos que cumplan con la emisión de corrientes armónicas señalados en la Tabla 3.10 pueden ser conectados en cualquier punto del sistema, siempre y cuando la relación entre el nivel de cortocircuito y la potencia aparente nominal del equipo sea mayor o igual a 33.

**Tabla 3.10**

*Límites de corrientes para conexión simplificada [26]*

<b>Orden de armónico (<i>h</i>)</b>	<b>Límite de corriente armónica (%)</b>	<b>Orden de armónico (<i>h</i>)</b>	<b>Límite de corriente armónica (%)</b>
3	21,6	21	≤ 0,6
5	10,7	23	0,9
7	7,2	25	0,8
9	3,8	27	≤ 0,6
11	3,1	29	0,7
13	2	31	0,7
15	0,7	≥ 33	≤ 0,6
17	1,2		
19	1,1	Pares	≤ 8/ <i>h</i> o ≤ 0,6

Nota: Los límites de corriente armónica son expresados en % respecto de la corriente nominal.

#### **Etapas 2: Conexión basada en los datos de la red y el equipo**

Para los equipos que no cumplan con los valores de emisión dados por la Tabla 3.10 (etapa 1), se permiten valores de emisión mayores, siempre y cuando su relación de



cortocircuito sea mayor o igual a 33. En la norma se especifican los límites de emisión para equipos balanceados y desbalanceados (Tablas 3.11, 3.12).

**Tabla 3.11**

*Límites de emisión de corrientes armónicas para equipos trifásicos balanceados [26]*

Mínima Relación de cortocircuito	Factores admisibles de distorsión de corriente armónica (%)		Límite de corriente armónica (%)			
	<i>THD</i>	<i>PWHD</i>	<i>I<sub>5</sub></i>	<i>I<sub>7</sub></i>	<i>I<sub>11</sub></i>	<i>I<sub>13</sub></i>
66	16	25	14	11	10	8
120	18	29	16	12	11	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
600	70	57	60	40	25	18

Notas:

- Los límites de corriente son expresados en % respecto de la corriente nominal
- El valor relativo de los armónicos pares no debería exceder el 16/h %.
- Se permite la interpolación entre valores consecutivos de la relación de cortocircuito.

**Tabla 3.12**

*Límites de emisión de corrientes armónicas en equipos trifásicos y monofásicos desbalanceados [26]*

Mínima Relación de cortocircuito	Factores admisibles de distorsión de corriente armónica (%)		Límite de corriente armónica (%)					
	<i>THD</i>	<i>PWHD</i>	<i>I<sub>3</sub></i>	<i>I<sub>5</sub></i>	<i>I<sub>7</sub></i>	<i>I<sub>9</sub></i>	<i>I<sub>11</sub></i>	<i>I<sub>13</sub></i>
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	9
600	57	57	40	30	20	14	12	10

Notas:

- Los límites de corriente son expresados en % respecto de la corriente nominal
- El valor relativo de los armónicos pares no debería exceder el (16/h) %.
- Para el caso trifásico, los valores dados en la tabla aplican a cada fase.

El término *PWHD*, corresponde a la distorsión armónica parcial ponderada (Partial Weighted Harmonic Distorsion). Este es utilizado a fin de garantizar que los efectos de las corrientes armónicas de orden elevado (a partir del armónico de orden 14, según IEC) sobre los resultados sean lo suficientemente pequeños como para requerir que se especifiquen límites individuales.

### Etapa 3: Conexión basada en la potencia a convenir con el cliente

De no cumplirse con las condiciones establecidas en las etapas anteriores, o bien si la corriente nominal de entrada por fase del equipo a ser conectado excede los 75 A, la empresa de suministro podrá aceptar la conexión del mismo basado en las normas particulares de la empresa y en los requerimientos de potencia activa en el sitio del cliente.

Con relación a los límites especificados por las Tablas 3.10 a 3.12 es conveniente señalar lo siguiente:

- Las corrientes armónicas individuales menores al 0,6% de la corriente de entrada fundamental son despreciadas.
- La corriente  $I_1$  referida en las tablas indicadas anteriormente corresponde a la componente fundamental de la corriente nominal del equipo.
- Las corrientes armónicas cuya duración sea menor a 10 segundos, en equipos bajo condiciones especiales de operación (rotura o cambio de una pieza), no deben exceder 1,5 veces los valores límites especificados por la etapa correspondiente.
- Para corrientes armónicas pares comprendidas entre el orden 2 y 10 y corrientes armónicas impares entre los ordenes 3 y 19 se permiten valores de hasta 1,5 veces los límites establecidos en las Tablas 3.10 a 3.12; para armónicos con una duración máxima del 10% de cualquier periodo de observación de 2,5 minutos.

### 3.2.5 Niveles de emisión en sistemas de media y alta tensión.

La norma IEC 61000-3-6 [24] esboza principios para que sean utilizados como la base para determinar los requerimientos necesarios para conectar cargas de gran tamaño (productoras de armónicos y/o interarmónicos) en el sistema.

El procedimiento propuesto para evaluar la aceptabilidad o no de cargas contaminantes depende de la potencia convenida por el cliente, la potencia del equipo generador de armónicos, y las características del sistema. El objetivo es limitar la inyección de corrientes armónicas provenientes de cada uno de los consumidores individuales a niveles que no provoquen distorsión en la tensión por encima de los valores especificados en los niveles de planificación. Tres etapas de evaluación se definen, que pueden ser usadas en secuencia o en forma independiente cada una.

#### Etapa 1: Evaluación simplificada de la emisión de la perturbación.

El objetivo de la etapa 1 es proponer un criterio bastante simple que permita tomar decisiones con respecto a la conexión o no de cargas contaminantes, evitando una evaluación en detalle.

La norma propone para el establecimiento de límites de distorsión, de manera que las cargas contaminantes puedan ser conectadas al sistema, la siguiente relación:

$$\frac{S_D}{S_{SC}} \leq \begin{cases} 0,1\% \text{ para MV} \\ 0,1 - 0,4\% \text{ para HV} \\ 0,1 - 0,2\% \text{ para EHV} \end{cases}$$

donde:

$S_D$ : Potencia de distorsión de la carga.

$S_{SC}$ : Nivel de cortocircuito en el PCC.

Generalmente es aceptable la instalación de pequeñas cargas o equipos por parte de los consumidores, sin realizarse una evaluación específica en cuanto al nivel de distorsión armónica por parte de la compañía de suministro.

#### Etapa 2: Límites de emisión relacionados a las características propias de la red.

Si una carga no satisface los criterios expuestos en la etapa 1, las características específicas del equipo generador de armónicos deberían ser evaluadas junto con la capacidad de absorción del sistema. Esta última se obtiene a partir de los niveles de planificación, y se reparte entre los consumidores individuales de acuerdo a su demanda con respecto de la capacidad total del sistema.

El objetivo que persigue esta etapa es que el nivel de perturbación sea igual al nivel de planificación si el sistema está plenamente cargado y todos los consumidores están inyectando a la red el límite de armónicos individual correspondiente.

#### Etapa 3: Aceptación de niveles de emisión elevados en casos excepcionales.

Bajo circunstancias especiales, un consumidor puede requerir el consentimiento de la empresa de suministro para la emisión de perturbaciones por encima de las permitidas en la etapa 2. En tales situaciones, el consumidor y la empresa de servicio eléctrico pueden llegar a un acuerdo para facilitar la conexión de la carga contaminante; no sin antes llevar a cabo un estudio detallado de las condiciones actuales y a futuro de las características del sistema, para determinar bajo que condiciones puede efectuarse la conexión del equipo.

### **3.2.6 Niveles de emisión en sistemas industriales.**

En la norma IEC 61000-2-6 [27] se especifica el procedimiento para evaluar los niveles de perturbación producidos por los aparatos, equipos y sistemas instalados en

redes no públicas enmarcados en entornos industriales. Es conveniente recordar que por sistemas no públicos se entienden aquellos que corresponden a un solo usuario y desde el cual no se suministra energía eléctrica a otros usuarios.

Los límites de emisión permitidos para un equipo pueden ser determinados por medio de un procedimiento que consta de tres pasos, a saber:

- Intercambio de información entre las partes involucradas: Empresa de servicio eléctrico, clientes y fabricantes. En la norma se señala el mínimo de información que deben suministrar cada uno de los involucrados.
- Tomar en cuenta la presencia en la instalación industrial de diferentes fuentes de perturbación y seleccionar de manera adecuada la forma en que se representará la suma de sus efectos.
- Evaluación del nivel total de emisión esperado en el PCC, así como también la evaluación del nivel de perturbación esperado en cada uno de los puntos internos de acoplamiento (IPC) del sistema industrial.

Las componentes armónicas en la corriente de línea son principalmente generadas por cargas que se pueden clasificar en tres diferentes categorías:

- Cargas conmutadas mediante equipos de electrónica de potencia.
- Cargas con impedancias no lineales.
- Cargas con inductancias saturables.

En la norma también se presenta un rango de emisión típico de corrientes armónicas y las características principales para las cargas más comunes presentes en la red eléctrica.

### 3.2.7 Mediciones de Desbalance de Tensión

Para el manejo estadístico de las mediciones efectuadas, los rangos de tiempo recomendados por IEC 77A [28] para la compresión de datos son:

- Intervalo muy corto ( $T_{vs}$ ): 3 segundos
- Intervalo corto ( $T_{sh}$ ): 10 minutos
- Intervalo largo ( $T_L$ ): 1 hora
- Intervalo diario ( $T_D$ ): 24 horas
- Intervalo semanal ( $T_{wk}$ ): 7 días

NOTA: Por ejemplo, la tensión armónica evaluada en intervalos de muy corto tiempo será  $U_{h,vs}$

Para las evaluaciones de desbalance de tensión también se utilizan periodos de 2 horas (obtenidos combinando intervalos de 10 min.).

El estándar **IEC 61000-4-30** [29] sugiere en su anexo informativo A.6 que para el estudio de desbalance de tensión los datos sean obtenidos a partir de mediciones con intervalos de 10 min y/o 2 h para ser evaluados con alguno de los siguientes criterios (aunque otras técnicas de procesamiento pueden ser concertadas entre las partes involucradas):

- Se tomará en cuenta el número o porcentaje de valores que durante el intervalo de medición excedan los valores preestablecidos como límites para el desbalance;
- Y/o los valores obtenidos bajo el escenario de peor condición (el intervalo de medición puede ser diferente para esta posibilidad, por ejemplo un año);
- Y/o uno o más de los valores semanales con 95% (u otro porcentaje) de probabilidad de ocurrencia.

### 3.2.8 Mediciones de Armónicos

Entre los estándares internacionales pertenecientes a la IEC que tratan el tema de mediciones de armónicos se incluyen el 61000-4-30 [29] y el 61000-4-7 [30]; de manera general, el método de medición es el siguiente:

- Obtener el espectro de la onda sobre una ventana de 10 ciclos (sistemas de 50 Hz) o de 12 ciclos (sistemas de 60 Hz). La ventana debería estar sincronizada dependiendo de la frecuencia a la cual se está efectuando la medición;
- Los espectros se combinan (rms) para formar un espectro total sobre un intervalo de 3 s (150 ciclos para sistemas de 50 Hz, 180 ciclos para sistemas de 60 Hz) y los valores obtenidos son referidos como intervalos de tiempo muy corto ( $U_{h,vs}$ );
- Los valores de 3 s se combinan para formar valores de 10 min ( $U_{h,sh}$ );
- Los  $U_{h,vs}$  y  $U_{h,sh}$  son evaluados sobre un periodo de un día o una semana.

Los valores máximos con probabilidad de ocurrencia del 95% o el 99% son tomados como los índices propios del lugar de medición.

El reporte técnico IEC 61000-3-6:1996 propone valores de medición más específicos, como se muestra a continuación:

- El valor diario máximo de 95% de probabilidad de no ser excedido de la tensión de muy corto tiempo de duración  $U_{h,vs}$  (valor rms de las componentes armónicas individuales medidas en periodos de 3 s) no debe exceder el nivel de planificación;
- El máximo valor semanal de  $U_{h,sh}$  (valor rms de las componentes armónicas individuales medidas en periodos de 10 min) no debe exceder el nivel de planificación;
- El máximo valor semanal de  $U_{h,vs}$ .

NOTA: El inconveniente de utilizar los valores máximos, es que estos pueden ser influenciados por transitorios en la red.

Este reporte se basa en las recomendaciones de IEC 61000-4-7, y señala un tiempo mínimo de medición de una semana.

En el estándar IEC 61000-4-30 no se especifican índices de medición, pero se dan valores de referencia para fines contractuales en su anexo informativo A.6. Se recomienda un periodo de una semana como mínimo para evaluaciones con intervalos de 10 min.

### **3.3 Normas emitidas por otros organismos**

Si bien una gran parte de las empresas de suministro eléctrico a nivel mundial utilizan las normas IEEE o IEC, ya sea de manera directa, o como base para la elaboración de sus propias referencias, se pueden encontrar diferentes criterios o valores límites a los expuestos con anterioridad.

A continuación se muestran las características y diferencias más resaltantes de algunos estándares o guías regionales con respecto de las normas internacionales para el estudio del desbalance de tensión y la distorsión armónica, en cuanto a la definición de límites y técnicas de medición de los distintos fenómenos.

#### ***Desbalance de Tensión***

Para especificar los objetivos o rangos óptimos de operación del sistema, el estándar **CENELEC<sup>10</sup> EN 50160:1999** [31] recomienda ***Características de Tensión<sup>11</sup>***; que son límites o valores entre los cuales cualquier usuario puede esperar que se mantengan

---

<sup>10</sup> CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization. En la actualidad 28 países europeos se encuentran afiliados.

<sup>11</sup> Algunas normativas y documentos como: NRS 048-2 [32], Emeraude Contract [33], HydroQuebec Voltage Characteristics (H-Q) [34], también utilizan esta definición para especificar sus límites, aunque a diferencia de [31], estos también son aplicables para alta y extra alta tensión (HV-EHV).



las variables del sistema bajo condiciones normales de operación; sin embargo, las características de tensión no describen la situación típica o común de un cliente conectado a la red de suministro, ya que el nivel de la perturbación puede ser mucho menor al indicado.

En esta norma se definen y describen las principales características de tensión en el punto de conexión de suministro en sistemas de distribución para baja tensión (LV) y media tensión (MV).

CENELEC EN 50160:1999 establece un valor límite de desbalance de tensión de 2%, aunque puede llegar a ser 3% en ciertas áreas del sistema, medido según las componentes de secuencia. El índice de desbalance es el valor con 95% de probabilidad de ocurrencia para el promedio rms de mediciones  $T_{Sh}$  de la componente de secuencia negativa de la tensión de suministro para ser evaluados en periodos de una semana.

Por otro lado, el artículo **CIGRE 1992 36-203** [8] en cuanto a desbalance de tensión sugiere los siguientes *niveles de compatibilidad*:

**Tabla 3.13**

*Niveles de Compatibilidad para Desbalance de Tensión según CIGRE [8]*

	LV	MV	HV-EHV
$U_{NEG}/U_{POS}$	2%	2%	1%

$U_{NEG}$ : Tensión de secuencia negativa.

$U_{POS}$ : Tensión de secuencia positiva.

También se establecen los siguientes criterios para el manejo estadístico de los valores correspondientes a las mediciones:

- Al final del periodo total de observación (pocos días como mínimo incluyendo un fin de semana, aunque preferiblemente una semana), el valor diario de probabilidad de ocurrencia del 95% para intervalos de 3 s de medición ( $U_{nVS\ 95\%}$ ) será comparado con el límite establecido.
- El mayor valor diario del máximo valor rms sobre periodos de 10 min para ser comparado contra el mismo valor límite.

Al igual que CENELEC EN 50160:1999, el estándar nacional **NRS<sup>12</sup> 048-2:2003** señala un desbalance de tensión negativo máximo del 2%, con excepción de ciertas zonas de la red donde puede llegar a ser 3%.

En cuanto a las mediciones que deben ser efectuadas, establece que por cada fase, el mayor valor rms medido en intervalos de 10 min que no sea excedido por la cantidad de 95% de probabilidad de ocurrencia medida en la semana, sea el valor tomado para comparar con el valor de desbalance establecido por las partes. La evaluación debe tener como mínimo una semana de duración.

### ***Distorsión Armónica***

En el artículo **CIGRÉ 1992 36-203** se propone como periodo de observación para el análisis de armónicos un mínimo de pocos días incluyendo un fin de semana (aunque una semana preferiblemente). Al final del mismo, el valor diario con 95% de probabilidad de no ser excedido medido en intervalos de 3 s ( $U_{h,vs}$ ) debería ser obtenido para cada orden de armónico de interés, para que sea comparado con el nivel de compatibilidad correspondiente. Los niveles de compatibilidad recomendados para LV, MV y HV se muestran en la Tabla 3.14.

---

<sup>12</sup> NRS: National Rationalised Specification

Tabla 3.14

Niveles de Compatibilidad para tensiones armónicas según CIGRE [8]

Armónicos Impares			Armónicos impares múltiplos de 3			Armónicos pares		
Orden del armónico (h)	Tensión Armónica (%)		Orden del armónico (h)	Tensión armónica (%)		Orden del armónico (h)	Tensión armónica (%)	
	LV-MV	HV		LV-MV	HV		LV-MV	HV
5	6	2	3	5	2	2	2	1,5
7	5	2	9	1,5	1	4	1	1
11	3,5	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,5
13	3	1,5	21	0,2	0,2	8	0,5	0,2
17	2	1	>21	0,2	0,2	10	0,5	0,2
19	1,76	1				12	0,2	0,2
23	1,41	0,7				>12	0,2	0,2
25	1,27	0,7						
>25	0,2+1,3(25/h)	0,2+0,5(25/h)						

El *THD* para LV y MV es 8%, mientras que para HV es 3%.

El estándar **EN 50160:1999** [31] estipula que durante cada periodo de una semana, los valores rms de 95% de probabilidad de no ser excedidos medidos en intervalos de 10min ( $U_{h,sh}$ ) de cada armónica individual de tensión sea el índice de calidad a ser comparado contra la característica relevante de tensión.

### 3.4 Comparación de las normas internacionales y regionales [35]

En las secciones anteriores se describieron los aspectos más importantes y sobresalientes de la distorsión armónica y el desbalance de tensión reseñados en distintas normas con validez regional e internacional.

Para elaborar un análisis comparativo entre las normas antes mencionadas, y analizar sus aspectos comunes y diferencias en torno a los fenómenos de interés, resulta útil agrupar la información suministrada en las mismas bajo un mismo formato, como se muestra en las Tablas 3.15 hasta la 3.18, en estas se hace una comparación sumaria de los intervalos utilizados para el control y medición del desbalance de tensión y la

distorsión armónica, así como también de los objetivos o niveles de compatibilidad señalados por los documentos.

Entre los aspectos comunes presentes en la mayoría de las normas, tanto para la distorsión armónica como para el desbalance de tensión se tienen:

- El punto para medir y aplicar los límites a un cliente es el punto común de conexión (PCC) con otros usuarios.
- Los valores límites suministrados por la mayoría de las normas corresponden al 95% de probabilidad de no ser excedidos.
- El periodo de medición más utilizado es de por lo menos una semana.

En las Tablas 3.15 y 3.16 se especifican los parámetros más resaltantes del desbalance de tensión para cada una de las normas estudiadas.

**Tabla 3.15**

*Intervalos de medición utilizados por diferentes normas para el estudio del Desbalance de Tensión*

Documento / Estándar		Documentos Internacionales			Guías y estándares nacionales o regionales				
		IEC 61000-4-30:2003 [29]	ANSI/IEEE C84.1:1995 [15]	CIGRÉ 1992 Paper 36-203 [8]	EN 50160:1999 [31]	NRS 048-2:2003 [32]	EdF Emeraude Contract – A.2 [33]	ER P29 [36]	H-Q Voltage Characteristics [34]
<b>Estatus</b>		Estándar Internacional	Recomendación internacional	Trabajo CIGRÉ 36.05	Estándar europeo	Estándar nacional	Contrato de servicio	Estándar nacional	Voluntario
<b>Donde aplica</b>		Internacional	Internacional	Internacional	28 países europeos afiliados	Países surafricanos	Francia	Reino Unido	Québec
<b>Propósito</b>		Métodos de medición de la calidad de potencia	Recomendaciones acerca de los valores de tensión de los equipos y sistemas eléctricos	Evaluar la calidad de la tensión en relación a armónicos, flicker y desbalance	Características de la tensión de suministro para redes públicas	Estándar base usado por el regulador	Características de la tensión de suministro	Niveles de planificación para control de emisiones	Características de la tensión de suministro
<b>Intervalos de Evaluación</b>	<b>Intervalo muy corto de tiempo (3s)</b>			$U_{neg,vs}$ 95% diario					
	<b>Intervalo corto de tiempo (10min)</b>	$U_{neg,sh}$ 95% semanal (o a convenir)		$U_{neg,sh}$ Máximo semanal	$U_{neg,sh}$ 95% semanal	$U_{neg,sh}$ 95% diario	$U_{neg,sh}$ (no hace más especificaciones)	Máximo valor del factor de secuencia negativa sobre cualquier periodo de 1min	
	<b>Intervalo largo de tiempo (2h)</b>	y/o $U_{neg,lt}$ 95% semanal (o a convenir)	Se supone en este intervalo por su forma de definir el fenómeno						$U_{neg,lt}$ 95% semanal
<b>Periodo para evaluación estadística</b>		Al menos una semana, o más a convenir		Mínimo pocos días, incluyendo un fin de semana	Una semana	Una semana mínimo	Al menos una semana (o más)	Suficiente para representar el efecto sobre máquinas rotativas (podría llegar a un año)	Una semana
<b>Comentarios</b>		Índices propuestos para aplicaciones contractuales en anexo A.6	Cubre todos los niveles de tensión	Cubre desde LV a EHV	Aplica desde LV a MV	Cubre desde LV a HV	1kV a 50kV y >50kV	>132kV	Aplica para LV hasta EHV

Tabla 3.16

Objetivos y límites de Desbalance de Tensión utilizados por diferentes normas regionales e internacionales

Documento / Estándar		Documentos Internacionales			Guías y estándares nacionales o regionales				
		IEC 61000-2-12 [22]	ANSI/IEEE C84.1:1995 [15]	CIGRÉ 1992 Paper 36-203 [8]	EN 50160:1999 [31]	NRS 048-2:2003 [32]	EdF Emeraude Contract – A.2 [33]	ER P29 [36]	H-Q Voltage Characteristics [34]
Índice utilizado para cuantificar el desbalance		$\frac{U_2}{U_1}$	Máxima desviación del promedio de las tensiones de fase  Tensión promedio (ecuación 2.6)	$\frac{U_2}{U_1} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$ con $\beta = \frac{U_{ab}^4 + U_{bc}^4 + U_{ca}^4}{(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2)^2}$	$\frac{U_2}{U_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$
Objetivos en MV	Intervalo muy corto de tiempo (3s)			2%					
	Intervalo corto de tiempo (10min)			2%	2%	2%	2%	2% (intervalo de 1min)	
	Intervalo largo de tiempo (2h)	3%	3%						2%
Objetivos en HV-EHV	Intervalo muy corto de tiempo (3s)	n/a		1%	n/a				
	Intervalo corto de tiempo (10min)	n/a		1%	n/a	2%	1%	2% (intervalo de 1min)	
	Intervalo largo de tiempo (2h)	n/a	2% (IEEE 1159)		n/a	n/a			HV=1.5% (2h); EHV=1% (2h)
Comentarios		Índices propuestos para aplicaciones contractuales en anexo A.6	Medidos para condición sin carga	Cubre desde LV a EHV	Aplica desde LV a MV	Cubre desde LV a HV	n/a	>132kV	Aplica para LV hasta EHV

Con respecto al desbalance de tensión se pueden distinguir los siguientes hechos:

- En la gran mayoría de las normas, el desbalance de tensión se muestra en términos de las componentes de secuencia, donde sólo la norma ANSI C84.1 proporciona la definición NEMA. Al respecto puede decirse que la impedancia de secuencia negativa es la verdadera medida del impacto sobre los motores, pero la definición NEMA es usada en el estándar porque es más sencilla de medir en el campo.
- Puede observarse que los valores correspondientes a intervalos cortos de medición (10 min) son los utilizados de forma más común.
- El valor máximo de desbalance es 2% para MV (con excepción de ciertas áreas para las cuales se permite hasta un 3%) y 1% para HV-EHV.

Es de hacer notar, que aunque distintas ecuaciones puedan utilizarse para calcular el factor de desbalance de tensión de secuencia negativa, los resultados deberían ser similares para un tiempo de integración dado.

Otro hecho importante de resaltar es que todos los estándares desarrollados se centran en la generación y propagación del desbalance de secuencia inversa, no haciéndose referencia a límites para el desbalance de tensión de secuencia cero; esto se debe a que la componente de secuencia negativa se propaga con mayor facilidad a lo largo de la red eléctrica en comparación con la componente homopolar debido al tipo de conexión de los transformadores y a la configuración de los consumos desequilibrados.

Análogamente, en las Tablas 3.17 y 3.18 se especifican los métodos de medición y valores sugeridos para cada armónico en cuanto a la distorsión de tensión.

**Tabla 3.17**

*Intervalos de medición utilizados por diferentes normas para evaluar la Distorsión Armónica*

Documento / Estándar		Documentos Internacionales				Guías y estándares nacionales o regionales				
		IEC 61000-4-30:2003 [29]	IEC 61000-3-6:1996 [24]	IEEE519:1991 [17]	CIGRÉ 1992 Paper 36-203 [8]	EN 50160:1999 [31]	NRS 048-2:2003 [32]	EdF Emeraude Contract – A.2 [33]	ER G5/4 [37]	H-Q Voltage Characteristics [34]
Intervalos de Evaluación	Intervalo muy corto (3s)	$U_{h,vs}$ (% a convenir)	$U_{h,vs}$ (95% diario)		$U_{h,vs}$ (95% diario)					
	Intervalo corto (10min)	$U_{h,sh}$ (% a convenir)	$U_{h,sh}$ Máximo semanal			$U_{h,sh} + THD$ 95% semanal	$U_{h,sh} + THD$ 95% semanal	$U_{h,sh} + THD$ (Máximo)		$U_{h,sh} + THD$ 95% semanal
	Otro		$U_{h,vs}^*$ Máximo semanal	$U_h$ (95% diario)	$U_{h,sh}$ Máximo				$U_{h,1-min} + THD$ 95% semanal	
Periodo para evaluación estadística		Al menos una semana, o más a convenir	Una semana como mínimo	Al menos una semana (P519 [19])	Mínimo pocos días, incluyendo un fin de semana	Una semana	Una semana mínimo	Al menos una semana (o más)	Una semana	Una semana
Método de medición		IEC 61000-4-7	IEC 61000-4-7	**	IEC 61000-4-7	IEC 61000-4-7	Método propio	IEC 61000-4-7	Método propio	IEC 61000-4-7
Comentarios		Índices propuestos como guías para aplicaciones contractuales	Abarca niveles desde MV hasta EHV	Cubre todos los niveles de tensión	Cubre desde LV a HV	Aplica desde LV a MV	Cubre desde LV a EHV	Cubre desde LV a EHV	Aplica para LV-MV y para HV-EHV	Aplica para LV-MV y para HV-EHV

**Notas:**

- El IEC 61000-3-6 es un reporte técnico tipo 3.
- (\*) Multiplicado por un factor entre 1,5 y 2,0.
- (\*\*) No se especifica ningún método, pero se hace referencia a IEC 61000-4-7 en la definición de límites para armónicos de corta duración.



