

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA

D E L

L I T O R A L

FACULTAD DE INGENIERIA

ELECTRICA

"ANALISIS DE LA GENERACION Y PROPAGACION
DE LAS SEÑALES ARMONICAS ORIGINADAS POR
LOS CONVERTIDORES ESTATICOS DE POTENCIA"

TESIS PREVIA A LA OBTENCION

DEL TITULO DE

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION POTENCIA

GIL ALBERTO TAMA FRANCO

GUAYAQUIL

1986-1987

A G R A D E C I M I E N T O

Agrezco al PROF. G.T. HEYDT y muy en especial a los INGS. LEO SALMON y GUSTAVO BERMUDEZ quienes con la participación de sus conocimientos y filosofías, así como de sus críticas y sugerencias, han sido de gran valor para la realización de éste trabajo.

DEDICATORIA

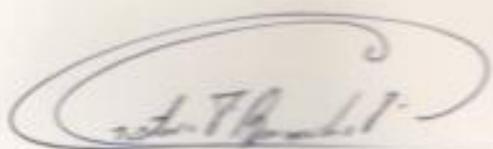
Dedico la presente

TESIS DE GRADO:

A DIOS

A MIS PADRES Y

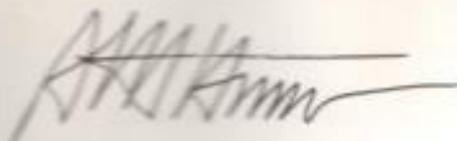
A MIS HERMANOS.



ING. GUSTAVO BÉRMUDEZ FLORES
SUB-DECANO DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA ELECTRICA



ING. LEO SALOMON F.
DIRECTOR DE TESIS



ING. ALBERTO HANZE BELLO
MIEMBRO PRINCIPAL

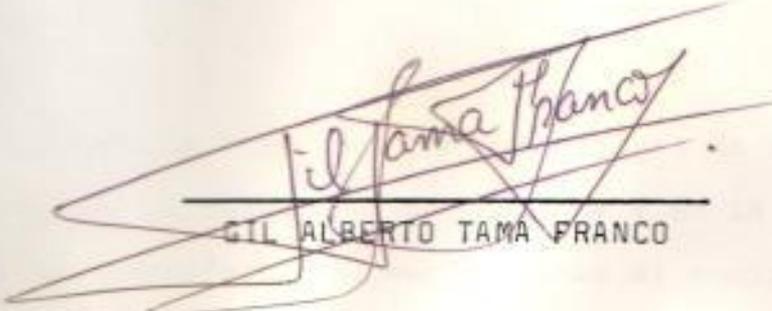


ING. JORGE FLORES M.
MIEMBRO PRINCIPAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en ésta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).


GIL ALBERTO TAMA FRANCO

RESUMEN

El presente estudio es para analizar la conveniencia de la instalación de trampas de armónicas en los sistemas de potencia, con el fin de poder realizar un control minucioso en la generación y propagación de dichas señales armónicas.

En primer lugar se realiza un estudio teórico de la manera como los rectificadores pueden introducir armónicos en los sistemas de potencia, analizando así, las principales fuentes de armónicas, comenzando el estudio desde el elemental rectificador monofásico de media onda hasta las más variadas cargas no lineales que son responsables de los efectos que producen las señales armónicas en todos los equipos eléctricos.

En el Capítulo 2 se realiza un análisis de la forma de onda de la corriente en la carga y en la línea y fase del transformador que alimenta al equipo rectificador, tanto para los equipos con rectificadores

trifásicos como para los equipos con rectificadores hexafásicos-estrella, realizando finalmente una comparación cualitativa y cuantitativa de estos dos tipos de rectificadores.

Las formas para la reducción de armónicas en los sistemas de potencia y las alternativas para la correcta selección de filtros para atenuar dichas señales armónicas, se presentan en el Capítulo 3.

En el Capítulo 4 se realiza el análisis de un sistema real, el análisis del comportamiento de un sistema de potencia al producirse el flujo de las señales armónicas, todo esto se resume en la obtención de la característica Impedancia-Frecuencia de dicho sistema de potencia.

Finalmente se realiza el estudio del flujo de armónicas al sistema de potencia y al sistema de filtros diseñados en el Capítulo 4, con el cual se tiene un doble propósito; en primer lugar, suministrar compensación de reactivos; y en segundo lugar, realizar el control de la propagación y atenuación de las armónicas al sistema de potencia.

INDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
RESUMEN -----	VI
INDICE GENERAL -----	VIII
INDICE DE FIGURAS -----	XV
INDICE DE TABLAS -----	XXI
INTRODUCCION -----	22
CAPITULO 1	
GENERALIDADES	
1.1 MANERA COMO LOS RECTIFICADORES PUE DEN INTRODUCIR ARMONICOS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA -----	25
1.2 ANALISIS DE LAS FUENTES DE ARMONI CAS -----	29
1.3 ESTUDIO ELEMENTAL DE RECTIFICADO RES -----	34
1.3.1 RECTIFICADORES MONOFASICOS DE ME DIA ONDA -----	37
1.3.1.1 CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE FOU RIER DE LA CORRIENTE EN LA CARGA DEL RECTIFICADOR -----	39

1.3.1.2	FORMA DE ONDA DE DICHO RECTIFICADOR -----	41
1.3.2	RECTIFICADORES MONOFASICOS DE ONDA COMPLETA -----	42
1.3.2.1	CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER DE LA CORRIENTE EN LA CARGA DEL RECTIFICADOR MONOFASICO DE ONDA COMPLETA -----	45
1.3.2.2	ANALISIS DE LA FORMA DE ONDA, DEPENDIENDO DE LA CARGA QUE ESTA ALIMENTANDO DICHO RECTIFICADOR -----	46

CAPITULO 2

RECTIFICADORES DE CARGAS DISTRIBUIDAS EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

