



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISCUSIÓN SOBRE MÉTODO PARA DETERMINAR
DIRECCIONABILIDAD DE ARMÓNICAS**

Lester Guillermo Morales Ruiz

Asesorado por el Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, agosto de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISCUSIÓN SOBRE MÉTODO PARA DETERMINAR
DIRECCIONABILIDAD DE ARMÓNICAS**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

LESTER GUILLERMO MORALES RUIZ

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISCUSIÓN SOBRE MÉTODO PARA DETERMINAR
DIRECCIONABILIDAD DE ARMÓNICAS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha febrero de 2006.


Lester Guillermo Morales Ruiz

Guatemala, 12 de Junio de 2007

Ing. Renato Escobedo
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS

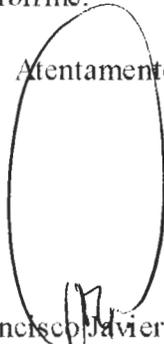
Estimado Ing. Renato Escobedo.

Por medio de la presente, envío a usted trabajo de graduación, titulado **“DISCUSIÓN SOBRE MÉTODO PARA DETERMINAR DIRECCIONABILIDAD DE ARMÓNICAS”**. Este trabajo fue desarrollado por el estudiante universitario **LESTER GUILLERMO MORALES RUIZ**.

Por lo que, habiendo cumplido satisfactoriamente con los objetivos y los requisitos de ley bajo mi asesoría solicito darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,



Ing. Francisco Javier González.
COORDINADOR DE ELECTROTECNIA



Guatemala, 13 de junio 2007.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**DISCUSIÓN SOBRE MÉTODO PARA DETERMINAR
DIRECCIONABILIDAD DE ARMÓNICAS**, desarrollado por el
estudiante; Lester Guillermo Morales Ruiz, por considerar que cumple
con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Área de Electrotécnica

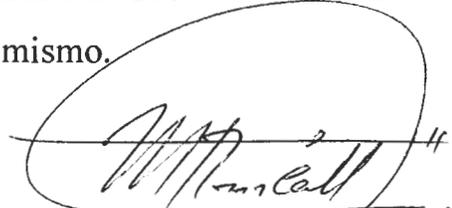
FJGL/sro





FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de Graduación del estudiante; Lester Guillermo Morales Ruiz titulado: **DISCUSIÓN SOBRE MÉTODO PARA DETERMINAR DIRECCIONALIDAD DE ARMÓNICAS**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
DIRECTOR

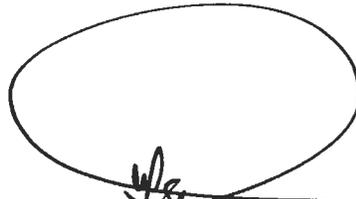


GUATEMALA, 19 DE JULIO 2,007.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISCUSIÓN SOBRE MÉTODO PARA DETERMINAR DIRECCIONABILIDAD DE ARMÓNICAS**, presentado por el estudiante universitario **Lester Guillermo Morales Ruiz**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, agosto de 2007



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por concederme la vida y porque siempre ha guiado mis pasos y ha llenado mi vida de bendiciones. Sin Él nada habría sido posible.
Mis padres	Juan José y Silvia, que creyeron siempre en mí esforzándose para darme siempre lo mejor, sacrificándose de forma incondicional.
Mi esposa e hija	Alejandra y Sara, por su apoyo y comprensión.
Mis abuelos	Que con su ejemplo y sabios consejos me alentaron a salir adelante.
Ing. Francisco González	Por su motivación y asesoramiento a lo largo de mi trabajo.
Mis compañeros	Que por su amistad hicieron más amena mi estadía en las aulas de clase, donde nos formamos académicamente.
La Facultad de Ingeniería	Casa de pensamientos y análisis, que me formó como un profesional capaz de contribuir para una Guatemala mejor.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
JUSTIFICACIÓN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. INTRODUCCIÓN A LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LAS SEÑALES DE CORRIENTE Y VOLTAJE.....	1
1.1 Reseña histórica.....	1
1.2 Distorsiones en las ondas de tensión y corriente.....	2
1.3 Analizando el direccionamiento armónico porcentualmente.....	4
1.4 Relación del ángulo de fase y el direccionamiento armónico.....	5
2. LEYES ESTABLECIDAS RELACIONADAS A LA DISTORSIÓN DE CORRIENTE Y TENSIÓN.....	7
2.1 Normas técnicas y de calidad del servicio de transporte y sanciones.....	7
2.2 Tablas IEC 61000-3-4.....	9
2.3 Normas IEEE 519.....	12

3. MÉTODO DEL DIRECCIONAMIENTO ARMÓNICO BASADO EN EL TEOREMA DE SUPERPOSICIÓN.....	15
3.1 Análisis del método de determinación del direccionamiento armónico utilizando el teorema de la superposición.....	15
3.1.1 Criterio para el direccionamiento.....	17
3.1.1.1 Descomposición en Series de Fourier.....	18
3.1.1.2 Comprobación del método aplicando el teorema de superposición.....	19
3.1.2 Considerando la red como un circuito equivalente para el método del direccionamiento armónico aplicando el Teorema de Norton.....	24
3.1.3 Usando el Teorema de Thevenin y comparando índices de voltaje.....	29
3.1.3.1 Comprobación de índices de Voltaje.....	33
3.1.4 Limitaciones del método de superposición.....	35
3.1.4.1 Análisis matemático.....	37
3.2 Caso de estudio.....	40
4. MÉTODO DE CONMUTACIÓN APLICANDO LA IMPEDANCIA CRÍTICA.....	47
4.1 Aplicando el método de impedancia crítica.....	47
4.2 Convirtiendo el cambio de impedancia en una fuente de corriente equivalente.....	52
4.3 Caso de estudio cuando la impedancia del distribuidor o del consumidor varía	54

5. CÓMO SE DETERMINA EL DORECCIONAMIENTO ARMÓNICO EN ALGUNOS EQUIPOS DE CALIDAD DE ENERGÍA	65
5.1 Presentación de datos de dirección en los equipos de monitoreo.....	66
5.2 Errores potenciales.....	68
5.3 Uso de transductores para adquisición de datos.....	70
5.4 Muestreo de tasa para adquisición de datos.....	70
CONCLUSIONES.....	73
REFERENCIAS.....	75
BIBLIOGRAFÍA.....	77
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.....	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Representación gráfica del punto PCC.....	17
2. Circuito RLC en serie.....	20
3. Circuito con carga no lineal en paralelo.....	21
4. Representación de las cargas unidas en e punto PCC.....	24
5. Circuito equivalente de Norton del punto PCC.....	25
6. Circuito equivalente de Norton del punto PCC aplicando el teorema de superposición.....	26
7. Diagrama fasorial de las corrientes armónicas en el punto PCC cuando las corrientes se suman.....	27
8. Diagrama fasorial de las corrientes armónicas en el punto PCC cuando las corrientes se cancelan.....	28
9. Diagrama del circuito equivalente de Norton.....	30
10. Diagrama del circuito equivalente de Thevenin.....	31
11. Diagrama del circuito equivalente de Thevenin aplicando el teorema de superposición.....	32
12. Circuito equivalente de Thevenin visto de cada fuente aplicando el teorema de superposición.....	33

13. Comparación de corrientes y potencia armónica contra el ángulo de fase I_c	36
14. Diagrama del circuito equivalente de Norton para análisis matemático con fuentes de corriente de diferente dirección.....	38
15. Diagrama de circuito equivalente de Norton para análisis matemático con fuentes de corriente con la misma dirección.....	39
16. Diagrama de circuito equivalente de Norton para caso de estudio.....	41
17. Diagrama del circuito Norton con conmutador.....	47
18. Ejemplo de sistema de potencia.....	49
19. Conversión de cambio de impedancia a cambio de fuente de corriente.....	52
20. Circuito de caso de estudio de impedancia crítica.....	54
21. Comportamiento de las corrientes en el punto PCC respecto a las variaciones de la impedancia del distribuidor.....	58
22. Comportamiento de las corrientes en el punto PCC con respecto a las variaciones de la impedancia del consumidor.....	63
23. Captura de trasientes.....	67
24. Conexión de transformadores de corriente.....	69

TABLAS

I. Valores límites de emisión normados IEC.....	11
II. Valores límites de emisión de equipos monofásicos o trifásicos desequilibrados normados IEC.....	11
III. Valores límites de emisión de equipos trifásicos equilibrados normados IEC.....	12
IV. Valores límites de distorsión de corriente normas IEEE.....	13
V. Resultado de caso de estudio para corrientes que se cancelan al variar I_c	42
VI. Resultado de caso de estudio para corrientes que se suman al variar I_c	43
VII. Resultado de caso de estudio para corrientes que se cancelan al variar I_u	44
VIII. Resultado de caso de estudio para corrientes que se suman al variar I_u	44
IX. Pruebas realizadas de conmutación para encontrar I_c , Z_c , I_u y Z_u	50
X. Resultados variando la impedancia del distribuidor al cancelarse las corrientes.....	56
XI. Resultados variando la impedancia del distribuidor al sumarse las corrientes.....	57
XII. Resultados variando la impedancia del consumidor al cancelarse las corrientes.....	60
XIII. Resultados variando la impedancia del consumidor al sumarse las corrientes.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS

MVA	Mega Volt Ampere.
p.u.	Valores por unidad.
S	Potencia aparente.
U	Tensión.
Z	Impedancia.
I	Corriente.
P	Potencia activa.
THD%	Distorsión armónica total.
R	Resistencia
PCC	Punto de acople común
P_h	Potencia armónica
θ_h	Ángulo de fase entre voltaje armónico y potencia armónica
Cos (θ_h)	Factor de potencia armónica
R	Resistencia.
L	Inductancia.
C	Capacitancia.
Z_u	Impedancia lado del distribuidor.
Z_c	Impedancia lado del consumidor.
T	Período.

GLOSARIO

Ángulo de fase:	Ángulo que existe entre la medición de la onda de voltaje y la onda de corriente.
Armónicos:	Son distorsiones en las señales de voltaje o de corriente que pueden causar daños en el sistema de Potencia.
Corriente eléctrica:	El flujo o movimiento de partículas cargadas. En unidades del sistema internacional se mide en amperios (A) la cual es un coulomb por segundo.
Trasformador de corriente:	Dispositivos que tienen la finalidad de convertir una alta intensidad de corriente a un nivel menor con el fin de utilizarlo de referencia para realizar una medición.

Transformados de potencial:	Dispositivos que tienen la finalidad de convertir una alta Tensión de voltaje a un nivel menor con el fin de utilizarlo de referencia para realizar una medición.
Equivalente de Norton:	Es el dual del equivalente de Thévenin donde la red eléctrica se reduce a una fuente de corriente con una impedancia en paralelo.
Equivalente de Thévenin:	Este teorema expresa que un par de Terminales de cualquier red lineal puede ser sustituida por una fuente de voltaje en serie con una resistencia. La fuente de voltaje es igual al voltaje del par Terminal cuando la carga externa se retire. Y que la resistencia es igual a la resistencia calculada en el par de terminales con todas las fuentes independientes desenergizadas.
Factor de potencia:	Representa el coseno del ángulo de fase entre el voltaje y la corriente, el cual nos indica cuanto esta atrasado o adelantado la corriente respecto al voltaje.

Leyes de Kirchoff:	Estas leyes se relacionan con la suma algebraica de los voltajes alrededor de una malla o rama de un circuito es igual a cero y que la suma algebraica de las corrientes que entran a un nodo es igual a la suma de las corrientes que salen de ese nodo.
Punto de acople común PCC:	Es un punto existente donde se acopla el consumidor de energía eléctrica a la red de distribución.
Teorema de superposición:	Se puede considerar las fuentes de voltaje o corriente por separado para analizar la red eléctrica.
Tiristores:	Es un dispositivo semiconductor que utiliza retroalimentación interna para producir un nuevo tipo de conmutación. Su función es el control de grandes corrientes de carga para motores, calentadores y otros.

**Trasformada de
Fourier:**

Consiste en descomponer una onda no senoidal, en una sumatoria de ondas senoidales de diferentes frecuencias, las cuales son múltiplos de una frecuencia fundamental.

Voltaje:

Es la cantidad de energía por unidad de carga.

RESUMEN

Debido al aumento de cargas no lineales en los consumidores conectados a los sistemas de potencia, las cuales provocan una distorsión en la corriente, que se refleja en una distorsión de voltaje que afecta a otros clientes conectados a la red de distribución eléctrica. Una gran interrogante en este campo es la determinación de la fuente de donde provienen las distorsiones, con el fin de buscar una mejor calidad de la energía eléctrica, si es del distribuidor de energía eléctrica o si es del consumidor conectado a la red.

El primer paso para determinar la dirección consiste en descomponer la forma de onda distorsionada, mediante la Serie de Fourier en diferentes ondas senoidales de diferentes frecuencias, múltiplos de la frecuencia fundamental. Una vez conociendo las armónicas, se analiza la armónica del orden que se quiera analizar, viendo la tensión y la intensidad de corriente para esa armónica de orden determinado. De ahí se mide el ángulo de fase entre la corriente armónica y el voltaje armónico. En el ángulo esta la información de la dirección del armónico. Cuando el ángulo de fase esta entre 90 grados y 270 grados se asume que los armónicos viajan desde la carga.

Recordando que la potencia activa es igual al producto de la corriente por el voltaje por el coseno del ángulo entre ellos, de ahí que la potencia armónica P_h nos da también el flujo de potencia armónica siguiendo el criterio de que si $P_h > 0$ el consumidor causa más distorsión y la dirección de los armónicos son desde la carga a la red. Caso contrario si $P_h < 0$ la red nos proporciona más distorsión.

Con el fin de analizar el direccionamiento del flujo armónico o determinar si es el distribuidor o el consumidor que genera más armónico se representa la red eléctrica, a su equivalente de Thevenin o Norton visto desde un punto de conexión común hacia la red y hacia la carga, y en ese punto se realizan las mediciones. Para el análisis del circuito equivalente se utiliza el Teorema de Superposición que consiste en trabajar por separado cada fuente de corriente en el caso del equivalente de Norton o cada fuente de tensión en el caso del equivalente de Thevenin.

El teorema de Superposición tiene la desventaja que no se puede aplicar cuando el ángulo de fase entre la corriente armónica generada por la carga y la corriente armónica generada por la fuente tiene cierto rango. O no es aplicable cuando las impedancias del distribuidor o del consumidor son variables.

Con el fin de conocer qué fuente de armónicos es predominante en el punto de acople común se desarrolló el método de impedancia crítica que es aplicable para impedancias variables. Este se basa en la medición de parámetros en el punto PCC y de ahí calcular los valores de corriente e impedancia tanto para el distribuidor como para el consumidor. O el transformar la variación de impedancia es una variación de la fuente de corriente y tener una impedancia constante de referencia.

Actualmente, los equipos de medición de calidad de energía presentan resultados donde podemos apreciar el direccionamiento armónico, mediante mediciones realizadas por el muestreo de corriente y voltaje de un punto mediante los transformadores de voltaje y transformadores de corriente.

JUSTIFICACIÓN

Con este trabajo se pretende proporcionar una fuente bibliográfica, acerca de los métodos de análisis de las fuentes de distorsión armónica con el fin de observar el comportamiento de las fuentes de armónicas, en un punto común entre el sistema y el cliente. Los métodos proporcionados nos muestran que fuente de armónicos es más predominante, y como viajan en la red. De esa forma se puede determinar la responsabilidad de la distorsión en la red si es del cliente o del distribuidor de energía.

OBJETIVOS

GENERAL:

- Establecer una discusión y descripción de métodos para determinar las contribuciones de armónicos y la dirección en que viajan.

ESPECÍFICOS:

1. Describir las distorsiones armónicas de corriente y tensión
2. Exponer las diferentes normas y estándares utilizados para regular la distorsión armónica.
3. Analizar el método de direccionamiento armónico, utilizando el teorema de superposición
4. Analizar el método de determinar la fuente de armónicos cuando las impedancias varían.
5. Describir cómo se analiza la dirección de armónicos en los equipos de medición.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los equipos consumen una potencia eléctrica, en la cual la tensión y la intensidad se presentan en una onda de 50 o 60 ciclos por segundo (50 o 60 Hz). Con el uso de cierta clase de equipos, que no tienen un consumo lineal, provocan cierta distorsión en la onda de tensión o la onda de intensidad de corriente. Cualquiera de estas ondas, por medio de la aplicación de la transformada de fourier, podemos descomponerla de su forma de onda a una sumatoria de diferentes ondas senoidales, una fundamental de 60 ciclos por segundo, y otras de frecuencias múltiplos de la fundamental, las que llamaremos armónicas, las cuales vamos asignándoles un orden, que lo indica el factor por el cual se multiplica la frecuencia de la onda fundamental para obtener la frecuencia de la onda de distorsión a la que nos referimos.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica establece, de acuerdo a las normas NCTS, que en la distribución se pueden generar distorsiones en la onda de tensión, las cuales el distribuidor de energía es responsable de su control mientras en el caso del consumidor es responsable de velar por no afectar la red con distorsiones de corriente, teniendo los valores de esas distorsiones provocadas por la carga, dentro de un nivel de valores regulados por normas. En síntesis se establece que los distribuidores entregan una onda de tensión con distorsión armónica que puede ser provocada por otros contribuyentes, fluyendo hacia el cliente o consumidor, mientras los consumidores entregan ondas de corriente con distorsión armónica al sistema, la cual puede afectar a otros usuarios.