Tabla 3.18

Comparación de las componentes individuales de tensión armónica

MV – Tensiones Armónicas (% de la tensión fundamental)							HV – EHV – Tensiones Armónicas (% de la tensión fundamental)						
Orden (h)	Niveles de Compatibilidad (IEC 61000-2-12)	Niveles de Planificación (IEC 61000-3-6:1996)	Límites de tensión (IEEE 519:1991)	Características de tensión (EdF Emeraude Contract + EN 50160:1999)	Niveles de Planificación (ER G5/4)	Características de tensión (NRS 048-2:2003)	Niveles de Planificación (IEC 61000-3-6:1996)	Límites de Tensión (IEEE 519:1991)		Niveles de Planificación (ER G5/4)		EdF Emeraude Contract	H-Q Voltage Characteristics
								69<U <sub>N</sub> <161 kV	>161 kV	20<U <sub>N</sub> <145 kV	275-400 kV		
2	2	1,6	3	2	1,5	2	1,5	1,5	1	1	1	1,5	1,5
3	5	4	3	5	3	5	2	1,5	1	2	1,5	2	2
4	1	1	3	1	1	1	1	1,5	1	0,8	0,8	1	1
5	6	5	3	6	3	6	2	1,5	1	2	2	2	2
6	0,5	0,5	3	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5
7	5	4	3	5	3	5	2	1,5	1	2	1,5	2	2
8	0,5	0,4	3	0,5	0,4	0,5	0,4	1,5	1	0,4	0,4	0,5	0,4
9	1,5	1,2	3	1,5	1,2	1,5	1	1,5	1	1	0,5	1	1
10	0,5	0,4	3	0,5	0,4	0,5	0,4	1,5	1	0,4	0,4	0,5	0,4
11	3,5	3	3	3,5	2	3,5	1,5	1,5	1	1,5	1	1,5	1,5
12	0,46	0,2	3	0,5	0,2	0,46	0,2	1,5	1	0,2	0,2	0,5	0,3
13	3	2,5	3	3	2	3	1,5	1,5	1	1,5	1	1,5	1,5
14	0,43	0,2	3	0,5	0,2	0,43	0,2	1,5	1	0,2	0,2	0,5	0,3
15	0,4	0,3	3	0,5	0,3	0,4	0,3	1,5	1	0,3	0,3	0,5	0,75
16	0,41	0,2	3	0,5	0,2	0,41	0,2	1,5	1	0,2	0,2	0,5	0,3
17	2	1,6	3	2	1,6	2	1	1,5	1	1	0,5	1	1
18	0,39	0,2	3	0,5	0,2	0,39	0,2	1,5	1	0,2	0,2	0,5	0,3
19	1,76	1,2	3	1,5	1,2	1,76	1	1,5	1	1	0,5	1	1
20	0,38	0,2	3	0,5	0,2	0,38	0,2	1,5	1	0,2	0,2	0,5	0,3
21	0,3	0,2	3	0,5	0,2	0,3	0,2	1,5	1	0,2	0,2	0,5	0,5
22	0,36	0,2	3	0,5	0,2	0,36	0,2	1,5	1	0,2	0,2	0,5	0,3
23	1,41	1,2	3	1,5	1,2	1,41	0,7	1,5	1	0,7	0,5	0,7	0,7
24	0,35	0,2	3	0,5	0,2	0,35	0,2	1,5	1	0,2	0,2	0,5	0,3
25	1,27	1,2	3	1,5	0,7	1,27	0,7	1,5	1	0,7	0,5	0,7	0,7
Impares no múltiplos de 3 >25	2,27(17/h)-0,27	0,2+(25/h)	3	n/a	0,2+0,5(25/h)	2,27(17/h)-0,27	0,2+0,5(25/h)	1,5	1	0,2+0,5(25/h)	0,2+0,3(25/h)	n/a	0,2+0,5(25/h)
THD	8	6,5	5	8	4	8	3	2,5	1,5	3	3	3	3

La comparación entre las distintas normas en lo que a distorsión armónica se refiere, nos muestra lo siguiente:

- En la mayoría de los casos el estándar a tomar como referencia para efectuar mediciones de armónicos es el IEC 61000-4-7.
- El intervalo de medición más común para medir tensiones armónicas es el llamado intervalo de corto tiempo ( $U_{h,sh}$ ); y el valor utilizado más comúnmente para ser comparado con los objetivos fijados es usualmente el de 95% de probabilidad de no ser excedido.
- Con respecto a los niveles de planificación, los intervalos de medición están definidos con mayor detalle en IEC 61000-3-6.
- En media tensión, los valores más comunes para las componentes armónicas individuales son las correspondientes al estándar EN 50160.
- En HV y EHV la norma IEEE 519 recomienda niveles para tensiones armónicas hasta dos veces más severos (sólo 1% para el quinto armónico) que los niveles de planificación suministrados en IEC 61000-3-6; en contraste, en especial a partir de la armónica 20, los límites de distorsión armónica en la tensión de la mayoría de las normas son mucho más conservadores que los especificados en la norma IEEE.
- Otra diferencia de las normas IEEE con respecto del resto, es que permite el mismo nivel de tensión armónica para cualquier orden de armónico; aunque esto puede cambiar en un futuro, ya que esta norma se encuentra actualmente bajo revisión.

Para los sistemas de alta y extra alta tensión es importante aclarar el propósito de los indicadores suministrados. A diferencia de los sistemas de baja tensión, los objetivos de calidad para HV y EHV no están directamente relacionados con el aislamiento o inmunidad de los equipos pertenecientes al cliente, ya que estos no están conectados directamente a niveles de tensión tan elevados. Los límites para las perturbaciones en sistemas de transmisión están orientados a coordinar los niveles de emisiones entre las diferentes partes componentes del sistema a distintos niveles de tensión.

### **3.5 Normas recomendadas a ser aplicadas por CVG EDELCA**

En este punto se recomiendan las normas que tanto CVG EDELCA como sus clientes deberían utilizar para el control y regulación del desbalance de tensión y la distorsión armónica. Esta recomendación está basada en el análisis llevado a cabo a lo largo del presente capítulo, en el cual se revisaron las principales normas internacionales y regionales para el estudio de los fenómenos señalados.

#### **3.5.1 Norma recomendada sobre Desbalance de Tensión**

Aunque en diferentes estudios realizados por CVG EDELCA en los últimos años se han utilizado los indicadores sugeridos por la IEEE 1159-1995 en cuanto a niveles permisibles y técnicas de medición para la evaluación del Desbalance de Tensión, en la actualidad la empresa no cuenta con una norma específica para definir dicho fenómeno.

Después de la comparación efectuada en secciones anteriores, se recomienda que la norma sobre desbalance de tensión que CVG EDELCA adopte para su uso y cumplimiento se apegue a lo establecido en los documentos **IEC** de la serie **61000-2** y a las recomendaciones indicadas en el artículo **CIGRE 1992 36-203** [8] (en lo referente a los niveles de compatibilidad para alta y extra alta tensión).

Entre las razones por las cuales fueron elegidos los documentos anteriores como base para la elaboración de las normas a seguir por CVG EDELCA para evaluar el desbalance de tensión se distinguen las siguientes:

- La información se encuentra más condensada, ya que trata exclusivamente los fenómenos de desbalance, distorsión armónica y flicker (CIGRÉ 1992 36-203), en cuanto a límites y objetivos de cumplimiento; esto facilita su entendimiento y posterior implementación.

- El índice sugerido en las normas IEEE para evaluar el desbalance de tensión (definición NEMA) puede dar lugar a malas aproximaciones, especialmente si no se extraen las componentes de secuencia cero.
- Se trabaja con magnitudes de secuencia, esto coincide con el formato usual utilizado en las bases de datos de flujos de cargas y estudios de cortocircuitos en las redes de transporte.
- Se definen los niveles permisibles de desbalance distinguiendo los distintos niveles de tensión presentes en el sistema, a diferencia de los dados por la IEEE.
- Ya que las componentes de secuencia negativa se propagan con mayor facilidad de niveles mayores a niveles menores de tensión, es conveniente limitar el desbalance para sistemas de HV y EHV con valores más estrictos, en vez de aplicar un mismo tope para todos los valores de tensión existentes en la red.

Utilizando como guía las normas IEC 61000-2 y el artículo CIGRÉ, se recomiendan los siguientes niveles de planificación y compatibilidad para el desbalance de tensión:

**Tabla 3.19**

*Niveles de Planificación sugeridos para desbalance de tensión*

<b>Nivel de Tensión</b>	<b>Nivel de Planificación</b> <i><math>U_{NEG}/U_{POS}</math> (%)</i>
<b>MV</b>	2
<b>HV</b>	1,5
<b>EHV</b>	1

**Tabla 3.20**

*Niveles de Compatibilidad sugeridos para desbalance de tensión*

<b>Nivel de Tensión</b>	<b>Niveles de Compatibilidad <math>U_{NEG}/U_{POS}(\%)</math></b>
<b>MV</b>	2*
<b>HV</b>	2
<b>EHV</b>	1,5

\* Para MV puede permitirse un desbalance de hasta 3%, para entornos tipo Clase 3.

### **3.5.2 Norma recomendada sobre Distorsión Armónica**

Tomando como base el estudio realizado a lo largo del presente capítulo, para el estudio de la distorsión armónica se sugiere la utilización de la norma IEEE 519. Las razones principales por las cuales se prefiere el enfoque dado en este estándar por encima del resto se presentan a continuación:

- Dividen la responsabilidad entre la compañía de suministro y los consumidores, en este sentido la empresa que brinda el servicio eléctrico debería mantener los niveles de distorsión de tensión en el PCC por debajo de los límites establecidos y los consumidores limitar la cantidad de armónicos que inyectan al sistema.
- Está más orientada hacia los sistemas de transmisión, a diferencia de la norma IEC que establece límites de emisión de distorsión armónica únicamente para sistemas con tensión nominal de hasta 35 kV, para tensiones superiores establece un procedimiento de cálculo.
- El enfoque individual que brinda la norma IEC para la emisión de armónicos por parte de las cargas está dirigido en primer lugar a los fabricantes de equipos, y no a las empresas que suministran el servicio eléctrico.
- Los límites descritos por la norma IEEE 519 (debido al uso de límites para la corriente y para la tensión) son de alguna manera más estrictos que los suministrados por las normas IEC.

- Presenta los límites en una forma más clara y fácil de aplicar.
- El estándar IEEE 519 es más completo que los otros documentos presentados, ya que provee una guía de aplicación para el análisis de armónicos (IEEE P519A) que abarca todo tipo de sistemas (industriales, de distribución y transmisión) [38].

Por otro lado, entre los puntos débiles o deficiencias que se encontraron en el estándar IEEE 519 con respecto de las otras normativas estudiadas se encuentran:

- No le da mayor importancia a las aplicaciones residenciales ni a la mayoría de convertidores monofásicos.
- Cuando se presentan aumentos en la carga de los clientes (o cambios significativos en la topología del circuito), los procedimientos contenidos en IEEE 519 deben ser revisados nuevamente de manera de comprobar que los niveles de armónicos se encuentren entre los límites establecidos.

Es importante resaltar que si bien la metodología sugerida en las normas IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4 para atacar el problema de armónicos (haciendo uso de límites de emisión por equipos) es muy recomendada y cuenta con muchos beneficios, el problema de tomar estos datos radicaría en que estos valores están relacionados al diseño y comportamiento del equipo en el sistema. Sin embargo, debido a las diferencias existentes entre los sistemas europeos y americanos sería lógico imaginar que los límites deberían ser diferentes en ambos sitios.

Adicionalmente, es importante señalar que CVG EDELCA en los últimos años, en sus contratos de servicio con PDVSA y la empresa Electro Norte (Brasil), ha tomado como referencia lo señalado en la norma IEEE 519 en lo que a límites de distorsión armónica se refiere.

## CAPÍTULO IV

### **MODELACIÓN RECOMENDADA DE LOS ELEMENTOS COMPONENTES DE LA RED ELÉCTRICA PARA EL DESBALANCE DE TENSIÓN Y LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN *ATPDRAW* Y *POWER FACTORY***

Para conducir cualquier estudio relacionado con el análisis de sistemas de potencia, es necesario modelar matemáticamente los distintos componentes que conforman el sistema bajo consideración. En este sentido, los programas *Power Factory 13.1.253* de DIGSILENT y *ATPDraw 4.0* tienen una gran variedad de modelos predefinidos (ver Anexo No. 3) que sirven como interfaz entre el problema y el software a utilizar.

La elección entre los distintos modelos presentes en cada uno de los programas señalados, dependerá del tipo de fenómeno que quiera simularse, la velocidad de cálculo requerida, la metodología a utilizar (análisis en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia), la data disponible para determinado componente del sistema y la exactitud esperada en los resultados a obtener.

En este sentido, debe aclararse que para ejecutar estudios de desbalance de tensión o análisis de armónicos y simular sus efectos sobre el comportamiento del sistema de potencia, los modelos a ser utilizados no necesariamente serán los mismos para ambos fenómenos. La diferencia primordial será la información adicional referente a la dependencia en frecuencia para predecir el comportamiento de los equipos para frecuencias mayores a la fundamental en el análisis de armónicos.

Sin embargo, ya que para realizar un estudio de armónicos es necesario resolver un flujo de carga a frecuencia fundamental [39], los modelos suministrados a

continuación podrán utilizarse con libertad para conducir ambos estudios, en cualquiera de las herramientas disponibles.

En el programa *Power Factory*, para la mayoría de los componentes sólo se dispone de un modelo, independientemente del fenómeno que quiera estudiarse; lo que hará que este sea o no adecuado para una determinada circunstancia serán los datos que se suministren para su representación. De esta forma, en *Power Factory* los parámetros de entrada necesarios para describir los elementos del sistema pueden clasificarse en:

- Parámetros básicos: estos deben ser suministrados por el usuario de forma obligatoria, independientemente del estudio que vaya a ser llevado a cabo; permiten efectuar cálculos básicos de flujo de carga.
- Parámetros opcionales: requeridos dependiendo de los módulos de análisis que vayan a ser utilizados (estudio de armónicos, estabilidad, transitorios, etc.)

Por lo tanto, en las siguientes secciones sólo se mencionarán aquellos datos necesarios para el estudio del desbalance de tensión y el análisis armónico; ya que estos son los fenómenos en los que se centra el presente trabajo (en el Anexo No. 3 se encuentran las gráficas correspondientes a la introducción de datos para cada uno de los programas utilizados).

En *ATPDraw* (a diferencia del *Power Factory*) cada elemento puede representarse mediante diferentes modelos que varían en su grado de definición y en el tipo o cantidad de parámetros que deben introducirse para su identificación. En base a los datos disponibles y al tipo de aplicación que quiera simularse, el usuario decidirá cual es el modelo más apropiado para cada caso.

Para mostrar las diferencias, ventajas y desventajas de los modelos empleados en un programa con respecto del otro, a continuación se describe su representación circuital o circuito equivalente y los parámetros de entrada requeridos por cada aplicación.



## 4.1 Líneas de transmisión

El equivalente  $\pi$  es el modelo implementado para representar líneas de transmisión en *Power Factory*. Esta representación (Figura 4.1(a)) es válida para secuencia positiva, negativa y cero. Dependiendo de los datos de entrada que se usen para definir la línea, también es posible obtener la representación matricial de los parámetros eléctricos de la misma; esta representación incluye el acoplamiento eléctrico entre los circuitos.

En la Figura 4.1 (b) se muestra el esquema general para líneas con parámetros distribuidos, disponible para representar líneas de transmisión en el programa *ATPDraw*. En esta herramienta, las líneas con parámetros concentrados se representan por un equivalente  $\pi$  similar al de la Figura 4.1 (a), pero sin dependencia de la longitud.

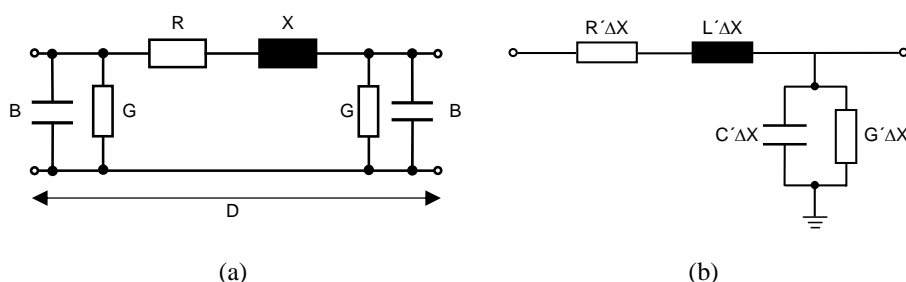


Figura 4.1 Modelo de línea de transmisión en (a) *Power Factory* y (b) *ATPDraw*

La anterior es una representación por fase de una línea de transmisión. Cuando se tengan líneas cortas<sup>13</sup> la capacitancia generalmente podrá despreciarse, excepto en el caso de cables de potencia (subterráneos o submarinos). La conductancia  $G$  podrá despreciarse en la mayoría de los casos; a menos que sea de importancia modelar las pérdidas por corona [40].

En la Tabla 4.1 se presentan las características más importantes referentes a la introducción de datos para representar líneas de transmisión en los programas *Power Factory* y *ATPDraw*.

<sup>13</sup> Según IEEE Std 399-1997 [40], líneas cortas serán aquellas menores a 80km.

**Tabla 4.1**

*Parámetros requeridos para la representación de Líneas de Transmisión*

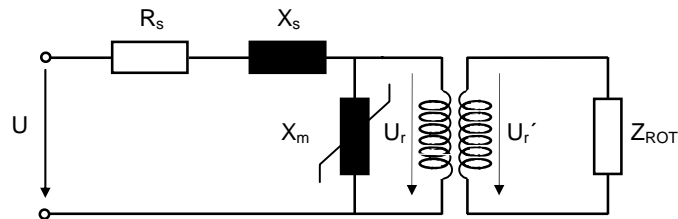
	<i>Power Factory</i>	<i>ATPDraw</i>
<b>Parámetros de entrada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• R, X y B; que serán iguales para secuencia positiva y negativa, no así para secuencia cero. Es decir, <math>R = R_1 = R_2</math> (secuencia positiva y negativa) y <math>R = R_0</math> para secuencia cero.</li> <li>• Longitud de la línea.</li> </ul>	
<b>Comentarios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La tensión y corriente nominal de la línea también son requeridos por el programa.</li> <li>• Es posible introducir una ecuación que represente la dependencia de la frecuencia para la resistencia, inductancia y capacitancia (para el análisis armónico) por unidad de longitud.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependiendo del modelo utilizado, los parámetros de la línea pueden determinarse para una frecuencia en particular o para un rango de frecuencias (modelo JMARTÍ), aunque generalmente no será necesario para el cálculo de flujo de carga y análisis de armónicos.</li> <li>• En resumen, para el análisis armónico puede utilizarse cualquier modelo de línea del <i>ATPDraw</i>.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para representar líneas de transmisión no transpuestas, es necesario introducir los valores de la geometría de los conductores, altura de las torres, resistividad del suelo y efecto skin, para así obtener los datos de la matriz de reactancias y conductancias de la línea. En el programa <i>ATP</i> estos datos pueden obtenerse a partir de la subrutina <i>LINE CONSTANTS</i>.</li> </ul>	

En general, puede decirse que para modelar de forma adecuada las líneas de transmisión (independientemente del programa utilizado) debe tenerse en cuenta el efecto de la longitud de la línea. También es importante tomar en cuenta el efecto skin; especialmente en sistemas de extra alta tensión (EHV), ya que en estos casos la resistencia de la línea es la fuente principal de amortiguamiento (de especial interés en el estudio de la resonancia armónica).

#### **4.2 Motores de Inducción**

El modelo genérico para una máquina asincrónica en el programa *Power Factory* es básicamente el modelo clásico de una máquina de inducción. Este modelo genérico representa las tensiones y corrientes del estator como fasores instantáneos en régimen permanente. En contraste, las tensiones y corrientes del rotor están representadas en un marco referencial que rota a cierta velocidad. Estas dos referencias están conectadas por medio de un arrollado de transformación de proporción uno; por lo

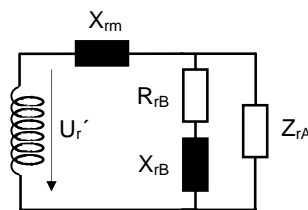
tanto, la impedancia del rotor está referida al lado del estator. El circuito equivalente se muestra en la Figura 4.2.



**Figura 4.2 Modelo básico del motor asincrónico en Power Factory**

El subíndice “s” en las resistencias y reactancias, indica que las mismas están referidas al estator o armadura de la máquina. Puede observarse también que se incluye una impedancia dependiente de la frecuencia (o el deslizamiento) en el rotor ( $Z_{ROT}$ ); para esta impedancia  $Z_{ROT}$  pueden seleccionarse varias representaciones en el modelo general del motor en *Power Factory*, esto dependerá del tipo de motor que quiera modelarse (jaula sencilla, jaula doble o rotor jaula de ardilla).

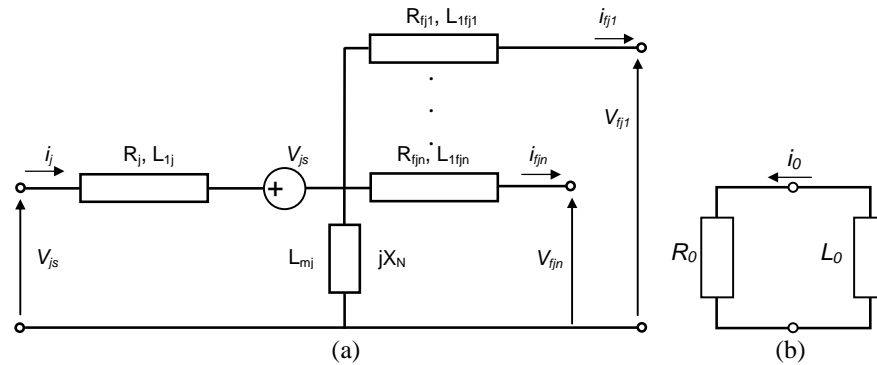
En los motores de jaula doble, la impedancia  $Z_{ROT}$  se representa como se indica en la Figura 4.3 (se describe este tipo de motor, ya que este será el modelo utilizado en las simulaciones).



**Figura 4.3 Modelo del rotor para motores de jaula doble en Power Factory**

Los subíndices “rA y rB” indican que las cantidades están referidas al rotor y a la jaula de arranque respectivamente. La reactancia de fuga del rotor está representada por  $X_{rm}$ .

Análogamente, en el *ATPDraw* el modelo del motor de inducción o módulo de máquina universal (UM) tiene la siguiente representación circuital:



**Figura 4.4** Circuito equivalente para representar una máquina asíncrona en *ATPDraw*

Nota:

- (a) circuito para las variables en los ejes d-q
- (b) circuito de secuencia cero
- $j$  denota las cantidades en el dominio d o q.
- $f$  representa las variables de excitación o campo
- $V_j$  y  $V_{fj}$  son las tensiones de los arrollados transformadas
- $V_{js}$  es la tensión que acopla los circuitos de eje directo y en cuadratura (d y q)
- La dirección de las corrientes dependerá de la operación como motor o como generador de la máquina.

Para poder utilizar el algoritmo de Máquina Universal en *ATPDraw* para simular motores de inducción es necesario aplicar la Transformación de Park a las cantidades presentes en el estator y el rotor para convertirlas al dominio d-q-0. En la Figura 4.4 se observa que las bobinas de los ejes d-q-0 están aisladas entre sí, excepto por la fuente de acoplamiento  $V_{js}$  entre los circuitos d y q.

Al igual que en el programa *Power Factory*, en *ATPDraw* también es posible simular diferentes tipos de motores de inducción (hasta tres modelos distintos).

A continuación se muestra (Tabla 4.2) la información que debe ser recopilada para representar la interacción dinámica entre los motores y los demás componentes del sistema en las dos herramientas en estudio.

**Tabla 4.2**

**Parámetros requeridos para la representación de Motores de inducción trifásicos**

	<i>Power Factory</i>		<i>ATPDraw</i>
<b>Parámetros de entrada</b>	<u>Torque-Deslizamiento</u>	<u>Circuito Equivalente</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deben suministrarse las resistencias e inductancias en los ejes d-q-0 para el estator y el rotor. Para la rama magnetizante sólo en los ejes d-q.</li> <li>• # de arrollados del rotor en el eje d y el eje q.</li> <li>• El % de deslizamiento (inicialización automática) o las corrientes presentes en los arrollados del estator y del rotor en los ejes d-q-0 (inicialización manual).</li> <li>• # de pares de polos y frecuencia del motor.</li> <li>• Tipo de conexión del estator.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiencia en operación nominal</li> <li>• Velocidad nominal</li> <li>• Corriente de rotor trabado</li> <li>• Torque de rotor trabado</li> <li>• Torque máximo</li> <li>• Reactancia del estator <math>X_s</math></li> <li>• Reactancia de fuga del rotor (<math>X_m</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reactancia del estator <math>X_s</math></li> <li>• Resistencia del estator <math>R_s</math></li> <li>• Reactancia de magnetización <math>X_m</math></li> <li>• Reactancia de fuga del rotor <math>X_{rm}</math></li> <li>• Resistencia y reactancia del rotor <math>Z_{rA}</math> (<math>R_{rA}</math> y <math>X_{rA}</math>).</li> <li>• Resistencia y reactancia de la jaula de arranque <math>Z_{rB}</math> (<math>R_{rB}</math> y <math>X_{rB}</math>)</li> </ul>	
<b>Comentarios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para ambos casos la tensión, frecuencia, y potencia mecánica en el punto de operación nominal es requerido; así como también el # de pares de polos del motor y la forma de conexión del estator.</li> <li>• Como puede observarse, los datos pueden especificarse mediante las resistencias y reactancias del circuito equivalente, o por puntos característicos de torque, corriente y deslizamiento de la máquina.</li> <li>• El programa verifica los datos de entrada suministrados (torque-deslizamiento) y reporta si hay inconsistencias que no permitan la creación de los parámetros del circuito equivalente.</li> <li>• Se grafican automáticamente (al introducir los valores) las características del torque y la corriente en función de la velocidad, para distintos rangos de tensión nominal (50, 75 y 100%).</li> <li>• Para el análisis armónico se puede suministrar la dependencia de la frecuencia de la resistencia y la reactancia estatórica.</li> <li>• Para simular el arranque de motores, también es necesario reportar la constante de Inercia (en ambos modelos).</li> <li>• El programa cuenta con un módulo especial para el arranque de motores de inducción.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los parámetros deben ser dados en el dominio d-q-0.</li> <li>• El sistema mecánico asociado al motor se representa como una red eléctrica equivalente.</li> <li>• Los parámetros de entrada pueden especificarse en por unidad o en cantidades físicas.</li> <li>• Las unidades de las variables de salida dependerán de cómo fueron introducidos los parámetros de entrada.</li> <li>• Debe elegirse entre inicialización automática (funcionamiento nominal al comenzar la simulación) o manual (condiciones de arranque) de la máquina.</li> <li>• En el archivo de salida las cantidades asociadas al motor tendrán la siguiente equivalencia: Tensión(V)=Velocidad (rad/s) Corriente(A) = Torque(Nm)</li> <li>• Puede representarse el efecto de saturación mediante una relación entre el flujo y la corriente en los ejes d-q-0.</li> </ul>

Con respecto a la modelación de motores de inducción en los programas *ATPDraw* y *Power Factory* puede concluirse que:

- El programa *Power Factory* ofrece mayores facilidades para representar y simular el arranque de motores de inducción.
- En condiciones de desequilibrio el programa *ATPDraw* requiere de un paso adicional para definir la tensión en los terminales del motor.
- La transformación de los parámetros del motor para obtener los datos del circuito equivalente en los ejes d-q-0 (en *ATPDraw*) no es inmediata. Por lo tanto, se recomienda el uso de una herramienta adicional (como por ejemplo, el programa INDMOT<sup>14</sup>) para realizar la conversión de datos.
- A diferencia del modelo empleado por el *Power Factory*, en *ATPDraw* no está representada la reactancia de fuga del rotor en el circuito equivalente para motores de jaula doble.

En general para los estudios de armónicos, las resistencias e inductancias del estator y la rama magnetizante pueden considerarse independientes de la frecuencia.

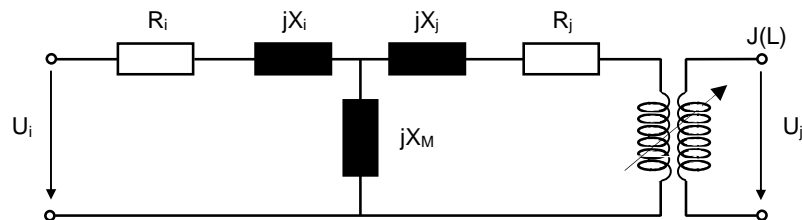
### 4.3 Transformadores

El diagrama de representación de secuencia positiva para un transformador de dos arrollados en el programa *Power Factory* se muestra en la Figura 4.5, este incluye las resistencias efectivas y las reactancias de fuga de los arrollados de alta y baja tensión; una reactancia de magnetización y un cambiador de tomas (tap) generalizado (fase y magnitud). Este modelo también es válido para secuencia negativa (con excepción del cambiador de tomas); mientras que para secuencia cero el diagrama dependerá del tipo de conexión del transformador.

---

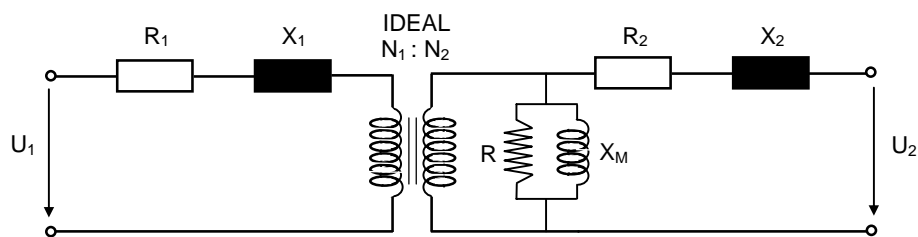
<sup>14</sup> El programa INDMOT calcula los parámetros de la red equivalente a un motor de inducción a partir de los datos especificados por el usuario o el fabricante, para ser utilizados en el algoritmo de máquina universal del *ATPDraw*. El motor puede ser de rotor devanado, simple, jaula doble o de ranuras profundas.

En *Power Factory* el tap puede estar controlado por tensión, potencia activa o reactiva, o puede ser configurado para que se ajuste automáticamente a ciertas condiciones de operación del sistema, fijadas por el usuario.



**Figura 4.5** Circuito equivalente por fase para representar transformadores de dos arrollados en *Power Factory*

Entre los modelos disponibles en *ATPDraw* para la representación de transformadores, se utilizó la subrutina “BCTRAN” para generar los elementos componentes del circuito equivalente (Figura 4.6).



**Figura 4.6** Circuito equivalente por fase para representar transformadores en *ATPDraw*

Este modelo toma en cuenta las pérdidas por excitación (aunque pueden despreciarse para transformadores monofásicos) y las pérdidas de cortocircuito. Las capacitancias parásitas son ignoradas, lo que indica que el modelo es válido hasta unos pocos kHz. A diferencia de la rutina “XFORMER”, BCTRAN es válida para frecuencias bajas, esto es debido al hecho de que la parte resistiva e inductiva de la impedancia de cortocircuito es tratada por separado en este modelo [41].

En la siguiente tabla se especifican los parámetros de entrada que deben suministrarse en *ATPDraw* y *Power Factory* para la representación de transformadores para el análisis de flujo de cargas y armónicos.