2.1	INTRODUCCION Y GENERALIDADES -----	49
2.2	LA GENERACION, PROPAGACION Y ATENUACION DE LAS SEÑALES ARMONICAS -	53
2.2.1	RECTIFICADORES TRIFASICOS -----	57
2.2.2.1	ANALISIS Y FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE EN LA CARGA ALIMENTADA POR UN RECTIFICADOR TRIFASICO -----	65
2.2.2.2	ANALISIS Y FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE EN LA LINEA DEL TRANSFORMADOR -----	69

2.2.1.3	ANALISIS Y FORMA DE ONDA DE LA <u>CO</u> RRIENTE EN LA FASE DEL TRANSFORMA DOR -----	74
2.2.1.4	PROGRAMA PARA LA OBTENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER EN FORMA RECURSIVA DE LAS CORRIENTES EN LA CARGA, EN LA LINEA Y EN LA FASE DEL TRANSFORMADOR -----	77
2.2.1.5	ANALISIS DE LOS RESULTADOS, FORMAS DE PREVENIR DAÑOS -----	94
2.2.2	RECTIFICADORES HEXAFASICOS ESTRE LLA -----	101
2.2.2.1	ANALISIS Y FORMA DE ONDA DE LA <u>CO</u> RRIENTE EN LA CARGA DEL TRANSFORMA DOR -----	106
2.2.2.2	ANALISIS Y FORMA DE ONDA DE LA <u>CO</u> RRIENTE EN LA LINEA DEL TRANSFORMA DOR -----	108
2.2.2.3	ANALISIS Y FORMA DE ONDA DE LA <u>CO</u> RRIENTE EN LA FASE DEL TRANSFORMA DOR -----	113
2.2.2.4	PROGRAMA PARA LA OBTENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER EN FORMA	

	RECURSIVA DE LAS CORRIENTES EN LA CARGA, EN LA LINEA Y EN LA FASE DEL TRANSFORMADOR -----	113
2.2.2.5	ANALISIS DE LOS RESULTADOS Y FORMAS DE PREVENIR POSIBLES DAÑOS ---	126
2.2.3	COMPARACION DE LOS DOS TIPOS DE RECTIFICADORES -----	128
CAPITULO 3		
FORMAS DE REDUCIR LAS ARMONICAS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA		
3.1	EFFECTOS DE LAS SEÑALES ARMONICAS EN LOS EQUIPOS ELECTRICOS -----	131
3.2	EFFECTOS DE LAS SEÑALES ARMONICAS SOBRE LAS MAQUINAS ELECTRICAS ----	132
3.3	ALTERNATIVAS PARA LA CORRECTA SELECCION DE FILTROS PARA ATENUAR LAS SEÑALES ARMONICAS -----	134
3.3.1	DIVERSOS TIPOS DE FILTROS UTILIZADOS PARA LA ATENUACION DE LAS SEÑALES ARMONICAS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA -----	135
3.3.1.1	FILTROS SINTONIZADOS -----	138

3.3.1.2	FILTROS PASA BAJO -----	142
3.4	LIMITES ADMISIBLES DE ARMONICAS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA -----	144

CAPITULO 4

PREVENCIÓN Y ATENUACIÓN DE LAS ARMONICAS EN
LOS SISTEMAS DE POTENCIA

4.1	ANÁLISIS DE UN SISTEMA REAL -----	148
4.2	ANÁLISIS DE LA CARACTERÍSTICA IMPE DANCIA-FRECUENCIA COMO UNA FUNCIÓN DEL FACTOR DE CALIDAD "Q" -----	156
4.2.1	PROGRAMA PARA LA OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA IMPEDANCIA-FRECUEN CIA (VARIANDO LA CAPACIDAD DEL BAN CO DE CONDENSADORES Y EL FACTOR DE CALIDAD) -----	159
4.3	DISEÑO DE FILTROS -----	163
4.3.1	PROGRAMA QUE PERMITE LA OBTENCIÓN DEL TIPO DE FILTRO MAS FUNCIONAL -	166

CAPITULO 5

ESTUDIO DEL FLUJO DE POTENCIA DE ARMONICAS

5.1	FORMULACION DEL FLUJO DE POTENCIA DE ARMONICAS -----	168
5.2	APLICACION PRACTICA -----	173
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
1	CONCLUSIONES -----	176
2	RECOMENDACIONES -----	177
ANEXOS		
1	PROGRAMA GENERAL QUE PERMITE OBTENER: 1. LA CARACTERISTICA IMPEDANCIA- FRECUENCIA COMO UNA FUNCION DEL FACTOR DE CALIDAD "Q". 2. EL TIPO DE FILTRO MAS FUNCIO- NAL PARA LA ATENUACION DE LAS SEÑALES ARMONICAS EN LOS SISTE- MAS DE POTENCIA. -----	180
2	PROGRAMA GENERAL QUE PERMITE OBTENER: 1. EL FLUJO DE POTENCIA DE LAS SE- ÑALES ARMONICAS, VALORES DE	

	LAS CORRIENTES ARMONICAS. ----	193
3	PROGRAMA GENERAL QUE PERMITE OBTENER:	
	1. EL FLUJO DE CARGA DE UN SISTEMA DE POTENCIA EN EL QUE SE CONSIDERA LA PRESENCIA DE FILTROS DE LAS SEÑALES ARMONICAS, SE LO HACE EN BASE DEL FLUJO DE CARGA DE NEWTON-RAPHSON. --	207
4	APLICACION PRACTICA -----	221
	BIBLIOGRAFIA -----	395

INTRODUCCION

Desde 1947 con la invención del transistor, una nueva era fue abierta para la ingeniería eléctrica, se dispusieron de nuevas herramientas, los dispositivos semiconductores empezaron a ser utilizados. El diodo, el transistor, el thyristor, el termistor y todos sus relativos fueron hechos para ser utilizados por el diseñador en la conversión y el control de la potencia eléctrica, incrementando de ésta manera su utilidad para el hombre. Las grandes plantas electroquímicas operaban con sistemas rectificadores que utilizaban ya sea diodos o rectificadores de arco de mercurio, utilizados estos por tener elevada eficiencia y un alto factor de potencia.