Desde que los armónicos empezaron a tener consecuencias, tanto en el sistema de potencia como en los usuarios conectados a ella, y buscando una mejor calidad en la energía, se han implementado diferentes métodos que han sido aplicados a equipos analizadores de energía, con el fin de determinar la fuente de armónicos y la dirección en que viajan, si viajan de la carga al sistema o del sistema a la carga. Se han desarrollado métodos para encontrar la fuente de armónicos de cada orden, analizando corriente y tensión armónica.

Los métodos se basan en establecer un circuito equivalente, y analizando desde un punto de acople común entre el sistema y la carga que llamaremos PCC, por sus siglas en inglés *point common couple*. En este punto se mide la corriente y la tensión de cada armónica, y se analiza mediante algún método de direccionamiento armónico. Los métodos varían dependiendo si las impedancias del sistema y del cliente son constantes, si se analiza un circuito equivalente aplicando el Teorema de Norton, representando los armónicos como fuentes de corriente o aplicando el Teorema de Thevenin, representando la contribución armónica como fuentes de tensión.

En este trabajo se presenta un análisis sobre el interés de conocer el direccionamiento armónico y de las normas establecidas ante la distorsión de corriente y de tensión; además se presentan los diferentes Métodos utilizados para determinar la fuente de armónicos y sus limitaciones.

1. INTRODUCCION A LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA SEÑAL DE CORRIENTE Y LA SEÑAL DE VOLTAJE

1.1 Reseña histórica

La problemática de los armónicos tuvo sus orígenes en dos sucesos históricos. Con el embargo del petróleo, el cual condujo a un aumento en el costo de la energía y una necesidad de ahorrar, por lo que los consumidores industriales empezaron a instalar condensadores para el mejoramiento del factor de potencia, reduciendo así la demanda en MVA ya que la porción reactiva ya no era consumida desde la acometida sino que era generada dentro de la industria. Esto provocó el aumento de circuitos resonantes en las redes eléctricas y plantas. Estos circuitos resonantes pueden originar problemas en distorsión de voltaje e interferencia en líneas telefónicas. El circuito resonante en paralelo puede amplificar los niveles de corriente armónica en un punto tal que produzca fallas en los equipos.

Seguidamente el desarrollo de la tecnología, con la llegada de tiristores (familia de semiconductores de cuatro capas de material), desarrollados en la década de los 60, y en los 70 en los principios de electrónica de potencia.

En resumen por los avances de la tecnología, e introducción de elementos electrónicos de potencia, circuitos con semiconductores y cargas no lineales en general, se ha provocado un aumento en la distorsión de la energía eléctrica. Esta distorsión llamada armónicos han afectado la calidad del servicio de potencia, la cual pretende mantener las distorsiones en señales a niveles tolerables.

1.2 Distorsiones en las ondas de tensión y corriente

Los armónicos han sido un problema en los sistemas de potencia trifásica, y crece debido al uso de las cargas no lineales, que aumentan con el mayor crecimiento de la tecnología en equipos que incluyen convertidores electrónicos que toman energía en forma alterna y la convierten en corriente continua. En este proceso la onda de corriente que consume la carga ya no presenta una forma de onda senoidal, sino una onda distorsionada. Esta presencia de armónicos en la red tiende a tener consecuencias como:

- a) Deterioro de la calidad de la onda de tensión, afectando a algunos receptores sensibles.
- a) Empeoramiento de factor de potencia. La capacidad de la red para suministrar potencia se ve limitada por ello.
- b) Sobrecarga de cables y sobre todo de transformadores (aumento muy significativo de las pérdidas en el hierro)

Garantizando un suministro estable se establecieron límites de calidad, que representan los límites de distorsión y pérdidas aceptables, valores que establecen las normas internacionales IEC-EN en Europa e IEEE en Estados Unidos. Más específicamente en el torno Industrial la norma IEC-61000-2-4 que establece los niveles de compatibilidad en plantas industriales para perturbaciones conducidas de baja frecuencia.

Aunque la tensión se presente de una forma de onda senoidal las cargas no lineales provocan una onda de corriente distorsionada, la cual repercute que el punto de consumo se tenga una distorsión de la tensión y por lo tanto los usuarios conectados a la red distorsionada sufren los efectos de los usuarios que generan la distorsión de corriente.

Tenemos dos casos en el problema de la distorsión armónica, el primero la compañía debe de garantizar la calidad de la onda de tensión. Pero el consumo de los usuarios son los que deterioran dicha calidad de onda. Aunque este deterioro depende de los armónicos de corriente provocados por las cargas no lineales del usuario, así como puede ser provocada por la impedancia en el punto de distribución. Por lo que las normas IEC-61000-3-4 e IEEE 519, las cuales limitan la máxima cantidad de armónicos de corriente que un usuario o una instalación pueden absorber en la red, lo hacen en función de la impedancia de la red o un índice de dicha impedancia como lo es la potencia de cortocircuito. Estas medidas de potencia de cortocircuito y los armónicos de corriente se hacen en el punto de conexión a la red pública, denominando el punto PCC. De donde el usuario debe interesarse en limitar distorsiones adicionales que se provocan en su instalación, procurando que la impedancia de su red de distribución sea lo más baja posible. Esta impedancia depende básicamente de la inductancia por metro de las líneas de distribución,

parámetro que es muy degradado si los cables de distintas fases están muy separados entre sí.

1.3 Analizando el direccionamiento armónico porcentualmente

Una forma funcional para determinar si el cliente esta inyectando armónicos al sistema es representar la magnitud relativa de armónicos que esta contribuyendo, como un porcentaje del voltaje y corriente fundamentales. Si el cliente estuviera experimentando una cantidad de armónicos inyectados por el sistema, la magnitud relativa de la corriente armónica sería menor o igual a la magnitud relativa del voltaje. Por ejemplo si el voltaje de la tercera armónica fuera 3.1% del voltaje fundamental y la corriente de la tercera armónica fuera 2.8% de la corriente fundamental, concluiríamos que la corriente armónica es el resultado del voltaje armónico en las líneas del sistema. La carga del cliente tiene una componente reactiva inductiva, la cual provoca que la impedancia sea más grande debido a los armónicos ($X_L = \omega L$ de donde $\omega = 2\pi f$) ya que la reactancia es directamente proporcional a la frecuencia. Por lo que la carga se comporta como un filtro pasa bajo. Por lo que esperaríamos que la corriente armónica sea menor que el voltaje armónico. Si experimentáramos el caso contrario que la magnitud de la corriente armónica fuera mayor que la magnitud de voltaje, la carga del cliente inyectaría armónicos al sistema. Ya que la impedancia de la línea tiende a ser menor que la impedancia de carga.

Aunque este efecto disminuye al aumentar la frecuencia como se menciono anteriormente. Esto se espera que pase en los armónicos más bajos, y es muy posible, por ejemplo una corriente armónica de 22% con el voltaje armónico de 3.9%. Debido a la resonancia, algunos armónicos tienden a tener efectos exagerados

1.4 Relación del ángulo de fase y el direccionamiento armónico

Muchos ingenieros en el campo eléctrico se han encontrado con el dilema de la dirección del flujo de la potencia armónica, si es desde la carga a la fuente, o si es de la fuente a la carga. La práctica más aceptada para determinar la dirección es la de ver el ángulo de fase, o la relación entre el voltaje y corriente para una armónica en particular. Si la carga es puramente resistiva el ángulo es cero o en otras palabras el factor de potencia ($\cos \theta$) es 1. Si la carga es puramente inductiva la corriente atrasa al voltaje expresando el ángulo como $+90^\circ$. Si la carga es capacitiva la corriente adelanta el voltaje en 90° , expresado como -90° . Entonces el factor de potencia será un número de 0 a 1 positivo o negativo dependiendo de la carga. Cuando el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente es mayor a 90 grados, nos indica que la dona de medición usada para un equipo de medición o analizador esta en dirección opuesta al flujo de la corriente. Si la polaridad del transformador de corriente está correcta, y el ángulo de fase entre el voltaje armónico y la corriente armónica es entre 90° y -90° , (270°) asumimos que el flujo armónico es en dirección opuesta al flujo de potencia fundamental, lo que quiere decir que va de la carga a la fuente.

Con el fin de conocer en qué dirección viajaban los armónicos, quién los generaba, si viajaban desde la red o desde el consumidor o quién produce la mayor parte de la contaminación armónica y con el fin de resolver las incógnitas, se han desarrollado métodos que han ido evolucionando con los avances de la ciencia.

Los métodos en general inician con la representación del sistema de potencia en un circuito equivalente representando las fuentes de armónicos como fuentes de corriente si aplicamos el teorema de Norton o como fuente de voltaje si se aplica el teorema de Thevenin. Luego se establece un punto entre la fuente del distribuidor como la del consumidor que representa el punto de acople común PCC, que era donde se medían parámetros para cada armónico con el fin de determinar la fuente de armónicos. Ya que las medidas posibles en PCC eran las de voltaje y corriente, y con el fin de determinar la contribución armónica, en base a las mediciones realizadas en el punto de acople común se empiezan análisis según el método desarrollado.

2. LEYES ESTABLECIDAS RELACIONADAS A LA DISTORSION DE CORRIENTE Y TENSION

2.1 Normas técnicas y de calidad del servicio de transporte y sanciones

En los CRITERIOS NORMAS NTCSTS (Normas técnicas y de calidad del servicio de transporte y sanciones). Realizado por la comisión nacional de energía eléctrica de la república de Guatemala y PROYECTO REGIONAL DE ENERGIA ELECTRICA del istmo Centroamericano. Establecen que las distorsiones en la tensión deben ser veladas por el transportista, mientras que las distorsiones en la corriente deben ser veladas por los usuarios.

En su página 7 expresa:

“Los transportistas deberán controlar los niveles de las armónicas del voltaje en los puntos de suministro a las compañías de distribución y a los grandes usuarios, en los puntos de conexión con las compañías de generación, en las subestaciones y en varias localizaciones de las líneas de transmisión.”

Indicando que el transportista es responsable de mantener la calidad en la onda de voltaje en el punto de conexión ante el usuario. Aunque estas distorsiones en la tensión sean provocadas por otros usuarios, el transportista debe de velar por entregar una buena calidad al resto de usuarios.

Por otra parte en la página diez del mismo documento establece que: “Las cargas no lineales conectadas al sistema de transmisión pueden producir corrientes armónicas que se propagan al sistema de transmisión y causan distorsiones armónicas de voltaje que afectan a otros usuarios.”

Por lo que las distorsiones de corriente en el punto de acople PCC provocadas por cargas no lineales en la red eléctrica del usuario, son responsabilidad del mismo y debe velarse de que estas no entren a la red de distribución afectando a otros usuarios. Propiamente en las normas NTCSTS en el Título IV que habla de la calidad del producto técnico, en el Capítulo III “Distorsión armónica de la tensión” establece en el Artículo 26:

“Control para la distorsión armónica de la tensión. El control de la distorsión armónica de la tensión es responsabilidad del transportista, así como también el desarrollo de las acciones necesarias para dar solución al problema. Durante el período de control se realizarán mediciones en dos puntos de conexión entre el transportista y los participantes, de la siguiente forma: un distribuidor y un gran usuario (o un Generador). Las mediciones deberán ser realizadas de acuerdo con la norma IEC 1000-4-7.”

Y en el Título V Incidencia en la calidad del producto por parte de los participantes, Capítulo II distorsión armónica de la corriente de carga por parte de los participantes. En donde se establece que la empresa transportista debe velar por que los usuarios regulen la cantidad de corrientes armónicas que entregan a la red, con el fin de que estas distorsiones en la corriente afecten a otros usuarios.

2.2 Tablas IEC 61000-3-4

En las tablas se establecen los límites de la norma IEC 61000-3-4 relativos a las corrientes armónicas que pueden consumir instalaciones industriales. En relación a estas tablas deben establecer algunos conceptos:

a. POTENCIA DE CORTOCIRCUITO (S_{sc}):

Es un indicador de la impedancia propia de la red, se define como:

$$S_{sc} = U_{nom}^2 / Z_{cc}$$

b. Potencia nominal del equipo (S_{equ}):

Se calcula de distinta forma según el tipo de carga

$$S_{equ} = U_{fase-N} \cdot I_{equ} \quad \text{Para equipos entre fase y neutro;}$$

$$S_{equ} = U_{fase-fase} \cdot I_{equ} \quad \text{Para equipos entre fase y fase;}$$

$$S_{equ} = \sqrt{3} \cdot U_{fase-fase} \cdot I_{equ} \quad \text{Para equipos trifásicos equilibrados.}$$

c) Relación de cortocircuito R_{sce} :

Es un índice de la carga que supone un equipo para una red. Se define como:

$$R_{sce} = S_{sc} / 3S_{equ} \quad \text{Para equipos entre fase y neutro;}$$

$$R_{sce} = S_{sc} / 2S_{equ} \quad \text{Para equipos entre fase y fase;}$$

$$R_{sce} = S_{sc} / S_{equ} \quad \text{Para equipos trifásicos equilibrados.}$$

d) Distorsión armónica total $THD\%$:

Se define como:

$$THD\% = 100 \cdot \sum_{h=2}^{40} (I_h / I_1)^2$$

e) Distorsión parcial ponderada $PWHD$:

Para la norma citada (IEC-61000-3-4) se usa la distorsión ponderada de los armónicos 14 al 40:

$$PWHD\% = 100 \cdot \sum_{h=14}^{40} h \cdot (I_h / I_1)^2$$

Valores límites de emisión para equipos de $I > 16A$ cuando $S_{equ} \leq S_{sc}/33$

Tabla I **Valores límites de emisión normados IEC**

Armónico h	Corriente admisible $I_n/I_1\%$
3	21,6
5	10,7
7	7,2
9	3,8
11	3,1
13	2
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21	$\leq 0,6$
23	0,9
25	0,8
27	$\leq 0,6$
29	0,7
31	0,7
≥ 33	$\leq 0,6$
Pares	$\leq 8/n$ ó 0,6

Límites de emisión para equipos monofásicos o trifásicos desequilibrados con $R_{sc} > 33$

Tabla II **Valores límites de emisión de equipos monofásicos o trifásicos desequilibrados normados IEC**

R_{sc} (2)	Tasa total admisible		Tasas individuales admisibles					
	THD%	PWHD%	$I_3/I_1\%$	$I_5/I_1\%$	$I_7/I_1\%$	$I_9/I_1\%$	$I_{11}/I_1\%$	$I_{13}/I_1\%$
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	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

NOTAS: (1) El valor relativo de los armónicos pares no debe sobrepasar $16/h$ %
(2) Para valores de R_{sc} intermedios interpolar; (3) En caso de redes desequilibradas los valores de la tabla se aplican a cada una de las fases individualmente

Límites de emisión para equipos trifásicos equilibrados con $R_{sc} > 33$:

Tabla III **Valores límites de emisión de equipo trifásicos equilibrados normados IEC**

R_{sc} (2)	Tasa total admisible		Tasas individuales admisibles			
	<i>THD</i> %	<i>PWHD</i> %	I_5/I_1 %	I_7/I_1 %	I_{11}/I_1 %	I_{13}/I_1 %
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: (1) El valor relativo de los armónicos pares no debe sobrepasar $16/h$ %
(2) Para valores de R_{sc} intermedios interpolar

2.3 Norma IEEE 519

La tabla representa los límites de distorsión de corriente para sistemas de transmisión en general (< 161 KV). En generación y cogeneración, establecidos por el estándar 510 de la IEEE en 1992. El cual es revisión realizada en 1981.

Tabla IV **Valores límites de distorsión de corriente normas IEEE**

Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)

I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$11 \leq h < 17$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.8	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Donde midiendo en el punto PCC I_{sc} es la corriente máxima de Cortocircuito, e I_L es la corriente máxima demandada por la carga.