**Tabla 4.3**

*Parámetros requeridos para la representación de Transformadores*

	<i>Power Factory</i>	<i>ATPDraw</i>
<b>Parámetros de entrada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensión de cortocircuito (%)</li> <li>• Pérdidas en el cobre (kW)</li> <li>• Corriente de excitación (%)</li> <li>• Pérdidas en el hierro (kW)</li> <li>• Tensión y potencia nominal de los arrollados</li> <li>• Tipo de conexión de los arrollados (Y-Δ-Autotransformador)</li> <li>• Ángulo de desfase</li> <li>• # de fases y de arrollados</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• # de transformadores conectados en paralelo</li> <li>• Frecuencia nominal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de núcleo del transformador</li> <li>• Frecuencia a la cual se realizaron las pruebas al transformador</li> </ul>
<b>Comentarios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El análisis de flujo de carga simple no requiere los datos para la impedancia de magnetización</li> <li>• Sólo se introduce un punto del total de las pruebas de cc y ca.</li> <li>• La impedancia del transformador será proporcional a la reactancia de fuga y lineal con la frecuencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debe especificarse en cual arrollado fueron llevadas a cabo las pruebas</li> <li>• Pueden introducirse hasta 6 puntos diferentes correspondientes a las pruebas de circuito abierto (ca).</li> <li>• El programa reproduce automáticamente la curva de magnetización del transformador</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En ambas herramientas pueden introducirse los datos de las pruebas para secuencia cero.</li> <li>• Es importante señalar que en el programa <i>ATPDraw</i> las no linealidades no se tomarán en cuenta cuando se realice un análisis en el dominio de la frecuencia, ya que el programa toma todos los elementos como lineales para calcular la respuesta en régimen permanente (condiciones iniciales).</li> </ul>	

El hecho de que en la herramienta *ATPDraw* sea posible introducir hasta seis valores diferentes correspondientes a la curva de magnetización, hace suponer que este modelo es más preciso que el utilizado en *Power Factory*.

En resumen, para representar de manera correcta los transformadores deben seguirse las siguientes directrices:

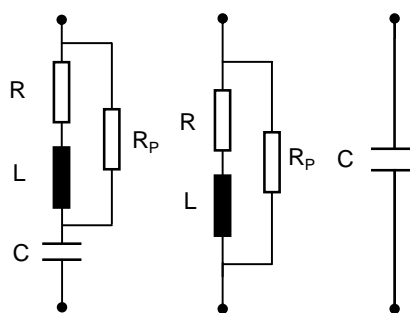


- Las pérdidas de cortocircuito siempre deberían ser tomadas en cuenta.
- Sólo es importante modelar el comportamiento no lineal de la curva de magnetización en la zona de saturación y la presencia de histéresis, para el estudio de armónicos.
- Incluir las capacitancias en el modelo del transformador no es práctico y no puede ser justificado para frecuencias armónicas. Las capacitancias empiezan a tener un efecto significativo a partir de 10 kHz [41].

Usualmente la densidad de flujo magnético nominal para transformadores de gran tamaño es alta. Mientras mayor es la tensión de operación del transformador, frecuentemente este operará cerca de la zona de saturación y la corriente de excitación será mayor, aumentando también la componente armónica en la corriente de excitación.

#### 4.4 Filtros y baterías de condensadores

En *Power Factory* los elementos compensadores se modelan según sea el caso por una conexión de un capacitor, un reactor y una resistencia (esta última sólo para modelar las pérdidas en el cobre), como se muestra en la Figura 4.7.



**Figura 4.7** Representación de elementos compensadores en *Power Factory*

Si se quiere representar una conexión en paralelo entre un capacitor y un reactor, muchos elementos compensadores en paralelo deben ser conectados en la misma

barra. Este modelo también puede ser utilizado para representar combinaciones entre diferentes tipos de filtros, para el control de armónicos.

A diferencia del *Power Factory*, el *ATPDraw* no cuenta con modelos predefinidos para la representación de filtros; en consecuencia el usuario deberá calcular los parámetros correspondientes al tipo de filtro que desee utilizar (ver Anexo No. 1). Si bien esto permite mayor libertad en cuanto a la configuración de los elementos que componen el filtro (ya que el usuario no está limitado por los modelos existentes), la desventaja fundamental es el tiempo adicional que debe emplearse para construir estos modelos, suponiendo que se conocen los fundamentos teóricos necesarios para la elaboración de los mismos.

Para instalar un filtro pasivo en una determinada barra del sistema se debe realizar una serie de estudios que conlleven al diseño del mismo (flujos de carga, transitorios, armónicos). En la Tabla 4.4 se especifican los parámetros de entrada necesarios para representar elementos compensadores en el programa *Power Factory*.

**Tabla 4.4**

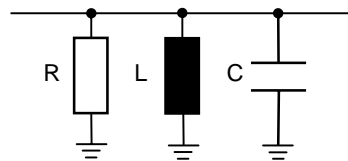
*Parámetros requeridos para la representación de filtros*

<i>Power Factory</i>	
<b>Parámetros de entrada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensión nominal de operación del elemento compensador</li> <li>• Tipo de conexión (Y-<math>\Delta</math>)</li> <li>• Potencia reactiva nominal</li> <li>• Orden de sintonía</li> <li>• # de pasos</li> </ul>
<b>Comentarios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede introducirse la dependencia en frecuencia de los elementos que componen el filtro.</li> <li>• La tensión nominal del elemento compensador debe ser mayor o igual a la tensión de la barra a la cual el mismo está conectado.</li> <li>• Al fijar el factor de potencia deseado, es posible controlar la potencia reactiva suministrada por el filtro.</li> </ul>

En el programa *ATPDraw* se utilizarán algunos de los parámetros antes mencionados para determinar en forma aproximada los elementos que componen el filtro pasivo requerido.

#### 4.5 Modelos de carga lineal

El modelo genérico para cargas lineales en el *Power Factory* puede definirse como una combinación entre carga constante, carga dinámica y una porción denominada como “especial”, cuya característica puede ser introducida por el usuario mediante un gráfico. Para estudios de flujo de carga debe especificarse la dependencia de la tensión y de la frecuencia de los parámetros P y Q de la carga (necesaria cuando se analicen cargas con impedancia constante).



**Figura 4.8 Modelo general de la carga en Power Factory**

Para calcular la dependencia de la frecuencia y la tensión se tomó como punto de partida la ecuación de la potencia compleja:

$$\bar{S} = \bar{U} \cdot \bar{I}^* \quad (4.1)$$

Al sustituir la corriente en la ecuación (4.1) según la ley de Ohm ( $\bar{U} = Z \cdot \bar{I}$ ), resulta:

$$\bar{S} = \frac{|U|^2}{Z^*} \quad (4.2)$$

Donde se observa que la potencia es directamente proporcional al cuadrado de la tensión e inversamente proporcional a la impedancia. En el caso de tener una impedancia óhmica  $Z = R$  (sólo parte real), la potencia activa será:

$$P = \frac{|U|^2}{R} \propto U^2 \quad (4.3)$$

Si suponemos que la resistencia es constante, la potencia activa será proporcional al cuadrado de la tensión. En *Power Factory* esta relación se expresa colocando el valor “2” para la dependencia de tensión.

De forma similar, para calcular la dependencia en frecuencia se supondrá ahora una carga puramente inductiva  $Z = j\omega L$ ; donde la ecuación resultante para la potencia reactiva es:

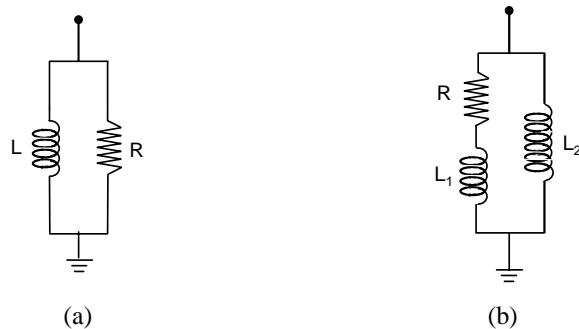
$$Q = \frac{|U|^2}{2\pi fL} \propto \frac{|U|^2}{f} \quad (4.4)$$

Luego, la dependencia de la frecuencia se expresará colocando un valor de “-1” para cargas inductivas.

En cuanto al análisis de armónicos, el programa *Power Factory* ofrece la posibilidad de modelar las cargas como impedancias o como fuentes de corriente (especificando la magnitud y ángulo de fase de cada armónico para cada fase).

El programa *ATPDraw* no cuenta con un modelo general para representar la carga lineal. El usuario tendrá que elegir, dependiendo de las características e información disponible sobre la misma, la manera más adecuada de representarla, esto dependerá del estudio que se desee llevar a cabo, para así de esta forma calcular los parámetros correspondientes.

El equivalente paralelo R-L (Figura 4.9 (a)) es generalmente suficiente para representar las características de elementos con impedancia constante en el estudio de flujo de carga a la frecuencia fundamental (este modelo también puede ser utilizado en el análisis de armónicos, aunque no está completamente recomendado [42]).



**Figura 4.9** Modelo de carga general en *ATPDraw* (a) R-L y (b) CIGRÉ

Para realizar análisis de armónicos existe una gran variedad de modelos de carga, sin que ninguno pueda considerarse definitivo. Entre los diferentes modelos existentes se eligió el modelo CIGRÉ (Figura 4.9 (b)); este modelo es dependiente de la frecuencia y está predefinido en el programa *ATPDraw*. El modelo CIGRÉ está constituido por una inductancia en paralelo con una rama compuesta de una resistencia en serie con una inductancia. Los parámetros requeridos por ambas herramientas para representar las cargas lineales se muestran en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5**

*Parámetros requeridos para la representación de cargas lineales*

	<i>Power Factory</i>	<i>ATPDraw</i>	
		<u>R-L</u>	<u>CIGRÉ</u>
<b>Parámetros de entrada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia Activa “P” (MW)</li> <li>• Potencia Reactiva “Q” (MVar)</li> <li>• % de carga capacitiva</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>R = \frac{V^2}{P}</math>, <math>L = \frac{V^2}{2\pi fQ}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensión nominal “V”</li> <li>• Potencia activa “P” (MW)</li> <li>• Potencia Reactiva “Q” (MVar)</li> </ul>
<b>Comentarios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La carga también puede ser especificada por su fp, corriente y potencia aparente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En las ecuaciones para calcular R y L se utilizará la tensión línea neutro y la potencia monofásica.</li> <li>• El programa <i>ATPDraw</i> calcula los parámetros del circuito equivalente del modelo CIGRÉ a partir de las siguientes ecuaciones:           <math display="block">R = \frac{V^2}{P}; L_1 = \frac{A * h * R}{2\pi f}; L_2 = \frac{h * R}{2\pi f \left( B \frac{Q}{P} - C \right)}</math>           Donde h es el orden de armónico y las constantes A, B y C tienen los siguientes valores: A=0,073; B=6,7; C=0,74.         </li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los valores de entrada para P y Q en <i>Power Factory</i> y <i>ATPDraw</i> (modelo CIGRÉ) serán monofásicos o trifásicos dependiendo del tipo de carga (monofásica o trifásica).</li> </ul>		

En general, un número considerable de cargas está localizado de forma tan cercana que son consideradas como un todo, debido a este carácter indefinido es difícil conocer el comportamiento de la carga en función de la frecuencia, por lo tanto no es tarea sencilla establecer un modelo basado en un análisis teórico.

#### **4.6 Modelos de cargas no lineales**

Existen numerosos tipos de cargas no lineales que se conectan a la red eléctrica en sus distintos niveles de tensión; en este sentido el programa *ATPDraw* no presenta ningún modelo predefinido para estos elementos, mientras que en la herramienta *Power Factory* se cuenta con modelos para rectificadores/inversores y compensadores de reactivos.

El modelo más común para definir cargas no lineales para realizar estudios de armónicos es mediante fuentes de corrientes armónicas, especificadas por su magnitud y espectro de fase. Esta opción está disponible en ambos programas, con la única diferencia que en el *ATPDraw* las fuentes solo permiten un máximo de once (11) frecuencias armónicas (si se quiere modelar un número mayor se tendrán que colocar varias fuentes en paralelo).

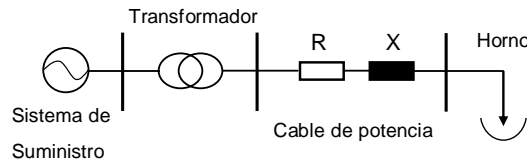
A continuación se describirán brevemente algunos modelos de cargas no lineales. En el caso del rectificador y el compensador solo se darán las características necesarias para su representación en la herramienta *Power Factory*, ya que estos componentes están predefinidos; mientras que en el *ATPDraw* se tendría que desarrollar un modelo para cada uno de estos elementos.

##### **4.6.1 Modelo de horno de arco [43]**

El horno de arco es una carga no lineal variante en el tiempo que puede afectar la calidad de potencia al producir distorsión armónica y desbalance de tensión en el

sistema. Para poder representar estos fenómenos se requiere un modelo que tome en cuenta las no linealidades, asimetrías y características de tensión, corriente y longitud del arco eléctrico, que vendrán determinadas por la posición de los electrodos.

Para representar un horno de arco existen distintos métodos; en general, estos pueden clasificarse en modelos en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. Los diferentes modelos existentes tienen diferentes niveles de complejidad en los cuales pueden o no tomarse en cuenta las no linealidades del circuito del horno de arco; siendo los elementos principales del circuito del horno de arco los que se muestran en la Figura 4.10.



**Figura 4.10** Diagrama de una instalación asociada a un horno de arco

El modelo sugerido en el presente trabajo (ya que ninguno de los programas utilizados cuenta con un modelo predefinido para hornos de arco) se basa en una aproximación lineal de la característica de tensión-corriente del arco en el dominio del tiempo. El mismo está descrito por las siguientes ecuaciones:

$$v = \begin{cases} R_1 i & 0 \leq i < i_1 \\ R_2 i + V_{ig} (1 - R_2 / R_1) & i_1 < i \leq i_2 \end{cases} \quad (4.5)$$

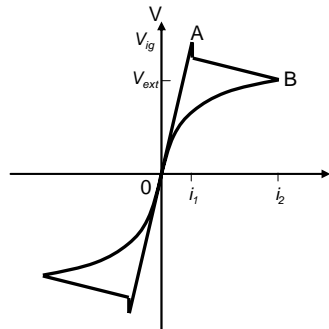
$$i_1 = \frac{V_{ig}}{R_1} \quad (4.6)$$

donde:

$$i_2 = \frac{V_{ext}}{R_2} - V_{ig} \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \quad (4.7)$$

La característica de tensión-corriente resultante se muestra en la Figura 4.11. La tensión de ignición ( $V_{ig}$ ) y la tensión de extinción ( $V_{ext}$ ) están determinadas por la

longitud del arco durante la operación del horno.  $R_1$  y  $R_2$  serán las pendientes entre las líneas 0A y AB, por lo tanto las ecuaciones anteriores representan el ciclo positivo de la operación del horno de arco.

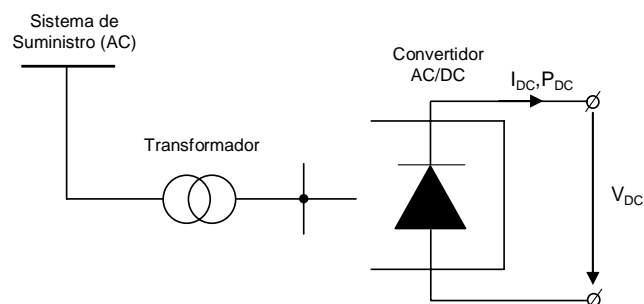


**Figura 4.11** Característica tensión-corriente del arco asociada al modelo propuesto

En el programa *ATPDraw* para modelar el comportamiento del horno de arco pueden utilizarse las subrutinas TACS (Transient Analysis of Control Systems) y MODELS (lenguaje de simulación) las cuales permiten el modelado de sistemas de control y componentes con características no lineales. Por otro lado, en la herramienta *Power Factory*, mediante el DPL (DIGSILENT Programming Language) será posible representar las características de operación del horno de arco.

#### 4.6.2 Modelo del Rectificador/Inversor

En *Power Factory* el circuito equivalente del rectificador/inversor para sistemas de transmisión en corriente continua (HVDC) se muestra en la Figura 4.12.



**Figura 4.12** Modelo del Rectificador/Inversor en Power Factory



Para representar de forma correcta el sistema asociado a los rectificadores o inversores, debe incluirse el transformador y la línea de transmisión DC. Los parámetros de entrada se muestran en la Tabla 4.6.

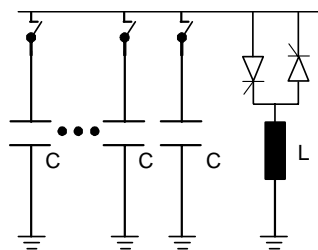
**Tabla 4.6**

*Parámetros requeridos para la representación de Rectificadores/Inversores en Power Factory*

<i>Power Factory</i>	
<b>Parámetros de entrada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Característica de control (I,V)</li> <li>• Ángulos de disparo mínimo y máximo</li> <li>• Ángulo de extinción</li> </ul>
<b>Comentarios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• También se pueden introducir datos correspondientes al transformador convertidor asociado al sistema.</li> <li>• La contribución de armónicos al sistema puede ser la de un rectificador ideal, o puede ser introducida por el usuario.</li> </ul>

### 4.6.3 Modelo del Compensador

En el programa *Power Factory* el circuito equivalente del compensador estático de reactivos (SVC<sup>15</sup>), es una combinación entre un banco de capacitores en derivación y un tiristor controlado por una reactancia. Los SVC son importantes para controlar la potencia o tensión en la barra a la cual están conectados (o en una barra remota).



**Figura 4.13 Modelo del Compensador (SVC) en Power Factory**

Los capacitores que conforman el banco pueden ser controlados individualmente, y su funcionamiento estará condicionado a los cambios en la demanda de potencia reactiva. Los datos necesarios para su representación se describen en la Tabla 4.7

<sup>15</sup> SVC: Static Var Compensator

**Tabla 4.7**

***Parámetros requeridos para la representación de Compensadores (SVC) en Power Factory***

<b><i>Power Factory</i></b>	
<b>Parámetros de entrada</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tensión nominal de operación del elemento compensador</li><li>• Potencia reactiva nominal</li><li>• Pérdidas en vacío.</li><li>• Modo de control.</li><li>• Tipo de modulación (Sinusoidal, Rectangular).</li><li>• Impedancia de cortocircuito y pérdidas en el cobre correspondientes al reactor en serie.</li></ul>
<b>Comentarios</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Los bancos de condensadores pueden conectarse en Y o <math>\Delta</math>.</li></ul>

Por último es importante mencionar que para estudios de desbalance muchas de las características suministradas en los modelos no serían necesarias (por ejemplo, la variación de la carga con respecto a la frecuencia ), así como también no siempre será necesario realizar una modelación trifásica del sistema para conducir estudios de armónicos. En consecuencia, la escogencia o no de determinado modelo quedará sujeta a las necesidades del usuario para cada situación en particular.

Es conveniente aclarar que modelos diferentes (o más simplificados) a los aquí mostrados podrían ser usados obteniendo resultados igualmente satisfactorios; sin embargo, los modelos presentados fueron escogidos por su versatilidad y con la intención de representar con el mayor grado de detalle todos los componentes de la red.

## **CAPÍTULO V**

### **LINEAMIENTOS PARA EL ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL DESBALANCE DE TENSIÓN Y LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LOS PROGRAMAS ATPDRAW Y POWER FACTORY**

El diseño, planificación y operación de un sistema de potencia requiere un análisis continuo y exhaustivo de todas sus características que permita evaluar su desempeño y confiabilidad. Por este motivo, las simulaciones son una herramienta muy efectiva y económica con la cual pueden comprobarse condiciones de operación del sistema, prevenir efectos indeseables y optimizar la conexión de equipos a la red eléctrica.

El análisis de armónicos se usa comúnmente para comprobar condiciones de resonancia y para predecir niveles de distorsión cuando se añade una carga no lineal productora de armónicos o un banco de capacitores. El procedimiento general tiene como primer paso desarrollar un modelo que pueda representar de manera precisa la respuesta en función de la frecuencia de un determinado sistema y luego agregar los elementos problemáticos. Este tipo de estudios también es efectuado para evaluar distintas alternativas a problemas encontrados por mediciones hechas en el sistema.

La simulación del Desbalance de Tensión se llevará a cabo cuando se sospeche la existencia de condiciones elevadas de desequilibrio en el sistema, bien sea por la presencia de grandes cargas monofásicas (tracción eléctrica, hornos de arco monofásicos, etc.), diferentes configuraciones en el tap de los transformadores o cuando en la red bajo estudio se presente alguna de las condiciones mencionadas en el Anexo No. 2. Para calcular el desbalance en una red eléctrica, se seguirá un procedimiento similar al necesario para calcular un flujo de carga, teniendo en cuenta que el modelo de los elementos presentes debe contener información para todas las fases.

A continuación se describirá el procedimiento general que debe seguirse para evaluar un sistema eléctrico desde el punto de vista de los fenómenos de Distorsión Armónica y Desbalance de Tensión.

### 5.1 Análisis y simulación de la Distorsión Armónica

La finalidad del estudio y simulación de armónicos es cuantificar la distorsión en las formas de onda de la tensión y la corriente producidas mayormente por diferentes cargas no lineales, determinar la existencia de condiciones peligrosas de resonancia y verificar el cumplimiento de los límites establecidos en varios puntos del sistema. Los resultados que se obtengan serán útiles para evaluar medidas correctivas y para la solución de problemas causados por armónicos.

En las siguientes secciones se describirán una serie de pasos necesarios para realizar un análisis de armónicos en un determinado sistema, con independencia de la herramienta computacional que vaya a ser utilizada.

#### 5.1.1 Selección del punto de común acoplamiento (PCC)

Los límites de distorsión armónica descritos por la IEEE 519-1991(recomendados en el presente trabajo) fueron hechos con el fin de ser aplicados en el PCC entre la compañía de suministro eléctrico y los consumidores; siendo el PCC el punto del sistema donde otros consumidores pueden ser servidos [19].

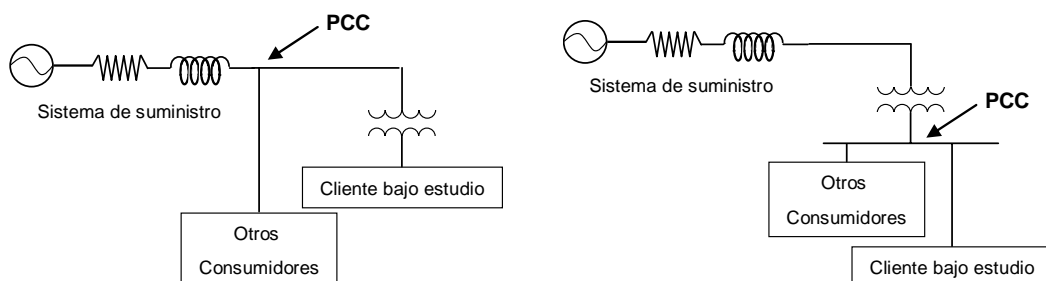


Figura 5.1 Selección del PCC [19]

Una vez definido el PCC, se tendrá una medida del sistema que quiera simularse y en consecuencia se conocerá la cantidad de elementos para los cuales debe recolectarse información con mayor detalle. En base a este punto se podrá determinar en que punto del sistema se calculará el equivalente Thevenin (para simulaciones en el programa *ATPDraw*) y se comprobarán los límites de distorsión armónica que hayan sido especificados.

### **5.1.2 Identificación de las fuentes generadoras de armónicos [19]**

El propósito de identificar cuales componentes del sistema son los más perjudiciales desde el punto de vista de armónicos es dar mayor importancia a la modelación y estudio de estos elementos, para así realizar una simulación precisa que corresponda al funcionamiento real del sistema, sin necesidad de describir todos los elementos de la red de manera detallada.

Existen dos métodos generales para encontrar la fuente de armónicos en los sistemas de potencia:

#### **1. Comparar las variaciones en el tiempo de la distorsión de tensión con las características específicas de determinadas cargas consideradas como fuentes de armónicos.**

Los cambios en los niveles de distorsión armónica pueden asociarse al comportamiento de determinados tipos de cargas en sistemas industriales que responden a ciertas características específicas de funcionamiento. En base a los patrones de distorsión del sistema, sería posible entonces identificar cual es la carga que ocasiona mayores problemas a la red eléctrica.

#### **2. Monitorear el flujo de corrientes armónicas**

El flujo natural de las corrientes armónicas será desde la carga no lineal (fuente de armónicos) hacia la fuente de generación del sistema. La fuente de armónicos

puede ser localizada realizando mediciones de corrientes armónicas a partir de una determinada subestación y hacia donde se supone se encuentra la fuente de armónicos. Es importante señalar que este método solo será efectivo si todos los bancos de condensadores son removidos del alimentador. Los condensadores causan resonancias locales que pueden ocultar donde se encuentra realmente la fuente generadora de armónicos.

En P519A [19] se especifican las formas de onda características más comunes para diferentes tipos de cargas no lineales presentes en el ámbito industrial; aunque el efecto combinado de muchas de estas cargas puede ser difícil de determinar sin la ayuda de mediciones.

### **5.1.3 Elección del tipo de modelación del sistema**

Para la mayoría de estudios armónicos una representación monofásica utilizando la componente de secuencia positiva será suficiente. En otros casos, tendrá que efectuarse un estudio que tome en cuenta todas las fases del sistema de potencia; con este tipo de análisis se busca evaluar la propagación de armónicos en cada una de las fases de la red. A continuación se mencionan algunas situaciones donde un estudio desbalanceado de armónicos debería llevarse a cabo:

- Si es de interés calcular el factor de interferencia telefónica (TIF), la influencia de los armónicos de corriente residual (secuencia cero) es importante. En este caso, el desbalance del sistema o de las fuentes armónicas debe ser representado para determinar de manera precisa las armónicas correspondientes.
- Cuando en el sistema en estudio se encuentren bancos de capacitores monofásicos, los modelos trifásicos balanceados no son suficientes para representar correctamente el sistema.
- En presencia de fuentes de generación de armónicos no característicos, fuentes desbalanceadas o monofásicas; se recomienda el análisis armónico para todas las secuencias (positiva, negativa y cero).

### 5.1.4 Representación de los componentes de la red eléctrica

Para llevar a cabo un estudio típico de armónicos (en el capítulo IV se recomiendan los modelos más idóneos para representar los diferentes componentes del sistema de potencia) se requieren los siguientes datos:

- a) Diagrama del sistema de potencia a ser estudiado (industrial, transmisión, etc). En este sentido es importante incluir todos los bancos de condensadores y modelar correctamente las líneas de larga longitud, ubicadas dentro del sistema en cuestión, o en las cercanías del PCC.
- b) Información de la data de los equipos, características de las líneas, pruebas realizadas a transformadores y motores.
- c) Niveles de cortocircuito trifásico y monofásico para diferentes condiciones del sistema, para así calcular el equivalente de Thevenin correspondiente, a partir de las impedancias de secuencia positiva y cero. El equivalente de Thevenin representará la región del sistema que no necesita ser modelada en detalle. También es necesario el espectro existente de armónicos del sistema de suministro (externo al sistema a ser modelado).
- d) El tipo de conexión, porcentaje de impedancia y kVA de todos los transformadores de potencia.
- e) El tipo de conexión, kVAr, y tensión de los bancos de capacitores y reactores en derivación.
- f) Características de placa, número de fases, pulsos, y conexiones de los convertidores, bien sean en base a diodos o tiristores, y, para estos últimos el máximo ángulo de retraso/disparo por fase, la carga y el ciclo de carga de cada unidad conectada al sistema en cuestión. De no poseer toda esta información, los kVA nominales del transformador asociado al convertidor pueden usarse para establecer el espectro de corriente armónica que será inyectado al sistema.
- g) Los límites permisibles para la distorsión armónica en el PCC.

### **5.1.5 Extensión del modelo del sistema [39]**

La principal dificultad a la hora de preparar un modelo para representar un determinado sistema es determinar la extensión del mismo; aunque muchas veces la extensión del modelo de la red estará limitada por los datos disponibles para representar los componentes. Las siguientes directrices serán de utilidad para representar de forma correcta el sistema a ser estudiado:

- Para sistemas de potencia industriales conectados a sistemas robustos o particulares generalmente es suficiente modelar dos transformaciones de tensión a partir de la carga. En estos casos usualmente la impedancia del transformador es dominante. También es común despreciar la capacitancia de las líneas aéreas de corta longitud, no así para el caso de los cables de potencia, en los cuales la capacitancia debería ser representada. Los circuitos ramales deberían modelarse si están presentes bancos de condensadores o motores.
- Para sistemas industriales alimentados a niveles de transmisión y subtransmisión es importante modelar al menos una porción de la red de HV/EHV si la instalación es servida por varias subestaciones. En el caso de estar servida solo por una subestación bastará solamente con obtener la impedancia equivalente en este punto para calcular el equivalente de Thevenin del sistema.

Otra manera de determinar la extensión del modelo de la red es mediante estudios de sensibilidad; por ejemplo, podría expandirse el modelo de la red progresivamente hasta que los resultados no varíen significativamente.

### **5.1.6 Elección de los parámetros de interés**

Al llevar a cabo un análisis de armónicos generalmente serán ejecutadas las siguientes tareas, teniendo en cuenta cuales sean los principales puntos de interés que quieran evaluarse:



- **Barrido en Frecuencia:** El barrido en frecuencia se usa para determinar la existencia de condiciones de resonancia; básicamente es una gráfica de la impedancia del sistema en función de la frecuencia (o su equivalente número de armónico) desde la fuente de corriente armónica. Los barridos en frecuencia se desarrollan para condiciones normales y anormales de operación, así como también para expansiones previstas a futuro.
- **Amplificación de corriente:** El gráfico de respuesta correspondiente a la Amplificación de Corriente posee la misma apariencia que un barrido en frecuencia, pero con un significado totalmente distinto. Estas gráficas muestran la atenuación/magnificación de la corriente en función de la frecuencia en una barra cualquiera del sistema, cuando se inyectan componentes armónicos en otro lugar de la red. Estos estudios ayudan en la identificación de interacciones negativas que puedan existir entre equipos presentes en las adyacencias del sistema eléctrico, cargas no lineales y equipos compensadores.
- **Distorsión Armónica de Corriente o Tensión:** Adicionalmente a los estudios anteriores, cálculos de distorsión pueden ser efectuados en diferentes partes del sistema, de manera de confirmar que los límites impuestos en el mismo se cumplan.