Cuando se realiza la compensación de reactivos es necesario hacer un análisis de la posible resonancia parala entre el banco de capacitores utilizado para la compensación de reactivos y la reactancia inductiva del sistema de potencia. Los convertidores estáti

cos de potencia utilizados como rectificadores ó como inversores, son equipos que requieren de una cantidad determinada de potencia reactiva, estos convertidores estáticos de potencia, pueden considerarse que son generadores ó verdaderas fuentes de armónicas en un sistema de potencia AC. Estas corrientes armónicas se propagarán por el camino de menor impedancia, pudiendo darse el caso de resonancia paralelo, causando oscilaciones de corrientes verdaderamente elevadas las cuales fluyen a través de impedancias; dando lugar a la producción de voltajes armónicos, los cuales en adición de la onda fundamental de voltaje, produce formas de onda de voltaje distorsionado. Esta distorsión de voltaje, puede causar corrientes armónicas a flujir hacia otros circuitos, pudiendo de ésta manera interferir con los circuitos de regulación de voltaje y los circuitos de comunicación.

El método que aquí presento se basa en el CONTROL DE LA GENERACION, PROPAGACION Y ATENUACION DE LAS SEÑALES ARMÓNICAS CAUSADAS POR LOS CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA, utilizando el banco de capacitores que sirve para compensar reactivos con un doble beneficio, el mencionado anteriormente y el control de la propagación y atenuación de las señales armónicas.

La propagación de éstas señales armónicas causadas por los convertidores estáticos de potencia, puede ser reducida por el uso y conveniente aplicación de adecuados sistemas de filtros. EL DISEÑO DE ESTOS FILTROS, DEBERIA ELIMINAR LA INTERACCION ENTRE LOS SISTEMAS DE POTENCIA Y LA CARGA Y, REDUCIR EL FLUJO DE LAS CORRIENTES ARMONICAS.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1.- MANERA COMO LOS RECTIFICADORES PUEDEN INTRODUCIR ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA

En los últimos 50 ó 60 años, el desarrollo de la tecnología de los rectificadores, convertidores e inversores-semiconductores comenzó a surgir de una manera muy rápida, aplicándose especialmente su utilización en fábricas de papel, industrias de todo tipo, en especial, electromecánicas y de fundición, etc.

Los convertidores-semiconductores, producen señales armónicas en los sistemas de potencia, el verdadero problema presente es; la no linealidad de ciertas cargas a la corriente alterna, es decir que su característica de impedancia no es lineal al aplicársele corriente alterna. Sus formas de onda de corriente eléctrica, son distorsionadas en comparación con ondas puramente sinusoidales a frecuencia fundamental. En el lenguaje del análisis de Fourier, dichas formas de onda, contienen componentes armónicas ó simplemente armónicas.

Con el advenimiento de grandes equipos asociados al control por medio de thyristores, considerable atención ha sido dirigida a las corrientes armónicas requeridas por tales cargas y los voltajes armónicos producidos por el paso de tales corrientes a través del sistema de potencia en consideración.

Los capacitores de potencia han sido y son utilizados para suministrar compensación de reactivos en algunos sistemas de potencia, el problema radica principalmente en que se debe tener cuidado de la posible resonancia en paralelo entre el banco de condensadores y la reactancia inductiva equivalente del sistema de potencia. La operación a bajo factor de potencia, hace que sea deseable la compensación de los reactivos. La resonancia entre los capacitores y la reactancia del sistema puede producir grandes voltajes armónicos causados por las corrientes armónicas generadas por los convertidores. Esto puede ser reducido por el uso de filtros convenientes; los cuales actúan como verdaderas trampas de armónicas.

La selección del equipo para compensación de reactivos y el diseño de filtros de armónicas, es una mezcla de arte, ciencia y economía.

El sistema de potencia, podría ser reducido a un sistema equivalente, llamado sistema eléctrico simplificado. Fig. # 1. Donde \dot{E} es una tensión perfectamente sinusoidal. Para facilitar el razonamiento se ha reducido las impedancias del sistema de potencia en tres impedancias equivalentes:

- Z_c - es la impedancia común al consumidor normal y al consumidor con equipo rectificador.
- Z_r - es la impedancia relacionada al consumidor con equipo rectificador.
- Z_n - es la impedancia relacionada apenas al consumidor normal.

Para una frecuencia dada, conviene tener presente el hecho de que Z_c , Z_r y Z_n varían con la frecuencia.

La tensión en el nodo J, que alimentará la carga del consumidor normal a través de la impedancia Z_n , está dada por:

$$\dot{E}_J = \dot{E} - Z_c(\dot{i}_n + \dot{i}_r) \quad (1)$$

La tensión \dot{E}_J , no será sinusoidal, debido al hecho que la corriente \dot{i}_r no es sinusoidal, ésta corriente tiene componentes armónicos que fluyen hacia el resto del sistema provocando voltajes armónicos que pueden ser peligrosos y producirían la muy conocida interferencia telefónica.