Todos los equipos de generación de potencia son limitados a estos valores de distorsión de corriente. Los armónicos son limitados al 25% de los límites armónicos impares anteriores. La distorsión de corriente resultado de la compensación de corriente directa no esta permitida.

3. MÉTODO DEL DIRECCIONAMIENTO ARMÓNICO BASADO EN EL TEOREMA DE SUPERPOSICIÓN

3.1. Análisis del Método de Determinación del direccionamiento armónico utilizando el teorema de la superposición

Siempre que exista una distorsión significativa tanto en tensión como en intensidad de corriente en un sistema de potencia, es necesario conocer la fuente que origina esta distorsión con el fin de resolver la controversia de quien es el responsable por la distorsión. El conocer la fuente de armónicos de una red nos proporciona una manera de identificar las responsabilidades de las partes involucradas. Durante mucho tiempo nos hemos encontrado con la controversia de que si los armónicos viajan de la carga a la fuente o en caso contrario de la fuente a la carga. Mientras este dilema ha causado polémica se han planteado métodos para resolver este problema.

El método comúnmente más utilizado ha sido el del direccionamiento armónico aplicando el teorema de Superposición, el cual establece que se puede trabajar una red eléctrica, analizando cada fuente por separado y cortocircuitando las demás fuentes de voltaje y abriendo las fuentes de corriente.

El método parte del analizar una señal tanto de tensión como de corriente, mediante la transformada rápida de Fourier de separar la señal distorsionada en una suma de ondas senoidales, cada una a diferente frecuencia.

Una vez tenemos la corriente y la tensión para cada orden armónico. El método se basa en determinar el ángulo de fase de la potencia armónica, es decir la relación entre la tensión e intensidad a una armónica determinada así como lo haríamos con la frecuencia fundamental.

Como sabemos los armónicos producen un flujo de energía como la frecuencia fundamental, con una potencia dada por: [1]

$$P_h = V_h \cdot I_h \cdot \cos(\theta_h)$$

Donde V_h e I_h son la tensión e intensidad a la frecuencia armónica determinada y θ_h es el ángulo de fase entre ellas.

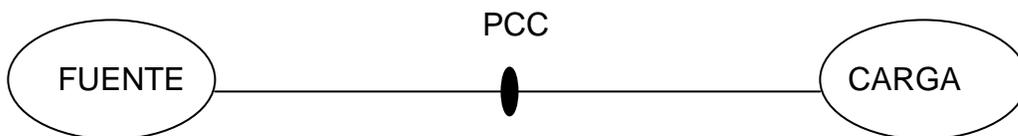
Este método fue el primero desarrollado para identificar fuentes de armónicos. De hecho, algunos medidores de calidad de energía se basan en este método.

3.1.1 Criterio para el Direccionamiento

Este método para determinar el flujo de potencia armónica nos proporciona la información para identificar la fuente armónica dominante, midiendo un voltaje y una corriente armónica de orden determinada en un punto llamado punto de acople común (PCC) indicado en la Figura No. 1; y su ángulo entre ellas, calculamos la potencia armónica, y utilizando el criterio:

- Si $P_h > 0$ el consumidor causa más distorsión y la dirección de los armónicos son desde la carga a la red. [1]
- Caso contrario si $P_h < 0$ la red nos proporciona más distorsión. [1]

Figura 1. Representación gráfica del punto PCC



Para un consumidor cualquiera se puede medir la corriente $i(t)$ y el voltaje $v(t)$, y determinar la potencia activa

$$p(t) = v(t) i(t) \cos \theta$$

Los parámetros p , v y i siendo funciones periódicas pueden desarrollarse en series de Fourier.

3.1.1.1 Descomposición en Series de Fourier

Con $i(t)$ siendo una función periódica se puede descomponer en Fourier con dos posibilidades: [1]

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t - \theta_n)$$

$$\text{Siendo } I_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\text{Y } \cos \theta_n = a_n / \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

ó

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t - \theta_n)$$

$$\text{Siendo } I_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\text{Y } \sin \theta_n = b_n / \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

Con:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(n\omega t) dt$$

Y

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \text{Sen}(n\omega t) dt$$

Nuestro criterio se basa en el encontrar el signo de P_h o bien el signo de:

$$\text{Cos}(\theta_{(V_n)} - \theta_{(I_n)})$$

La potencia promedio en orden n será:

$$P_n = \frac{1}{T} \int_0^T V_n I_n \text{cos}(n\omega t - \theta_{(V_n)}) \text{cos}(n\omega t - \theta_{(I_n)}) dt.$$

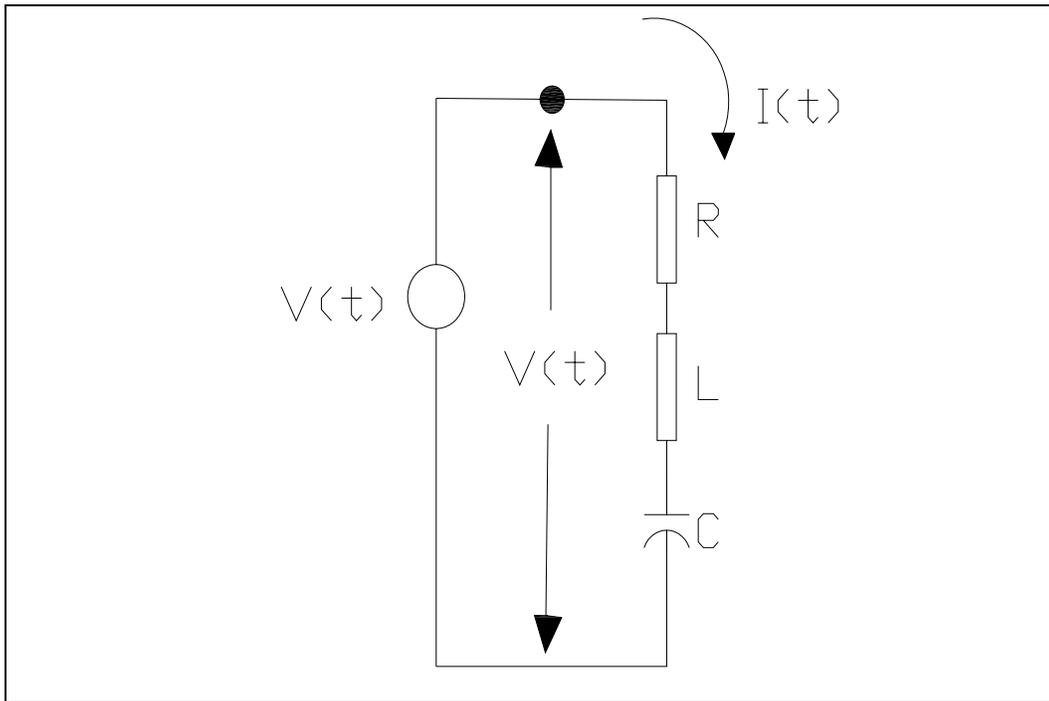
$$= (V_n I_n) / 2 \text{Cos}(\theta_{(V_n)} - \theta_{(I_n)})$$

3.1.1.2 Comprobación de método aplicando el teorema de superposición

A continuación se presentan los análisis aplicados a circuitos con el fin de comprobar el criterio del método de direccionamiento armónico: [2]

Dada la siguiente red:

Figura 2. **Circuito RLC en serie**



En este caso en el cual la potencia activa esta dada por:

$$P = I^2 R$$

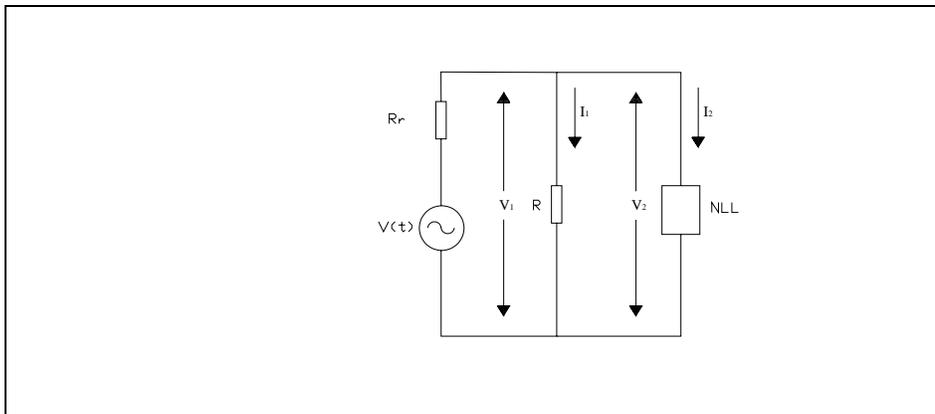
Donde siempre $P > 0$, donde demostramos que una carga lineal no crea corrientes armónicas. [1]

Asumiendo una red alimentada por un voltaje sinusoidal con una resistencia en serie R_r representando la resistencia de la línea, una carga lineal R y una carga no lineal la cual genera armónicos a la red.

En esta red no tomamos en cuenta el efecto de la capacitancia y la autoinductancia ya que estos no afectan en el cálculo de la potencia activa. Nos interesa conocer el signo de cada potencia activa para cada armónico n , es decir el signo de $\cos(\theta_v - \theta_i)$.

Representando la red:

Figura 3. **Circuito con carga no lineal en paralelo**



Tenemos para un armónico de orden $n > 1$, y descomponiendo con Fourier las funciones de voltaje y corriente las siguientes ecuaciones:[2]

$$a_n(V_1) = a_n(V_2) = a_n(V_r) - R_r (a_n(I_1) + a_n(I_2)) = R a_n(I_1)$$

$$b_n(V_1) = b_n(V_2) = b_n(V_r) - R_r (b_n(I_1) + b_n(I_2)) = R b_n(I_1)$$

Y como asumimos $n > 1$ entonces $a_n(V_r) = b_n(V_r) = 0$ ya que es una fuente sinusoidal. Analizando para la carga lineal, partiendo de la identidad trigonométrica:

$$\cos(\theta_v - \theta_i) = \cos(\theta_v) \cos(\theta_i) + \sin(\theta_v) \sin(\theta_i)$$

Aplicando las identidades anteriores:

$$\cos \theta_n = a_n / \left((a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \right) \quad \text{y,}$$

$$\sin \theta_n = b_n / \left((a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \right)$$

Tendríamos:

$$\begin{aligned} \cos(\theta_v - \theta_i) = & \frac{a_n(V_1)}{(a_n(V_1) + b_n(V_1))^{1/2}} \frac{a_n(I_1)}{(a_n(I_1) + b_n(I_1))^{1/2}} \\ & + \\ & \frac{b_n(V_1)}{(a_n(V_1) + b_n(V_1))^{1/2}} \frac{b_n(I_1)}{(a_n(I_1) + b_n(I_1))^{1/2}} \end{aligned}$$

$$\cos(\theta_v - \theta_i) = \frac{a_n(V_1) a_n(I_1) + b_n(V_1) b_n(I_1)}{(a_n(V_1) + b_n(V_1))^{1/2} (a_n(I_1) + b_n(I_1))^{1/2}}$$

Observando la relación tenemos que denominador > 0 , y el numerador

$$a_n(V_1) a_n(I_1) + b_n(V_1) b_n(I_1)$$

y sabemos de las ecuaciones de malla anteriores que:

$$a_n(V_1) = R a_n(I_1), \text{ y } b_n(V_1) = R b_n(I_1) \text{ entonces:}$$

$$R (a_n^2(I_1) + b_n^2(I_1)) > 0 \text{ de donde:}$$

$$\cos(\theta_v - \theta_i) > 0 \text{ y } P > 0$$

Por lo que demostramos que la carga lineal no está produciendo armónicos.

Ahora bien, analizando la carga no lineal utilizando la misma relación de $\cos(\theta_v - \theta_i)$ tendríamos que siempre el denominador será mayor que cero y partiendo de las ecuaciones de malla del circuito:

$$a_n(V_2) = a_n(V_r) - R_r (a_n(I_1) + a_n(I_2))$$

Como mencionamos anteriormente, al ser una alimentación sinusoidal en un orden de $n > 1$ entonces $a_n(V_r) = 0$ por lo que:

$$a_n(V_2) = -R_r (a_n(I_1) + a_n(I_2))$$

$$Y \ a_n(I_1) = a_n(V_1)/R \ \text{ y } \ a_n(V_1) = a_n(V_2)$$

Entonces:

$$a_n(V_2) = -R_r (a_n(V_2)/R + a_n(I_2))$$

$$a_n(V_2) = -R_r a_n(V_2)/R - R_r a_n(I_2)$$

$$a_n(V_2) = - [R R_r / (R + R_r)] a_n(I_2)$$

Aplicando el mismo análisis para b_n tendríamos:

$$b_n(V_2) = - [R R_r / (R + R_r)] b_n(I_2)$$

Por lo que el numerador sería:

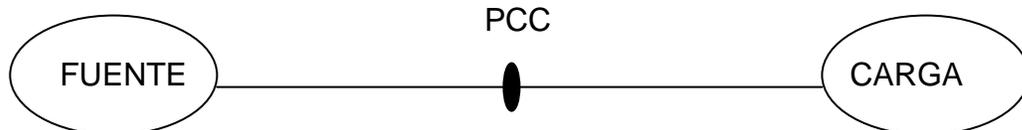
$$- [R R_r / (R + R_r)] a_n^2(I_2) - [R R_r / (R + R_r)] b_n^2(I_2) < 0$$

Lo que hace $\cos(\theta_v - \theta_i) < 0$ y $P < 0$ concordando con el criterio de que la carga no lineal estaría entregando armónicos hacia la red. [1]

Considerando la red como un circuito equivalente para el método del direccionamiento armónico aplicando el Teorema de Norton

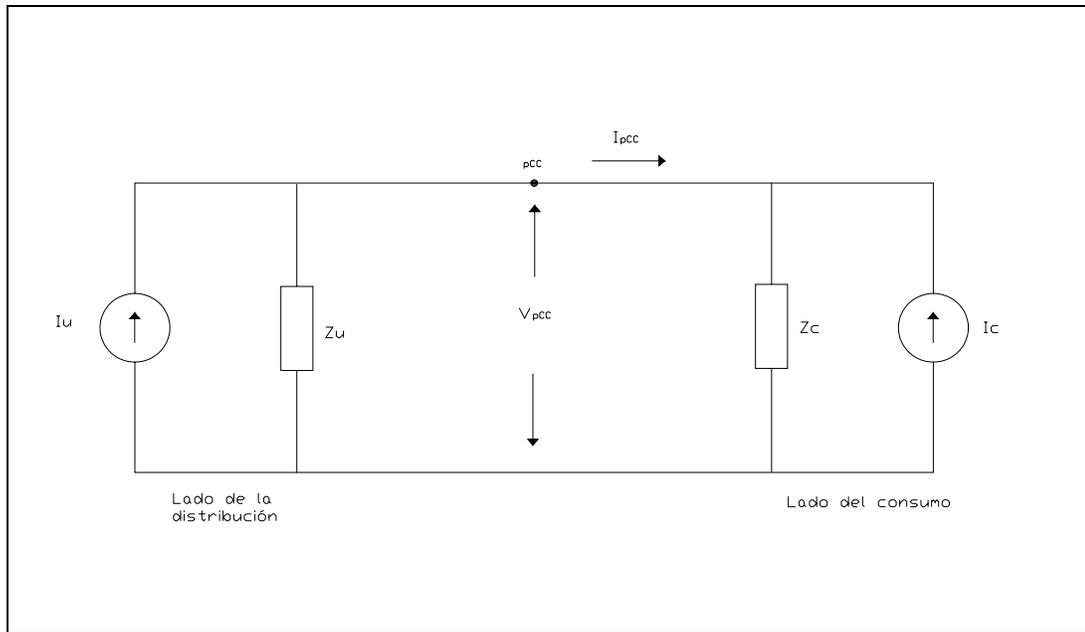
Transformando el siguiente esquema:

Figura 4. **Representación de las cargas unidas en el punto PCC**



En el circuito con fuentes de corriente:

Figura 5. **Circuito equivalente de Norton del punto PCC**



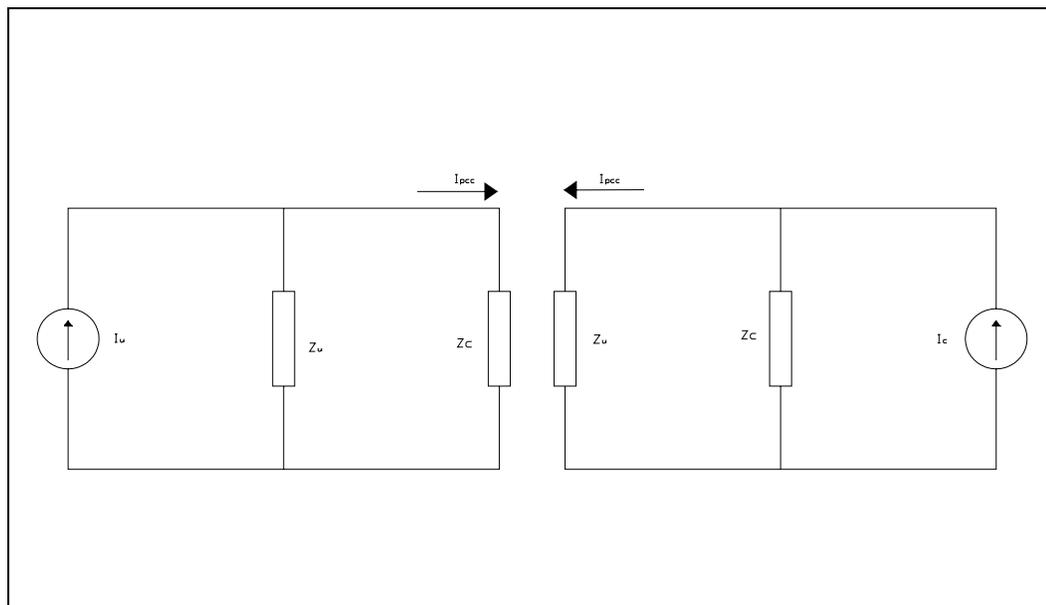
En el circuito la fuente I_u es la fuente de armónicos del lado de la red e I_c es la fuente del lado del consumidor, Z_u y Z_c son las impedancias de cada parte. El circuito es aplicable para cada orden de frecuencia armónica. El método de direccionamiento armónico tiene como fin determinar que lado tiene mayor inyección de armónicos a la red, analizándolo desde el PCC. El método empieza con la medición de voltaje y corriente en el punto PCC y determinar el índice de potencia armónica:

$$P = \text{real} (V_{pcc} I_{pcc}^*)$$

Una vez determinada la potencia armónica de un armónico determinado se utiliza el criterio anteriormente determinado que para $P > 0$ el lado de distribución causa más distorsión, caso contrario si $P < 0$ el consumidor causa más distorsión, recordando que eso se hace para cada frecuencia.