Antes de ejecutar cualquiera de las tareas anteriores es necesario realizar una corrida de flujo de carga del sistema. Dependiendo del tipo de estudio que se decida llevar a cabo se seleccionará la herramienta más adecuada para un determinado estudio.

### **5.1.7 Simulación de Distorsión Armónica**

Al ejecutarse todos los pasos anteriores se procederá a examinar los resultados obtenidos, y estos serán comparados, de ser posible, con mediciones efectuadas en el sistema. Dependiendo de este análisis, se realizarán de nuevo algunas de las tareas propuestas previamente, dependiendo si los datos del sistema o sólo los parámetros propios del análisis deben ser modificados.

Será necesario también comparar los valores correspondientes a los requerimientos de carga de los bancos de condensadores con el máximo permisible en el sistema. En IEEE Std 18-1992 [44] se encuentran definidos los siguientes límites de operación:

- La tensión de operación en estado estable debe ser menor al 110% de la tensión nominal.
- La tensión pico rms debe ser menor a 1.2 veces la tensión rms nominal.
- Los kVAr de operación deben ser menores a 135% de los kVAr nominales.
- La corriente debe ser menor al 180% de la corriente rms nominal.

En caso de que se excedan los límites antes establecidos los bancos de capacitores deben ser reubicados.

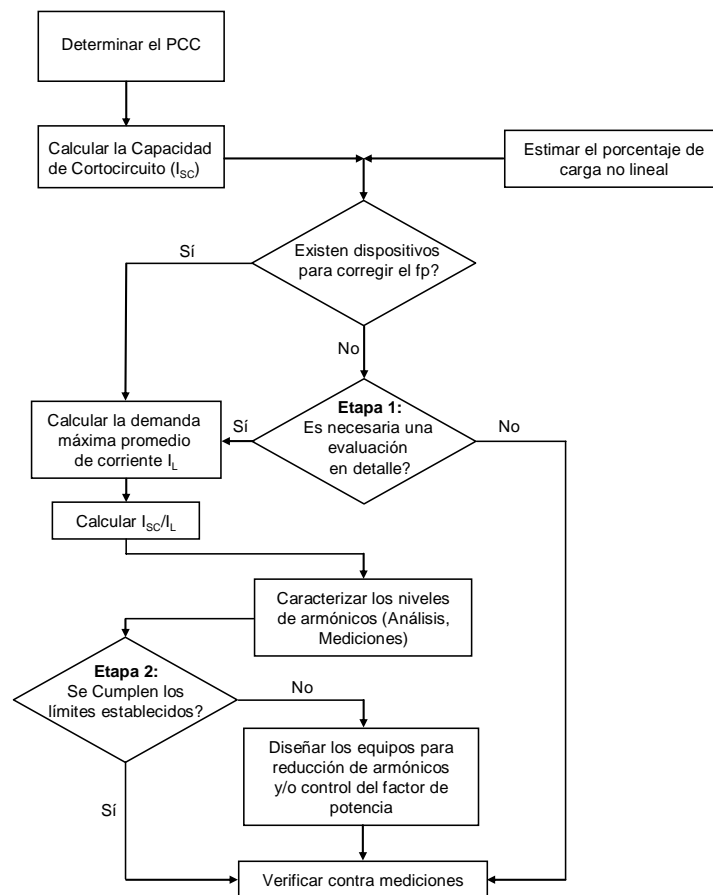
Por último se tendrá que añadir en el sistema, filtros u otro mecanismo de mitigación, sí los factores de distorsión armónica en el PCC exceden los límites impuestos por la compañía de suministro.

### **5.1.8 Procedimiento para aplicar los límites de Distorsión Armónica**

La aplicación final de la simulación de armónicos en un determinado sistema usualmente está ligada a la evaluación del cumplimiento de los límites de distorsión armónica. En la norma IEEE P519A se propone un procedimiento (ver diagrama de flujo en Figura 5.2) para la aplicación de los límites de distorsión armónica de tensión y corriente (descritos en la misma norma). Este procedimiento está diseñado para ser aplicado básicamente en sistemas industriales por las siguientes razones:

- La mayoría de los problemas asociados con armónicos provienen de cargas no lineales usadas en instalaciones industriales, estas incluyen rectificadores de gran tamaño para llevar a cabo procesos en corriente continua, hornos de inducción, hornos de arco y variadores de velocidad ajustable.

- En los sistemas industriales comúnmente se encuentran bancos de condensadores para la corrección del factor de potencia, ya que las cargas industriales más usuales (como los motores de inducción) poseen bajo factor de potencia.
- Por otra parte, como la mayoría de las cargas industriales están compuestas por motores de inducción y otras cargas que ofrecen poco amortiguamiento resistivo cuando se presentan condiciones de resonancia, la aplicación de capacitores para la corrección del factor de potencia puede magnificar estos problemas en mayor proporción que en sistemas de distribución donde hay una significativa cantidad de cargas resistivas.



**Figura 5.2 Procedimiento general para la realización de estudios de armónicos según IEEE 519 [19]**

Los pasos anteriores deben llevarse a cabo para la configuración base del sistema de potencia así como también para las topologías resultantes de las contingencias más comunes que puedan presentarse en el mismo. Cualquier expansión que se vaya a realizar o cualquier cambio en el nivel de cortocircuito también debería ser representado.

## **5.2 Análisis y simulación del Desbalance de Tensión**

Para llevar a cabo un estudio de desbalance de tensión deben seguirse básicamente los mismos pasos propuestos para el análisis y simulación de la distorsión armónica; las principales variaciones estarán vinculadas a la manera de representar los diferentes elementos componentes de la red eléctrica. Por esta razón en la siguiente sección solo se discutirán brevemente algunas características adicionales a las suministradas con anterioridad.

- **Selección del PCC:** Una vez seleccionado el PCC (en el caso de instalaciones industriales) el siguiente paso para realizar una corrida de flujo de carga es la preparación de un diagrama del sistema, en el cual se defina la configuración del sistema, la localización y tamaño de las cargas, generadores y equipos en general.
- **Identificación de las fuentes generadoras de Desbalance:** Tomando como base las posibles fuentes generadoras de desbalance (descritas en el anexo No. 2), siendo la principal causa de desbalance el desequilibrio de cargas en el sistema.
- **Elección del tipo de modelación del sistema:** A diferencia de lo mencionado en el caso de la distorsión armónica, para simular el desbalance de tensión siempre es necesario realizar una representación detallada de todas las fases de la red.
- **Requerimientos para representar los componentes de la red eléctrica:** Serán los mismos que para el estudio de la distorsión armónica, con excepción de la dependencia en frecuencia para los distintos elementos.
- **Extensión del modelo del sistema:** Dependiendo del alcance del análisis que se este llevando a cabo se fijarán los límites del modelo de la red.

- **Elección de los parámetros de interés:** En cuanto a los parámetros de interés, la tensión y ángulo de fase de las barras involucradas en la simulación es la principal incógnita.
- **Simulación del desbalance de tensión:** Para sistemas existentes, la configuración de la red, carga, y generación se escogen frecuentemente para que coincidan con condiciones normales de operación, de tal forma que los resultados puedan ser comparados con valores conocidos que ayuden a validar el modelo escogido. El caso base representa al sistema en sus condiciones normales de operación.

## CAPÍTULO VI

### **ESCENARIOS DE ESTUDIO: APLICACIONES A SISTEMAS EQUIVALENTES PRESENTES EN LA RED DE CVG EDELCA**

En este capítulo se comparan los resultados obtenidos de las simulaciones llevadas a cabo con los programas *Power Factory* de DIGSILENT y *ATPDraw* en relación a los fenómenos de desbalance de tensión y distorsión armónica. Estas simulaciones fueron realizadas en escenarios equivalentes a los existentes en el sistema de CVG EDELCA.

Los elementos que conforman los sistemas en estudio (líneas de transmisión, transformadores, autotransformadores, bancos de condensadores, etc) fueron modelados utilizando los datos correspondientes a sus valores reales; las variaciones principales con respecto a los sistemas existentes correspondieron fundamentalmente al valor y composición de las cargas (lineales y no lineales), que fueron ajustados para cubrir las necesidades del presente estudio.

Estos escenarios fueron seleccionados con la finalidad de abarcar la mayor cantidad de niveles de tensión, las distintas partes componentes del sistema eléctrico (centrales generadoras, sistemas de transmisión y puntos de suministro) y tomando en cuenta las posibles fuentes de distorsión armónica y desbalance de tensión conectadas al sistema de potencia de CVG EDELCA, tales como hornos de arco, motores de inducción, transformadores, cargas desequilibradas, etc.

De esta manera, los estudios presentados a continuación evalúan el impacto de diferentes condiciones del sistema sobre el nivel de armónicos y sobre el desbalance de tensión.

Entre las condiciones más importantes a ser tomadas en cuenta, se tienen:

- El uso de capacitores para corrección del factor de potencia, reactores y elementos compensadores ubicados en el sistema de potencia y dentro de las instalaciones del cliente.
- Conexión y desconexión de filtros, para comprobar su efecto sobre la resonancia serie y paralelo y sobre los niveles permisibles de distorsión.
- Simulaciones para diferentes niveles y modelos de carga, para así observar el efecto de estas configuraciones sobre la respuesta del sistema.
- Efecto de grandes bloques de cargas productoras de armónicos sobre los niveles de distorsión permisibles.
- Aplicación de los límites sugeridos por las diferentes normas.
- Efecto de la transposición de líneas y cargas en desbalance sobre el desequilibrio de tensión; y a su vez el efecto de este fenómeno sobre los motores de inducción.

Es importante señalar que mediante la realización de las siguientes simulaciones, más que comprobar las condiciones de operación de los sistemas, se persigue contar con bases sólidas para hacer una comparación en detalle entre las herramientas en cuestión, de manera que la recomendación que se haga acerca de cual es la más adecuada para la evaluación de cada uno de los fenómenos estudiados, tenga como base la metodología que debe emplearse en estudios reales de distorsión armónica y desbalance de tensión.

Los resultados obtenidos a partir del procesamiento y simulación de los diferentes casos de estudio son presentados en el Anexo No. 4 en una serie de gráficos y tablas en los cuales está contenida toda la información de interés para el proyecto. En las tablas se reportan las tensiones y ángulos en los diferentes puntos del sistema para ambas herramientas, índices de desbalance y el porcentaje total de distorsión armónica (THD). Los gráficos, por otra parte, serán de 4 tipos diferentes:

- Un primer gráfico en el que se representa la impedancia armónica, a partir del cual se puede observar para que frecuencias se tienen condiciones de resonancia en la red.

- Los gráficos de barra, donde se representa el porcentaje de la magnitud armónica (respecto al valor fundamental para la tensión y al valor máximo para la corriente) en función del orden del armónico. En este tipo de gráfico se puede apreciar rápidamente las principales componentes armónicas que están presentes en las diferentes tensiones y corrientes medidas del sistema.
- Comportamiento de los motores que fueron utilizados en la simulación (torque, deslizamiento, velocidad) y gráficas de respuesta del horno de arco simulado.
- Por último, un perfil de tensión para visualizar el desbalance en el sistema y las barras para las cuales se sobrepasan los límites establecidos.

Todos los resultados fueron obtenidos para ambas herramientas y en su presentación está explícita la comparación entre los programas. Los casos reseñados fueron hechos con el fin de observar si el comportamiento de alguna de las herramientas era irregular o no se correspondía con lo expresado por su contraparte, en la búsqueda de hallar diferencias significativas en los resultados que permitieran escoger una herramienta o modelo en particular.

A continuación se muestra en detalle la descripción de los tres escenarios de estudio, así como también el análisis de los resultados obtenidos a partir de los diferentes casos simulados. En los dos primeros escenarios, el análisis se centra en el estudio de la distorsión armónica, mientras que en el último se evaluará el desbalance de tensión.

### **6.1 Sistema de Transmisión Sur**

Este sistema fue diseñado para satisfacer los requerimientos de energía eléctrica de los desarrollos mineros ubicados hacia el sur del estado Bolívar, suplir la demanda a los puntos de consumo ubicados en el trayecto del sistema, y establecer la fuente de suministro necesaria para atender a las poblaciones fronterizas.

El sistema se extiende en dirección Sur a través de una línea de transmisión a 230 kV que conecta la subestación Las Claritas con la subestación Santa Elena de Uairén,



construida al sur de esta población. Desde esta última parte una línea a 230 kV que alcanza el punto fronterizo definido para la interconexión con la línea proveniente de la ciudad de Boa Vista en Brasil (ver Anexo No. 4).

### **6.1.1 Características del sistema**

El Sistema de Transmisión Sur es radial y está compuesto por más de 700 km en líneas de transmisión, con tensiones que van desde 400 kV a 13,8 kV. Alimenta cargas en el territorio venezolano en la subestación El Callao II a 400/115 kV y Santa Elena a 230/34,5 kV y en el territorio brasileño a través de la subestación Boa Vista a 230/69/13,8 kV. Los componentes que conforman este sistema son:

- Dos (2) autotransformadores (AT) de 150 MVA, 400/230 kV, conectados en la subestación Las Claritas.
- Dos (2) transformadores de 30 MVA, 230/34,5 kV, conectados en la subestación Santa Elena.
- Un AT de 120 MVA, 400/115 kV, conectado en la subestación Callao II.
- Dos (2) reactores de 50 MVAR en Las Claritas, dos reactores de 25 MVAR en Boa Vista y dos reactores de 25 MVAR en Santa Elena.
- Dos (2) autotransformadores (AT) de 100 MVA 230/69/13,8 kV en la subestación Boa Vista.
- Cuatro (4) bancos de condensadores a 13,8 kV y potencia nominal de 3,6 MVAR c/u ubicados en la subestación Boa Vista.

### **6.1.2 Criterios asumidos para la simulación**

Se fijó el factor de potencia en 0,8 para todas las cargas y estas fueron representadas de manera trifásica y balanceada entre sus fases; los modelos utilizados para el análisis se basan en lo expuesto en el capítulo IV. Se simularon los siguientes casos:

### **Caso 1: Línea Santa Elena – Boa Vista en vacío**

Se escogió este evento en particular para visualizar el efecto de líneas aisladas sobre las condiciones de resonancia del sistema y comprobar las condiciones de la red en el punto de interconexión entre los dos sistemas.

### **Caso 2: Carga en Boa Vista a 230 kV**

En este caso se perseguía comparar la respuesta del sistema cuando no se modelan en detalle todos los componentes necesarios para una simulación precisa a nivel de armónicos, como son los bancos de condensadores.

### **Caso 3: Bancos de condensadores conectados en Boa Vista**

Con la representación completa del sistema, se observa el efecto de los bancos de condensadores para corrección del factor de potencia y la carga a 69 kV en Boa Vista sobre la respuesta de la red en estudio.

Sólo para este último caso se realizaron las siguientes simulaciones:

- Se representaron las cargas para 50 y 100% de su valor nominal.
- Se utilizaron diferentes modelos de líneas de transmisión (parámetros concentrados y distribuidos).

Como se asumió que las cargas presentes son balanceadas, y ya que las líneas de transmisión son transpuestas, un análisis monofásico será suficiente para determinar los niveles de distorsión armónica en este escenario.

Las simulaciones fueron efectuadas con ambas herramientas; el análisis y comparación de los resultados obtenidos se muestra a continuación.

### 6.1.3 Análisis y comparación de resultados

De las simulaciones y estudios efectuados para el Sistema de Transmisión Sur (ver Anexo No. 4) se tiene que:

- Los resultados del flujo de carga obtenido con el programa *Power Factory* y el *ATPDraw* son prácticamente los mismos. Condición indispensable para realizar una comparación realista en los estudios posteriores.
- En la evaluación con el programa *ATPDraw* se observa que la forma de la curva (para todos los casos estudiados) es menos distorsionada; esto se debe a que en esta herramienta sólo se está modelando un equivalente del sistema, mientras que en *Power Factory* están representadas todas las barras de la red.

Para comprobar la veracidad de la afirmación anterior se simuló en *Power Factory* un equivalente del sistema (similar al representado en *ATPDraw*). Al comparar los resultados se observó que las formas de onda eran prácticamente iguales, manteniéndose las diferencias en cuanto a las magnitudes de los picos de resonancia.

- El modelo CIGRÉ del *ATPDraw* (al igual que la respuesta en *Power Factory*) brinda resultados más conservadores (picos de resonancia más elevados) que los alcanzados con el modelo R-L.
- El modelo de cargas para análisis armónico del *Power Factory* se asemeja más al modelo CIGRÉ del *ATPDraw* que al equivalente R-L.
- La forma de la gráfica A.4.14 sugiere que las líneas de transmisión de gran longitud deben simularse por su modelo de parámetros distribuidos, ya que el modelo de parámetros concentrados no representa de manera precisa los efectos sobre los armónicos de orden elevado (importante para estudios de interferencia sistemas de comunicación y armónicos de alta frecuencia).
- Debido a la coincidencia en la frecuencia armónica para los cuales se dan condiciones de resonancia, se infiere que la extensión del modelo representada en el programa *ATPDraw* es lo suficientemente amplia.

- Los programas muestran comportamientos similares para todo el rango de frecuencias estudiado (0-3 kHz).
- Las diferencias existentes entre los resultados para los distintos modelos de carga disponibles en *ATPDraw* son menores cuando se estudia la barra más cercana al punto de generación.
- En los casos 2 y 3 se observa como la diferencia entre los modelos de carga R-L y CIGRE del *ATPDraw* es mayor con respecto al caso 1. Esto se debe a que el punto de evaluación para el caso 1 era una línea en vacío (sin carga conectada). Por este motivo, las variaciones que los distintos modelos aportan a la respuesta del sistema estarán atenuadas en este punto con respecto a los casos 2 y 3.

#### **6.1.4 Conclusiones y comentarios**

- La elección del modelo para las cargas pasivas es de suma importancia en estudios de armónicos, ya que se pueden obtener resultados muy pesimistas u optimistas que no necesariamente corresponden a la realidad del sistema. Por lo tanto, la elección del modelo de carga siempre debe hacerse en función de las características conocidas de la misma.
- Para estudios en los cuales no se tenga certeza sobre la fuente generadora de armónicos se sugiere el uso del *ATPDraw*, ya que los estudios de penetración armónica (Amplificación de corriente) son mucho más sencillos y flexibles de llevar a cabo que para el *Power Factory*.
- La porción resistiva de la carga proporciona amortiguamiento que afecta a la impedancia del sistema en las frecuencias resonantes. La carga resistiva reduce la amplificación de los niveles armónicos cerca de las frecuencias de resonancia paralelo.

## **6.2 Sistema Regional B**

Para satisfacer las necesidades de energía de la zona de Guayana, CVG EDELCA posee dos redes de suministro, asociadas a las subestaciones Guayana A y Guayana B,

que proporcionan energía al complejo industrial de Guayana. El Sistema del Bajo Caroní a 400 kV interconecta los patios de Guri A, Guri B, Macagua II y Caruachi con la subestación Guayana B (ver Anexo No. 4).

En la subestación Guayana B existe un sistema de transmisión a 115 kV, con el cual se satisfacen los requerimientos de las grandes y medianas industrias del Parcelamiento Industrial Matanzas, localizado en Ciudad Guayana, Estado Bolívar. Este sistema se conoce como Sistema Regional B.

Para llevar a cabo las simulaciones se seleccionaron las diferentes secciones de barra de la subestación Guayana B a 115 kV, debido a que estas son el punto de común acoplamiento (PCC) de gran parte de la industria pesada metalúrgica y del aluminio, tal y como puede observarse en el diagrama unificar anexo correspondiente al Sistema Regional B.

### **6.2.1 Características del sistema**

En la sección de Barra I están conectadas las subestaciones R<sub>7</sub> y R<sub>8</sub> de SIDOR, estas alimentan a su vez una carga compuesta totalmente por hornos de arco con una demanda de aproximadamente 750 MW, los cuales son fuentes generadoras de gran cantidad de corrientes armónicas.

La sección de Barra II alimenta también parte de la carga de SIDOR y a una subestación de VENALUM, estas cargas de aproximadamente 700 MW en total está compuesta por motores y puentes rectificadores respectivamente, las cuales son fuentes generadoras de corrientes armónicas.

Las secciones de Barra III y IV están acopladas eléctricamente, por lo que es indiferente medir en cualquiera de ellas. Estas cargas presentan una composición muy heterogénea, donde prevalecen los hornos de arco, motores de inducción y puentes rectificadores. Los componentes que conforman este sistema son:

- Siete (7) autotransformadores (AT) de 700 MVA 400/115/20 kV (Y-Y- $\Delta$ ) conectados en la subestación Guayana B 400 kV.
- Dos (2) transformadores de 30 MVA 115/34.5 kV conectados en las secciones de Barra I y Barra II para la operación de los hornos de arco.
- Secciones de barra a 115 kV desacopladas a excepción de la III y IV.
- Filtro de 120 Hz y 150 MVAr conectado a la sección de Barra I 115 kV.
- Filtro de 180 Hz de 150 MVAr y un banco de condensadores de 160 MVAr conectados a la sección de Barra II 115 kV.

### **6.2.2 Criterios asumidos para la simulación**

Al igual que en el caso anterior se fijó el factor de potencia en 0,8 para todas las cargas pasivas y estas fueron representadas de manera trifásica y balanceada entre sus fases. La contribución de armónicos de las cargas no lineales se representó mediante el modelo de fuentes de corriente a partir de mediciones efectuadas por CVG EDELCA, en el año 2000 [45].

El análisis en el dominio de la frecuencia será el utilizado para llevar a cabo las simulaciones. Si bien la modelación en el dominio del tiempo ofrece más detalles sobre el comportamiento de las fuentes generadoras de armónicos, los límites de distorsión están desarrollados asumiendo que los niveles de inyección se mantienen relativamente constantes.

Para el análisis de este escenario de estudio fueron modelados dos hornos de arco (ver Anexo No. 4), cuya respuesta en el dominio del tiempo fue convertida al dominio de la frecuencia haciendo uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), de manera de conocer su contribución en el dominio armónico. Se simularon los siguientes casos:

### **Caso 1: Cargas no lineales modeladas como impedancias**

De manera de observar el efecto del tipo de modelación utilizada para representar las cargas no lineales sobre los niveles de resonancia y de distorsión armónica, se usará un modelo convencional para las cargas lineales.

### **Caso 2: Cargas no lineales modeladas como fuentes de corriente**

Los grandes bloques de carga presentes se modelarán como fuentes de corriente armónicas. De esta forma se observará el efecto real de las cargas no lineales sobre los niveles permisibles de distorsión.

Para ambos casos se realizaron las simulaciones con filtros conectados al sistema y sin los mismos, de manera de establecer las diferencias en la respuesta y verificar la utilidad de estos equipos como mecanismos de mitigación de armónicos.

### **6.2.3 Análisis y comparación de resultados**

De las simulaciones y estudios efectuados para el Sistema Regional B (ver Anexo No.4) se tiene que:

- La característica de tensión-corriente del horno de arco simulado se corresponde con la descrita en el capítulo IV (Figura 4.11).
- El filtro sintonizado para una determinada frecuencia proporciona una máxima atenuación para una armónica individual funcionando de manera similar en ambas herramientas; aunque es más sencillo e inmediato de representar en el programa *Power Factory*.
- Las gráficas correspondientes al barrido en frecuencia muestran características similares. Es importante señalar que para este escenario de estudio las cargas

pasivas fueron representadas utilizando el modelo CIGRÉ, disponible en la herramienta *ATPDraw*.

- Para representar líneas de transmisión de muy corta longitud, el programa *ATPDraw* necesita un  $\Delta t$  muy pequeño, lo cual alarga el tiempo requerido para la simulación.
- Al igual que en el escenario anterior, la respuesta de las dos herramientas es bastante similar en todo el rango de armónicos estudiados.

#### **6.2.4 Conclusiones y comentarios**

- La representación de componentes no predefinidos (p.ej. Hornos de arco) es más sencilla en el *ATPDraw*. Si bien la herramienta *Power Factory* cuenta con una mayor gama de modelos, no presenta mayor flexibilidad para realizar cambios o adaptaciones en los mismos.
- Los filtros se presentan como una de las mejores alternativas para mitigar la polución armónica, pero antes de proceder a instalarlos se deben realizar una gran cantidad de estudios para determinar cuál es la mejor configuración y qué problemas adicionales introducen en el sistema eléctrico.
- Los bancos de capacitores utilizados para el control de la tensión y el mejoramiento del factor de potencia, así como los cables aislados, son los componentes principales que afectan las características de respuesta a la frecuencia de los sistemas eléctricos. La conexión de los capacitores puede dar origen a condiciones de resonancia (serie y paralelo) que pueden magnificar los niveles de armónicos y producir sobretensiones importantes.
- La forma de representación de las cargas (en especial las no lineales) puede llevar a resultados que no se corresponden con la realidad del sistema, en especial cuando constituyen las principales fuentes de distorsión. La exactitud de los resultados obtenidos estará relacionada directamente con una representación matemática adecuada de cada uno de sus componentes.



### **6.3 Subestación “Jose 115kV”**

La subestación Jose 400/115 kV se encuentra interconectada al Sistema Eléctrico Nacional a través de dos líneas a 400 kV, una proveniente de la subestación San Gerónimo, y otra proveniente de la subestación Barbacoa II; de la cual también se encuentra conectada la subestación El Tigre, siendo el esquema definitivo el mostrado en el Anexo No.4.

Desde la subestación “Jose” se alimentan en el nivel de 115 kV las cargas asociadas al Complejo Petrolero Petroquímico José Antonio Anzoátegui, que representa el sistema de transmisión más importante para el suministro de cargas eléctricas correspondientes al sector petrolero.

#### **6.3.1 Características del sistema**

Las líneas que interconectan al Complejo Petrolero Petroquímico José Antonio Anzoátegui con el Sistema Eléctrico Nacional son San Gerónimo de 165 km y Barbacoa II de 35 km. Entre las empresas asociadas a esta subestación se encuentran Petrozuata, Operadora Cerro Negro (OCN), Pequiven, Ameriven y SINCOR. Todas estas empresas representan una composición muy heterogénea respecto de sus cargas, donde prevalecen los motores de inducción y puentes rectificadores. Los componentes que conforman este sistema son:

- Tres (3) autotransformadores (AT) de 300 MVA 400/115 kV conectados en la subestación Jose 400 kV.
- Un (1) transformador de 30 MVA 115/34,5 kV conectado en la barra 2 a 115 kV.
- Un (1) transformador de 5 MVA 34,5/4,16 kV conectado a la barra 3 para la operación de motores de inducción.
- Dos (2) bancos de condensadores a 115 kV y potencia nominal de 100 MVAR c/u ubicados en Jose 115 kV.

### **6.3.2 Criterios asumidos para la simulación**

Las cargas fueron representadas de manera trifásica y desbalanceada entre sus fases (caso 2), donde los modelos utilizados para el análisis se basan en lo expuesto en el capítulo IV. Los siguientes casos fueron simulados:

#### **Caso 1: Líneas sin transposición**

En este caso se analiza el efecto del desequilibrio introducido por las líneas San Gerónimo “A” y Barbacoa II a 400 kV, y las líneas (de corta longitud) que parten desde la subestación “Jose 115 kV” hacia las diferentes empresas asociadas al complejo. Las tensiones resultantes se muestran en la Tabla A.4.5.

#### **Caso 2: Cargas desbalanceadas**

En este caso se estudia solamente el efecto del desequilibrio introducido por las cargas, con el fin de observar la atenuación o amplificación en los valores de desbalance para los diferentes niveles de tensión presentes en el sistema.

Es importante señalar que la presencia de motores de inducción en el sistema permitirá observar los efectos que las condiciones de desbalance de tensión establecidas tienen sobre los mismos. Con base a toda esta información se obtuvieron los valores para las tensiones y ángulos de fase resultantes en las barras de interés (ver Tabla A.4.4).

### **6.3.3 Análisis y comparación de resultados**

De las simulaciones y estudios efectuados para la Subestación Jose 115 kV (ver Anexo No.4) se tiene que:

- Los resultados del flujo de cargas obtenido con el programa *Power Factory* y el modelo simulado en *ATPDraw* son prácticamente los mismos en todas las fases.
- Con respecto a los resultados obtenidos de la simulación del arranque de motores de inducción, ambos programas muestran características parecidas, con pequeñas diferencias en cuanto al comportamiento transitorio.
- Es más sencillo observar el efecto del desbalance sobre los motores de inducción en la herramienta *Power Factory*.
- Para calcular el Desbalance de Tensión según la definición recomendada (componentes simétricas) es necesario realizar un paso adicional en el programa *ATPDraw* para convertir los valores por fase a valores de secuencia.

#### **6.3.4 Conclusiones y Comentarios**

- La representación de motores de inducción en *Power Factory* es más inmediata que en el programa *ATPDraw*, ya que en este último programa se requiere transformar los valores propios del motor al dominio p-q-0.
- De los resultados obtenidos en los casos 1 y 2 se deduce que el desbalance introducido por el desequilibrio de las líneas de transmisión es de inferior magnitud al producido por el desequilibrio de cargas.
- Se comprueba que el desbalance de corriente en un motor de inducción es de 6 a 10 veces el desbalance de tensión presente en los terminales del mismo.
- La diferencia entre los valores obtenidos a partir de los diferentes índices de desbalance de tensión es mayor a medida que el desbalance aumenta (Tabla A.4.5).
- El desbalance de tensión producido a niveles de transmisión se amplifica cuando pasa a niveles menores de tensión.