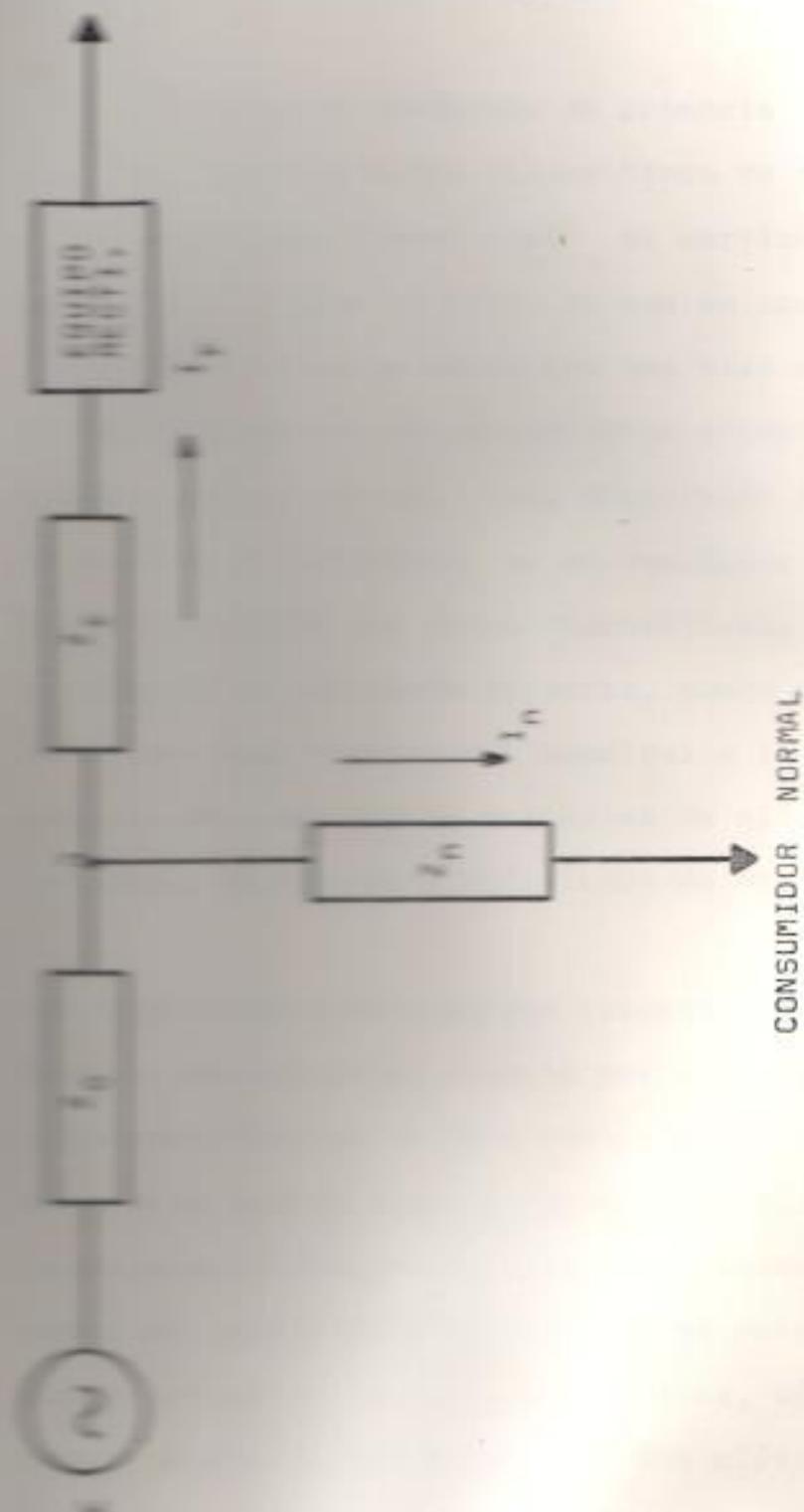


Fig. # 1 Sistema Eléctrico Simplificado.

7.2.- ANÁLISIS DE LAS FUENTES DE ARMONICAS

Los convertidores estáticos de potencia (rectificadores, inversores y otros dispositivos de conmutación) constituyen una fuente común de corrientes armónicas. Esto se debe al hecho de que se produce discontinuidad en la carga de la red que trae como resultado una deformación de la corriente primaria, en las fases y en las líneas. Esta distorsión de la forma de onda de la corriente, es un resultado de la conmutación producida por éstos dispositivos. La forma de onda de la corriente primaria, puede descomponerse en una onda fundamental senoidal a la que se superpone una cantidad de armónicas de diferentes frecuencias, amplitudes y relaciones de fase.

Las corrientes armónicas son requeridas para aproximarse a una corriente directa por medio de algún equipo rectificador de fase controlada, produciendo una onda de salida esencialmente cuadrada. Las armónicas características de corriente asociadas comúnmente con convertidores estáticos de potencia cuyo número de pulsos es seis, son: quinta, séptima, undécima y décimotercera armónica. Una clásica corriente de forma de onda cuadrada, puede ser producida aumentando corrientes armónicas en fase, cuya magnitud

es igual a la suma de la fundamental con un múltiplo de ella igual al recíproco del orden del armónico.

En la Fig. # 2 se muestra la onda resultante, que no es más que la suma de la fundamental con los armónicos de quinto, séptimo, undécimo y décimotercer orden.

Si se considera la carga DC en un convertidor estático de potencia a ser relativamente constante en un corto período de tiempo -segundos ó minutos- podría considerarse que la corriente DC es constante.

En un convertidor estático de potencia, Fig. # 3, conmuta ó cambia esta corriente constante DC entre las fases de un sistema de potencia AC. Por medio del análisis de Fourier, se puede mostrar que el sistema de potencia AC tiene que suministrar corrientes armónicas de orden y magnitud de:

$$n = kp \pm 1 \quad (2)$$

$$I_n = I_1/n \quad (3)$$

donde:

n = Orden del armónico

k = Del análisis de Fourier, es un entero que puede ser 1, 2, ...

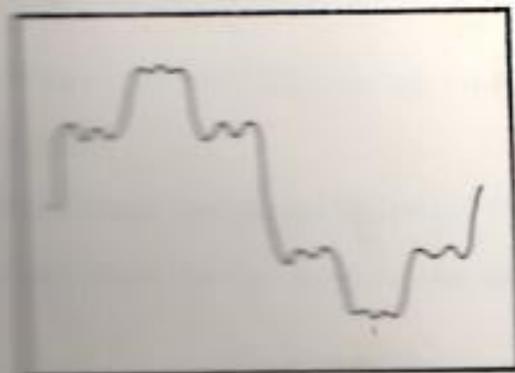


Fig. 42 Forma de Onda Resultante, incluye la Fundamental y armónicas de orden: quinto, séptimo, uno décimo y duodécimo.