Debido a que el método da una respuesta como que lado genera más armónicos, es vagamente definido. Por la necesidad de una respuesta más precisa, se aplica el método de superposición al circuito anterior, de manera que la contribución de corriente de cada armónico n I_{pcc} puede determinarse de acuerdo a la siguiente figura:

Figura 6. **Circuito equivalente de Norton del punto PCC aplicando teorema de superposición**



De donde desarrollamos las ecuaciones, basándonos en el divisor de corriente de dos impedancias en paralelo:

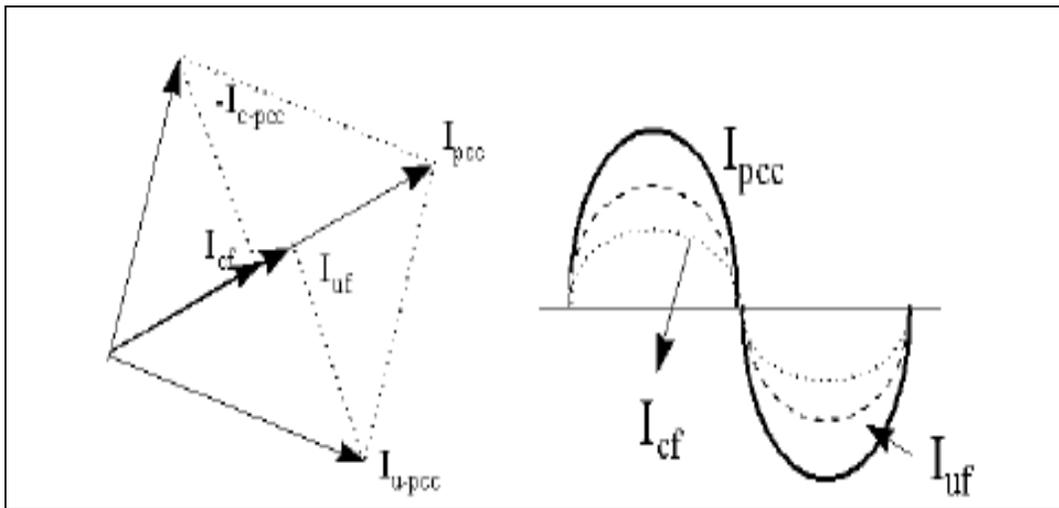
$$I_{u-pcc} = Z_u / (Z_u + Z_c) I_u$$

$$I_{c-pcc} = Z_c / (Z_u + Z_c) I_c$$

$$I_{pcc} = I_{u-pcc} + (-I_{c-pcc})$$

De donde I_{u-pcc} y I_{c-pcc} son las contribuciones respectivas hacia el punto PCC. Las cantidades del esquema anterior son referidas a una determinada armónica. Las ecuaciones son ecuaciones fasoriales, que siguen siendo ambiguas para definir la contribución armónica. Un método es descomponer I_{pcc} en dos escalares como mostramos en el siguiente diagrama fasorial de la figura 7. [5]

Figura 7. **Diagrama fasorial de las corrientes armónicas en el punto PCC cuando las corrientes se suman**



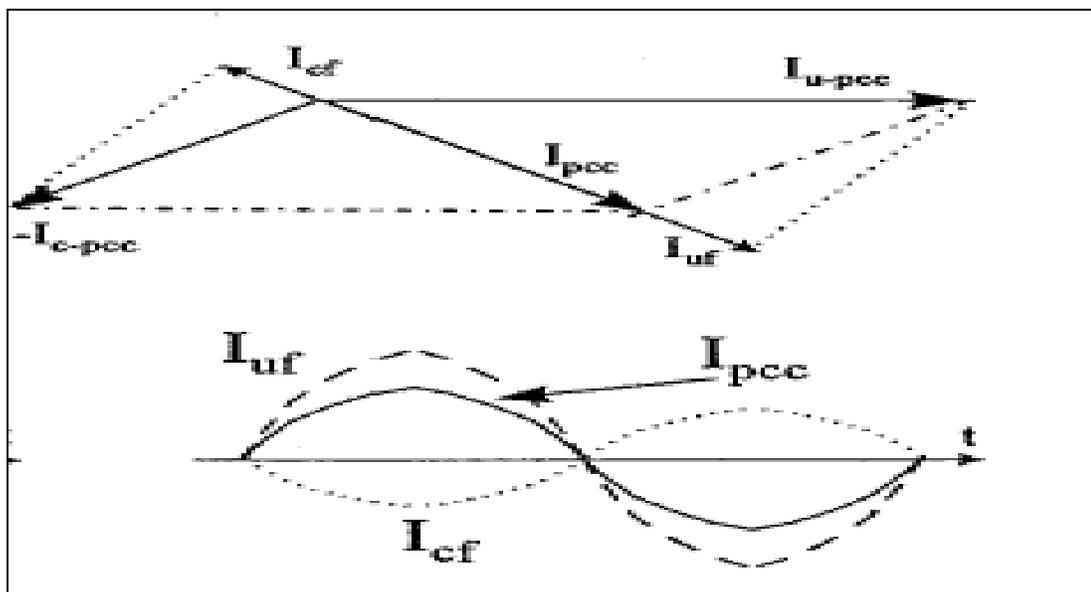
FUENTE: "A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling" Wilsun Xu, *Senior Member, IEEE*, and Yilu Liu, *Member, IEEE* TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 15, NO. 2, APRIL 2000. PAGINA 805.

Donde I_{uf} es una proyección de I_{u-pcc} en I_{pcc} e I_{cf} es una proyección I_{c-pcc} en I_{pcc} . Por lo tanto I_{pcc} es la suma algebraica de dos componentes de corriente una debida al consumidor y otra a la red.

Además si I_{cf} e I_{uf} son escalares y pueden tener signos opuestos, Si tienen el mismo signo, tanto el consumidor como la red añaden corrientes armónicas. Si tienen signos opuestos, el más negativo tiene la tendencia de reducir el flujo armónico en PCC.

En el Caso que las Corrientes se cancelaran entre si el diagrama fasorial Seria el de la figura 8:

Figura 8. **Diagrama fasorial de las corrientes armónicas en el punto PCC cuando las corrientes de cancelan**



FUENTE: "A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling" Wilsun Xu, Senior Member, IEEE, and Yilu Liu, Member, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 15, NO. 2, APRIL 2000. PAGINA 805.

De la misma forma podemos trabajar el voltaje, determinando la contribución al punto PCC de la distorsión en el voltaje para cada armónico.

$$V_{u-pcc} = Z_u Z_c / (Z_u + Z_c) I_u$$

$$V_{c-pcc} = Z_c Z_u / (Z_u + Z_c) I_c$$

$$V_{pcc} = V_{u-pcc} + V_{c-pcc}$$

Y de la misma forma V_{u-pcc} y I_{c-pcc} deben proyectarse en V_{pcc} para obtener los valores escalares como en la corriente.

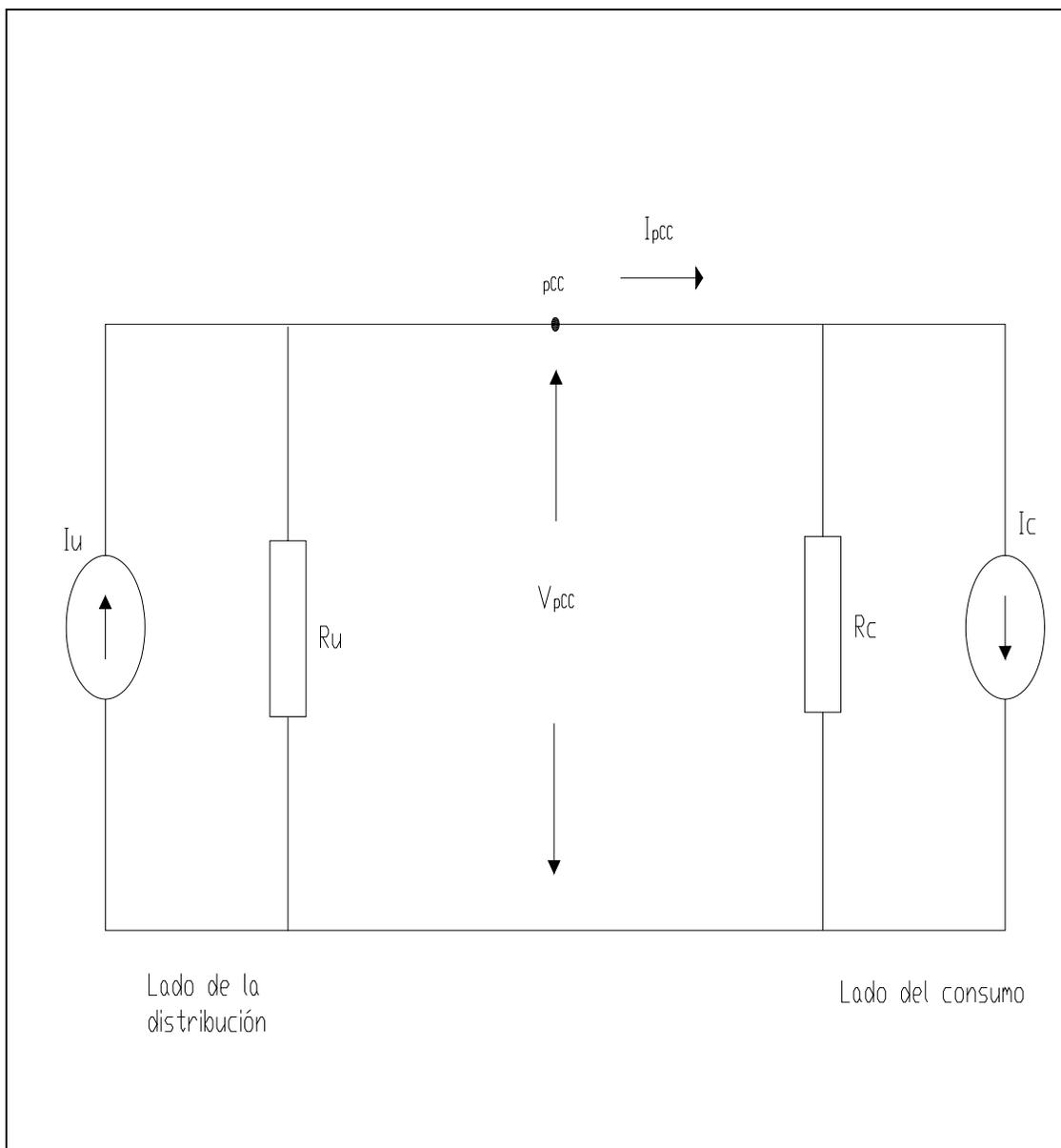
Comparando las ecuaciones de voltaje y corriente vemos que en el signo de la potencia dependerá de la intensidad de corriente que entreguen las fuentes ya que si $I_{uf} > I_{cf}$, entonces $P > 0$ o viceversa.

3.1.3 Usando el Teorema de Thevenin y comparando índices de voltaje

Este método fue desarrollado basándose en el Teorema de Thevenin donde los armónicos en el PCC se componen de una corriente armónica de la red y otra del consumidor. El método se basa en que en las mediciones de PCC un medidor de armónicos activo que usa una corriente de frecuencia inter-armónica con el fin de determinar las impedancias armónicas.

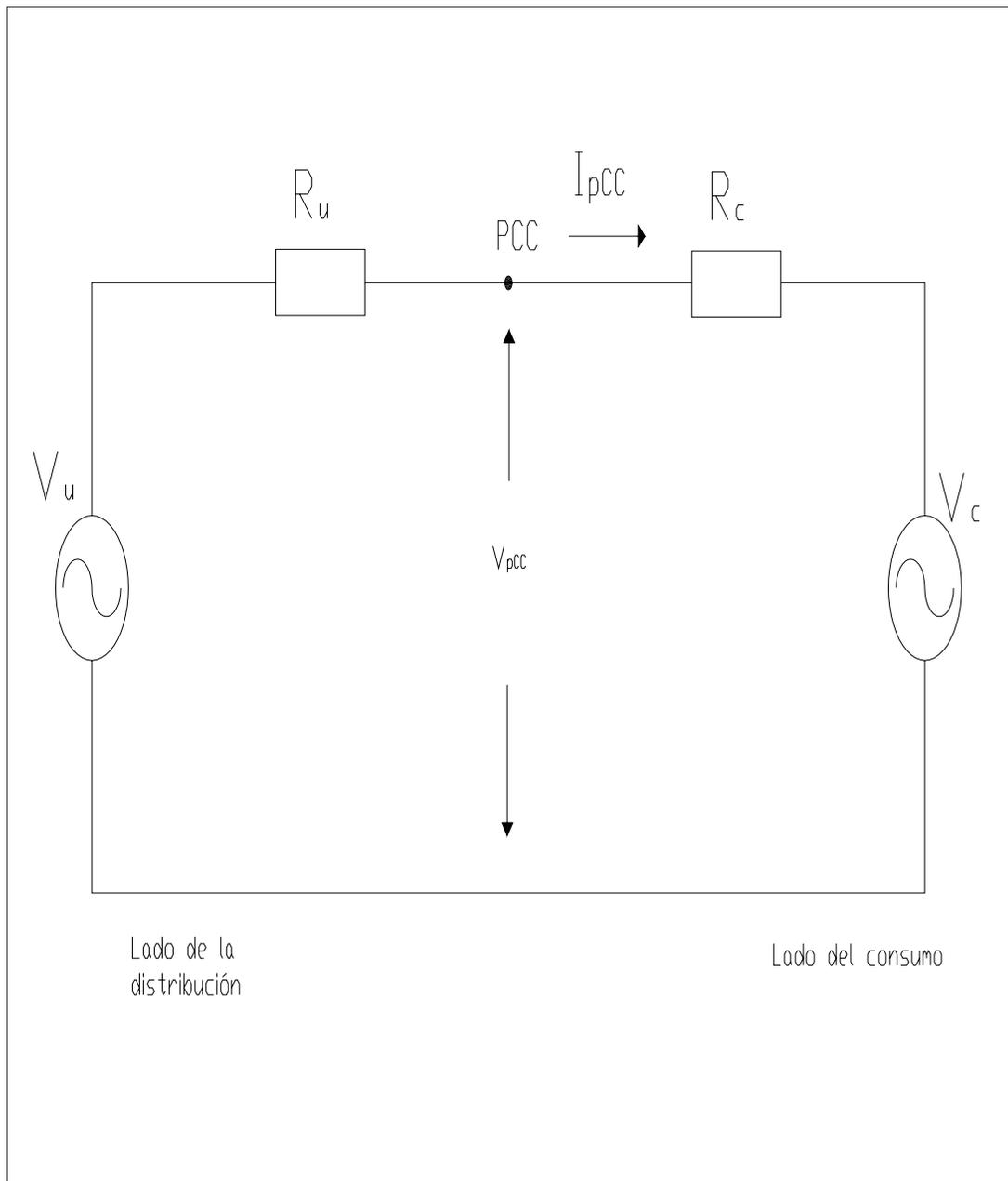
Esta corriente inter-armónica se puede utilizar ya que es considerada que se mezclara con las componentes que están bajo estudio. El circuito analizado en el caso del teorema de Norton puede traducirse a un circuito equivalente teorema de Thevenin usando las corrientes e impedancias armónicas. [4]