## CONCLUSIONES

La intención que motivó este trabajo, fue comparar dos herramientas de análisis para sistemas eléctricos en lo que al desbalance de tensión y distorsión armónica se refiere, contemplando gran parte de las características particulares presentes en los sistemas de la red de CVG EDELCA. Basándose en esto, en este trabajo se presentó la metodología, criterio de elección para los modelos presentes en la red y guías para elegir que programa se ajusta mejor para el análisis de cada uno de los fenómenos en estudio. Además se sugirieron diferentes indicadores por los cuales guiarse para la normalización y control del desbalance de tensión y la distorsión armónica.

En este sentido las conclusiones a presentar son de índole general, encontrándose el detalle de ellas en capítulos precedentes.

- La ventaja más importante del programa *Power Factory* sobre el *ATPDraw* para el estudio del desbalance de tensión y la distorsión armónica, es sin lugar a dudas que el sistema puede modelarse de forma completa; si bien hay que tomar en cuenta el esfuerzo y tiempo requeridos para obtener un equivalente preciso que se ajuste a las necesidades de cada fenómeno.
- Por otro lado, el problema principal al utilizar la herramienta *Power Factory* es que el caso base disponible no cuenta con una representación completa de todas las fases (ya que no es práctica para los estudios que normalmente se llevan a cabo con este programa) y tampoco posee mayor información en lo a que dependencia de frecuencia se refiere. Por lo tanto, adecuar el sistema para realizar estudios de desbalance de tensión y distorsión armónica puede ser una tarea bastante compleja; por este motivo, muchas veces sólo se modelará en detalle aquellas partes del sistema que afecten en gran medida la respuesta del mismo.
- El programa *ATPDraw* es más versátil y sencillo de utilizar en instalaciones/escenarios donde sea necesario desarrollar modelos para diferentes elementos componentes de la red.

- Las mediciones efectuadas en el sistema deben ser utilizadas conjuntamente con las simulaciones para caracterizar la contribución de las cargas no lineales, luego, las simulaciones serán realizadas para determinar mecanismos de mitigación, como por ejemplo filtros. De ninguna manera deben verse como medidas excluyentes.
- La elección del modelo de carga a utilizar dependerá de que tan bien se conozcan las características de la misma. Ya que no hay modelos universalmente aceptados para modelar equivalentes de cargas para el análisis armónico, la necesidad de mediciones junto con información detallada de la red bajo estudio es vital para el entendimiento y establecimiento de modelos realistas.
- De manera general, dependiendo de cual sea la fuente generadora de armónicos y las características o datos disponibles de los componentes del sistema, se realizará la elección de la herramienta más adecuada según el caso. Siendo el factor más crítico y decisivo para la confiabilidad en los resultados de una simulación es la precisión (exactitud) de los modelos utilizados.

## RECOMENDACIONES

En base a las simulaciones efectuadas en los diferentes escenarios de estudio y a la revisión de las diferentes normas que tratan sobre desbalance de tensión y distorsión armónica se sugiere lo siguiente:

- Ya que los límites suministrados para desbalance de tensión se tomaron en base a valores extraídos de referencias (con el fin de lograr la máxima calidad en el servicio de energía posible), el efecto sobre los costos que tendría la implementación de los mismos debería ser estudiado de manera que los objetivos trazados sean más realistas.
- En los reportes de mediciones efectuadas por CVG EDELCA deberían incluirse (además de la corriente máxima, mínima y promedio) los valores con 95% de probabilidad de no ser excedidos para las corrientes de interés. Además, las mediciones efectuadas en el sistema deberían ser realizadas con un instrumento que no solo reporte información sobre la magnitud del armónico, si no también el ángulo de fase.
- Deben compararse valores de mediciones actuales con los resultados obtenidos en las herramientas, de manera de validar por completo los modelos utilizados.
- Adecuar los modelos utilizados en el caso base del Sistema Interconectado Nacional representado en *Power Factory* (al menos en lo referente a la red de CVG EDELCA) para llevar a cabo no solo estudios de flujo de carga. De esta manera, las primeras aproximaciones a problemas existentes en el sistema (armónicos, desbalances, etc.) se obtendrían con un tiempo de respuesta casi inmediato.
- Comparar los datos presentados contra las actualizaciones más recientes de las normas utilizadas.

- Comparar los límites y objetivos presentes en las normativas sugeridas contra los exigidos por el ente regulador nacional (MEP<sup>16</sup>), ya que al fin y al cabo son estos los que deben cumplirse.
- Para el estudio de la Distorsión Armónica se recomienda la simulación en *Power Factory* por encima del programa *ATPDraw* a nivel del sistema de transmisión (para simulaciones en el dominio de la frecuencia). Considerando que los resultados obtenidos para ambas herramientas son prácticamente iguales y ya que el Sistema Interconectado Nacional (SIN) se encuentra representado en *Power Factory*, al utilizar este programa se ahorrará una cantidad importante de tiempo en lo referente a la modelación de los elementos de la red.
- Para simulaciones en el dominio del tiempo, los modelos utilizados para representar al SIN en *Power Factory* tendrían que ser adecuados para tal situación. En tales casos el programa *ATPDraw* sería una alternativa más conveniente.
- Para evaluaciones de armónicos en sistemas industriales (dentro de las instalaciones del cliente) deben tomarse en cuenta una mayor cantidad de detalles referente a los modelos de los componentes presentes en dicho sistema. En este tipo de análisis puede utilizarse cualquiera de las dos herramientas, teniendo en cuenta que en el programa *ATPDraw* es más sencillo el desarrollo de modelos no implementados y que además se encuentra más orientado a simulaciones en el dominio del tiempo.
- En cuanto al análisis del Desbalance de Tensión, el programa *Power Factory* cuenta con más opciones en lo que a estudios de flujo de carga se refiere; por ejemplo, posee opciones tales como el Flujo de Carga Óptimo y el Control automático de tensión y/o potencia en las barras, que lo hacen más adecuado para este tipo de tareas. Además, es posible trabajar con magnitudes de secuencia, lo cual es consistente con el formato recomendado para cuantificar el desbalance de tensión por la norma elegida para regular dicho fenómeno.

---

<sup>16</sup> MEP: Ministerio de Energía y Petróleo

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chang, Gary W., Ribeiro Paulo F. **“Harmonics Theory”**. IEEE Power Engineering Society Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Working Group Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee, 1998.
  
- [2] Martín José Ramón, Romero Zulay, Rodríguez Gonzalo. **Estudio del Fenómeno de la Distorsión Armónica en los Sistemas de Potencia**. CVG Electrificación del Caroní, C.A. EDELCA. División de Ingeniería de Sistemas Eléctricos, 1999.
  
- [3] Halpin S. Mark, Ribeiro Paulo F, Dai J.J, **“Frequency-Domain Harmonic Analysis Methods”**. IEEE Power Engineering Society Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Working Group Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee, 1998.
  
- [4] Arrillaga J, Medina A, Lisboa M, Vavia M, **“The Harmonic Domain. A frame of reference for Power System Harmonic Analysis”**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, February 1995.
  
- [5] Hatziadoniu C.J, **“Time Domain Methods for the Calculation of Harmonic Propagation and Distortion”**. IEEE Power Engineering Society Task Force on Harmonics Modelling and Simulation. Working Group Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee, 1998.
  
- [6] Driesen Johan, Van Craenenbroeck Thierry. **Voltage Disturbances-Introduction to Unbalance**. Power Quality Application Guide, Copper Development Association, 2002.



- [7] IEC 61000-4-27:2000. **Testing and measurements techniques – Unbalance, immunity test**, 2000. p.33.
- [8] Robert A, Marquet J. **Assessing Voltage Quality in relation to Harmonics, Flicker and Unbalance**. WG36.05, CIGRÉ Paper 36-203, 1992.
- [9] Power Quality Centre. **Voltage Unbalance**. University of Wollongong. Technical Note No.6, 2002.
- [10] IEEE P1159-1995. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. IEEE Std. Coordinating Committee 22 on Power Quality. 1995. p.20
- [11] IEEE Task Force P1159.1: Guide for Recorder and Data Acquisition Requirements for Characterization of Power Quality Events. **Tutorial on Voltage Imbalance Assessment Requirements**. [Artículo en Línea].  
Disponibile:  
[http://0-grouper.ieee.org.csulib.ctstateu.edu/groups/1159/1/VUF\\_requi.html](http://0-grouper.ieee.org.csulib.ctstateu.edu/groups/1159/1/VUF_requi.html)
- [12] PREEICA. “**Proyecto Regional de Energía Eléctrica del Istmo Centroamericano**”.  
Disponibile:  
<http://www.PRREICA.ca>
- [13] Gómez, Expósito (Coordinador). **Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica**. McGraw Hill. México, 2002. p.669.
- [14] Sutherland P.E, Waclawiak M, McGranahan M.F. **Analysis of Harmonics and Unbalance of Time-Varying Single-Phase Traction Loads on a Three-**

**Phase System.** Presented at the International Conference on Power Systems Transients (IPST'05) in Montreal, Canada on June 19-23, 2005.

- [15] ANSI C.84.1-1995. **Electric Power Systems and equipment - Voltage ratings.** Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995.
- [16] ANSI/IEEE Std.141-1986. **Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (Red Book).** Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1986.
- [17] IEEE Std.519:1991. **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.** IEEE New York, 1991.
- [18] EPRI Power Electronics Applications Center. **Voltage Unbalance: Power Quality Issues, Related Standards and Mitigation Techniques (Effect of Unbalanced Voltage on End Use Equipment Performance),** EPRI, 2000.
- [19] IEEE P519A/D5-1996. **Guide for Applying Harmonics Limits on Power Systems.** Prepared by the P519A Task Force of the Harmonics Working Group, 1996.
- [20] IEC 61000-2-1:1990. **Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signaling in public Power Systems,** 1990.
- [21] IEC 61000-2-2:1990. **Compatibility Levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems,** 1990.

- [22] IEC 61000-2-12:2003-04. **Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems**, 2004.
- [23] IEC 61000-2-4:1994. **Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances**, 1994.
- [24] IEC 61000-3-6:1996. **Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems**, Technical report type 3, 1996.
- [25] IEC 61000-3-2:1995. **Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current  $\leq 16A$ )**, 1995.
- [26] IEC 61000-3-4:1995. **Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current  $> 16A$ )**, 1995.
- [27] IEC 61000-2-6:1995. **Assessment of the Emission Levels in the Power Supply of Industrial Plants as regards Low-Frequency conducted disturbances**, 1995.
- [28] IEC 77A. **General guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment connected thereto**. IEC 77A(Secr)47, 1989.
- [29] IEC 61000-4-30: 2003. **Power Quality measurements methods**, 2003.
- [30] IEC 61000-4-7:2002. **General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto**, 2002.

- [31] CENELEC EN 50160:1999. **Voltage Characteristics of Electricity supplied by public distribution systems.** European standard, 1999.
- [32] NRS 048-2:2003. Electricity Supply-Quality Supply. **Part 2: Voltage Characteristics, Compatibility Levels, Limits and Assessment Methods.** South African Bureau of Standards, 2003.
- [33] Edf Emeraude Contract. **Contract Émeraude pour la fourniture d'électricité au tarif Vert.** Annexe 2: Qualité des fournitures en HTA (1-50kV) and HTB (>50kV). Electricité de France.
- [34] H-Q Voltage Characteristics: **Characteristics and Target Values of the Voltage Supplied by Hydro-Quebec Transmissions, MV and LV System,** July 2001.
- [35] CIGRÉ JWG C4.07. **Power Quality Indices and Objectives.** Cired Doc: Final WG Report.
- [36] Electricity Association Engineering Recommendation P29: **Planning Limits for Voltage Unbalance in the United Kingdom,** 1990.
- [37] Electricity Association Engineering Recommendation G5/4: **Planning Levels for Harmonic Voltage Distortion and the Connection of Non-linear Equipment to Transmission Systems and Distribution Networks in the United Kingdom,** 2001.
- [38] Prudenzi Alberto, Lamedica Regina, Tironi Enrico. **Harmonic analysis procedures: a comparison between IEEE and IEC guidelines.** 8<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings, Volume I. p.p 470-475.

- [39] Ranade S.J, Xu W. **An overview of Harmonics Modeling and Simulation.** IEEE Power Engineering Society Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Working Group Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee, 1998.
- [40] IEEE Std 399-1997. **Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (Brown Book).** Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997.
- [41] H.W. Dommel. **Alternative Transients Program Rule Book**, “Reference manual of EMTP”, 1986. p.46
- [42] Ribeiro, Paulo F. **Distribution System and other Elements Modeling.** IEEE Power Engineering Society Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Working Group Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee, 1998.
- [43] Zheng Tongxin, Makram Elham B, Girgis Adly A. **Effect of Different Arc Furnace Models on Voltage Disortion.** 8<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings, Volume I. p.p 1079-1085.
- [44] IEEE Std 18-1992. **IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.** Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997.
- [45] Grupo de Medición de Armónicos y Flicker. **Análisis de las Mediciones de Armónicos y Flicker en las Secciones de la Subestación Guayana B.** CVG Electrificación del Caroní, C.A. EDELCA, 1999.
- [46] Gómez, Expósito (Coordinador). **Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica.** McGraw Hill. México, 2002. p.621.

- [47] De la Rosa, Francisco. **Armónicas en Redes Eléctricas: Causas, Efectos y Soluciones**. ESP OIL ENGINEERING CONSULTANTS, 2001.
- [48] ANSI/IEEE C57.110-1986. **IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents**. The Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York, 1986.
- [49] Bisiach L. **Technical and Operational Experiences for Mitigating Interferences from High-Capacity Arc Furnaces**. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1992.
- [50] NEMA MG1-2003. **NEMA Motor-Generator Standards for Three-Phase Induction Motors**. National Electrical Manufacturers Association, 2003.

## BIBLIOGRAFÍAS

- Arrillaga J, Smith B, Watson N, Wood A, **Power System Harmonic Analysis**. John Wiley & Sons, 1997.
- DigSILENT. **Digital Simulation and Network Calculation**. User's Manual, 2000.
- Grupo SIEP. **Curso: Soluciones Actuales a los Problemas de Calidad del Servicio Eléctrico**. FUNINDES USB, 1998.
- Martínez Velasco, Juan A. **Curso: Análisis de Calidad de Suministro Eléctrico mediante Simulación Digital**. Universidad de los Andes – Facultad de Ingeniería, Mérida, 10 al 13 de Septiembre de 2002.
- Prikler Lászlo, Haidden Hans. **ATPDraw for Windows 3.1x95/NT**, Version 1.0, User's Manual.

## GLOSARIO

### **Armónicos:**

Son cada una de las componentes de frecuencia en que se descompone una señal periódica distorsionada. Estos componentes de frecuencia son múltiplos de la frecuencia fundamental.

### **Armónicos característicos:**

Son aquellos armónicos múltiplos enteros impares de la frecuencia fundamental generalmente producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de su normal operación.

### **Armónicos no característicos:**

Son aquellos armónicos múltiplos enteros pares o que no son múltiplos de la frecuencia fundamental.

### **Barrido en frecuencia:**

Se basa en una inyección de corriente en el nodo de interés, seguido por la solución de la ecuación  $[I] = [Y][V]$  para un determinado rango de frecuencias. Puede resolverse para determinar las tensiones en cada uno de los distintos nodos de la red.

### **Componentes simétricas:**

Es un método matemático desarrollado para el estudio y análisis de sistemas desbalanceados. Básicamente transforma un sistema trifásico desbalanceado (tensiones, corrientes o impedancias) en 3 vectores de componentes balanceadas, llamados *secuencia positiva o directa*, *secuencia negativa o inversa* y *secuencia cero* u *homopolar*, generalmente designadas por los subíndices 1,2 y 0 respectivamente.



**Conmutación:**

Es la transferencia de corriente unidireccional entre elementos de circuito convertidores (tiristores o diodos) que conducen en sucesión.

**Convertidor:**

Es un equipo que cambia las características de la energía eléctrica de una forma a otra (amplitud, frecuencia, de corriente alterna a continua y viceversa).

**Derrateo:**

Es la disminución de la capacidad eléctrica nominal de un determinado componente.

**Desbalance de Tensión:**

Condición que se presenta cuando en un sistema trifásico las tensiones no tengan la misma amplitud o no estén desfasadas en  $120^\circ$ .

**Distorsión de demanda total (TDD):**

Es la distorsión de corriente armónica total en % de la máxima demanda de corriente de carga.

**Distorsión armónica total (THD):**

Este índice corresponde al factor de distorsión armónica, y es usado para medir la desviación de una forma de onda periódica de tensión o corriente con contenido armónico con respecto a una onda sinusoidal perfecta.

**Factor de influencia telefónica (TIF):**

El factor de influencia telefónica de una onda de corriente o tensión en un circuito eléctrico, es la relación entre los valores rms ponderados de todas las componentes de onda seno (incluye las ondas de corriente o tensión a la frecuencia fundamental y frecuencia armónica) y el valor rms no ponderado de la onda. La ponderación se realiza a las componentes individuales de diferentes frecuencias.

**Filtro:**

Es un equipo cuyo propósito es reducir la corriente o la tensión armónica existente en partes específicas de un sistema de potencia eléctrico, pueden estar en derivación o en serie.

**Filtro en derivación:**

Es un tipo de filtro que reduce los armónicos proporcionándoles un camino en derivación de baja impedancia, ubicados entre la fuente de armónicos y el sistema a ser protegido.

**Filtro serie:**

Es un tipo de filtro que reduce los armónicos mediante la colocación de altas impedancias serie entre la fuente de armónicos y el sistema a ser protegido.

**Filtro sintonizado:**

Es un filtro que consiste en la combinación de capacitores, inductores y resistencias que han sido seleccionadas de tal manera de presentar una impedancia relativa mínima para un filtro en derivación o máxima para un filtro serie a una o más frecuencias específicas.

**Número de pulsos de un convertidor:**

Es el número total de conmutaciones sucesivas no simultáneas que ocurren dentro del circuito convertidor durante cada ciclo cuando opera fuera de control de fase. Esto es además, igual a la medida del armónico principal en la tensión directa (continuo), que es, el número de pulso presente en la tensión de salida de corriente continua en un ciclo de la tensión de suministro.

**Punto de Común Acoplamiento (PCC):**

Es el punto común entre el usuario contaminante y los posibles afectados. Este se puede encontrar en el primario o secundario del transformador.

**Punto Interno de Acoplamiento (IPC):**

Es el punto de la red (dentro del sistema o instalación) que se encuentra más cerca de una determinada carga a la cual otras están, o podrían estar conectadas. Esencialmente este es un punto que está dentro de las instalaciones del cliente.

**Técnica de MonteCarlo:**

Los métodos de Montecarlo abarcan una colección de técnicas que permiten obtener soluciones de problemas matemáticos o físicos por medio de pruebas aleatorias repetidas. En la práctica, las pruebas aleatorias se sustituyen por resultados de ciertos cálculos realizados con números aleatorios.

**Transformada Rápida de Fourier (FFT):**

Es un algoritmo eficiente para calcular la Transformada discreta de Fourier (DFT) y su inversa. La FFT es de gran importancia para una gran variedad de aplicaciones, desde el procesamiento digital de señales a la solución de ecuaciones diferenciales parciales.

## [ANEXO N°1]

### [Fundamento teórico sobre Distorsión Armónica]

#### A.1.1 Secuencia de fase de los armónicos

En los sistemas eléctricos no se presentan todos los armónicos en la misma proporción, en la mayor parte de las situaciones se produce lo que se denomina simetría de semionda, que se puede expresar como la propiedad de que se cumpla que:

$$V(t) = -V\left(t + \frac{\pi}{\omega_1}\right) \quad (\text{A.1.1})$$

donde:

$V(t)$ : Tensión del sistema

$\omega_1$ : Frecuencia fundamental

Esto es, que la forma de onda en el semiciclo negativo a la frecuencia fundamental sea exactamente opuesta a la forma de onda en el semiciclo positivo. Puesto que los armónicos pares no cumplen esa propiedad con respecto a la frecuencia fundamental, esto provoca que no se encuentren armónicos pares en muchas ocasiones (en la práctica, esto significa que su valor es muy bajo).

Además, en los sistemas trifásicos equilibrados con secuencia directa de fases en la alimentación, las ondas de tensión y corriente están desfasadas  $120^\circ$   $\left(\frac{2\pi}{3} \text{ radianes}\right)$

entre sí, por lo que se cumple que:

$$V_{ah}(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega_1 t + \theta_h) \quad (\text{A.1.2})$$

$$V_{bh}(t) = V_{ah}\left(t - \frac{2\pi}{3\omega_1}\right) \quad (\text{A.1.3})$$

$$V_{ch}(t) = V_{ah} \left( t + \frac{2\pi}{3\omega_1} \right) \quad (\text{A.1.4})$$

donde:

$h$  es el orden del armónico correspondiente

$V_{ah}$  : tensión armónica de orden  $h$

$\omega_1$ : Frecuencia fundamental

Si se particularizan las ecuaciones anteriores para distintos valores de  $h$ , se puede obtener una relación entre la secuencia de fase y el orden de los armónicos, como se muestra en la Tabla A.1.1.

**Tabla A.1.1**

*Relación entre la secuencia de fase y el orden de los armónicos*

Orden del armónico ( $h$ )	Secuencia de Fase	Orden del armónico ( $h$ )	Secuencia de Fase
1	+	8	-
2	-	9	0
3	0	10	+
4	+	11	-
5	-	12	0
6	0	13	+
7	+	14	-

Como se puede observar, la secuencia de fase de los distintos armónicos se va repitiendo cíclicamente. Pues bien, en los sistemas trifásicos de tres hilos (es decir, sin conductor de neutro) no puede haber corrientes homopolares, por lo que no se encuentran corrientes de armónicos múltiplos de tres. Además, la mayor parte de los perturbadores trifásicos sólo tienen tres hilos conectados a la red, es decir, que no pueden producir corrientes homopolares.

Las dos consideraciones previas permiten afirmar que en los sistemas trifásicos equilibrados sin conductor de neutro y con simetría de semionda sólo existen los

armónicos cuyo orden  $h$  cumpla la relación  $h = 6k \pm 1$ ;  $k = 1, 2, \dots$ ; es decir,  $h=5, 7, 11, 13, 17, \dots$ . Estos armónicos son los que normalmente presentan un valor más alto en los sistemas de potencia. Por otro lado, los armónicos de secuencia cero cumplen con la relación  $h = 6k-3$ ; estos son los armónicos de tercer orden y sus múltiplos.

La configuración de secuencia de fase mostrada en la Tabla A.1.1 no es válida para los sistemas desbalanceados, ya que los armónicos de cada orden contienen las tres diferentes secuencias. En los sistemas desequilibrados pueden generarse componentes de tercera armónica de secuencia positiva y negativa que circularan por sus respectivas redes de secuencia.

### **A.1.2 Respuesta del sistema de potencia ante la presencia de armónicos**

Los efectos de una o más fuentes de corrientes armónicas en el sistema de potencia dependen principalmente de la característica de respuesta en frecuencia del propio sistema. Los equipos no lineales pueden ser representados en su mayoría como fuentes de corrientes armónicas, por lo tanto, la distorsión armónica en la tensión del sistema de potencia dependerá de las características de la impedancia en función de la frecuencia, siendo la resonancia armónica uno de los efectos más importantes producidos en el sistema.

#### **A.1.2.1 Factores que afectan la respuesta en frecuencia**

En general, los factores que tienen mayor influencia sobre la respuesta en frecuencia del sistema de potencia, y en consecuencia en la distorsión armónica, son los que se indican a continuación:

- Nivel de cortocircuito: La capacidad de cortocircuito en determinado punto del sistema es una indicación de la impedancia equivalente del sistema a la frecuencia fundamental en dicho punto, por tal razón la distorsión armónica en la tensión está

íntimamente relacionada con la capacidad de cortocircuito del sistema. La distorsión de tensión que se obtiene en un sistema con una capacidad de cortocircuito elevada (sistema rígido) es menor que para un sistema con una capacidad de cortocircuito más baja (sistema débil), asumiendo la misma fuente de corriente armónica.

- Bancos de capacitores y cables aislados: Los bancos de capacitores utilizados para mejorar el control de la tensión y el factor de potencia, así como los cables aislados son los componentes del sistema que afectan en mayor grado la característica de respuesta en frecuencia. La conexión de los capacitores puede causar condiciones de resonancia (serie o paralelo) que pueden incrementar los niveles de distorsión armónica.
- Composición de la carga: El nivel de carga del sistema no tiene un efecto significativo en la característica de respuesta en frecuencia del sistema a excepción de la zona cercana a las frecuencias de resonancia, en estas frecuencias cercanas a la de resonancia el efecto de la carga depende de cómo está compuesta la misma. Si la carga posee una elevada parte resistiva, ésta contribuye de manera importante a atenuar la magnitud del nivel armónico cerca de la frecuencia de resonancia ya que actúa como una resistencia en derivación. Por otra parte, si la carga está formada principalmente por motores u otras cargas dinámicas (las cuales contribuyen a la capacidad de cortocircuito del sistema) la impedancia armónica asociada a ésta es inductiva, la cual produce poco amortiguamiento a la magnitud del pico de resonancia, sin embargo, este tipo de carga desplaza la frecuencia a la cual ocurre la resonancia, debido a que esencialmente está en paralelo con la inductancia del sistema.

### A.1.2.2 Condiciones de Resonancia Armónica

La condición de resonancia en los sistemas de potencia ocurre cuando a una cierta frecuencia (denominada frecuencia de resonancia) la impedancia de la componente capacitiva es de igual valor a la impedancia de la componente inductiva y adicionalmente la fuente contaminante inyecta una corriente armónica a dicha frecuencia, haciendo que ésta fluya por el sistema y produzca una distorsión armónica en la tensión.

Estas condiciones de resonancia son las que más influyen en los niveles de corrientes armónicas que circulan por los sistemas de potencia. Cuando las condiciones de resonancia no son un problema, el sistema posee la capacidad de absorber cantidades considerables de corrientes armónicas sin que este se vea afectado en sus parámetros principales (corrientes y tensiones), cuando estas corrientes armónicas encuentran una alta impedancia debido a una condición de resonancia paralelo es únicamente que ocurre una considerable amplificación de las corrientes y distorsión en las tensiones.

Bajo una condición de resonancia, ya sea serie o paralelo, en un circuito LC simple se cumple que a la frecuencia de resonancia ( $f_r$ ), las reactancias vistas por el capacitor y por la inductancia son de igual magnitud, siendo esta frecuencia igual a:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{A.1.5})$$

Las corrientes armónicas tienden a fluir desde las cargas no lineales, que son las fuentes de dichas corrientes, hasta las impedancias más bajas, que son usualmente la fuente de suministro, ya que la impedancia del sistema es por lo general mucho menor que los caminos paralelos que ofrecen otras cargas. Sin embargo, este flujo de corrientes armónicas se distribuirá dependiendo de la relación que exista entre las diferentes impedancias.



Existen dos condiciones diferentes de resonancia, serie y paralelo, las cuales se explican a continuación:

- Resonancia serie: La condición de resonancia serie se puede producir cuando un banco de capacitores está en serie con la reactancia del sistema y crea una baja impedancia en su trayectoria a la corriente armónica. Esta resonancia puede causar altos niveles de distorsión de la tensión entre la inductancia y el capacitor debido a la elevada corriente armónica que circula hasta la baja impedancia vista en su trayectoria, la cual puede producir falla en fusibles o capacitores debido a la sobrecarga. La condición de resonancia serie está dada por:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (\text{A.1.6})$$

donde  $h_r$  corresponde al orden del armónico a la frecuencia resonante.

- Resonancia paralelo: La condición de resonancia paralelo se produce cuando la reactancia de un banco de capacitores es igual en magnitud a la reactancia del sistema a cierta frecuencia, por lo que la combinación paralelo es vista como una gran impedancia desde la fuente armónica. La frecuencia a la cual la combinación paralelo alcanza su mayor valor (reactancia del capacitor igual a la del sistema) es denominada frecuencia de resonancia.

En el caso de sistemas radiales con un banco de capacitores en la carga donde la relación X/R es elevada, la siguiente expresión permite determinar en forma aproximada el orden de la frecuencia armónica a la cual podría ocurrir la resonancia paralelo:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVAR_{CAP}}} \quad (\text{A.1.7})$$

donde:

$h_r$ : orden del armónico a la frecuencia resonante.

$MVA_{SC}$ : Nivel de cortocircuito en MVA.

$MVAR_{CAP}$ : Capacidad del capacitor en MVAR.

En general, cuando la fuente contaminante genera corrientes armónicas a una frecuencia cercana a la frecuencia de resonancia del sistema, se produce una excesiva circulación de corrientes armónicas a dicha frecuencia, así como la presencia de excesivas sobretensiones armónicas.

### **A.1.3 Fuentes generadoras de armónicos**

Las principales fuentes de armónicos en los sistemas de potencia, se encuentran dentro de una de estas tres categorías:

- Equipos de electrónica de potencia: como son los rectificadores, inversores, convertidores, computadoras, etc.
- Equipos de arco: estos dispositivos incluyen a los hornos de arco, soldadores, alumbrado fluorescente, sodio y vapor de mercurio. En ellos el contenido de la corriente armónica puede ser alto y rápidamente cambiante debido a las fluctuaciones en el arco de las cargas.
- Equipos ferromagnéticos: los cuales involucran la excitación de una bobina con núcleo de hierro, estos son usados en motores y transformadores.

Los equipos señalados con anterioridad presentan una impedancia no lineal al sistema y las corrientes armónicas que se producen al operarlos, ocasiona distorsión de la tensión al fluir a través de la impedancia del sistema.

De manera más detallada, entre las principales fuentes de armónicos se tienen:

## **Convertidores de gran Potencia**

Los convertidores más utilizados son aquellos que se valen de dispositivos de electrónica de potencia para realizar la conversión de corriente alterna en corriente continua (rectificadores) o de corriente continua en corriente alterna (inversores).