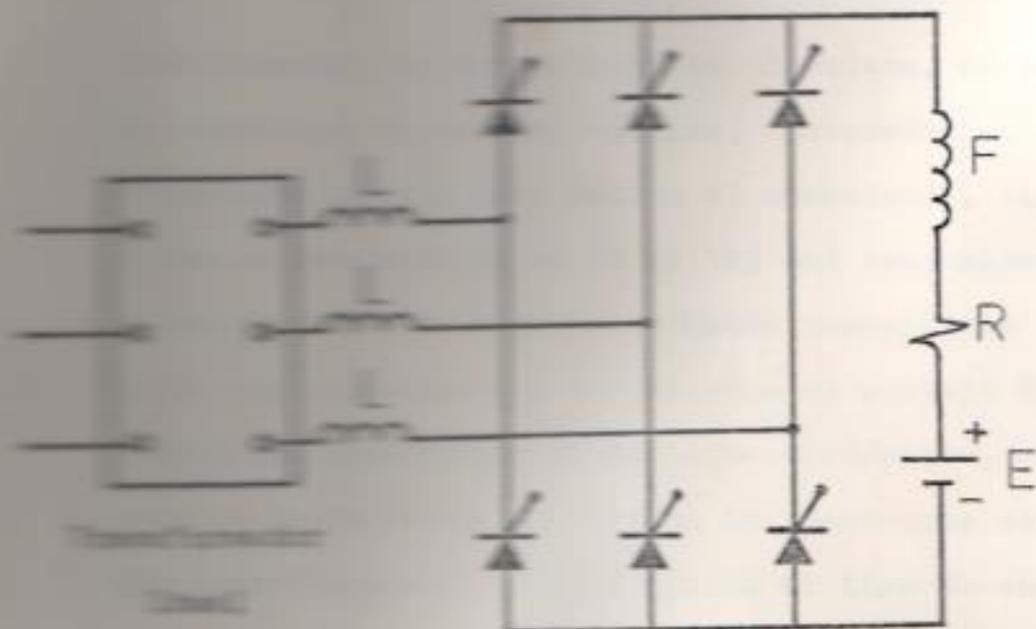


Fig. 43 Circuito de un Convertidor Trifásico de Onda Completa tipo Puente, seis pulsos.

q = Número de pulsos en el circuito del rectificador

I_1 = Amplitud de la corriente fundamental

I_n = Amplitud de la corriente armónica

La ecuación (3), proporciona valores teóricos de la corriente de armónica en por unidad de la corriente fundamental. Sin embargo las amplitudes de las corrientes armónicas son una función del ángulo de retardo (μ) y de la reactancia de conmutación (X_c). Los valores típicos para el análisis de armónicas se muestran en la Tabla # 1.

Adicionalmente, un convertidor de 12 pulsos, no produce armónicas de quinta, séptimo, decimoséptimo y décimo noveno orden, pero debido al desbalance, algunas veces se presentan en 10 al 15% del equivalente de un convertidor de 6 pulsos. Estos desbalances pueden ser causados por variaciones en voltaje ó impedancia de línea-línea en sistemas trifásicos, diferencias de razón de vueltas en los devanados de algún transformador; esto es debido al tipo de conexión con las bobinas, diferencias de los ángulos de disparo de los circuitos múltiples rectificadores, etc.

TABLA # 1

CORRIENTES ARMONICAS PRESENTES EN LOS CONVERTIDORES ESTATICOS DE POTENCIA
EN POR UNIDAD DE LA CORRIENTE FUNDAMENTAL

PULSOS DEL CONVERTIDOR	ORDEN DEL ARMONICO									
	5	7	11	13	17	19	23	25		
6	0.175	0.110	0.045	0.029	0.015	0.010	0.009	0.008		
12	0.026	0.016	0.045	0.029	0.002	0.001	0.009	0.008		
18	0.026	0.016	0.007	0.004	0.015	0.010	0.001	0.001		
24	0.026	0.016	0.007	0.004	0.002	0.001	0.009	0.008		

2.2.2.- ESTUDIO ELEMENTAL DE RECTIFICADORES

Casi todos los circuitos electrónicos necesitan una fuente de alimentación de corriente continua; aquellos sistemas portátiles que necesitan baja potencia pueden emplearse baterías, sin embargo, es alimentar un equipo electrónico a través de una fuente de alimentación, que constituye parte del equipo y convierte la onda alterna de las redes industriales de potencia a tensión continua.

Un rectificador es, en su acepción general, un dispositivo que presenta una resistencia distinta al paso de la corriente eléctrica cuando se invierte la dirección de la corriente. Un rectificador puede considerarse como un dispositivo conmutador, y, por ende, es una discontinuidad en la carga de la red que tiene como resultado una deformación de la corriente alterna, en los cables y en la línea.

De los rectificadores mecánicos, ésta propiedad se obtiene por medio de un dispositivo que funciona sin rozamiento, un contacto abre y cierra el circuito. Hay otros tipos de rectificadores que no tienen piezas móviles y cuyo funcionamiento se basa en la conductividad unilateral de estructuras fijas compues-

Una de materiales distintos. Esta última clase de
 rectificadores actúan como válvulas eléctricas y por
 eso algunas veces se las denomina "VALVULAS". Entre
 ellas están comprendidos los rectificadores de vapor
 de mercurio (cuyo cátodo es mercurio líquido), recti-
 ficadores de cátodo incandescente (cuyo cátodo tiene
 forma de filamento), rectificadores de cátodo frío,
 rectificadores electrostáticos y rectificadores de
 diodo. Algunos del último tipo son rectificadores
 de electrolito sólido, mientras que otros son recti-
 ficadores electrostáticos sólidos ó de contacto sólido.
 Los rectificadores de cristal también constituyen un ti-
 po de rectificador, en los cuales en los receptores
 de radio y, en parte considerar que algunos de estos
 están comprendidos dentro de los tipos de rectifica-
 dores que se mencionan.