Figura 9. Diagrama del circuito equivalente de Norton



Convirtiéndolo a

Figura 10. **Diagrama del circuito equivalente de Thevenin**



La contribución de cada fuente de voltaje a PCC se puede determinar usando siempre el principio de superposición usando las ecuaciones:

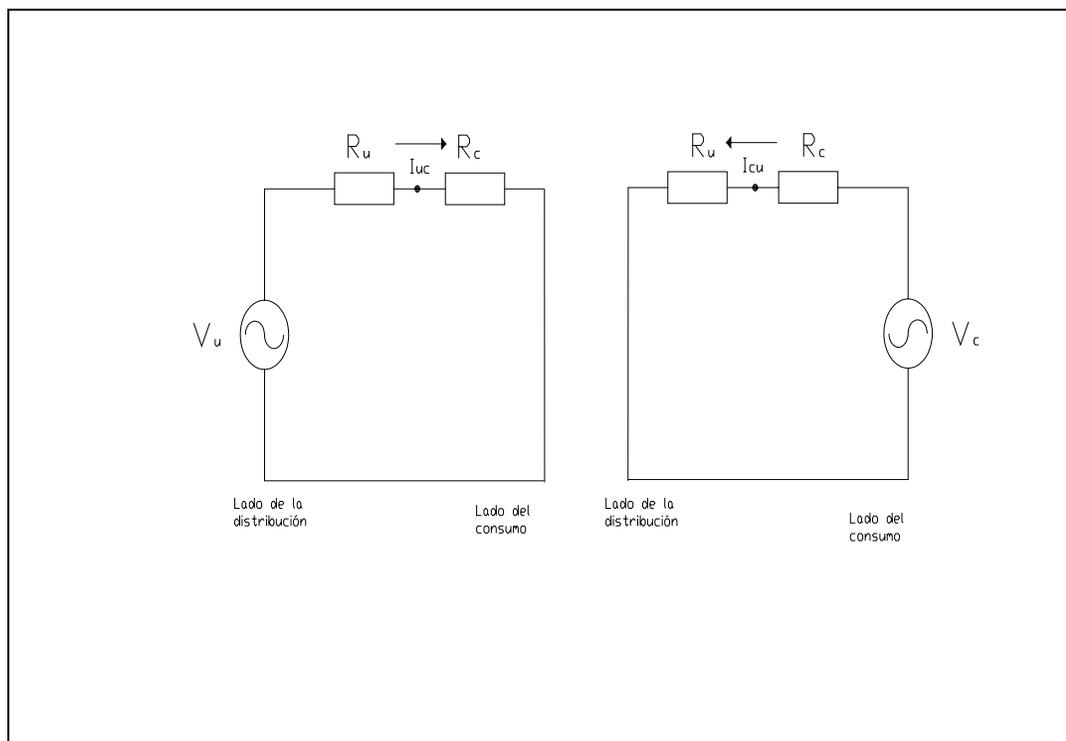
$$\overline{I_c} \overline{R_c} = \overline{V_c}$$

Y

$$\overline{I_u} \overline{R_u} = \overline{V_u}$$

Aplicándole el teorema de superposición al circuito anterior tanto a la fuente de voltaje de la red como a la fuente del consumidor tendríamos:

Figura 11. **Diagrama del circuito equivalente de Thevenin aplicando teorema de superposición**

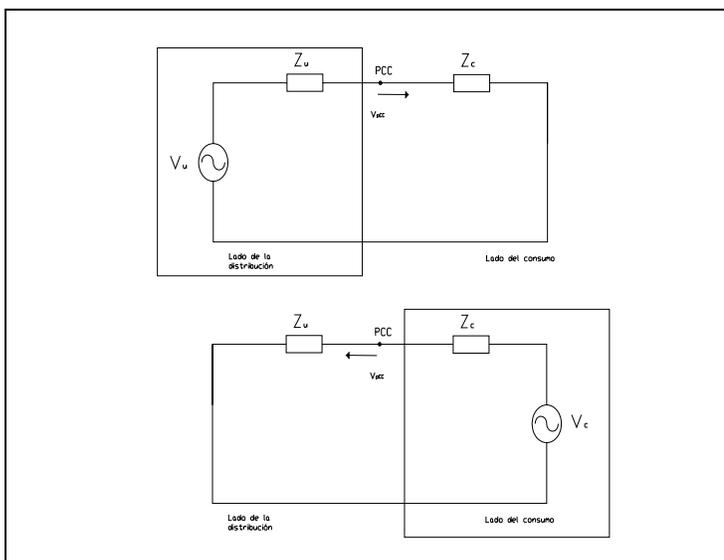


Donde se puede ver que Si $|I_{uc}| < |I_{cu}|$ entonces $|V_c| > |V_u|$ lo que como anteriormente se vio que los armónicos viajarían de la carga a la red. O por otra parte si $|I_{uc}| > |I_{cu}|$ entonces $|V_c| < |V_u|$ lo que indica que los armónicos van de la red a la carga. Por lo que las magnitudes de voltaje también se pueden usar para determinar la fuente de armónicos en un sistema de potencia en el punto PCC. Siendo las corrientes I_{uc} e I_{cu} corrientes obtenidas cuando aplicamos las fuentes de voltaje V_c y V_u individualmente. [2]

3.1.3.1 Comprobación de índices de Voltaje

Dado los circuitos:

Figura 12. **Circuito equivalente de Thevenin visto de cada fuente aplicando el teorema de superposición**



Analizando en la primera figura el lado de distribución y asumiendo positivo el flujo de la corriente del sistema a la carga. Por otro lado, en la segunda figura el flujo de corriente fluye del cliente al sistema. Concentrados en la figura uno, suponiendo que tanto Z_u como Z_c son ambas inductivas. Esto indicaría que como la carga es puramente inductiva la corriente esta retrasada al voltaje V_u .

Aplicando las leyes de voltaje de Kirchoff tendríamos:

$$\overline{V_u} - \overline{I} (\overline{Z_u} + \overline{Z_c}) = 0$$

Por lo que el voltaje en el punto PCC esta dado por:

$$\overline{V_{PCC}} = \overline{V_u} - \overline{Z_u} \overline{I}$$

De esta ecuación, cuando la corriente fluye del sistema a la carga, entonces el voltaje en PCC es menor al voltaje de V_u debido a la caída de voltaje en Z_u . Similarmente, el voltaje en PCC es mayor que el voltaje en la carga debido a la caída de voltaje en Z_c como se ve:

$$\overline{V_c} = \overline{V_{PCC}} - \overline{Z_c} \overline{I}$$

Por lo que se concluye que $|V_u| > |V_{PCC}|$ y por lo tanto $|V_u| > |V_c|$ y esto concluiría que la mayor fuente de armónicos es del sistema.

Por otro lado, cuando la corriente I fluye del cliente al sistema como se ve en el segundo circuito, el voltaje en PCC, es menor que V_c debido a la caída de voltaje a través de Z_c , así como el voltaje en el PCC es mayor al V_u por la caída de voltaje en Z_u . De donde

$$\overline{V_u} = \overline{V_{PCC}} - \overline{Z_u I}$$

De donde Observamos que $|V_u| < |V_{PCC}|$ ósea que $|V_u| < |V_c|$, por lo que la mayor fuente de armónicos existe en la carga.

3.1.4 Limitación del método de Superposición

Si analizamos:

$$Z_u = 1 + j 8$$

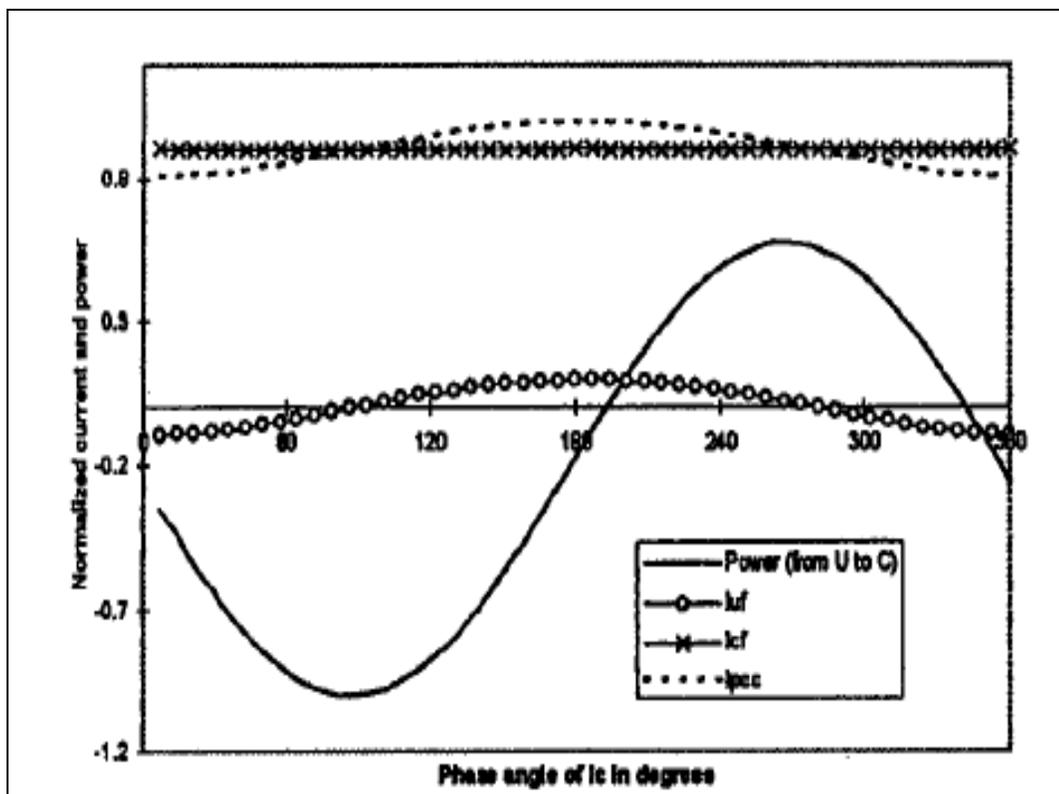
$$Z_c = 5 + j35$$

$$I_c = 3 \angle \underline{\text{ángulo}}$$

$$I_u = 1 \angle \underline{0^\circ}$$

Variando el ángulo de I_c de 0° a 360° . Vemos la correlación entre la dirección de la potencia y las corrientes, examinando que si el método de dirección de armónicos siempre fuera correcto para las condiciones que si $P_h > 0$ entonces $I_{uf} > I_{cf}$. Podemos observar los resultados en la gráfica: [3]

Figura 13. Comparación de corrientes y potencia armónica contra el ángulo de fase de I_c



FUENTE : "Power Direction Method Cannot Be Used for Harmonic Source Detection" Wilsun Xu, Senior Member University of Alberta IUntonton, Canada. PAGINA 874.

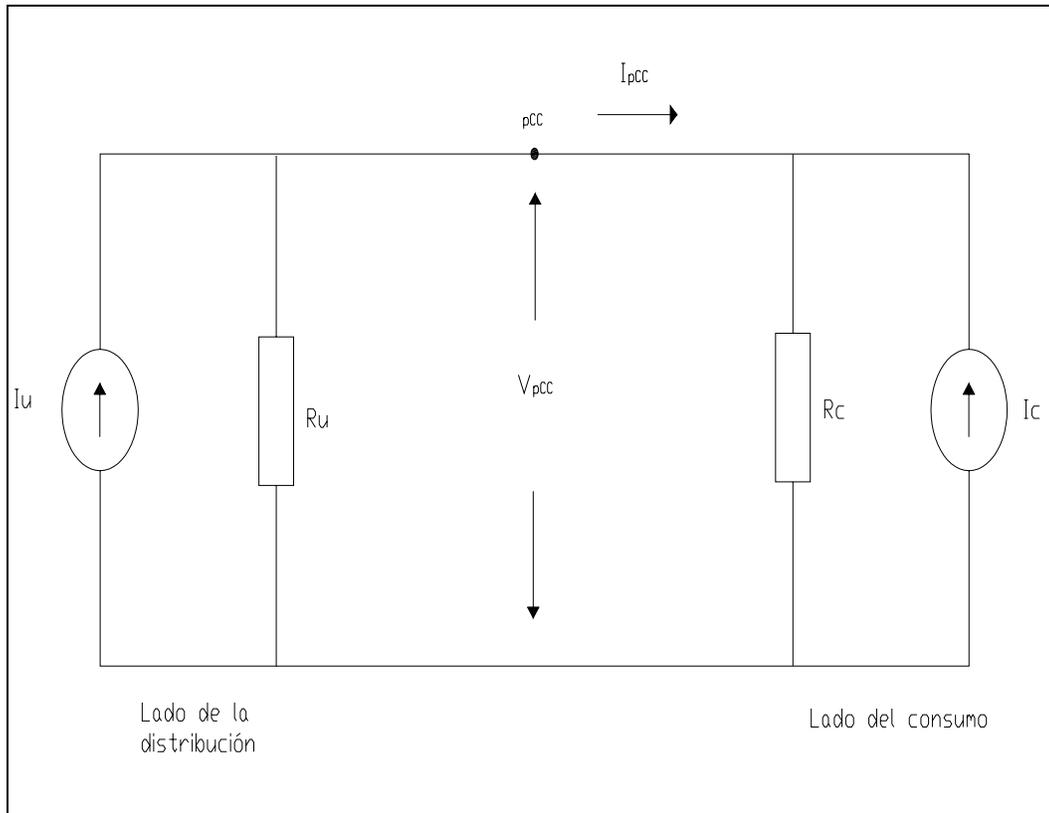
La figura muestra la variación de la potencia armónica normalizada, la corriente I_{pcc} y sus componentes, respecto al ángulo de fase de I_c . Se puede observar en la figura que las condiciones no siempre se cumplen. Por ejemplo I_{cf} es siempre mayor que I_{uf} y el lado del consumidor debe considerarse el mayor contribuidor de corriente armónica. Por otra parte la potencia armónica puede circular en cualquier dirección. Cuando el ángulo es mayor a 190° , la dirección de la potencia contradice el principio de superposición.

Por lo que existe una probabilidad del 50% que la contradicción pueda ocurrir. Como no hay garantía de que el ángulo de fase entre I_u e I_c se mantenga en cierto rango. El método de direccionamiento armónico por superposición no es utilizable para detección de fuentes de armónicos.

3.1.4.1 Análisis matemático

Si analizamos el diagrama de impedancias analizado anteriormente donde las fuentes de corriente tienen diferente dirección:[3]

Figura 14. Diagrama del circuito equivalente de Norton para análisis matemático con fuentes de corriente de diferente dirección



Mediante el análisis de circuitos podemos analizar para el punto PCC la corriente como:

$$I_{pcc} = I_{cf} + I_{uf} = \frac{R_u}{(R_u + R_c)} I_u - \frac{R_c}{(R_u + R_c)} I_c$$

y

$$V_{pcc} = \frac{R_u R_c}{(R_u + R_c)} (I_u + I_c)$$

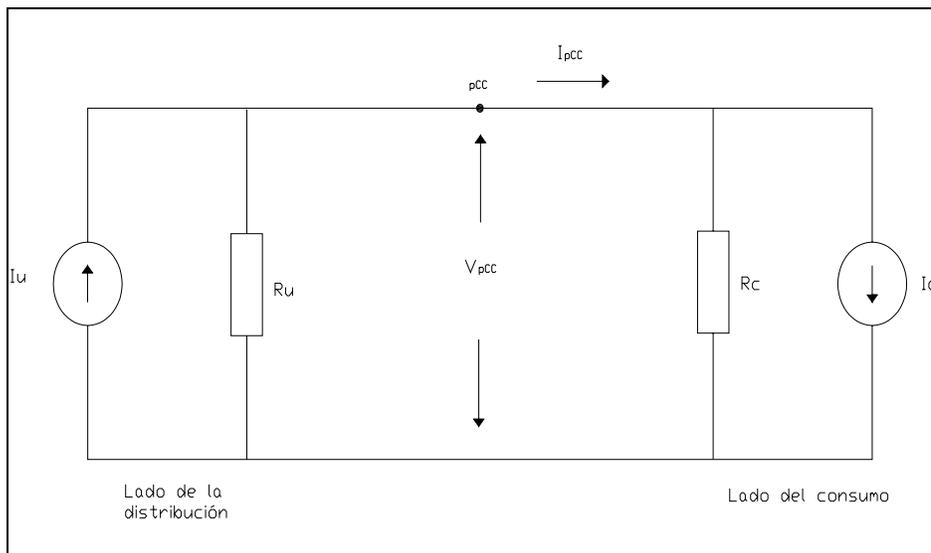
De donde podemos observar que el voltaje siempre será positivo, la condición de potencia ($=VI$) que viaja desde U hasta C requeriría que $I > 0$. O mejor dicho:

$$R_u I_u > R_c I_c$$

Por lo que demostraría que U esta contribuyendo en corrientes armónicas más que C. Por lo que el método de direccionamiento trabaja bien en este caso.