Los convertidores de gran potencia son aquellos cuya potencia nominal se encuentra en el orden de los MW. Estos generan corrientes armónicas que son inyectadas al sistema de potencia debido a que las componentes que integran estos equipos poseen una característica no lineal. La distorsión de la onda de corriente se produce por efecto de la conmutación en los circuitos de conducción y está acompañada tanto en el lado de corriente continua (dc) como en el lado de corriente alterna (ac) por un conjunto de componentes armónicas.

Generalmente tienen mucha más inductancia en el lado dc que en el lado ac, por lo que la corriente directa es prácticamente constante y el convertidor actúa como una fuente de tensión armónica en el lado dc y como una fuente de corriente armónica en el lado ac.

En el caso particular de un convertidor estático de potencia, donde se asume que hay suficiente carga inductiva como para producir una corriente continua constante y una inductancia de conmutación despreciable, se conmuta o interrumpe la corriente continua constante secuencialmente entre las tres fases del sistema de potencia de corriente alterna. Idealmente, esta corriente continua produce una onda de corriente cuadrada que fluye en las tres fases del sistema de corriente alterna. Mediante un análisis de Fourier se demuestra que el lado de corriente alterna suministra corrientes armónicas de orden y magnitud como los dados por las ecuaciones (A.2.6 y A.2.7).

Otra observación importante al hacer el análisis de Fourier en estos convertidores es que la inclusión de la impedancia del sistema reduce el contenido armónico de la

forma de onda de la corriente, siendo el efecto mucho más pronunciado en el caso de una rectificación sin control [43].

### **Convertidores de tamaño mediano**

La aplicación principal de los convertidores de tamaño mediano (decenas de miles de kW) es el control de velocidad para motores dc. Para estos, se observa que la quinta armónica puede alcanzar valores pico de tres veces la componente fundamental.

En el caso de tracción eléctrica, es común utilizar un control individual en cada puente convertidor. Durante el período de aceleración inicial, con corriente máxima en el motor dc, el puente rectificador produce las peores corrientes armónicas y opera con un factor de potencia bajo.

### **Convertidores de baja potencia**

A diferencia de las cargas descritas en los incisos anteriores, cuya potencia nominal es lo suficientemente grande como para que requiera un tratamiento individual, las cargas que operan con convertidores de baja potencia son importantes únicamente cuando un gran número de estas unidades están activas de forma simultánea.

La técnica de Monte Carlo es utilizada para investigar la probabilidad de exceder niveles predeterminados de armónicas.

### **Compensadores estáticos**

Estos equipos constituyen una de las principales fuentes de generación de corrientes armónicas en los sistemas de potencia. Entre los tipos más comunes se encuentran: a) con reactor controlado por tiristores (TCR), b) con capacitores conmutados por

tiristores (TSC), c) con reactor saturado (SR). Estos son utilizados tanto en el sistema de transmisión como en el sistema de distribución.

Debido a las características de regulación de la tensión del compensador mediante la absorción o generación de potencia reactiva, los armónicos generados dependen de los ángulos de disparo de los tiristores y las condiciones del flujo de carga de la red.

### **Hornos de Arco**

La combinación de retraso en la ignición del arco, con las características altamente no lineales de la curva tensión de arco contra corriente, introduce armónicas de la frecuencia fundamental. Adicionalmente, los cambios de tensión ocasionados por alteraciones en la longitud de arco producen una gama de frecuencias, predominantemente de 0,1 a 30 kHz, cada una de ellas con armónicas a su alrededor. Este efecto se hace más evidente en la fase de la fundición, en la interacción de las fuerzas electromagnéticas entre los arcos.

Los niveles de corrientes armónicas varían en forma marcada con el tiempo y se presentan comúnmente en forma de gráficas probabilísticas. Un punto importante es que la armónica  $h$  no solamente varía con el tiempo, sino también en su amplitud con respecto a la componente fundamental.

### **Transformadores y reactores con núcleo de hierro**

En un núcleo ideal sin pérdidas por histéresis, el flujo magnético y la corriente de magnetización necesaria para producir el mismo, están relacionadas entre sí mediante la curva de magnetización del acero utilizado en las laminaciones. Aún en esta condición ideal, si graficamos la corriente de magnetización contra el tiempo para cada valor de flujo, la forma de onda resultante dista mucho de ser sinusoidal.

Cuando estos equipos son operados en la zona de saturación son generadores de corrientes armónicas debido a la no linealidad de la curva de magnetización en la zona de saturación y la presencia de histéresis en su característica. Este efecto está presente en todos los equipos con núcleo de hierro y su magnitud depende del diseño del equipo y la tensión en que estén operando.

La onda de corriente distorsionada contiene componentes armónicas impares de apreciable magnitud. Esta corriente se incrementa cuando la tensión terminal es superior a lo normal.

Si en el circuito magnético del transformador la corriente de excitación contiene componentes armónicas de tercer orden y estas son suprimidas debido a la conexión del transformador, el flujo contendrá componentes armónicas de tercer orden que inducirá una tensión armónica de tercer orden en los arrollados del transformador. La magnitud de la tensión inducida varía entre el 5% y el 50% dependiendo del tipo de transformador utilizado.

En general, los armónicos de tercer orden estarán presentes en la corriente de excitación y en la tensión del transformador, siempre y cuando la forma de interconectar sus bobinas lo permita.

#### **A.1.4 Efectos de la distorsión armónica**

A continuación se describen los efectos más importantes de la distorsión armónica en la corriente y tensión sobre diferentes equipos del sistema de potencia. En general, estos efectos dependerán de los niveles de distorsión presentes y de la sensibilidad de los mismos ante tales niveles.

## **Cables de potencia**

En los cables de potencia el flujo de corriente armónica incrementa el calentamiento en el conductor producido por el aumento del valor efectivo de la corriente y de la resistencia alterna armónica equivalente. Esto se debe al llamado “efecto pelicular o skin”. Este efecto produce que la resistencia efectiva alterna  $R_{AC}$  sea superior a la resistencia de corriente directa  $R_{DC}$  aumentando en consecuencia las pérdidas óhmicas. Por causa del “efecto skin” la resistencia de los cables aumenta con la frecuencia, provocando que los conductores admitan menos corriente si esta tiene armónicos.

Los cables pueden vibrar mecánicamente a causa de los armónicos; los armónicos de alta frecuencia pueden dar a lugar a fallas en el aislamiento y al denominado “efecto corona”.

## **Neutro**

Debido a la presencia de armónicos de tercer orden, la corriente que circula por el neutro, en lugar de ser nula, puede presentar un valor considerable, pudiendo llegar a ser el triple de la corriente de fase.

En tales casos, es recomendable que el neutro tenga una sección más grande que los conductores de fase.

## **Máquinas Rotativas**

Los efectos de los armónicos en las máquinas rotativas están relacionados con los campos electromagnéticos que inciden en las máquinas debido a las corrientes armónicas.

El funcionamiento de una máquina operando en un sistema cuya tensión presente un alto contenido armónico se desmejora notablemente, debido a que:

- Se incrementan las pérdidas en el cobre y en el hierro
- Los armónicos de secuencia inversa generan torques en oposición al torque fundamental, esto genera fatiga y acorta la vida útil de la máquina.
- Los torques pulsantes producidos por la presencia de las corrientes armónicas conllevan a una emisión más alta de ruido.

### **Transformadores de Potencia**

El efecto de los armónicos sobre los transformadores consiste en [44]:

- Incremento de las pérdidas de cobre y hierro.
- Posible resonancia entre la inductancia de los arrollados del transformador y la capacitancia de la línea.
- Fatiga en el aislamiento.
- Incremento en el nivel de ruido audible del transformador e incremento de la corriente magnetizante producido por la componente de corriente continua presente en la corriente.

De los efectos mencionados el más importante es el incremento en las pérdidas, ya que estos ocasionan un aumento en el calentamiento del transformador. Las pérdidas en los transformadores se clasifican según las normas internacionales en:

- Pérdidas sin carga o pérdidas de excitación producidas cuando el transformador es excitado por la tensión.
- Pérdidas con carga.
- Pérdidas totales, que corresponden a la suma de las pérdidas sin carga y con carga.



Para evaluar la flexibilidad de suministrar corrientes armónicas a transformadores existentes y para especificar nuevos transformadores que alimentarán cargas no lineales, la norma ANSI/IEEE C57.110 [45] determina la “capacidad equivalente” de los transformadores mediante un factor de derrateo, denominado factor K.

Este derrateo consiste en el cálculo de la máxima corriente rms de carga no sinusoidal (en por unidad de la corriente de carga nominal) que asegura que las pérdidas en los arrollados (en la región de mayor densidad de pérdidas) no excedan el valor de diseño de las pérdidas en condiciones de operación nominal a la frecuencia fundamental.

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (\text{A.1.8})$$

Mediante el factor K definido en la ecuación (A.1.8) se puede evaluar el calentamiento adicional en los transformadores debido a las pérdidas por corrientes parásitas en los arrollados, incluyendo la fundamental y las contribuciones armónicas. Generalmente se utiliza para el derrateo de transformadores normalizados convencionales en cuyo diseño no se considera la presencia de corrientes armónicas (K= 1) o para especificar transformadores que suplirán cargas no lineales.

En la actualidad se fabrican transformadores con clasificación K (K-4, K-9, K-20, entre otros), que si bien tienen la misma capacidad nominal que un transformador convencional después de ser derrateado, cuentan con ventajas adicionales, tales como:

- Menor tamaño físico
- Menores pérdidas
- Menor ruido
- Menores requerimientos en la protección por sobrecorriente.
- Menor costo incremental

## **Capacitores**

En los capacitores, si la combinación de ellos con la inductancia del sistema resulta en una resonancia paralelo cerca de los armónicos característicos generados por las cargas no lineales, se producirá una amplificación de la corriente que oscila entre la capacitancia y la inductancia produciendo distorsión en la tensión, incremento del esfuerzo térmico de los cables de potencia, operación inadecuada de los equipos de protección, posible falla en equipos e interferencia en los sistemas de comunicación. Adicionalmente, la continua operación de los capacitores con excesivas corrientes armónicas puede producir incremento en la tensión y excesivo calentamiento. En la norma ANSI/IEEE C55.1:1980 se establecen una serie de criterios para que los capacitores operados en presencia de armónicos puedan utilizarse de manera continua.

### **A.1.5 Mecanismos de mitigación**

Los métodos para el control de las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia comenzaron con la utilización de filtros de sintonía puntual para representar un camino de baja impedancia a las corrientes armónicas. Sin embargo, en la actualidad existen adicionalmente otras técnicas que son utilizadas en la industria para reducir o controlar el flujo de las corrientes armónicas producidas por la utilización de cargas no lineales en los sistemas de potencia. Estas técnicas son las siguientes:

1. Reubicación y rediseño de los capacitores en derivación.
2. Uso de filtros pasivos.
3. Uso de filtros pasa banda.
4. Multiplicación de ángulos en convertidores.
5. Reconfiguración de la red.
6. Incremento de la relación de cortocircuito.

A continuación se describirán brevemente las técnicas anteriores, teniendo especial énfasis en los filtros de armónicas.

#### **A.1.5.1 Reubicación y rediseño de bancos de capacitores en derivación**

Los niveles de distorsión armónica excesivos en los sistemas de potencia están usualmente asociados con una condición de resonancia. Mediante la reubicación o eliminación de uno o varios bancos específicos de capacitores en derivación es posible evitar o mitigar este problema; también es posible desintonizar la frecuencia de resonancia cambiando el tamaño del banco de capacitores.

Este tipo de medidas regularmente se adopta para sistemas de distribución, y son empleadas no tanto para mitigar las corrientes armónicas de una carga en particular o del sistema, sino para evitar condiciones de resonancia que puedan amplificar la magnitud de la corriente armónica a una frecuencia definida. La ventaja que presentan estas técnicas es su bajo costo y su simplicidad de aplicación.

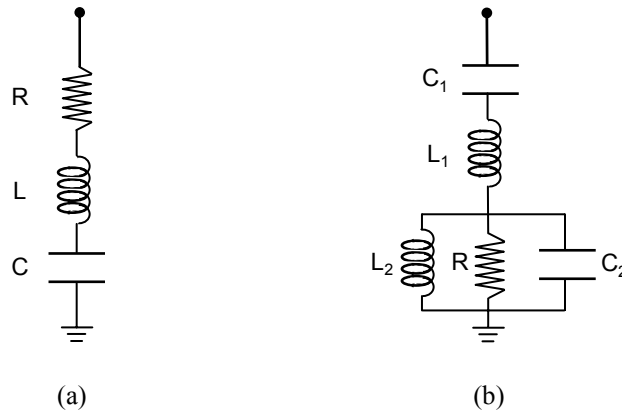
#### **A.1.5.2 Filtros Pasivos**

Los filtros pasivos son uno de los métodos más comunes utilizados para reducir el paso de las corrientes armónicas a través de los sistemas de potencia tanto a nivel de transmisión como de distribución, estos suelen ubicarse en la barra donde se encuentra la fuente generadora de corrientes armónicas, y son sintonizados para mitigar fundamentalmente una o dos frecuencias armónicas.

Los filtros pasivos se clasifican en dos tipos:

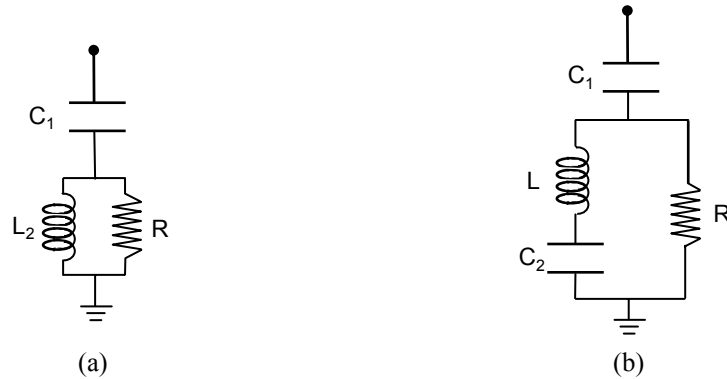
- Los filtros pasa-banda o filtros sintonizados, los cuales ofrecen una baja impedancia a la corriente armónica para la cual están sintonizados (sintonizados a una banda de frecuencia). Existen dos variantes de estos filtros, los de

sintonización sencilla (sintonizados a una única frecuencia armónica), los cuales consisten en un circuito serie resonante tal y como se indica en la Figura A.1.1 (a) y los de sintonización doble (sintonizados a dos frecuencias armónicas), cuyo circuito genérico se indica en la Figura A.1.1 (b).



**Figura A.1.1 Filtro Pasa-Banda de sintonización (a) sencilla y (b) doble**

- Los filtros pasa-alto o filtros amortiguadores, los cuales ofrecen una baja impedancia a las corrientes armónicas de alta frecuencia. Al igual que para los filtros pasa-banda estos filtros presentan dos variantes, los filtros de segundo orden, los cuales son los más utilizados y cuyo circuito se señala en la Figura A.1.2 (a), y el filtro tipo C, este es uno de los más recientes tipos de filtro pasa-alto, y tiene como ventaja sobre los filtros de segundo orden la reducción de las pérdidas a la frecuencia fundamental, su circuito genérico se muestra en la Figura A.1.2 (b).



**Figura A.1.2 Filtro Pasa-Alto de (a) Segundo Orden y (b) Tipo C**

### **A.1.5.3 Filtros Activos**

Los filtros activos eliminan las componentes armónicas del sistema a través de la generación de corrientes armónicas similares en magnitud pero de signo opuesto, de tal manera que se cancelen; la operación de los filtros activos se basa en la generación armónica existente de manera instantánea ajustando su operación continuamente dependiendo del espectro armónico resultante.

El comportamiento de los filtros activos está fuertemente influenciado por las características del circuito de selección de los parámetros de control, por lo que este bloque debe ser diseñado cuidadosamente para que el filtro cumpla con los objetivos deseados. Su uso es restringido debido a su elevado costo.

### **A.1.5.4 Multiplicación de ángulos en convertidores**

Muchas de las cargas que introducen corrientes armónicas en el sistema de potencia lo hacen principalmente no porque son cargas contaminantes o productoras de armónicos, sino debido a que requieren emplear puentes convertidores de potencia para transformar la corriente alterna del sistema en corriente continua.

El puente convertidor polifásico más sencillo corresponde con una unidad de 6 pulsos, pero este genera una gran cantidad de corrientes armónicas. Por otra parte, se pueden reducir drásticamente las corrientes armónicas generadas por estos equipos si se emplean varios puentes convertidores simultáneamente, lográndose que ciertas frecuencias armónicas se cancelen.

En forma general, si se operan  $m$  puentes convertidores de seis pulsos cada uno bajo las siguientes condiciones:

- Transformadores con igual impedancia y relación de transformación

- Los puentes convertidores están desfasados exactamente  $60^\circ/m$  entre ellos.
- Los puentes convertidores son controlados exactamente al mismo ángulo de retardo.
- La corriente de carga dc está igualmente repartida entre los diferentes puentes convertidores.

Se tiene entonces que las únicas componentes armónicas presentes son las armónicas características, cuyo orden está dado por la expresión:

$$h = n.q \pm 1 \tag{A.1.9}$$

$$q = 6m$$

donde:

$h$ : armónicas características

$n$ : cualquier número entero positivo

$q$ : número de pulsos

$m$ : número de puentes rectificadores hexafásicos

Lo antes descrito ocurre únicamente en la teoría, ya que no existen dos puentes convertidores que sean idénticos en todos los aspectos, por lo que en la práctica las armónicas no características siempre estarán presentes en el grado que no se cumplan las condiciones indicadas.

#### **A.1.5.5 Reconfiguración de la red**

En este punto es necesario identificar los usuarios/sectores de la instalación que introducen gran cantidad de corrientes armónicas al sistema y caracterizar su contenido. Como ocurre en las instalaciones residenciales, a menudo una redistribución de cargas en los alimentadores existentes puede proporcionar una solución económica para reducir significativamente los disturbios.

Por ejemplo, las cargas lineales pueden alimentarse separadamente de las no lineales, especialmente si la topología y calibres de la red eléctrica lo permiten sin sobrecargar los conductores. Es importante verificar esta condición a través de un estudio de flujos armónicos.

#### **A.1.5.6 Incremento en la relación de cortocircuito**

Otro mecanismo para mitigar el efecto de las corrientes armónicas generadas por cargas no lineales sobre el sistema de potencia es el de aumentar la capacidad del sistema de suministro eléctrico, de esta manera, al fortalecer el sistema de potencia en el punto de común acoplamiento (PCC) se reducirá el efecto de dichas corrientes armónicas sobre otros clientes.

Algunos métodos que se pueden llevar a cabo para fortalecer el sistema de potencia involucran las siguientes medidas:

- Cambiar la tensión de suministro eléctrico de la carga a un nivel superior.
- Aumentar el número de líneas de transmisión asociadas, así como también su capacidad.
- Aumentar la capacidad de transformación de la subestación.
- Alimentar las cargas contaminantes mediante circuitos independientes.
- Seccionar la barra de baja tensión de la subestación de distribución para ofrecer una alimentación exclusiva a las cargas contaminantes.
- Incrementar la capacidad de las líneas de transmisión.

Las condiciones particulares de cada caso determinarán qué medida o medidas correctivas serán las más convenientes para reducir el efecto de las cargas contaminantes sobre el resto de los clientes y el sistema.

## [ANEXO N°2]

### [Fundamento teórico sobre Desbalance de Tensión]

#### A.2.1 Fuentes Generadoras de Desbalance [9]

El origen de las perturbaciones en los sistemas de potencia puede ser entendido de dos distintas formas; de acuerdo a una interpretación, el interés se centra en la fuente de la perturbación y si esta es interna o externa al sistema (donde la frontera estaría definida por el medidor de energía). Por lo tanto, una perturbación interna estaría del lado del usuario, y por ende, una externa del lado de la compañía de suministro. La otra interpretación tiene que ver con la naturaleza de la fuente, y su descripción en términos técnicos.

La primera interpretación viene dada por la necesidad de asignar responsabilidades para el problema y su solución. La segunda interpretación está orientada a entender el problema y desarrollar recomendaciones para lograr una solución técnicamente satisfactoria.

En este sentido, la empresa que presta el servicio eléctrico (sistema externo) trata de suministrar un sistema de tensiones balanceado en el punto de común acoplamiento (PCC) entre la malla de distribución y la red del cliente (sistema interno). Bajo condiciones normales, estos niveles de tensión dependen de:

- Tensión de salida de los generadores
- Impedancia del sistema eléctrico
- Corrientes inyectadas por las cargas a lo largo del sistema de transmisión y distribución.

El sistema de tensiones en el punto de generación es por lo general altamente simétrico, debido a la operación de generadores sincrónicos (comúnmente usados en



grandes plantas de generación); ya que inclusive valores bajos de desbalance a este nivel pueden causar efectos significativos de rizado y calentamiento en los equipos de generación, transmisión y distribución del sistema. Por lo tanto, la central de generación no debe contribuir al desbalance de manera significativa. Inclusive, de tener generadores asincrónicos, como los usados en algunos tipos de turbinas de viento, se obtendría un set de tensiones balanceadas. Sin embargo, en el caso de generación distribuida o propia a pequeña escala, ubicada en las instalaciones del cliente, la situación es diferente. Muchas de estas unidades se conectan al sistema a baja tensión usando inversores monofásicos. Luego, el punto de conexión tiene una impedancia relativamente alta (el nivel de cortocircuito es relativamente bajo), conduciendo a un desbalance de tensión potencialmente mayor (ver ecuación 2.8) para conexiones a un nivel de tensión más alto.

La impedancia de los componentes del sistema eléctrico no es exactamente la misma por cada fase. La configuración geométrica de la mayor parte de las líneas aéreas de transmisión causa diferencias en los parámetros eléctricos de la línea e introduce cierto desequilibrio; si bien de un orden de magnitud pequeño comparado con el desbalance para consumos desequilibrados; generalmente, su efecto puede ser despreciado tomando precauciones, tales como la transposición de líneas.

En la mayoría de los casos, la asimetría en las cargas monofásicas conectadas a circuitos trifásicos es la causa principal para que se presente desbalance. Variaciones en las cargas monofásicas hacen que las corrientes que circulan por los conductores trifásicos sean diferentes, produciendo diferentes caídas de tensión y causando que las tensiones de fase sean desbalanceadas; estas variaciones pueden atribuirse a diferentes impedancias, o al tipo y valor de la carga en cada fase.

En redes de media y alta tensión las cargas son usualmente trifásicas y balanceadas, aunque cargas trifásicas con régimen de operación asimétrico, como por ejemplo hornos de arco en corriente alterna, también pueden causar desbalance. Las cargas

monofásicas, bien sean conectadas fase-fase o fase-neutro son desbalanceadas, como ejemplo de este tipo de cargas para estos niveles de tensión se tienen: equipos de tracción eléctrica para alta velocidad, cargas altamente reactivas (soldadores), hornos de inducción, convertidores y rectificadores. Estas cargas deberían, tanto como sea posible, ser distribuidas equitativamente entre las tres fases para reducir el desbalance total.

En redes de baja tensión, las cargas son en su gran mayoría monofásicas con conexión fase-neutro, y, al igual que en redes de media y baja tensión, estas deben distribuirse más o menos equitativamente entre las tres fases, en busca de la mayor simetría posible, ya que sistemas perfectamente balanceados no son posibles de lograr en la realidad.

Normalmente, el máximo desbalance de tensión ocurrirá al final del sistema de distribución primario, pero la cantidad exacta dependerá de lo bien que las cargas monofásicas estén balanceadas entre las fases del sistema. Por lo general, niveles de desbalance muy altos por cortos periodos de tiempo son típicamente causados por fallas en la red.

A continuación, se presenta una descripción general de los Hornos de Arco [46] (siendo esta una de las principales cargas que generan desbalance de tensión en los sistemas de potencia).

- **Hornos de arco:** los dos tipos de hornos de arco que hay en uso común son el horno trifásico y el horno monofásico. El campo general del horno trifásico es la fusión y refinado de metales, principalmente hierro en la producción de acero; el del horno monofásico, la producción de aleaciones no ferrosas. Para llevar a cabo estos procesos, consumen gran cantidad de energía eléctrica. Debido a la naturaleza del arco eléctrico y del proceso de fusión, estos dispositivos pueden producir grandes perturbaciones sobre la red eléctrica. En ellos durante el proceso de conversión de chatarra de metal, el arco de fase se mantiene entre la punta del

electrodo de esa fase y la carga. La carga sirve así, como electrodo común para los tres arcos (horno trifásico) y hace la conexión del circuito en ese punto, produciendo corrientes desbalanceadas en cada fase que presentarán fluctuaciones entre cero y un valor máximo correspondiente a la condición de cortocircuito, debido al movimiento del arco sobre toda la pieza fundida.

En líneas generales, las causas más comunes de desbalance de tensión ajenas a la operación del sistema y al desbalance de cargas son:

- Configuración desigual en el tap del transformador.
- Transformador de distribución monofásico de gran tamaño en el sistema.
- Fase abierta en el primario de un transformador trifásico en el sistema de distribución.
- Banco de transformadores conectados delta abierto.
- Disparo de fusible en un banco trifásico de condensadores para corregir factor de potencia

El desbalance de corriente resultante no sólo será causado por el desbalance del sistema de tensión, sino también por la impedancia del sistema, la naturaleza de las cargas causantes del desbalance, y la carga conectada a los equipos, particularmente motores.

### **A.2.2 Efectos sobre el sistema eléctrico**

A continuación se describen los principales efectos producidos por el desbalance de tensión y corriente en los diferentes equipos que componen el sistema eléctrico.

#### **Máquinas de Inducción [6]**

Los motores de inducción trifásicos son una de las cargas más comunes en el sistema eléctrico, encontrándose especialmente en el ámbito industrial. Cuando un motor de

inducción trifásico es alimentado por un sistema desbalanceado, la corriente de línea resultante muestra un grado de desbalance de 6 a 10 veces mayor al desbalance de tensión. Este fenómeno puede explicarse haciendo referencia a los dos campos rotantes girando en direcciones opuestas que se establecen una vez el motor es sometido a tensiones en desbalance. En relación a las componentes de secuencia positiva, si el motor desliza se tiene que:

$$s_1 = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (\text{A.2.1})$$

donde:

$N_s$  es la velocidad sincrónica

$N_r$  es la velocidad del rotor

El deslizamiento correspondiente a las componentes de secuencia negativa sería:

$$s_2 = \frac{-N_s - N_r}{-N_s} \quad (\text{A.2.2})$$

El deslizamiento  $s_2$  puede ser expresado en términos de  $s_1$ , resultando:

$$s_2 = \frac{-N_s - N_r}{-N_s} = (2 - s_1) \quad (\text{A.2.3})$$

Como el deslizamiento para secuencia positiva  $s_1$  es normalmente bastante pequeño (cercano a cero), el deslizamiento para secuencia negativa  $s_2$  será bastante elevado (cercano a 2).

Ya que la impedancia de un motor de inducción depende de su deslizamiento, donde a mayor deslizamiento (p.ej. bajo condiciones de rotor trabado) menor impedancia y a menor deslizamiento mayor impedancia; puede decirse de manera aproximada que la proporción de la impedancia de secuencia positiva a la negativa está dada por:

$$\frac{Z_1}{Z_2} \approx \frac{I_A}{I_B} \quad (\text{A.2.4})$$

donde:

$I_A$  es la corriente de rotor trabado

$I_B$  es la corriente nominal de operación del motor

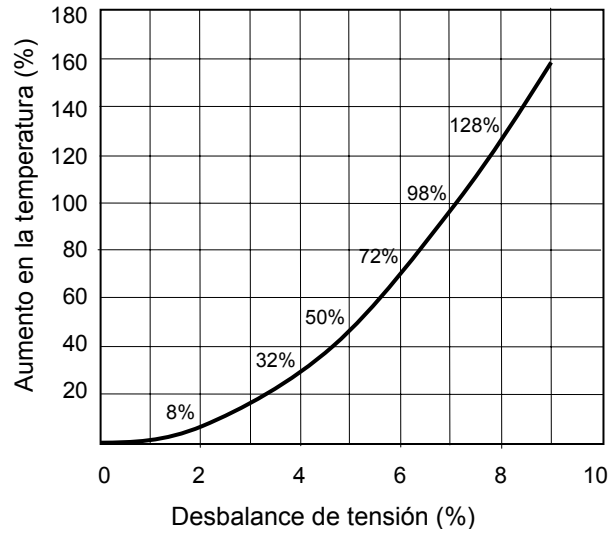
Como la corriente de secuencia positiva es  $I_1 = \frac{V_1}{Z_1}$ , y la corriente de secuencia negativa está dada por  $I_2 = \frac{V_2}{Z_2}$ ; la ecuación anterior se convierte en:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_2}{V_1} * \frac{I_A}{I_B} \quad (\text{A.2.5})$$

Para entender el significado de la ecuación (A.2.5) nos valdremos del siguiente ejemplo: Supongamos un motor con una corriente a rotor trabado 6 veces mayor que la corriente normal de operación; en este caso se obtendría un desbalance de 30% en la corriente de línea para un desbalance de tensión  $\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$  de 5%. En consecuencia, una máquina operando en régimen de desbalance manejará una corriente con un grado de desbalance varias veces más grande que la entregada por la fuente.