Los tipos de circuitos para rectificadores varían co-
 rrespondientemente con la simple conexión monofásica de media
 onda, que se emplea para la carga de baterías, hasta
 los complejos circuitos múltiples, zigzag y bifurca-
 dos, empleados para producir corriente continua para
 tracción, transmisiones de radio, electrólisis y o-
 tros procesos de alta tensión. Algunas de estas co-
 nexiones se caracterizan por el gran aprovechamiento
 de los aparatos; otras, por su característica plana

de regulación, etc.; mientras que otras son más apropiadas para rectificadores de un solo ánodo ó utilizadas para rectificadores de alta tensión.

En los circuitos de gran potencia hay que considerar con gran cuidado las formas de onda y el rendimiento. En los circuitos de poca potencia, a menudo se sacrifica la forma de onda en pro de sencillez y/o de costo.

Las transformaciones polifásicas de tres a seis, incluso mayor número de fases, constituyen una etapa en el proceso de rectificación. Pueden citarse algunos ventajas de la rectificación polifásica respecto a la monofásica, a saber:

- 1.- Menor contenido de rizado de la componente fundamental y en los armónicos de orden superior en la onda de salida, lo que requiere entonces filtros menos complejos.
- 2.- Los transformadores se usan con más rendimiento ya que la relación entre potencia en C.C. y KVA de transformador es más elevada para la conversión polifásica.
- 3.- Al aumentar el número de fases, aparece una relación superior entre tensiones de corriente continua y de corriente alterna.

4.- El rendimiento total del proceso de conversión es importante cuando deben convergir grandes cantidades de potencia de corriente alterna en corriente continua.

Por consiguiente, es mucho mejor, para una compañía eléctrica, suministrar corriente alterna a un abonado industrial que requiere grandes cantidades de corriente continua, enviando energía por líneas trifásicas de alta tensión. Se utilizan entonces transformadores para (1) proporcionar una tensión secundaria adecuada para la rectificación, y (2) transformar la alimentación trifásica a hexafásica ó con mayor número de fases, a fin de obtener las ventajas anteriormente citadas.

RECTIFICACIONES MONOFÁSICAS DE MEDIA ONDA

Para la carga de baterías y otros usos, no es necesario que la corriente de salida sea perfectamente continua, y en muchos casos puede emplearse una simple rectificación de media onda. La Fig. # 4 nos muestra un rectificador monofásico de media onda.

En estos tipos de rectificadores, la corriente circula sólo durante uno de los semiperíodos, lo cual indica que se trata de una corriente circulando en una

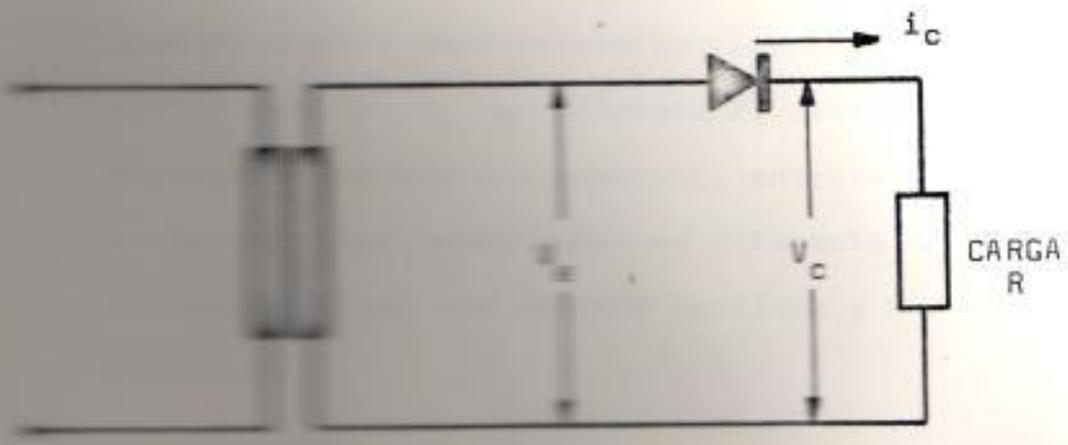


Fig. #4 Rectificador Monofásico de media onda.

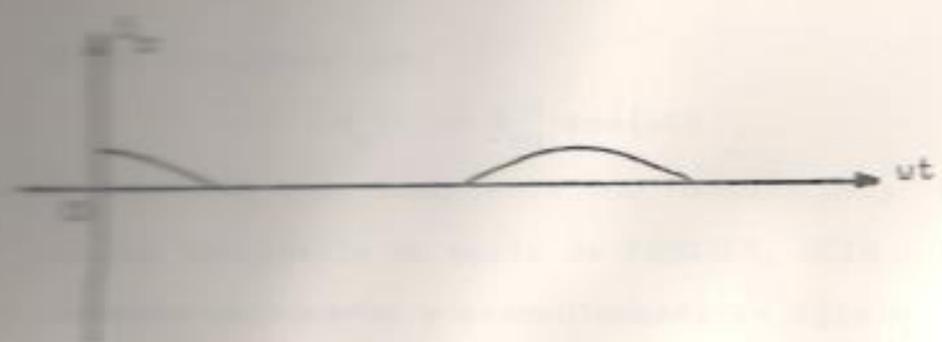
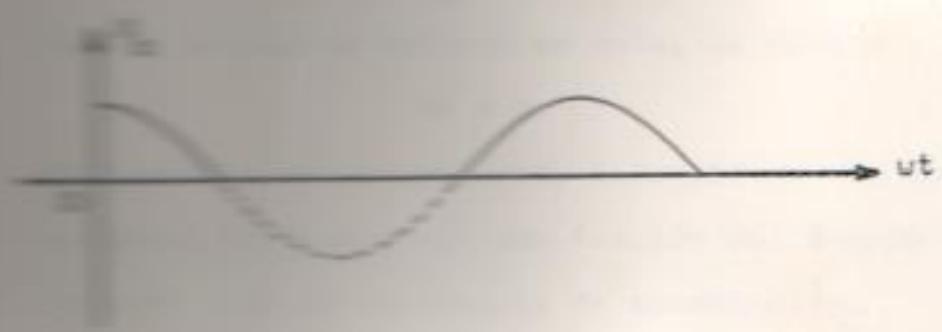
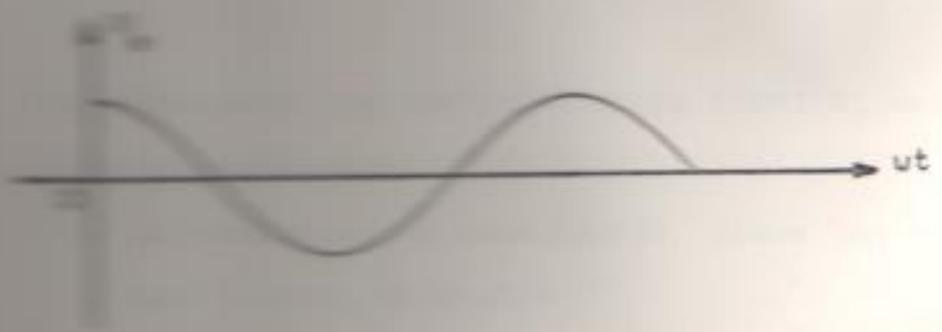