Pero si analizamos un circuito en el que la corriente del consumidor cambia de dirección ó sea que también inyecta armónicos, teniendo el mismo sentido que la de la red como se muestra:

Figura 15. Diagrama de circuito equivalente de Norton para análisis matemático con fuentes de corriente con la misma dirección



En este caso

$$I_{pcc} = I_{cf} + I_{uf} = R_u / (R_u + R_c) I_u + R_c / (R_u + R_c) I_c$$

Ya que por el sentido de las corrientes se añaden y;

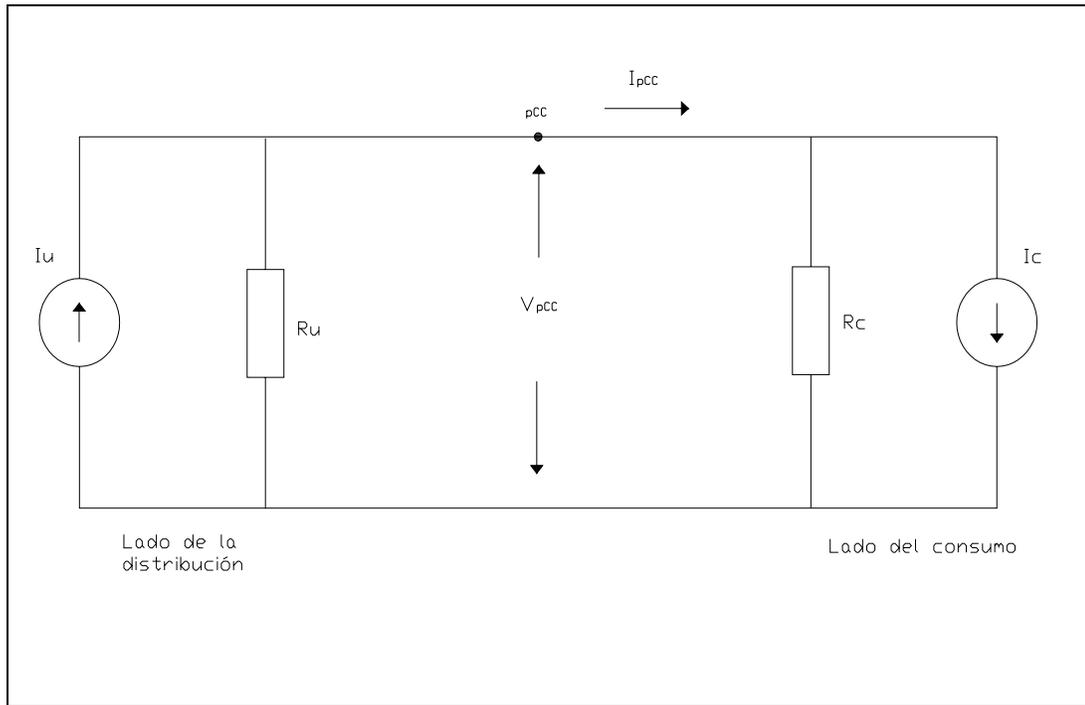
$$V_{pcc} = R_u R_c / (R_u + R_c) (I_u - I_c)$$

Por lo que en este caso la condición para que los armónicos viajen del lado de distribución al lado de consumo es que $V > 0$ es decir $I_u > I_c$. La condición del principio de superposición establece que $I_{uf} > I_{cf}$ es decir $R_u I_u > R_c I_c$. Lo que indica que depende del valor relativo de R_u y R_c . Por lo que concluimos que el método de direccionamiento armónico es cincuenta por ciento efectivos cuando las impedancias son conocidas y constantes.

3.2 Caso de estudio

Con el fin de verificar el método propuesto. Utilizando el circuito:

Figura 16. Diagrama de circuito equivalente de Norton para caso de estudio



Asumiendo los datos:

$$Z_u = 1 + j8$$

$$Z_c = 5 + j35$$

$$I_c = 3 \angle 0^\circ$$

$$I_u = 1 \angle 0^\circ \text{ Cuando } I_c \text{ e } I_u \text{ se cancelan}$$

$$I_u = 1 \angle 180^\circ \text{ Cuando } I_c \text{ e } I_u \text{ se suman.}$$

Aplicando las ecuaciones:

$$I_{u-pcc} = Z_u / (Z_u + Z_c) I_u = [1+j8 / (1+j8+5+j35)] * 1 \angle 0^\circ = -0.19$$

En el caso que se cancelen. Y

$$I_{u-pcc} = Z_u / (Z_u + Z_c) I_u = [1+j8 / (1+j8+5+j35)]^* 1 / \underline{180^\circ} = \mathbf{0.19}$$

En el caso que se sumen las corrientes.

$$I_{c-pcc} = Z_c / (Z_u + Z_c) I_c = [5+j35 / (1+j8+5+j35)]^* 3 / \underline{0^\circ} = \mathbf{2.44}$$

De donde:

$$I_{pcc} = I_{u-pcc} + (-I_{c-pcc})$$

Seria 2.26 para el caso que se cancelan y 2.63 para el caso en que se suman. Si variáramos la fuente de corriente del consumidor podríamos obtener la siguiente tabla:

Caso de I_u e I_c se cancelan.

Tabla V. **Resultado de caso de estudio para corrientes que se cancelan al variar I_c**

I_c	I_{pcc}	I_{uf}	I_{cf}
20%	0.30	-0.19	0.49
50%	1.04	-0.19	1.22
BASE	2.26	-0.19	2.44
200%	4.70	-0.19	4.89
300%	7.14	-0.19	7.33

Caso de I_u e I_c se Sumen

Tabla VI. **Resultado de caso de estudio para corrientes que se suman al variar I_c**

I_c	I_{pcc}	I_{uf}	I_{cf}
20%	0.67	0.19	0.49
50%	1.41	-0.19	1.22
BASE	2.63	0.19	2.44
200%	5.07	0.19	4.89
300%	7.51	0.19	7.33

Las tablas anteriores muestran el variar la fuente de armónicos del consumidor de un 20% a un 300% del valor base dado, utilizando las ecuaciones como se uso anteriormente. Podemos observar que la contribución del sistema permanece constante en el proceso. Por lo que el consumidor aumenta su responsabilidad así como la fuente aumenta en magnitud. Si variáramos la corriente del distribuidor sería:

Caso de I_u e I_c se cancelan.

Tabla VII. **Resultado de caso de estudio para corrientes que se cancelan al variar I_u**

I_u	I_{pcc}	I_{uf}	I_{cf}
20%	2.41	-0.04	2.44
50%	2.35	-0.09	2.44
BASE	2.26	-0.19	2.44
200%	2.07	-0.37	2.44
1000%	0.59	-1.85	2.44
1500%	0.35	2.76	-2.42
2000%	1.27	3.71	-2.44

Caso de I_u e I_c se Sumen

Tabla VIII. **Resultado de caso de estudio para corrientes que se suman al variar I_u**

I_c	I_{pcc}	I_{uf}	I_{cf}
20%	2.48	0.04	2.44
50%	2.54	0.09	2.44
BASE	2.63	0.19	2.44
200%	2.81	0.37	2.44
500%	3.37	0.93	2.44

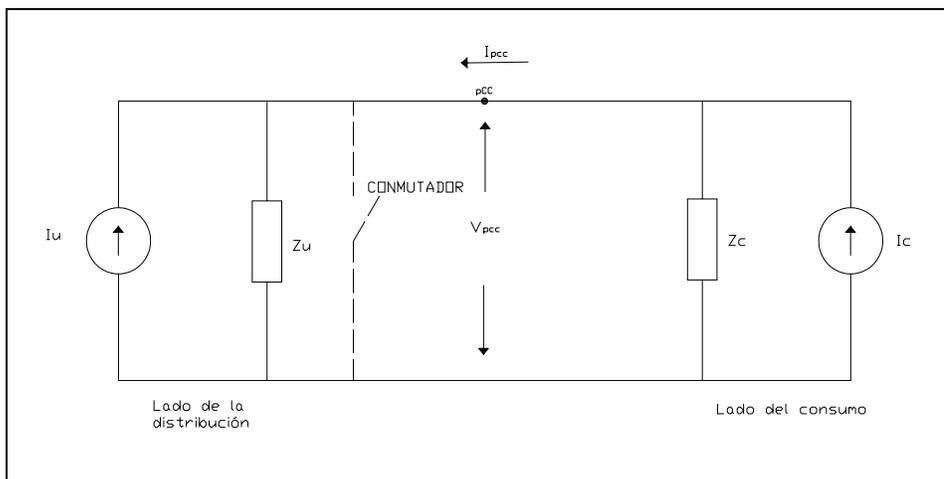
De acuerdo con las tablas anteriores es el resultado de variar la corriente del distribuidor. Podemos ver que la contribución del cliente es constante. Cuando la corriente del distribuidor aumenta a más del 1500% cuando se cancelan las corrientes, la contribución del consumidor es negativa. Esto es porque la corriente el punto PCC se vuelve alterante dominante por la corriente del distribuidor en esas condiciones.

4. MÉTODO DE CONMUTACIÓN APLICANDO LA IMPEDANCIA CRÍTICA

4.1 Aplicando el método de impedancia crítica:

Aplicando el teorema de la impedancia crítica, con el fin de analizar las fuentes de armónicas, cuando no podemos utilizar el método basado en el teorema de la superposición ya que los valores de las impedancias son desconocidos. En una simulación se pueden obtener los valores de I_u , Z_u , I_c y Z_c a través de la aplicación de un método de conmutación, aplicando el circuito de la figura 17: [4]

Figura 17. Diagrama del circuito Norton con conmutador



De donde podemos obtener las siguientes ecuaciones:

$$V_{pcc} = Z_u (I_u - I_{pcc})$$

$$V_{pcc} = Z_c (I_c + I_{pcc})$$

De estas dos ecuaciones los valores de corrientes e impedancias armónicas tanto del lado del distribuidor como del consumidor pueden ser determinados.

Con la primera ecuación usando los valores antes y después de la conmutación del lado del lado del consumidor V_h e I_h podemos obtener Z_u e I_u de la siguiente manera:

$$Z_u = -\Delta V_{pcc} / \Delta I_{pcc}$$

$$I_u = (V_{pcc} / Z_u) + I_{pcc}$$

Donde ΔV_h e ΔI_h son las diferencias entre los valores de antes y después de la carga para voltaje y corriente respectivamente para cada prueba de conmutación. Los Valores de Z_c e I_c para cada componente armónica en el lado del consumidor son calculados resolviendo la segunda ecuación obteniendo:

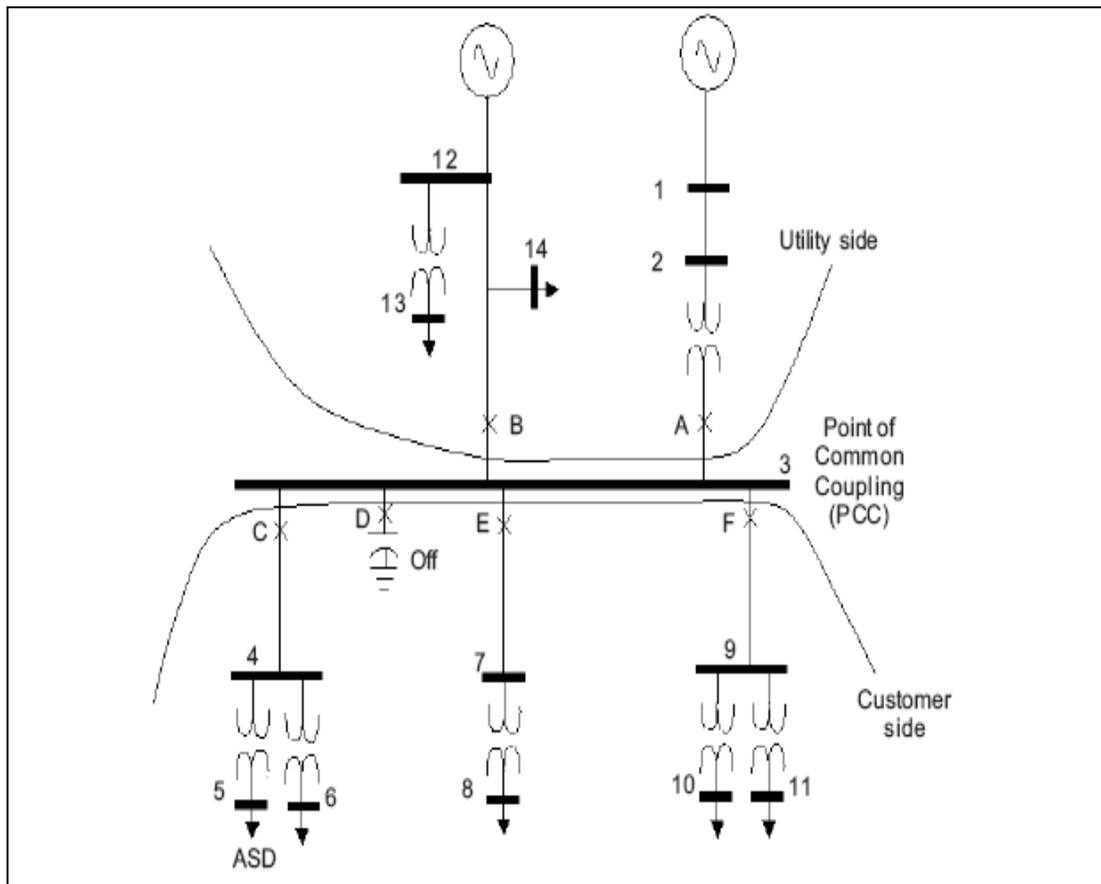
$$Z_c = \Delta V_{pcc} / \Delta I_{pcc}$$

$$I_c = (V_{pcc} / Z_c) - I_{pcc}$$

Una suposición que se debe considerar que solo los valores que satisfacen la identidad $|I_n/I_1| > 1\%$ son validas en el calculo de la impedancia, donde I_1 es el valor de la armónica fundamental.

Considerando el siguiente sistema de potencia:

Figura 18. Ejemplo de sistema de potencia



FUENTE: "A NEW METHOD TO DETECT THE SOURCE OF HARMONIC AT THE POINT OF COMMON COUPLING"
 Noraliza Hamzah, Azah Mohamed and Aini Hussain University Kebangsaan Malaysia, Bangi 43600,
 Selangor, Malaysia JURNAL TEKNIK GELAGAR, Vol 17, No. 01, April 2006 : 54 – 63 PAGINA 58.

Se hacen las pruebas como se indica en la siguiente tabla:

Tabla IX. **Pruebas realizadas de conmutación para encontrar I_c , Z_c , I_u y Z_u**

PRUEBA	OPERACIÓN	CONMUTAR EN EL LADO DEL DISTRIBUIDOR O DEL CONSUMIDOR	IMPEDANCIA Y CORRIENTE A SER DETERMINADA
1	Abrir línea A	DISTRIBUIDOR	I_c, Z_c
2	Cerrar línea A	DISTRIBUIDOR	I_c, Z_c
3	Abrir línea B	DISTRIBUIDOR	I_c, Z_c
4	Cerrar línea B	DISTRIBUIDOR	I_c, Z_c
5	Abrir línea C	CONSUMIDOR	I_u, Z_u
6	Cerrar línea C	CONSUMIDOR	I_u, Z_u
7	Abrir línea F	CONSUMIDOR	I_u, Z_u
8	Cerrar línea F	CONSUMIDOR	I_u, Z_u
9	Abrir línea E	CONSUMIDOR	I_u, Z_u
10	Cerrar línea E	CONSUMIDOR	I_u, Z_u

Observando que se realizan pruebas en las líneas C, F y E para conocer la impedancia Z_u y la corriente I_u , y en las líneas A y B para conocer la impedancia del consumidor Z_c y la corriente I_c . Utilizando las ecuaciones anteriores.