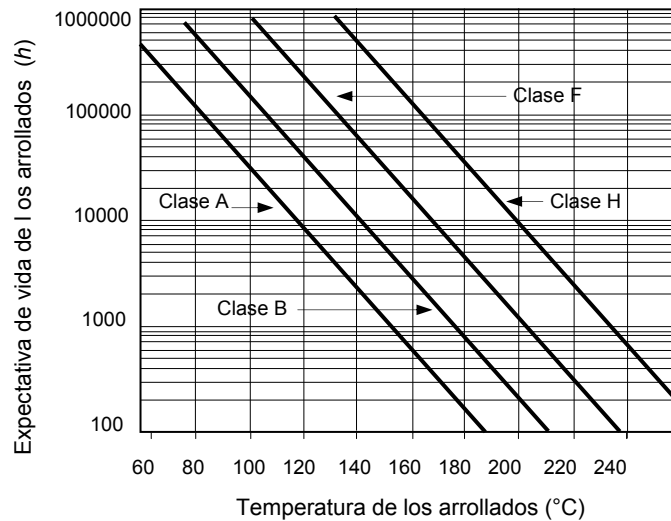
Bajo condiciones de desbalance, la impedancia de una máquina de inducción es similar a la impedancia durante su arranque (muy baja), luego, circulará una corriente mayor a la nominal por sus arrollados, incrementando excesivamente las pérdidas por calor especialmente en el rotor. Esto trae consigo una reducción en la eficiencia del motor y a la vez una reducción en la vida del aislamiento debido al sobrecalentamiento.

En la siguiente figura se muestra el incremento en la temperatura que ocurre para distintos valores de desbalance de tensión en los terminales de un motor.



**Figura A.2.1 Calentamiento causado por el Desbalance de Tensión [47]**

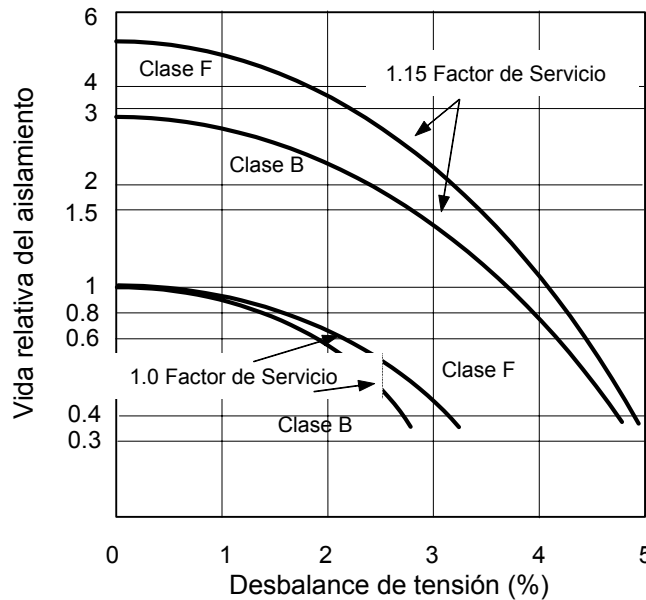
Como consecuencia del aumento en la temperatura de los arrollados, el tiempo de vida promedio del aislamiento se reduce aproximadamente a la mitad por cada 10°C de incremento, como se muestra en la Figura A.2.2.



**Figura A.2.2 Variación de la vida del aislamiento en función de la temperatura<sup>1</sup> [47]**

<sup>1</sup> En la figura A.2.2 se especifica la vida del aislamiento en función de la temperatura para motores Clase A, B, F y H. Estas letras (también llamadas **letras de código**) son una indicación de los kVA a rotor trabado por hp del motor, y están relacionadas al diseño del mismo. En [47] se suministra una tabla para determinados valores de kVA/hp y su correspondiente letra código.

De igual forma, también es posible graficar la reducción del tiempo de vida esperado del aislamiento en función del desbalance de tensión presente en los terminales del motor.



**Figura A.2.3 Desbalance de Tensión vs. Vida del aislamiento del motor<sup>2</sup> [47]**

Además de una reducción en su eficiencia, sobrecalentamiento y disminución en la vida del aislamiento, los motores de inducción que operan en condiciones de desbalance serán más ruidosos en su operación como consecuencia de las componentes de torque y velocidad pulsante inducidas al doble de la frecuencia del sistema; que también pueden causar daño mecánico en sus arrollados [6].

Operando en condiciones de desbalance la máquina no podrá alcanzar su máximo torque, ya que el campo magnético rotante inverso de la componente de secuencia negativa produce un torque negativo que debe ser restado del torque original asociado al campo magnético directo.

---

<sup>2</sup> En la placa de un motor se especifica el Factor de Servicio (FS), este número indica que tanto puede sobrecargarse un motor sin causar daños graves (p.ej. un motor con FS igual a 1.15 puede producir un torque 15% mayor a uno con FS de 1.00).

Para poder manejar el calor adicional causado por la inducción de las corrientes de secuencia negativa, proteger la vida del aislamiento e impedir que los motores se sobrecarguen por efecto del desbalance, el motor debe ser derrateado; lo cual puede provocar que una máquina de mayor capacidad deba ser instalada.

NEMA ha desarrollado una curva de derrateo<sup>3</sup> [47] como se indica en la Figura A.2.4. De acuerdo a esta curva, se requiere que cualquier motor sea construido para manejar un 1% de desbalance y por lo tanto, para valores mayores a este el motor debería ser derrateado.



**Figura A.2.4 Curva de derrateo de un motor de inducción [47]**

NOTA: Esta curva asume que el motor está entregando su potencia nominal.

### **Generadores sincrónicos [6]**

Básicamente exhiben fenómenos similares a los descritos para máquinas de inducción, pero más que todo sufren por exceso de calor. Se debe dedicar un cuidado especial al

---

<sup>3</sup> Para derratear un motor se multiplica su capacidad nominal en hp por el factor mostrado en la figura A.2.4.



diseño de arrollados de amortiguamiento en el rotor [6], donde las corrientes son inducidas por las componentes indirecta y homopolar.

### **Transformadores de Potencia**

Transformadores expuestos a tensiones de secuencia negativa transforman estas de la misma forma en que lo hacen con las tensiones de secuencia positiva. El comportamiento con respecto a tensiones de secuencia cero depende de las conexiones en el primario y el secundario, y principalmente, a la presencia de un conductor de neutro. Por ejemplo, en un transformador con conexión (Y- $\Delta$ ), las corrientes de secuencia cero se transforman en una corriente circulante (causante de calor) en la delta. El flujo magnético homopolar asociado a esta corriente circulante provoca pérdidas parásitas, que pueden llevar al derrateo del transformador.

### **Convertidores de potencia**

Los convertidores de potencia son dispositivos que cambian la energía eléctrica de una forma u otra, estos son parte esencial de variadores de velocidad, fuentes de poder, iluminación, etc.

Al ser alimentados con tensiones desequilibradas, los convertidores polifásicos (en los cuales cada entrada de tensión de fase contribuye a cambiar la salida a DC), pueden causar una componente de rizo indeseable en la salida, y armónicos no característicos en el lado AC.

Si el sistema de suministro es balanceado la corriente de línea puede tomar la forma de “doble pulso por medio ciclo”, como la mostrada en la Figura A.2.5, que contiene armónicos característicos de orden y magnitud:

$$h = 6k \pm 1 \tag{A.2.6}$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (\text{A.2.7})$$

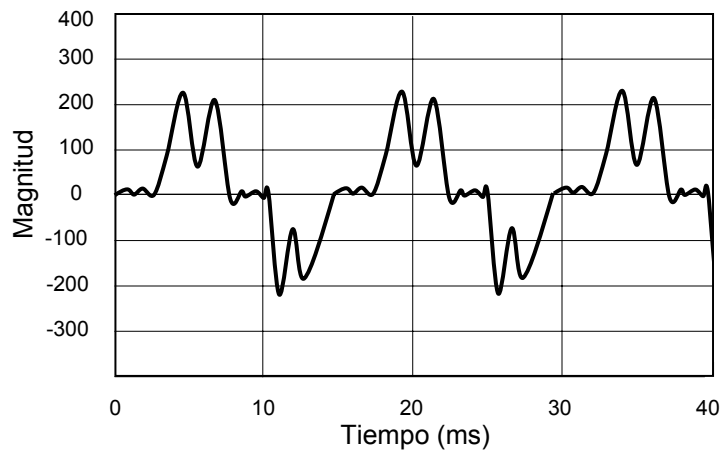
donde:

$h$ : orden del armónico

$k$ : 1,2,... Por lo tanto sólo se producen armónicos de orden 5<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup>, 13<sup>th</sup>...

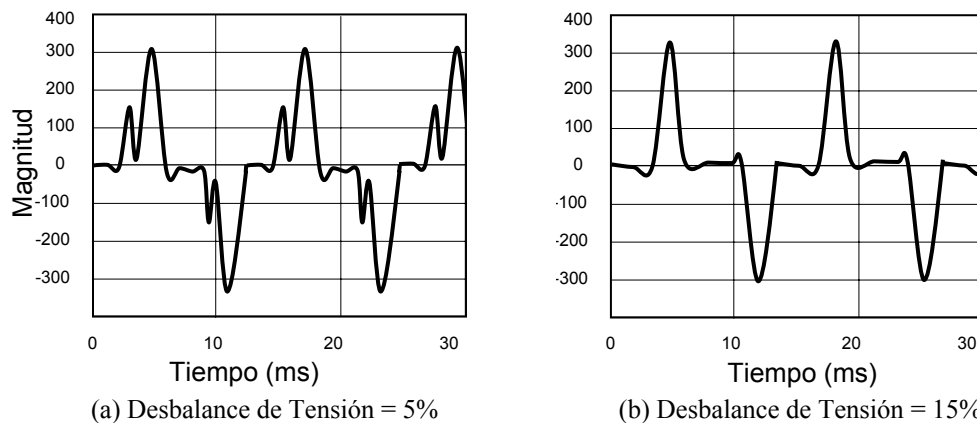
$I_h$ : amplitud de la corriente armónica de orden  $h$

$I_1$ : amplitud de la corriente a la frecuencia fundamental



**Figura A.2.5** *Corriente entregada por un rectificador trifásico cuando la tensión de suministro es balanceada*

A medida que al rectificador se le suministren tensiones desbalanceadas, la forma de onda de la corriente de línea se desviará de la formación de doble pulso mostrada en la Figura A.2.5, para convertirse en una formación de un solo pulso (como las mostradas en las figuras A.2.6 (a) y A.2.6 (b)), provocando la aparición de componentes armónicas de 3<sup>er</sup> orden.



**Figura A.2.6** *Corriente entregada por un rectificador trifásico cuando la tensión de suministro es desbalanceada*

En general, en redes desequilibradas la propagación de tensiones de secuencia negativa desde niveles de tensión bajas a redes de mayor capacidad, ocurre con un alto grado de atenuación; mientras que en el caso contrario, cualquier nivel de atenuación dependerá de la presencia de maquina trifásicas rotativas, las cuales tienen un efecto de equilibrio.

### **A.2.3 Mecanismos de mitigación**

El establecimiento de un nivel de desbalance nulo en el sistema de distribución es imposible debido entre otras causas a la aleatoriedad en la conexión y desconexión de cargas monofásicas, la distribución desigual de las cargas monofásicas en el sistema trifásico, y a la asimetría inherente del sistema de potencia.

Sin embargo, se pueden tomar diversas acciones (con diferentes grados de dificultad técnica) tanto a nivel de la empresa que suministra la energía como a nivel de los usuarios, para disminuir los efectos del desbalance.

De parte de la compañía que provee energía, la primera y más básica es reordenar o redistribuir las cargas de tal forma que el sistema se torne más balanceado. Para

algunas aplicaciones, hay la posibilidad de disminuir el desbalance cambiando los parámetros de operación.

Para reducir la influencia de las corrientes de secuencia negativa, causantes de caídas de tensión de secuencia negativa, es necesario un sistema de baja impedancia interna. Esto puede conseguirse conectando las cargas desbalanceadas en puntos de mayor nivel de cortocircuito, o por otras medidas del sistema para reducir la impedancia interna.

Otro tipo de técnica de mitigación es el uso de transformadores especiales, tales como los transformadores Scott y Steinmetz:

- El transformador Scott se construye a partir de dos transformadores monofásicos con una disposición especial en el tap, conectados a un sistema trifásico. Estos son conectados de tal forma que a la salida, un sistema de tensiones ortogonal bifásico es generado permitiendo la conexión de dos sistemas monofásicos [6]. Aunque hay otras maneras de lograr este efecto, la conexión Scott es la más económica.
- Un transformador Steinmetz es realmente un transformador trifásico con una carga para balancear la potencia conectada; esta carga está conformada por un condensador y un inductor cuyos valores son ajustados de forma proporcional a la carga monofásica conectada. Cuando la proporción de potencia reactiva del capacitor y el inductor es igual a la potencia activa de la carga (dividida por  $\sqrt{3}$ ), la red trifásica ve una carga balanceada. La potencia nominal del transformador se iguala a la potencia activa de la carga monofásica. Se observa que un balance perfecto sólo se alcanza cuando la potencia activa de la carga es igual a la utilizada para el diseño del sistema.

Una solución que puede aplicarse tanto por los clientes como por la empresa que presta el servicio eléctrico es el uso de circuitos de electrónica de potencia de acción

rápida, como los Compensadores estáticos de potencia (SVC), que son utilizados en los sistemas de potencia con el fin de regular las tensiones, reducir las fluctuaciones de tensión, mejorar el factor de potencia y limitar el desbalance de cargas.

Están compuestos por un reactor controlado por tiristores y un banco de capacitores que tiene una potencia del mismo orden que la del reactor, se comportan como si fueran impedancias que varían de forma muy rápida, compensando los cambios en la impedancia de las cargas por cada fase; el banco de capacitores consiste de una serie de filtros sintonizados sobre las corrientes producidas por la carga y el reactor controlado por tiristores.

Los SVC también son capaces de compensar potencia reactiva no deseada. Sin embargo, debido a su elevado costo son usados sólo para grandes cargas (ej. hornos de arco) cuando otras soluciones no son suficientes.

## [ANEXO N° 3] [Herramientas utilizadas]

A continuación se describen las herramientas utilizadas en el presente estudio para el análisis y simulación del Desbalance de Tensión y la Distorsión Armónica.

### **A.3.1 *Power Factory* de DIGSILENT**

El programa *Power Factory* es un paquete integrado para el análisis de sistemas de potencia con capacidad para modelar una gran cantidad de elementos. Este programa basado en plataforma Windows, es una herramienta para simulación de sistemas de potencia avanzada, integrada y totalmente interactiva, que facilita el estudio de los sistemas eléctricos por medio de las siguientes funciones:

1. Flujo de carga AC/DC
2. Análisis de cortocircuito IEC, VDE, y ANSI
3. Análisis de fallas y eventos
4. Reducciones de Red de estado estacionario
5. Transitorios electromagnéticos
6. Análisis de valores propios y Reducción de modelos de red
7. Simulación dinámica de sistemas (electromecánicos)
8. Coordinación automática de protecciones
9. Análisis de armónicos
10. Análisis de confiabilidad
11. Representación del sistema semi-geográfica
12. Interfaz con sistemas SCADA
13. Análisis y diseño de controles

Este programa es utilizado para el análisis de redes eléctricas con el fin de optimizar la operación y alcanzar los objetivos de planeamiento eléctrico y energético. Los

resultados obtenidos son continuamente actualizados por el gran dinamismo de su desarrollo, ya que ofrece muchas nuevas mejorías, que año a año lo mantienen en una constante evolución a medida que los clientes han ido solicitando nuevas y concretas utilidades.

Las funciones del paquete tienen acceso a una base de datos común bien sea en el formato de archivo de caracteres ampliado (ANSII) o el formato propio de la base de datos con un sistema de administración integrada de casos.

Entre las características especiales que posee el programa *Power Factory* con respecto a otros paquetes de simulación se tienen:

- Gráficos de subestación y diagramas unifilares de capas y ventanas múltiples totalmente integrados.
- Generación automática de subestaciones de acuerdo con las configuraciones básicas, las cuales pueden ser editadas de acuerdo con las necesidades específicas del usuario.
- Redes compuestas generales para áreas definidas, regiones de suministro, trenes, tableros de maniobra, etc., incluyendo funciones para edición de copia y empaste.
- Sistema de administración de casos de estudio.
- Modelos de red con descripciones físicas basadas en los dispositivos y previsiones de interfaces generales de usuario para la definición de los modelos del usuario.
- Salida de datos gráfica y tabular ampliada, diseñada para propósitos de reportes y documentación. Como complemento, el usuario puede diseñar sus propios reportes.
- Utilidades para el cálculo de parámetros (Líneas aéreas, cables, máquinas, etc.).
- Librería de modelos para relés y elementos dinámicos, con previsiones para modelos y macros definidos por el usuario.
- Caja de herramientas de control para el diseño de controles y la optimización.

- Operación bajo ambiente Windows, en modo interactivo, por lotes o en modo mixto, permitiendo que se puedan exportar datos a varios programas comerciales.
- Sistema de ventanas moderno, con administrador de base de datos incluyendo listas en árbol y funcionalidad de búsqueda, ventana de salida móvil, etc.

En cuanto al análisis de armónicos el programa *Power Factory* se puede aplicar tanto para sistemas de Transmisión, Distribución o Industriales, para el control de rizo, simulación de señales para la determinación de las frecuencias naturales de resonancia del sistema y para el diseño de filtros. En este sentido el programa tiene una función especial para el dimensionamiento de todo tipo de filtros; el cual reporta todos los valores relevantes (tensiones, potencia, etc.) de los filtros presentes en la red.

Para analizar el impacto de los armónicos en los sistemas de potencia, *Power Factory* provee dos funciones básicas:

### ***Flujo de Carga Armónico***

El Flujo de Carga Armónico en *Power Factory* permite el cálculo de distribuciones de corriente y tensión armónicas basado en las fuentes de armónicas definidas y en las características de la red. También permite modelar fuentes de tensión o corriente armónicas, en magnitud y ángulo de fase, incluyendo interarmónicos. Las fuentes de armónicos pueden estar localizadas en cualquier barra del sistema y pueden ser implementadas con cualquier topología de red.

El programa permite el cálculo de índices armónicos simétricos y asimétricos para tensión y corriente, tales como THD, pérdidas causadas por armónicos, potencia activa y reactiva a cualquier frecuencia, etc. Por otro lado los resultados pueden expresarse de manera gráfica mediante histogramas y formas de onda.



### ***Barrido en Frecuencia***

El Barrido en Frecuencia realiza un análisis continuo en el dominio de la frecuencia, la aplicación más común es el cálculo de impedancias mutuas o propias en la red para identificar diferentes puntos de resonancia. El programa *Power Factory* permite realizar este tipo de estudio para sistemas balanceados (secuencia positiva) o para el modelo completo trifásico de la red (secuencias negativa y cero).

*Power Factory* es a la vez un paquete para el análisis de sistemas de potencia en gran escala y una herramienta poderosa de uso diario para resolver problemas de ingeniería eléctrica de rutina.

Como complemento a las anteriores características, CVG EDELCA posee una base de datos completa del Sistema Interconectado Venezolano, que simplifica en gran medida el modelado de las diferentes partes del sistema.

Para ejecutar la versión 13.1.253 del programa *Power Factory* en ambiente MS-Windows, los requerimientos mínimos de hardware serán los siguientes:

- PC con procesador Pentium IV
- 256MB de memoria RAM
- Disco duro (50MB de espacio libre)
- Monitor SVGA.

### **A.3.2 Alternative Transient Program (*ATP*)**

El *ATP* es un programa de cálculo usado para la simulación de fenómenos transitorios electromagnéticos y electromecánicos en los sistemas eléctricos de potencia. Aunque debido a su gran versatilidad, también es posible simular y calcular otros fenómenos.

Los componentes que pueden representarse son:

- Elementos R-L-C de parámetros concentrados, acoplados o desacoplados.
- Resistencias e inductancias no lineales, resistencias variantes en el tiempo.
- Switches
- Válvulas (diodos, tiristores, triacs).
- Fuentes tipo rampa, DC, sinusoidales, exponenciales,
- Máquinas rotativas (generadores, motores)
- Componentes definidos por el usuario, bien sea mediante el lenguaje interno de programación MODELS, o TACS.

Para obtener los resultados de una simulación, generalmente se necesitan tres pasos, para cada uno de los cuales existen en la actualidad varios programas, o distintas versiones de un mismo programa. Tal y como fue utilizado en el presente trabajo, los programas serían:

1. *ATP*, para procesar el archivo de entrada y obtener las variables de respuesta requeridas por el usuario
2. *ATPDraw*, para la creación y edición de archivos de entrada mediante la representación gráfica de la red eléctrica
3. *TOP* (The Output Processor), para la transformación y representación de forma gráfica de los resultados obtenidos en las simulaciones.

Los principios básicos de operación del programa *ATP* son:

- Básicamente, la regla trapezoidal de integración es usada para resolver las ecuaciones diferenciales de los componentes del sistema en el dominio del tiempo.
- Condiciones iniciales distintas de cero pueden determinarse automáticamente o pueden ser introducidas por el usuario.

- Capacidad de interfaz con los módulos TACS (Transient Analysis of Control Systems) y MODELS (lenguaje de simulación) permite el modelado de sistemas de control y componentes con características no lineales.
- Perturbaciones simétricas y asimétricas son permitidas, tales como fallas, operaciones de switcheo, conmutación de diodos, etc.
- Cálculo de la respuesta en frecuencia de redes eléctricas mediante el uso de las herramientas:

**FREQUENCY SCAN (FS):** Esta herramienta permite la repetición de las soluciones de los fasores en estado estable para un rango de frecuencias y un paso de integración asignados por el usuario. Se obtendrán cantidades dependientes de la frecuencia como salida del sistema.

**HARMONIC FREQUENCY SCAN (HFS):** HFS es un complemento del FREQUENCY SCAN (FS). En ambos se lleva a cabo una repetición de soluciones para los fasores en estado estable; pero la diferencia principal radica en el hecho de que en FS se resuelve la red incrementando la frecuencia de las fuentes presentes en el sistema por cada paso de integración, pero no su amplitud o ángulo de fase; mientras que en el HFS las fuentes tienen una amplitud y ángulo de fase introducidos por el usuario para cada frecuencia de interés.

Los modelos desarrollados en *ATP* para el análisis en el dominio de la frecuencia son:

- Elementos R-L-C dependientes de la frecuencia.
- Carga dependiente de la frecuencia, basada en el modelo CIGRE tipo C.
- Fuentes de tensión/corriente armónicas con amplitud y ángulo de fase dependientes de la frecuencia.

*ATPDraw* es un editor gráfico que funciona en entorno Windows y dispone de una lista muy completa de los componentes necesarios para representar un sistema

eléctrico en código ATP. El usuario debe escoger los íconos de los elementos que forman el sistema en estudio y especificar los parámetros de cada uno.

**TOP (The Output Processor)** es un programa desarrollado en entorno Windows que lee datos en una gran variedad de formatos y los transforma en datos. Las prestaciones de este programa permiten que un usuario:

- Maneje datos de varios tipos de fuentes.
- Visualice los datos en forma de tablas y gráficos.
- Presente oscilogramas en varias ventanas simultáneamente.
- Realice operaciones matemáticas con los datos leídos por el programa mediante la opción “TopCalc”.
- Exporte los datos en pantalla a diversos formatos.

Este programa puede ser empleado como postprocesador gráfico y también sirve para realizar otras tareas como el análisis armónico de Fourier o el cálculo de ciertos índices de calidad de servicio, como son, la distorsión armónica total (THD), el factor de desbalance de tensión, etc.

En cuanto a los requerimientos de hardware, puede decirse que el programa *ATP* está disponible para la mayoría de PCS basados en plataformas Intel bajo sistema operativo DOS, Windows 3.1/9x/NT/XP, OS/2, Linux y para otras computadoras también (por ejemplo Digital Unix y VMS, Apple, etc.). Un PC con procesador Pentium, 128MB de memoria RAM, disco duro (20MB de espacio libre) y monitor VGA será una configuración suficiente para ejecutar la herramienta *ATP* bajo ambiente MS-Windows.

### A.3.3 Comparación entre parámetros de entrada en *Power Factory* y *ATPDraw*

En esta sección se muestran las figuras correspondientes a las ventanas de introducción de datos en los programas *Power Factory* y *ATPDraw* para los componentes utilizados en las diferentes simulaciones.

#### Líneas de Transmisión

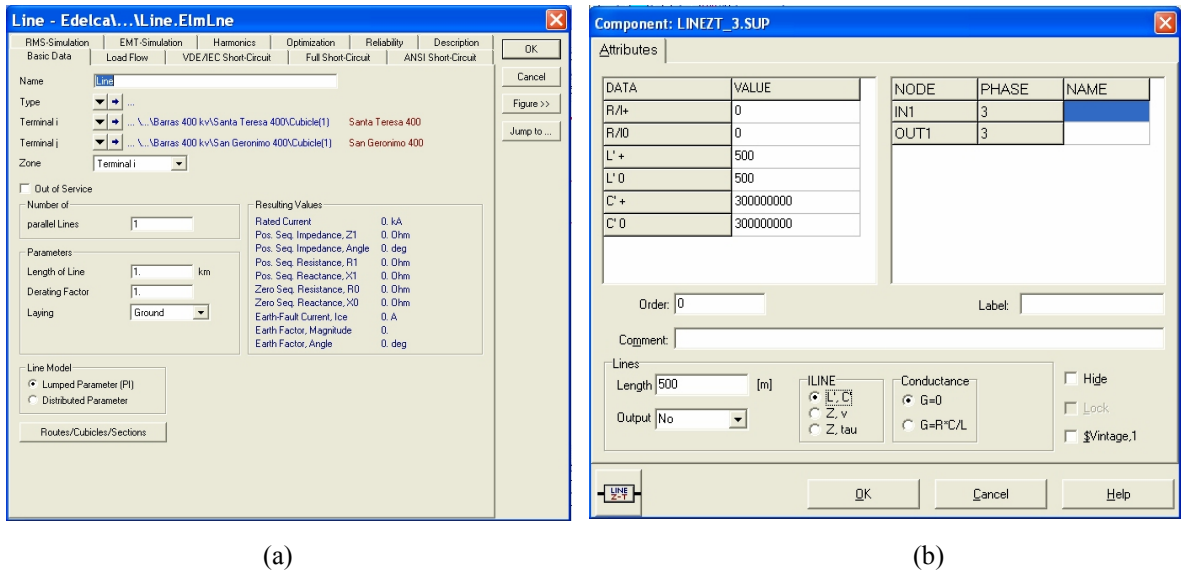


Figura A.3.1 Parámetros de entrada básicos para líneas de transmisión en a) *Power Factory* y b) *ATPDraw*

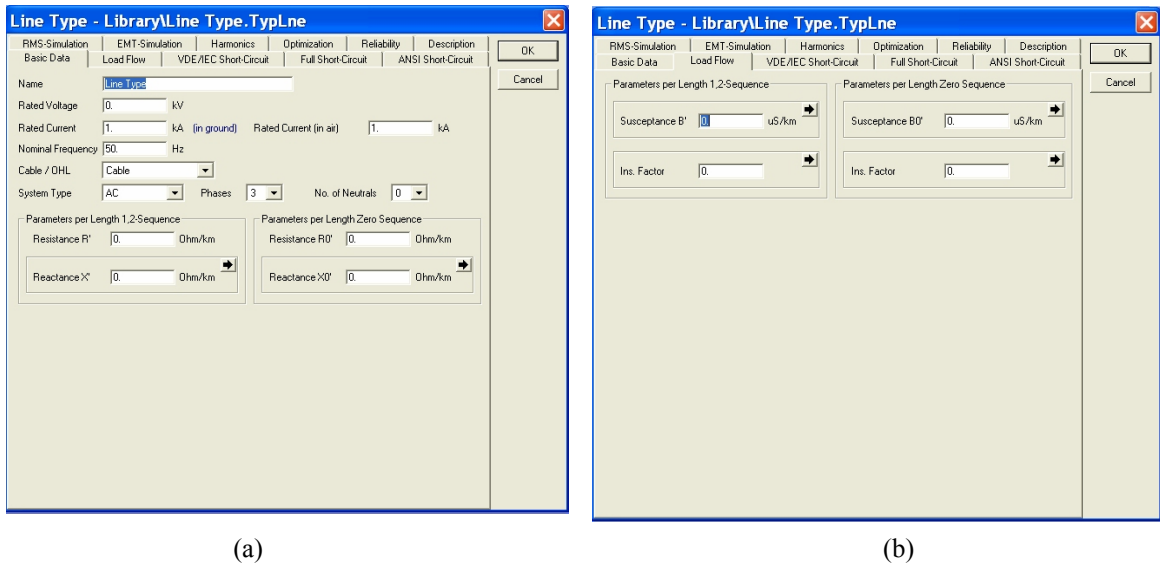
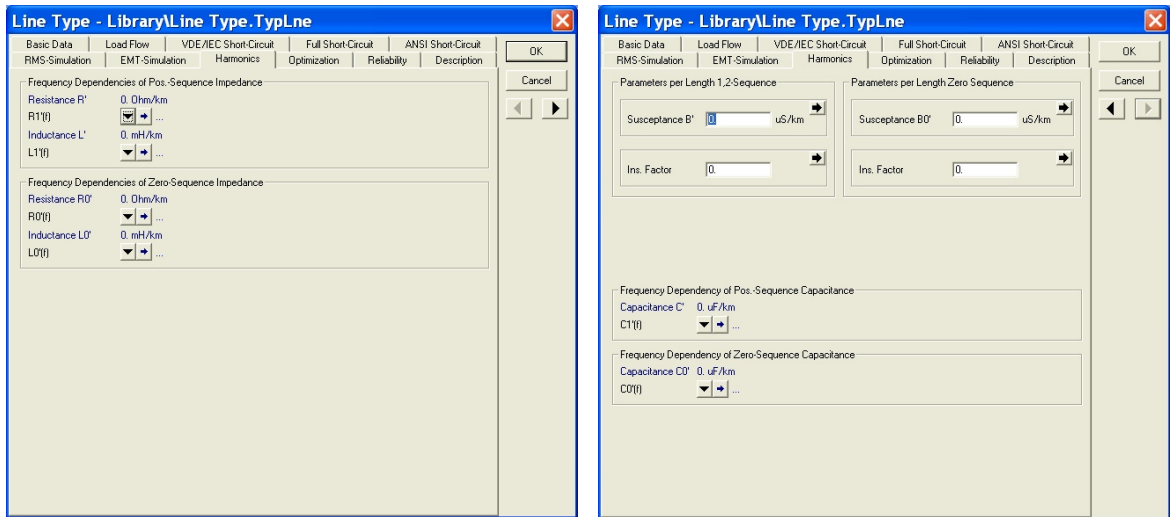
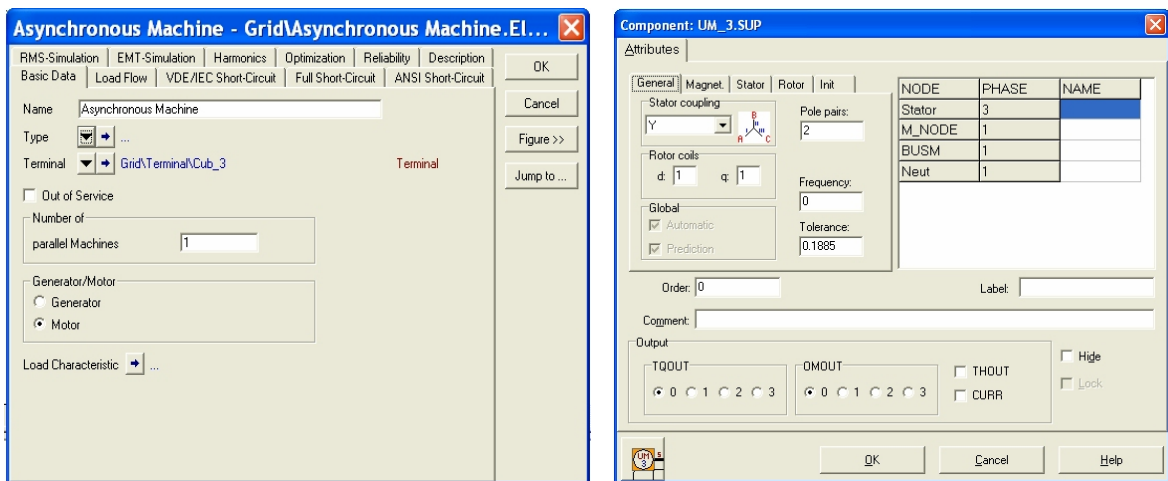