Fig. #5 Formas de Onda de un Rectificador Monofásico de Media Onda.

una sola dirección, pero intermitentemente. Es evidente que la tensión V_e que alimenta al rectificador es una tensión puramente sinusoidal, entretanto V_c es una tensión cuyo valor medio es diferente de cero, está compuesta por una tensión continua y una serie de armónicos.

CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER DE LA CORRIENTE EN LA CARGA DEL RECTIFICADOR

El cálculo de los coeficientes de FOURIER, va a realizarse, asumiendo:

1.- La reactancia de conmutación tiene un valor igual a cero, es decir:

$$X_c = 0 \quad (4)$$

2.- El ángulo de retardo es nulo, es decir:

$$\alpha = 0 \quad (5)$$

Sin embargo en la realidad, la amplitud de las corrientes armónicas son una función del ángulo de retardo y de la reactancia de conmutación.

Si se considera que:

$$V_e(t) = V_{em} \cos(\omega t) \quad (6)$$

La ecuación (6), representa una función par, entonces su desarrollo en serie de FOURIER, sólo tendrá términos en cosenos y probablemente un término con

tante que se lo considera como un término coseno. Si a caso se llama a:

$$x = \omega t \quad (7)$$

entonces, por Series de Fourier, se tendrá que:

$$a_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(x) dx = \frac{2}{\pi} (\sin(\frac{\pi}{2}) - \sin(0)) = \frac{2}{\pi}$$

$$a_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos^2(x) dx = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} (\cos(2x) + 1) dx = \frac{1}{2}$$

en forma general se tendría:

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(x) \cdot \cos(nx) dx =$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} (\cos(n-1)x + \cos(n+1)x) dx =$$

$$a_n = - \frac{2 \cdot \cos(\frac{n\pi}{2})}{(n^2 - 1)} \quad \text{si } n \neq 1 \text{ y si } n \text{ es par}$$

Es decir que la tensión V_c , aplicada a la carga del rec rectificador monofásico de media onda, estará dada por la expresión:

$$V_c = V_m \left[\frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cos(\omega t) + \frac{1}{3} \cos(2\omega t) - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos(4\omega t) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos(6\omega t) - \frac{1}{7 \cdot 9} \cos(8\omega t) + \frac{1}{9 \cdot 11} \cos(10\omega t) - \dots \right) \right]$$

de esta manera, se obtendría la corriente circulan-

do en la carga del rectificador monofásico de media onda:

$$i_c = \frac{V_c}{R} \quad (8)$$

3.2.2.- FORMA DE ONDA DE DICHO RECTIFICADOR

En la expresión obtenida de la tensión y la corriente en la carga del rectificador monofásico de media onda se aprecia claramente que existe, una componente de corriente continua así como armónicos pares. Esta componente de corriente continua, tiende a saturar el núcleo del transformador, es decir tiende a introducir armónicos nuevos y aumentan apreciablemente el valor de la corriente de magnetización del mismo, por éste motivo, éste tipo de rectificador es utilizado para suministrar baja potencia.

Cuando un transformador alimenta exclusivamente un rectificador de éste tipo, su potencia debe ser no mínimo de 1,5 veces la potencia absorbida por la carga.

Es decir que cuando se trabaja con un rectificador monofásico de media onda, su forma de onda de corriente, estará tendiendo a distorsionarse, es decir comparándola con la Fig. # 5 que es su forma de onda "teórica".

se tendrá una onda con armónicos aumentados debidos a la saturación del núcleo del transformador que alimenta al rectificador.

RECTIFICADORES MONOFASICOS DE ONDA COMPLETA

El circuito mostrado en la Fig. # 6, es un tipo de rectificador de onda completa, es una variante circuital muy simple cuando no se dispone de un transformador con derivación central, se lo conoce como "Rectificador tipo Puentes".

Para entender la forma de rectificación, se debe conocer las rutas de conducción y no conducción durante cada medio ciclo de la corriente alterna. En la Fig. # 7 está claramente la ruta de conducción para rectificar la corriente alterna durante el semiciclo positivo. Entonces en la carga resistiva, se desarrolla un voltaje debido a la corriente de conducción de los elementos rectificadores.

La Fig. # 8 muestra claramente la ruta de conducción para la rectificación de la corriente alterna durante el semiciclo negativo. Note cuidadosamente que la corriente i_{sc} circula en el mismo sentido que en el semiciclo anterior.