Si el sistema de potencia anterior fuera alimentado con una fuente de 13.8 kV, 15 MVA a 50 Hz de frecuencia. Con una generación de armónicos en el lado de distribución debido a un sistema de cómputo en el bus 14. Por otro lado en el bus 5 una inyección de armónicos debido al uso de variadores de velocidad ajustable. En síntesis el procedimiento del método será: [4]

- i) Medición de corriente y voltaje de armónicos en el punto PCC. Aplicación de la transformada de Fourier para conocer los valores de corriente y voltaje de cada armónico.
- ii) Cálculo Z_u e I_u así como Z_c e I_c con los datos de corriente y voltaje obtenidos en las pruebas de conmutación.
- iii) Calcular el voltaje en el lado del distribuidor $|V_u| = |Z_u||I_u|$ y el voltaje en el lado del consumidor $|V_c| = |Z_c||I_c|$.
- iv) Se compara los voltajes tanto del distribuidor como del consumidor, si $|V_u| > |V_c|$ la mayor cantidad de armónicos es del distribuidor. Si $|V_u| < |V_c|$ la mayor cantidad de armónicos vienen del consumidor.

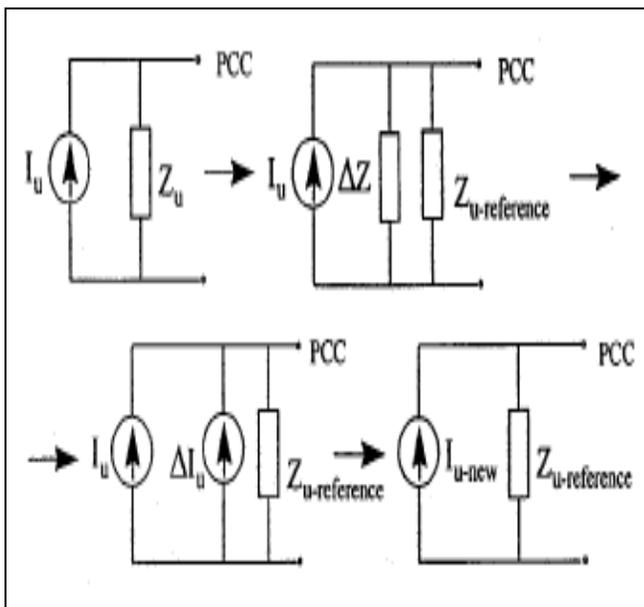
Una típica situación correspondiente a cuando se agregan capacitores en paralelo por lo que Z_u se reduce proporcionalmente, lo que puede provocar a que el consumidor inyecte más armónicos al sistema de alimentación. El consumidor no debe ser responsable por el aumento en la I_{pcc} consecuente con la variación de Z_u . De manera similar si Z_u aumentara la contribución del consumidor pero no debe recibir el consumidor crédito por ello. En resumen los

efectos de Z_u deben ser aislados cuando se considere la responsabilidad del Consumidor.

4.2 Convirtiendo el cambio de impedancia en una fuente de corriente equivalente

Otra forma de analizar esto es convertir el cambio de la impedancia del distribuidor en una fuente de corriente equivalente como se indica en la siguiente figura: [5]

Figura 19. **Conversión de cambio de impedancia a cambio de fuente de corriente**



“A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling”
 Wilsun Xu, Senior Member, IEEE, and Yilu Liu, Member, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 15, NO. 2, APRIL 2000 pp 805.

Donde:

$$I_u \text{ nueva} = V_{pcc} / Z_u \text{ referencia} + I_{pcc}$$

$$I_c \text{ nueva} = V_{pcc} / Z_c \text{ referencia} - I_{pcc}$$

Utilizando las ecuaciones:

$$I_{u-pcc} = Z_c / (Z_u + Z_c) I_u$$

$$I_{c-pcc} = Z_u / (Z_u + Z_c) I_c$$

Donde:

$$I_{pcc} = I_{u-pcc} - I_{c-pcc}$$

Si se convirtiera el lado de la carga la nueva corriente estaría dada por:

$$I_c \text{ nueva} = V_{pcc} / Z_c \text{ referencia} - I_{pcc}.$$

4.3 Caso de estudio cuando la impedancia del distribuidor o del consumidor varía

Sean los valores:

$$Z_u = 1 + j 8$$

$$Z_c = 5 + j35$$

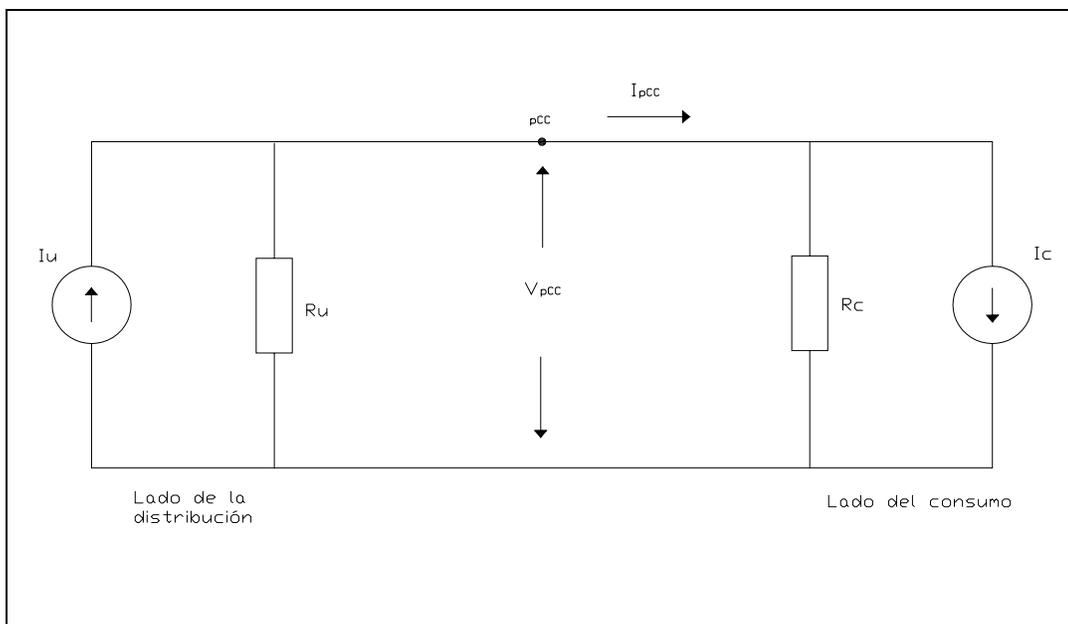
$$I_c = 3 \angle 0^\circ$$

$I_u = 1 \angle 0^\circ$ cuando I_c e I_u se cancelan

$I_u = 1 \angle 180^\circ$ cuando I_c e I_u se suman.

Del circuito equivalente:

Figura 20. Circuito de caso de estudio de impedancia crítica



Incluyendo dos valores nuevos I_{uz} e I_{cz} que son las contribuciones de corriente determinadas con los valores de impedancia actuales en vez de las impedancias dadas.

Para el caso de aumentar la impedancia 150%.

$$I_{uz-pcc} = Z_u^{*1.5} / (Z_u^{*1.5} + Z_c) \quad I_u = [(1+j8)+1.5 / ((1+j8)^*1.5+5+j35)]^* 1 / \underline{0^\circ} = \mathbf{-0.25}$$

En el caso que se cancelen. Y

$$I_{uz-pcc} = Z_u / (Z_u^{*1.5} + Z_c) \quad I_u = [1+j8)^*1.5 / (1+j8+5+j35)]^* 1 / \underline{180^\circ} = \mathbf{0.31}$$

En el caso que se sumen las corrientes.

$$I_{cz-pcc} = Z_c / (Z_u^{*1.5} + Z_c) \quad I_c = [5+j35 / ((1+j8)^*1.5+5+j35)]^* 3 / \underline{0^\circ} = \mathbf{1.98}$$

De donde:

$$I_{pcc} = I_{u-pcc} + (-I_{c-pcc})$$

Pero aplicando:

$$I_{uf \text{ nueva}} = V_{pcc} / Z_{u \text{ referencia}} + I_{pcc} = \mathbf{-0.16}$$

$$I_{cf \text{ nueva}} = V_{pcc} / Z_{c \text{ referencia}} - I_{pcc} = \mathbf{2.44}$$

Cuando se varía la impedancia del distribuidor se puede observar que la corriente I_{cf} no es variable comparada con los cambios de la impedancia del distribuidor Z_u . Sin embargo se observa que el signo cambia cuando la impedancia del distribuidor se vuelve muy grande. En este caso es más corriente armónica del distribuidor que es obligada a fluir hacia el consumidor. Podemos observar la tabla X: [5]

Caso de I_u e I_c se cancelan.

Tabla X. **Resultados variando la impedancia del distribuidor al cancelarse las corrientes**

Z_u	I_{pcc}	I_{uf}	I_{cf}	I_{uz}	I_{cz}
20%	2.83	0.38	2.44	-0.04	2.87
50%	2.59	0.15	2.44	-0.10	2.69
BASE	2.26	-0.19	2.44	-0.19	2.44
150%	1.98	-0.46	2.44	-0.25	2.24
400%	1.09	-1.35	2.44	-0.48	1.57
1000%	0.22	-2.22	2.44	-0.69	0.91
1200%	0.07	-2.33	2.40	-0.72	0.79
1500%	0.10	2.52	-2.42	0.77	-0.67

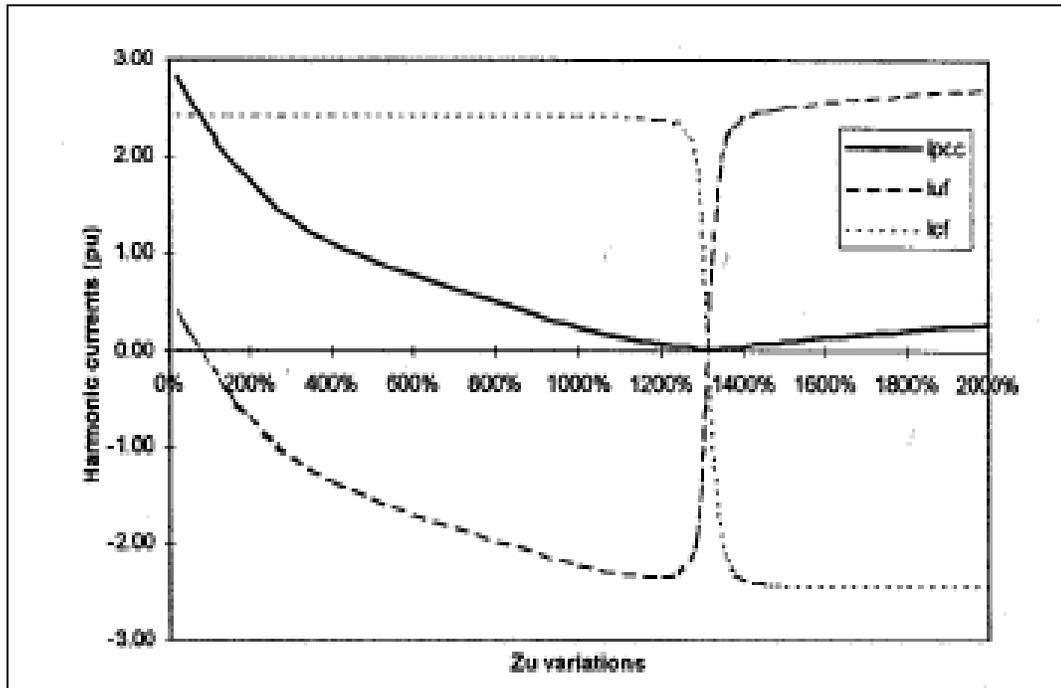
Caso de I_u e I_c se Sumen

Tabla XI. **Resultados variando la impedancia del distribuidor al sumarse las corrientes**

Z_u	I_{pcc}	I_{uf}	I_{cf}	I_{uz}	I_{cz}
20%	2.91	0.47	2.44	0.04	2.87
50%	2.80	0.35	2.44	0.10	2.69
BASE	2.63	0.19	2.44	0.19	2.44
200%	2.37	-0.07	2.44	0.31	2.06
500%	1.93	-0.51	2.44	0.53	1.40

Donde observamos que la contribución del consumidor al punto PCC cambia con los cambios de la impedancia del distribuidor. Observamos que la contribución del consumidor es más cuando Z_u se reduce o contribuye menos al aumentarse Z_u en el punto de medición PCC. Aunque en realidad el consumidor no tiene control ante los cambios de Z_u . Por lo que el índice I_{cf} es más realista que I_{cz} . En la siguiente grafica se puede observar el comportamiento de la corriente armónica respecto a los cambios de Z_u .

Figura 21. Comportamiento de las corrientes en el punto PCC respecto a las variaciones de la impedancia del distribuidor



FUENTE: "A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling" Wilsun Xu, *Senior Member, IEEE*, and Yilu Liu, *Member, IEEE* TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 15, NO. 2, APRIL 2000 PAGINA 807.

Cuando se varía la impedancia del consumidor se puede observar los valores para nuestro caso de estudio: [5]

$$I_{uz-pcc} = Z_c^{*1.5} / (Z_u + Z_c^{*1.5}) I_c = [5+j35^{*1.5} / (1+j8) + (5+j35)^{*1.5}]^{*} 3 \angle 0^\circ = \mathbf{2.60}$$

De donde:

$$I_{pcc} = I_{u-pcc} + (-I_{c-pcc})$$

Pero aplicando:

$$I_{uf\ nueva} = V_{pcc} / Z_u\ referencia + I_{pcc} = \mathbf{-0.19}$$

$$I_{cf\ nueva} = V_{pcc} / Z_c\ referencia - I_{pcc} = \mathbf{2.66}$$

Caso de I_u e I_c se cancelan.