Figura A.3.2 Datos requeridos por el programa *Power Factory* dependiendo del tipo de Línea de Transmisión a) Básicos y para estudios de b) Flujo de Carga



**Figura A.3.3** Datos requeridos por el programa Power Factory para definir el comportamiento de líneas de Transmisión en estudios de armónicos

## Motores de Inducción



(a)

(b)

**Figura A.3.4** Parámetros de entrada básicos para Máquinas de Inducción en a) Power Factory y b) ATPDraw

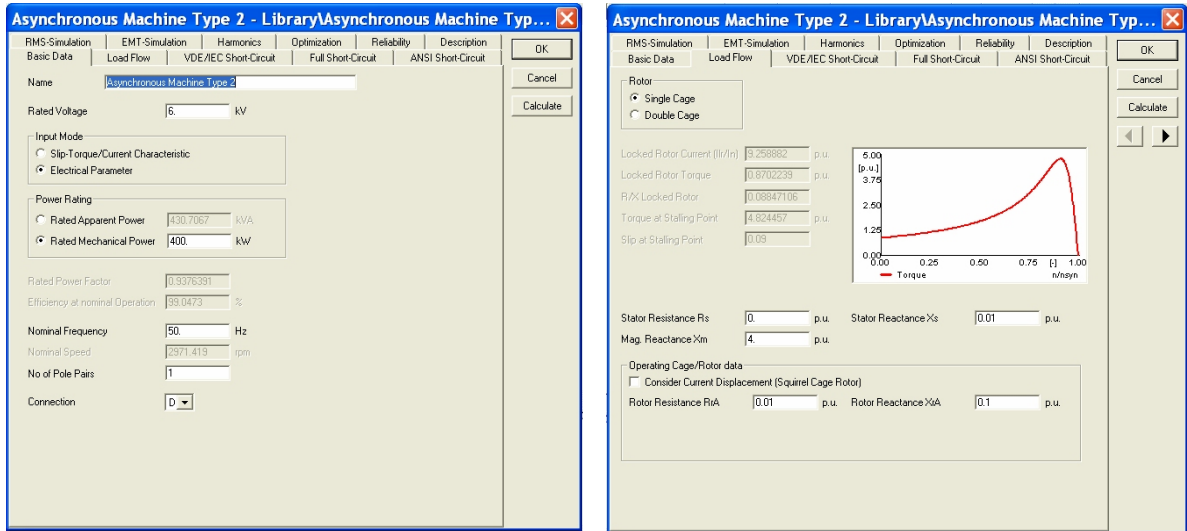


Figura A.3.5 Datos requeridos por el programa Power Factory dependiendo del tipo de Máquina asincrónica a) Básicos y para estudios de b) Flujo de Carga

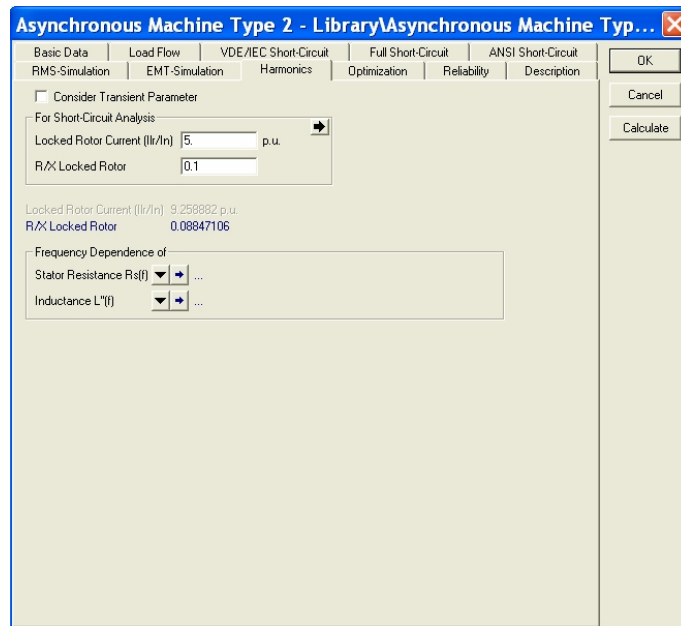


Figura A.3.6 Datos requeridos por el programa Power Factory para definir el comportamiento de Máquinas de Inducción en estudios de armónicos

## Transformadores, Autotransformadores

**2-Winding Transformer - Grid\2-Winding Transformer.ElmTr2**

RMS-Simulation | EMT-Simulation | Harmonics | Optimization | Reliability | Description  
Basic Data | Load Flow | VDE/IEC Short-Circuit | Full Short-Circuit | ANSI Short-Circuit

Name: 2-Winding Transformer

Type: ...

HV-Side: Grid\Terminal\Cub\_1 Terminal

LV-Side: Grid\Terminal(1)\Cub\_1 Terminal(1)

Zone: HV-Side

Out of Service

Number of parallel Transformers: 1

Rating Factor: 1. Rated Power: 0. MVA

Auto Transformer

Grounding Impedance, HV Side: Star Point: grounded, Re: 0 Ohm, Xe: 0 Ohm

Grounding Impedance, LV Side: Star Point: grounded, Re: 0 Ohm, Xe: 0 Ohm

**BCTRAN**

Structure: Number of phases: 3, Number of windings: 3, Type of core: Shell core, Test frequency [Hz]: 50,  AR Output

Ratings: HV, LV, TV  
L-L voltage [kV]: 320, 145, 12.5  
Power [MVA]: 200, 200, 10  
Connections: A, A, A  
Phase shift [deg]: 0, 0

Ext. neutral connections

Factory tests: Open circuit | Short circuit

Zero sequence data available

**positive sequence**

	Imp. (%)	Pow. (MVA)	Loss (kW)
HV-LV	6.2	200	25.6
HV-TV	0	0	0
LV-TV	0	0	0

Order: 0 Label: Factory test data  Hide

Comment:

OK Cancel Import Save As Run ATP View + Copy + Help

**Figura A.3.7** *Parámetros de entrada básicos para Transformadores de dos arrollados en a) Power Factory y b) ATPDraw*

**2-Winding Transformer Type - Library\2-Winding Transformer Typ...**

RMS-Simulation | EMT-Simulation | Harmonics | Optimization | Reliability | Description  
Basic Data | Load Flow | VDE/IEC Short-Circuit | Full Short-Circuit | ANSI Short-Circuit

Name: 2-Winding Transformer Type

Technology: Three Phase Transformer

Rated Power: 1. MVA

Nominal Frequency: 50. Hz

Rated Voltage: HV-Side: 6. kV, LV-Side: 6. kV

Vector Group: HV-Side: YN, LV-Side: YN

Phase Shift: 0 \*30deg

Name: YNyn0

Positive Sequence Impedance: Short-Circuit Voltage uk: 3. %, Copper Losses: 0. kW

Zero Sequ. Impedance, Short-Circuit Voltage: Absolute uk0: 3. %, Resistive Part uk0: 0. %

**2-Winding Transformer Type - Library\2-Winding Transformer Typ...**

RMS-Simulation | EMT-Simulation | Harmonics | Optimization | Reliability | Description  
Basic Data | Load Flow | VDE/IEC Short-Circuit | Full Short-Circuit | ANSI Short-Circuit

Tap Changer: at Side: HV, Additional Voltage per Tap: 0. %, Phase of du: 0. deg, Neutral Position: 0, Minimum Position: 0, Maximum Position: 0

Magnetizing Impedance: No Load Current: 0. %, No Load Losses: 0. kW

Zero Sequence Magnetizing Reactance: Mag. reac. / uk0: 100.

Distribution of Zero Sequ. Leakage-Impedances: z, Zero Sequ. HV-Side: 0.9, z, Zero Sequ. LV-Side: 0.1

Tap dependent impedance

**Figura A.3.8** *Datos requeridos por el programa Power Factory dependiendo del tipo de Transformador de dos arrollados a) Básicos y para estudios de b) Flujo de Carga*



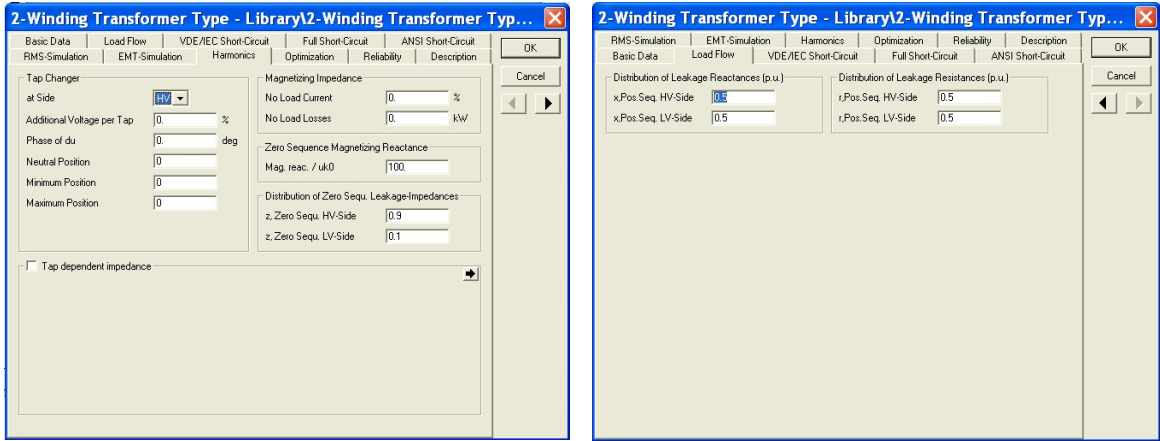
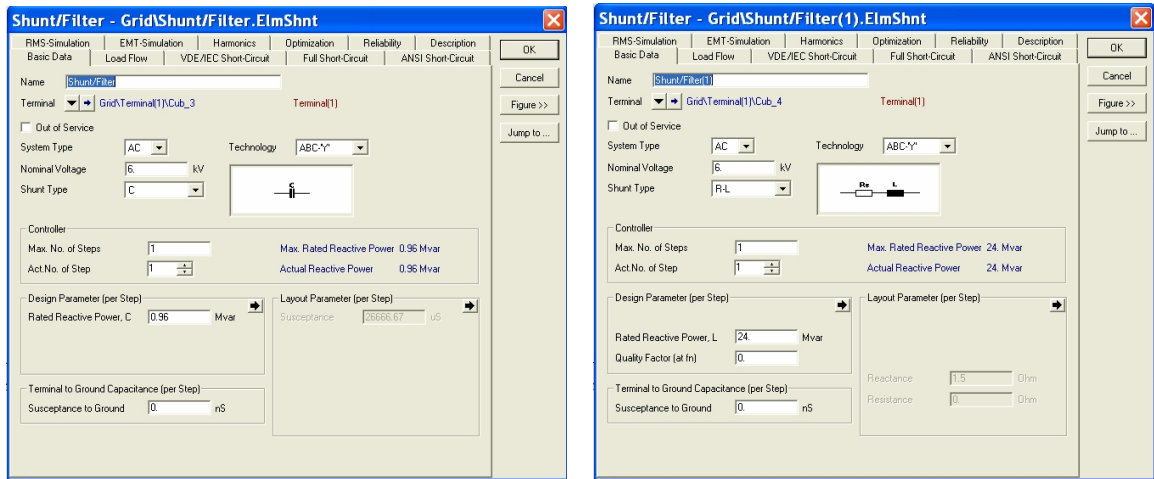


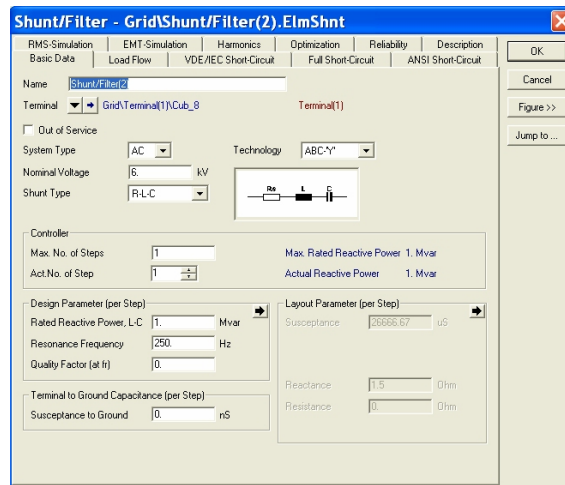
Figura A.3.9 Datos requeridos por el programa Power Factory para definir el comportamiento de Transformadores de dos arrollados en estudios de armónicos

### Filtros y baterías de Condensadores



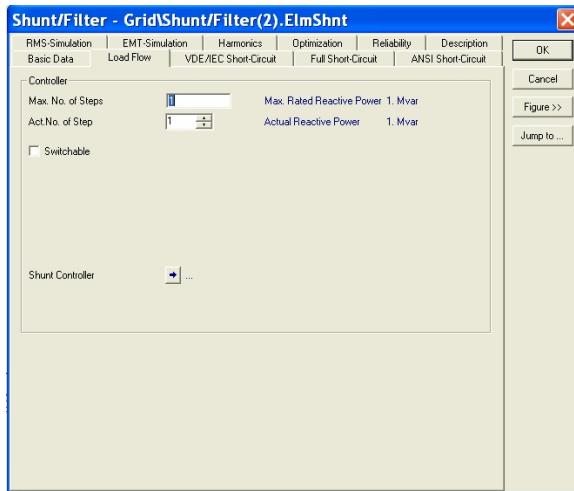
(a)

(b)

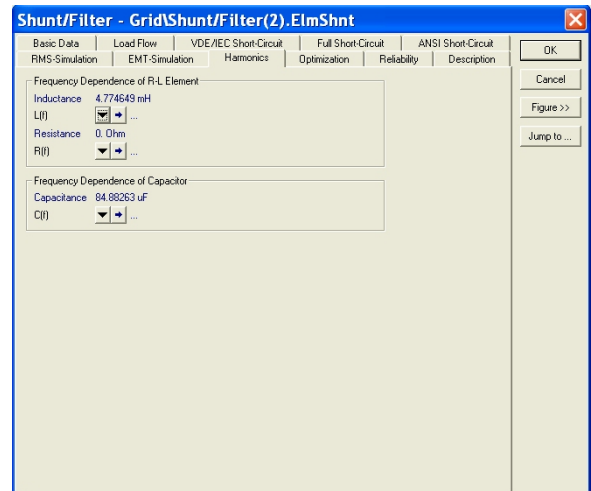


(c)

Figura A.3.10 Parámetros de entrada básicos para elementos compensadores de los tipos a) C, b) R-L y c) R-L-C en el programa Power Factory



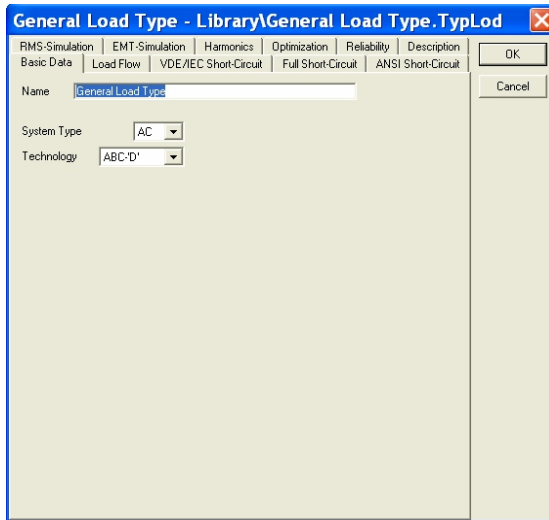
(a)



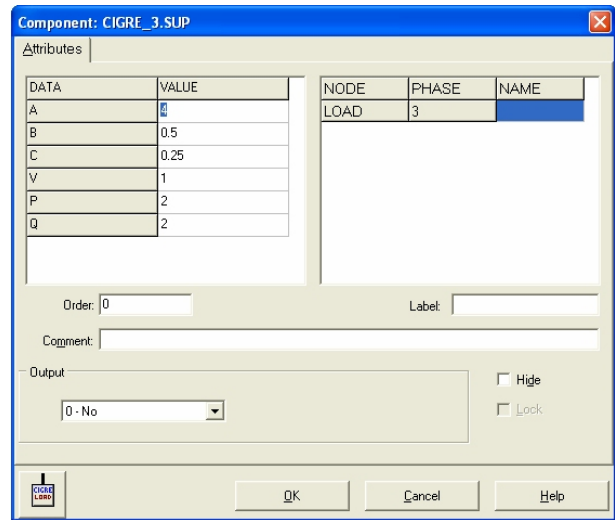
(b)

**Figura A.3.11** Datos requeridos por el programa Power Factory para representar elementos compensadores para estudios de a) Flujo de Carga y b) Armónicos

## Modelo de Carga Lineal

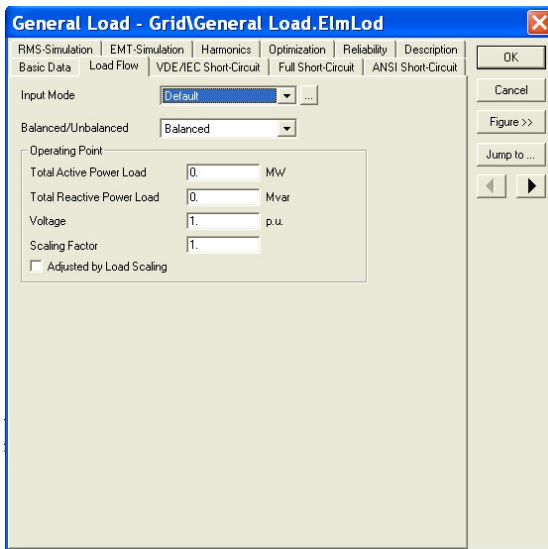


(a)

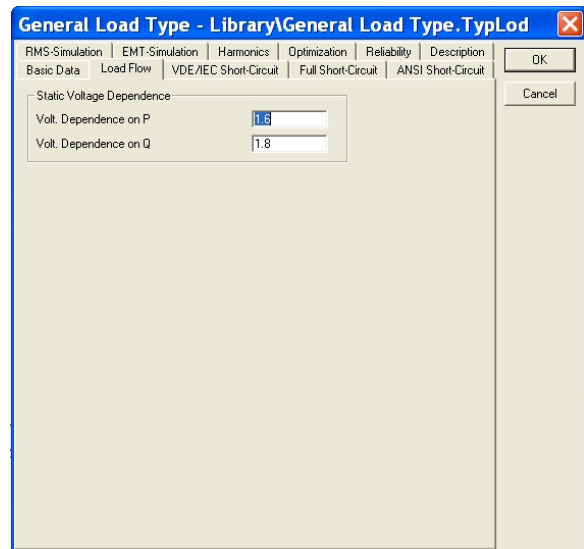


(b)

**Figura A.3.12** Parámetros de entrada básicos para el modelo de Carga en a) Power Factory y b) ATPDraw (modelo CIGRÉ)

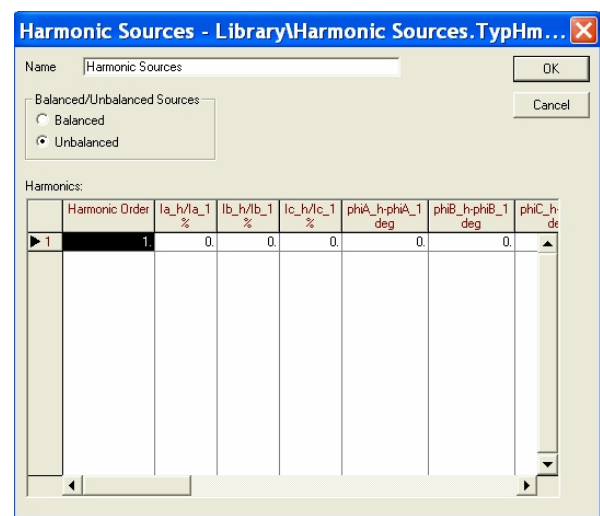
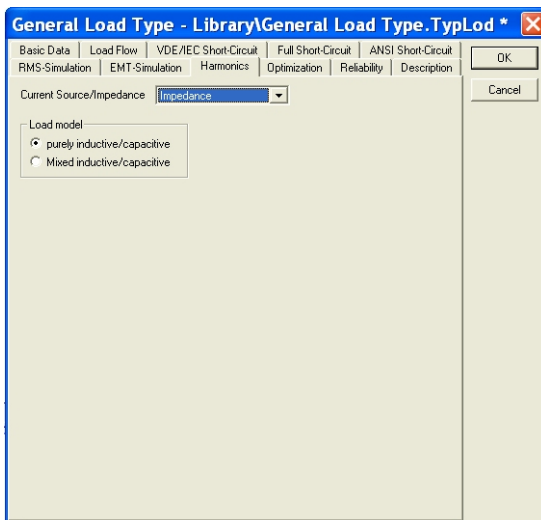


(a)



(b)

**Figura A.3.13** *Parámetros de entrada en Power Factory para el modelo de carga general a) independientemente del tipo y b) para el tipo general del modelo de Carga*



**Figura A.3.14** *Parámetros de entrada básicos para el análisis de armónicos para el modelo de Carga General en Power Factory*

## Modelo del Rectificador/Inversor

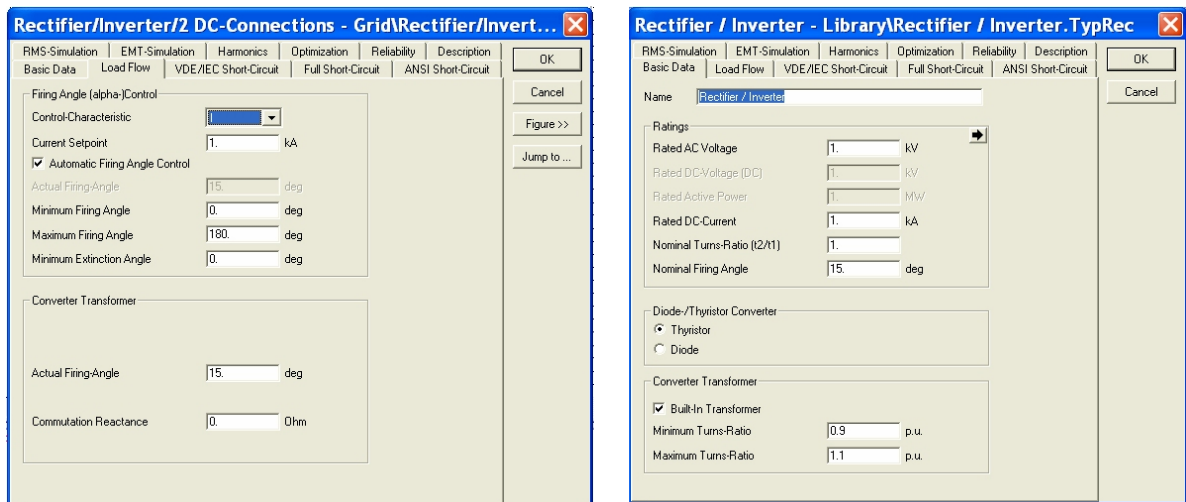


Figura A.3.15 Parámetros de entrada básicos para el modelo de Carga en a) Power Factory y b) ATPDraw (modelo CIGRÉ)

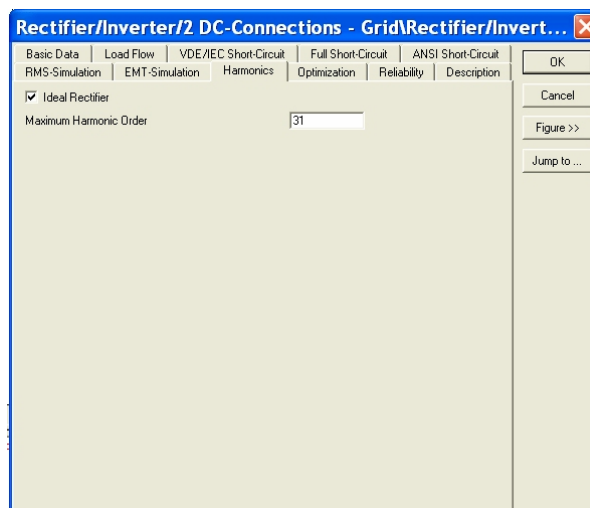
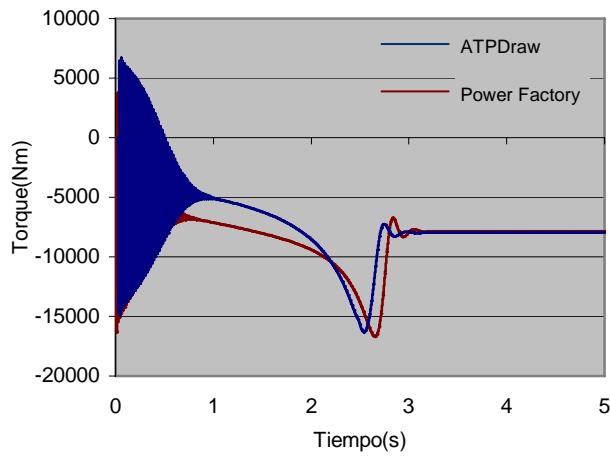
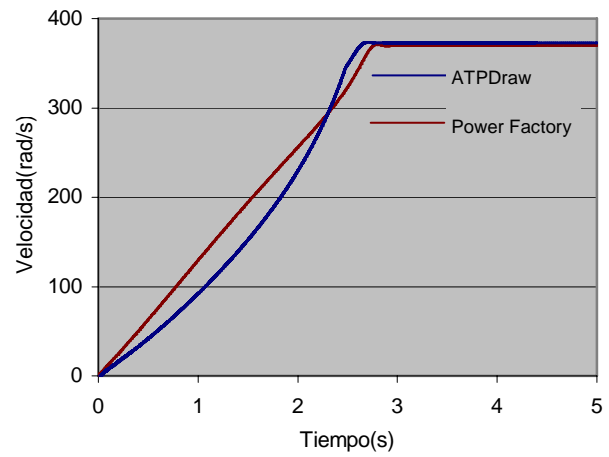


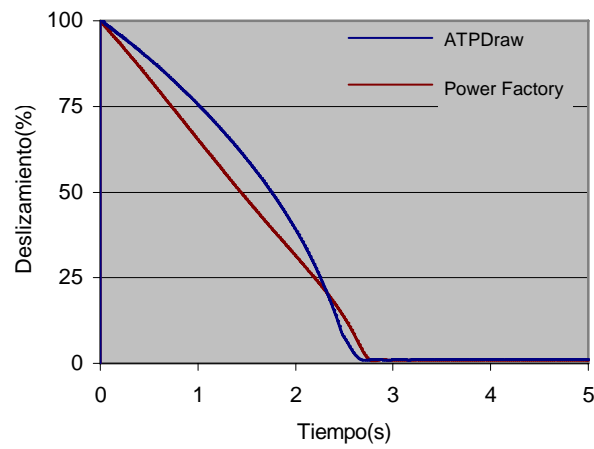
Figura A.3.16 Parámetros de entrada básicos para el modelo de Carga en a) Power Factory y b) ATPDraw (modelo CIGRÉ)



**Figura A.4.34** *Comparación del Torque Electromecánico en ambas herramientas*



**Figura A.4.35** *Comparación de la velocidad del motor en ambas herramientas*



**Figura A.4.36** *Gráfica comparativa del deslizamiento en ambas herramientas*