Tabla XII. **Resultados variando la impedancia del consumidor al cancelarse las corrientes**

ZC	lpcc	luf	lcf	luz	lcz
1%	0.83	0.19	0.65	0.96	-0.13
5%	0.28	0.19	0.10	0.82	-0.54
6%	0.17	0.19	-0.02	0.79	-0.62
7%	0.06	0.18	-0.12	0.75	-0.69
8%	0.04	-0.17	0.22	-0.70	0.74
9%	0.13	-0.18	0.32	-0.71	0.85
10%	0.22	-0.19	0.40	-0.69	0.91
50%	1.75	-0.19	1.93	-0.31	2.06
BASE	2.26	-0.19	2.44	-0.19	2.44
150%	2.47	-0.19	2.66	-0.13	2.60
300%	2.72	-0.19	2.90	-0.07	2.79
500%	2.83	-0.19	3.01	-0.04	2.87

Caso de I_u e I_c se Suman

Tabla XIII. **Resultados variando la impedancia del consumidor al sumarse las corrientes**

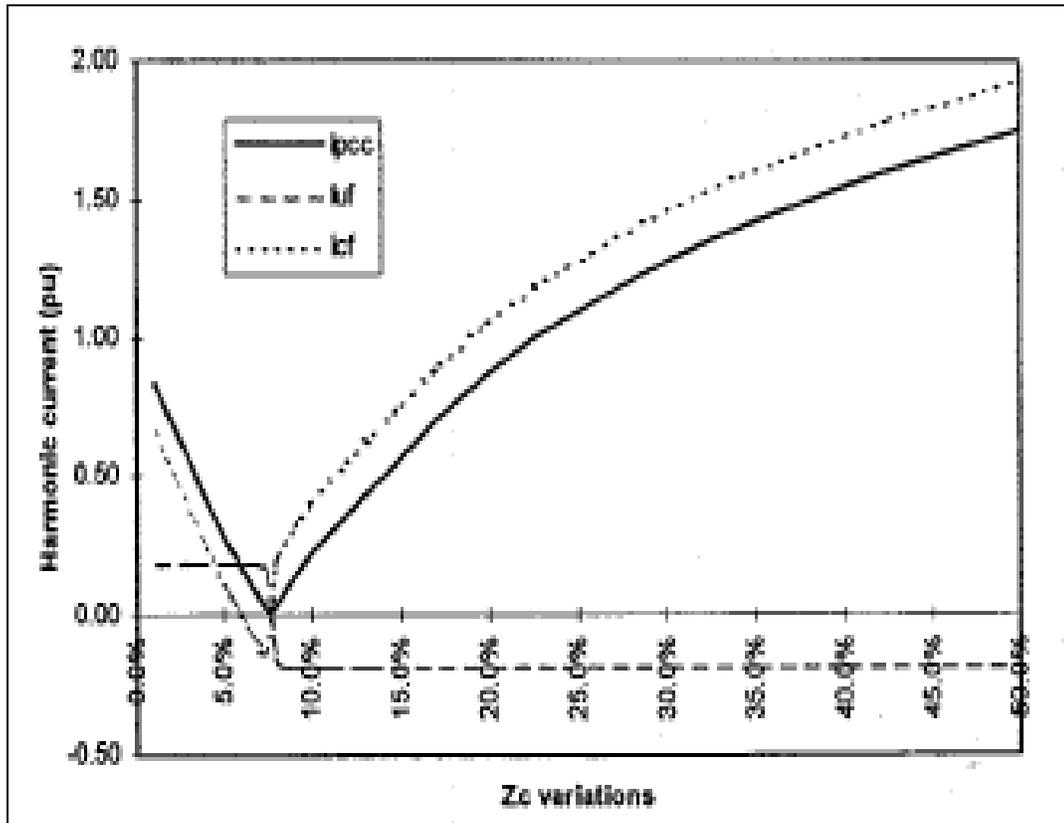
Z_c	I_{pcc}	I_{uf}	I_{cf}	I_{uz}	I_{cz}
1%	1.08	0.19	0.90	0.96	0.13
10%	1.61	0.19	1.42	0.70	0.91
50%	2.37	0.19	2.19	0.31	2.06
BASE	2.63	0.19	2.44	0.19	2.44
150%	2.74	0.19	2.55	0.13	2.60
300%	2.86	0.19	2.67	0.07	2.79
500%	2.91	0.19	2.73	0.04	2.87

Se observa que la contribución del distribuidor permanece constante excepto que el signo cambia en algunos casos. Que indica cancelación en el punto PCC. Y se observa que la corriente I_{uz} sugiere que la responsabilidad de la utilidad varía con los cambios de impedancia. Pero en el sistema no ha habido cambios. Esto puede ser por las causas:[5]

- La reducción de Z_c es equivalente a poner filtros de armónicos en servicio en la planta del consumidor. Cuando Z_c se reduce la contribución del cliente al PCC, este es reducido proporcionalmente. Ejemplo en los resultados del análisis cuando Z_c varía del 500% al 8%. [5]

- La responsabilidad del cliente aumentará, aunque, si Z_c es reducido a muy baja magnitud. Es porque el filtro del cliente es demasiado efectivo y empieza a afectar los armónicos del sistema [5].
- El índice de I_{cf} cambia de signo cuando Z_c es reducido en 8% a 6%. Esto es causado por el hecho de que es un filtro muy efectivo que esta en operación, la responsabilidad del cliente puede reducirse a cero hasta llegar a negativo. El caso negativo es alcanzado si una pequeña porción de corriente armónica es liberada por el filtro a cancelar la corriente del distribuidor. Este caso se puede apreciar en la gráfica de la figura 22.

Figura 22. Comportamiento de las corrientes en el punto PCC respecto a las variaciones de la impedancia del consumidor



"A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling"
Wilsun Xu, Senior Member, IEEE, and Yilu Liu, Member, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 15, NO. 2, APRIL 2000 pp. 808.

5. CÓMO SE DETERMINA EL DIRECCIONAMIENTO ARMÓNICO EN ALGUNOS EQUIPOS DE CALIDAD DE ENERGÍA

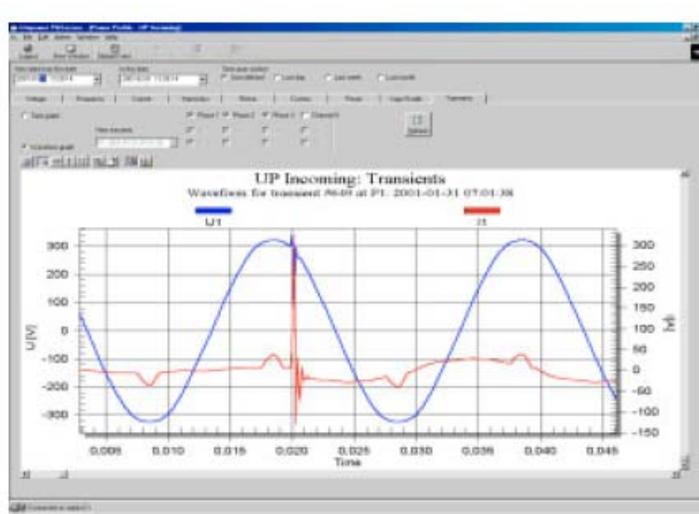
El encontrar el origen de una fuente de armónicos es algo complicado ya que cada carga en cada rama del circuito es una fuente de armónicos en potencia. Podemos ahorrarnos tiempo en encontrar el problema encontrando la dirección del flujo de los armónicos en el circuito. Por ejemplo si tuviéramos una red eléctrica con diez cargas, necesitaríamos conectar el monitor en cada carga y recolectando la información en cada una. Pero lo equipos que dan la dirección del flujo de potencia armónica podría conectarse a medio camino, es decir monitorear cinco cargas y ver si la distorsión viene de esas cinco cargas monitoreadas o no, de esa manera se puede por prueba y eliminación determinar más rápido la fuente de distorsión.

5.1 Presentación de datos de dirección en los equipos de monitoreo

Los equipos de medición nos presentan la información de diferentes formas, y el usuario debe interpretar la información para determinar el direccionamiento de armónicos. Básicamente todos se basan en una comparación de las formas de onda de corriente y voltaje de una frecuencia armónica de un orden determinado de una fase en particular. Si las formas de onda están en fase a $+90^\circ$ o -90° se dice que los armónicos provienen de la fuente de alimentación, en cambio si estuvieran fuera de fase provienen de la carga.

Algunos equipos de medición muestran la magnitud de potencia armónica y el coseno del ángulo de fase (o factor de potencia) otros muestran una captura de la forma de onda, el problema con este monitoreo es que da lugar a la inexactitud por apreciación, ya que la información es grabada por intervalos y algún cambio entre captura no es registrado. Afortunadamente, algunos instrumentos pueden presentar magnitudes armónicas y fases sobre tiempo, este tipo de pantalla captura los eventos continuos. El signo del factor de potencia (o saber si está en adelanto o en atraso) servirá para saber si el direccionamiento es desde la carga o desde la fuente.

Figura 23. Captura de transientes



Power Network Analyser ■ Unilyzer 9 FOLLETO pp. 2

Otros instrumentos muestran el ángulo propiamente, lo cual permite que el usuario interprete visualmente el direccionamiento viendo si el ángulo se encuentra del lado derecho o izquierdo del eje Y. Otros muestra un espectro mediante un diagrama de barras, los cuales cuando están sobre el eje se originan en la fuente y bajo el eje se originan en la carga. Otros tienen el resultado de una gráfica de barras que muestra el espectro armónico. Si los armónicos aparecen sobre el eje X, proviene de la fuente, si aparecen bajo el eje X proviene de la carga.

Entre los equipos que determinan la dirección de Potencia Armónica es el POWER NETWORK ANALYSER Unilyzer 902. De este se muestra la tabla técnica donde se ve que la dirección de la distorsión se muestra con el signo de la potencia armónica hasta la 11°.

5.2 Errores potenciales

En el momento de realizar una medición con un equipo de monitoreo, existen partes del sistema que nos pueden causar inexactitud en la medición de la dirección de los armónicos, como pueden ser los transformadores de corriente (PT) o los transformadores de voltaje (PT), como así también calibración, muestreo y la respuesta a la frecuencia. Ya que la determinación de la dirección de los armónicos es basado en la relación de fases entre el voltaje y corriente. Otra fuente de errores puede ser debido a que la magnitud de la forma de onda de voltaje y corriente es muy baja, por lo que el medidor no es capaz de determinar el ángulo de fase. Un error común en mediciones también es la conexión errónea de los CT's y PT's. Muchos fabricantes proporcionan el diagrama de favores, el cual presenta la rotación de fases. Esto ayuda a asegurarse que el muestreo de corriente y voltaje sea correcto.

Figura 24.

Conexión de transformadores de corriente



Power Network Analyser ■Unilyzer 9 FOLLETO pp. 2

Con el fin de minimizar errores, deben de utilizarse CT's y PT's con el menor cambio de fase y buena respuesta de frecuencia.

5.3 Uso de Transductores para adquisición de datos

Para el cálculo del flujo de potencia armónico es necesaria la medición exacta del voltaje y la corriente con cuidadosa atención al ángulo de fase. Así como en la mayor parte de las medidas, los transformadores de voltaje no tienen una respuesta a la frecuencia ajustable. El método más utilizado para medición de voltajes es usar un divisor capacitivo sin carga el cual puede ser un dieléctrico de desfase del ángulo (dielectric loss angle) con un transformador de corriente conectado a un capacitor seleccionado, con el fin de dar como dos voltios para voltaje primario nominal.

La medida de corriente, la cual generalmente tiene mayor amplitud de armónicos relativos a la fundamental, podría ser usada un transformador de corriente normal con la señal medida a través de elementos relativos en serie. Una tabla de corrección de fase debe ser establecida en base a pruebas directas según el tipo de transformador de corriente.

5.4 Muestro de tasa para adquisición de datos

El criterio Nyquist requiere un muestreo de las tasas por lo menos el doble que la frecuencia de interés más alta. Prácticamente el muestreo por canal necesita ser al menos 2.5 veces la frecuencia más alta y debe preferiblemente como 4 períodos más alto, con el fin de reducir el efecto alias que se refiere que en el orden de reproducir una señal de período T usando muestras discretas, la señal debe ser mostradas en el orden de T o más pequeñas.

Si no fuera así el análisis perdería energía en otras frecuencias no presentes en la señal original. En términos más simples, el análisis construiría un record el cual es una falsa imagen de la señal original o en otras palabras un alias de la original. Como los sistemas de potencia no contiene grandes niveles o muy altos ordenes de armónicos, no será necesario un filtro anti-alias para cada canal aunque se recomienda cuando se necesiten resultados muy precisos.

Otro criterio importante en el muestreo en la selección de la frecuencia de muestreo es el número de muestras que contendrá cada registro a transformarse. Cada registro de tiempo debe contener un número entero de ciclos de frecuencia de potencia para efectos de dispersión. Esta dispersión de la energía espectral a través de varias frecuencias “canales” es llamada dispersión espectral. Esta dispersión afecta cualquier componente de frecuencia de una señal la cual no coincide exactamente con la frecuencia del canal.

Por ejemplo, un sistema de 50 Hz. Puede considerarse con una medición deseada de un ancho de banda de 1KHz. Una tasa de muestreo de por lo menos 2 kHz es requerida y si un longitud de tiempo de registro mínimo de cinco ciclos frecuencias de potencia es escogida, la tasa de muestreo debe seleccionarse para dar 256 muestras por registro o 2560muestras por segundo.

CONCLUSIONES

1. Los armónicos han sido un problema en los sistemas de potencia trifásica, y crece debido al uso de las cargas no lineales.
2. Los métodos de direccionamiento armónico se basa en mediciones realizadas en el punto de conexión a la red pública, denominando el punto de acople común PCC.
3. La distorsión de voltaje es controlado por parte del distribuidor de energía, velando la calidad de tensión de manera que distorsiones de corriente generadas por un cliente no afecten presentando un voltaje distorsionado en la conexión a los demás consumidores.
4. La distorsión de corriente es responsabilidad del cliente, la cual es generada por las cargas no lineales en las cargas.
5. Un método para determinar la dirección de los armónicos de basa en el teorema de superposición. Y comparando el voltaje o corriente generado por cada fuente.
6. El sistema se representa por medio de un circuito equivalente dependiendo si se analiza por Norton o de Thevenin.
7. El método de superposición esta limitado a un rango del ángulo de fase entre la corriente armónica del distribuidor y del consumidor. Y esta regulado para impedancias conocidas.

8. Cuando las impedancias no son conocidas se usa el método de impedancia crítica.

9. Los equipos de medición tienen diferentes formas de expresar el direccionamiento armónico. Dependiendo como se analice y esta sujeto a errores de apreciación en algunos casos, o certezas por malas conexiones de equipos de medición.

REFERENCIAS

1. Azouaou, R., S.Rabahallah, ***Study of the direction of the harmonic injections in the electrical power systems***, S.Leulmi. Electrical engineering department, university of Tizi-Ouzou Algeria.
2. Xu , Wilsun, Xian Liu, Yilu Liu ***An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination***,. IEEE Transactions on power delivery, vol. 18, no. 1, January 2003
3. Xu , Wilsun, ***Power Direction Method Cannot Be Used for Harmonic Source Detection***, University of Alberta IUntonton, Canada.
4. Hamzah, Noraliza, Azah Mohamed, Aini Hussain ***A new method to detect the source of harmonic at the point oc common coupling***,, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi 43600, Selangor, Malaysia Jurnal Teknik Gelagar, Vol 17, No. 01, April 2006 : 54 – 63
5. Xu, Wilsun, Yilu Liu ***A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling***, IEEE Transactions on power delivery, vol. 15, no. 2, april 2000.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fink Donald G., Beaty; **Manual de Ingeniería Eléctrica Tomo 1** 13ª edición México, MC GRAW HILL, 2004.
2. George, Timothy A., David Bones, ***Harmonic power flow determination using the fast fourier transform***, IEEE Queensland Electricity Commission Brisbane, Australia. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 6, No. 2. *April* 1991.
3. Hamzah, Noraliza; Azah Mohamed, Aini Hussain ***A new method to detect the source of harmonic at the point of common coupling***, University Kebangsaan Malaysia, Bangi 43600, Selangor, Malaysia *Jurnal Teknik Gelagar*, Vol 17, No. 01, April 2006 : 54 – 63
4. Hsu, Hwei P. **Análisis de Fourier** Colombia, Pearson Education 1998.
5. ***IEEE Recommended practices requirements for harmonic electrical power systems***, Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society *Correction Sheet*, Issued 15 June 2004.

6. **NORMAS TÉCNICAS Y DE CALIDAD DEL SERVICIO CRITERIOS NORMAS NTCSTS**, COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA, república de Guatemala diciembre 1998.
7. Perera S, V J Gosbell, B. Sneddon ***A Study on the identification of major harmonic sources in power systems***. School of electrical, computer and Telecommunications Engineering University of Wollongong NSW 2522.
8. R.Azouaou, S.Rabahallah, S.Leulmi, ***Study of the direction of the harmonic injections in the electrical power systems*** Electrical engineering department, university of Tizi-Ouzou Algeria
9. **RESOLUCIÓN CNEE-51-99** LA COMISION NACIONAL DE ENERGIA ELECTRICA Guatemala, 26 de noviembre de 1999.
10. Valkenburg, Van **Análisis de Redes** 20va Edición, México Editorial Limusa
11. Xu, Wilsun, Xian Liu, Yilu Liu ***An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for harmonic Source Determination***, IEEE transactions on power delivery. Vol. 18, No. 1, January 2003

12. Xu, Wilsun, Yilu Liu ***A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling***, *IEEE Transactions on power delivery.*, Vol. 15, No. 2, April 2000.

13. Xu, Wilsun ***Power Direction Method Cannot Be Used for Harmonic Source Detection***, Senior Member University of Alberta luntonton, Canada.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. <http://www.arbiter.com>, mayo 2006
2. www.dranetz-bmi.com/pdf/techtipharmonics.pdf, mayo 2006
3. http://powerquality.com/mag/power_determine_accurate_harmonic/, mayo 2006
4. http://www.ieee-kc.org/library/pq/harmonic_02.htm, junio 2006
5. http://www.mindconnection.com/library/electrical/harmonics_pwr_flow.htm, abril 2007.
6. [.http://www.arbiter.com/ftp/datasheets/1133a_direction_harmonic_flicker.pdf](http://www.arbiter.com/ftp/datasheets/1133a_direction_harmonic_flicker.pdf), mayo 2007.
7. <http://www.jcee.upc.es/JCEE2003/BALCELLS.doc> , mayo 2007.
8. <http://composite.about.com/library/glossary/d/bldef-d1625.h>, mayo 2007
9. <http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/econtrolhtml/Freq/Nyquist2.html>, mayo 2007.
10. <http://www.ccalmr.ogi.edu/~ppearson/tillamook/alias.html> , mayo 2007.