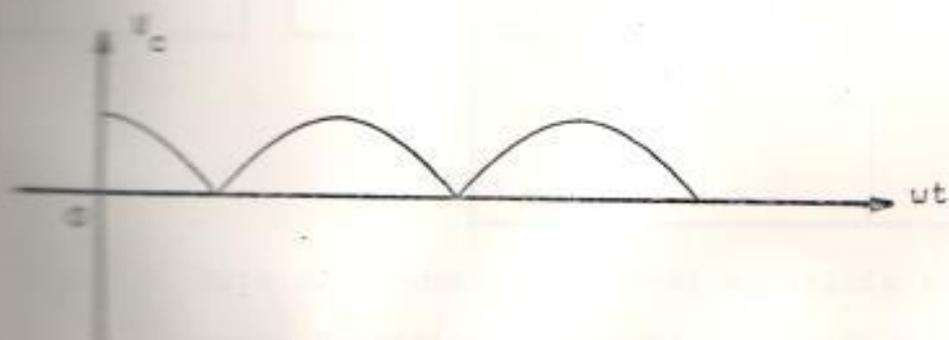
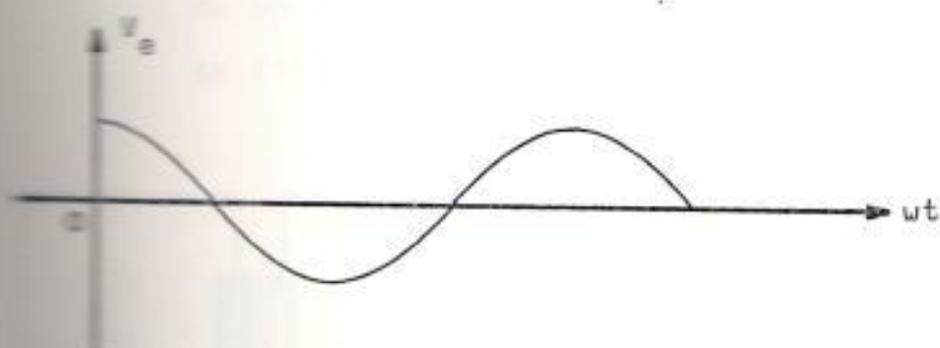
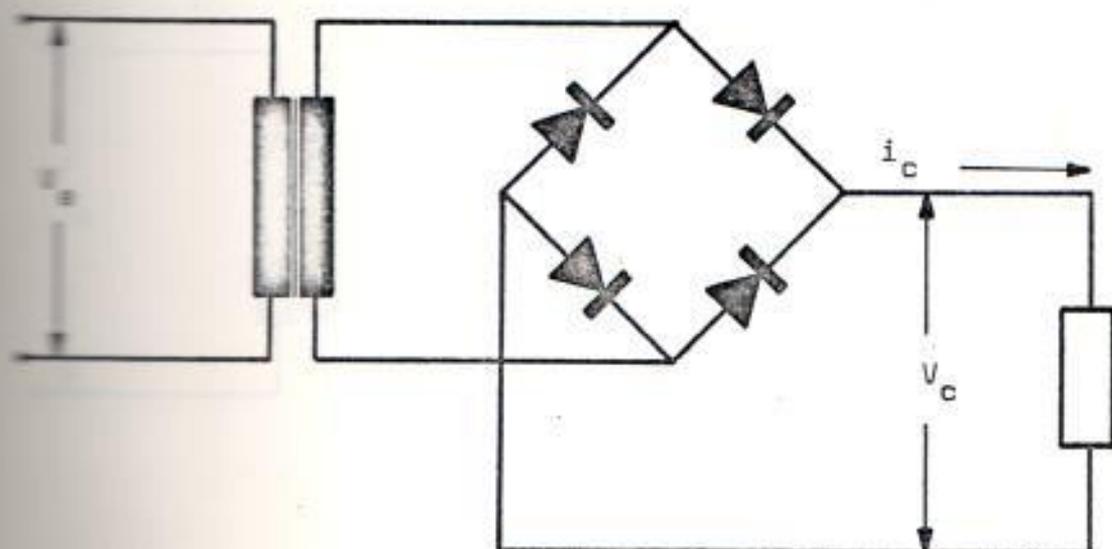


Fig. 4.5 Rectificador Monofásico de Onda completa.

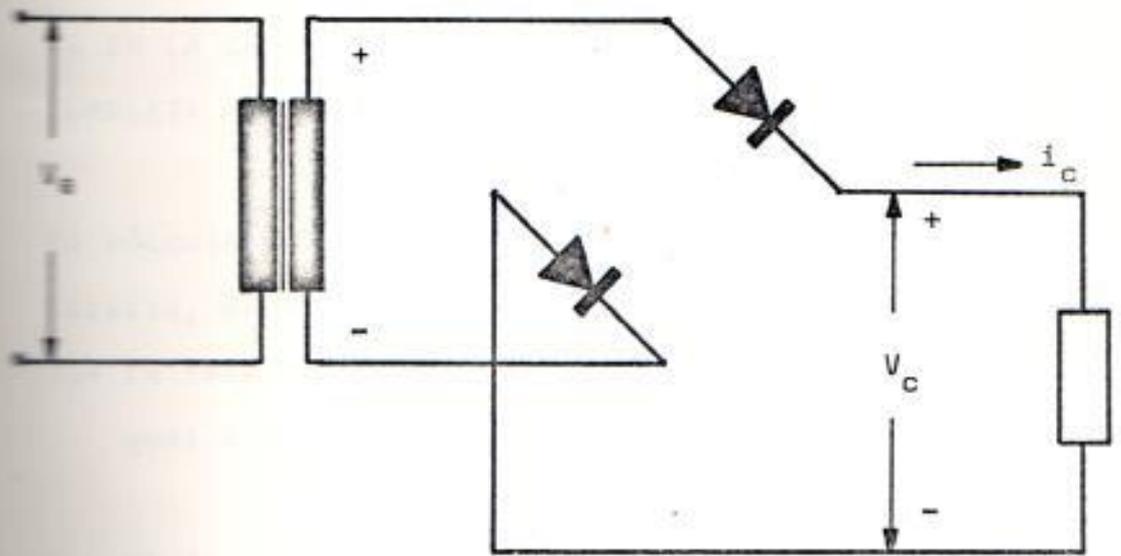


Fig. # 7 Ruta de conducción para el semiciclo positivo de un Rectificador Monofásico de Onda Completa (Tipo Puente).

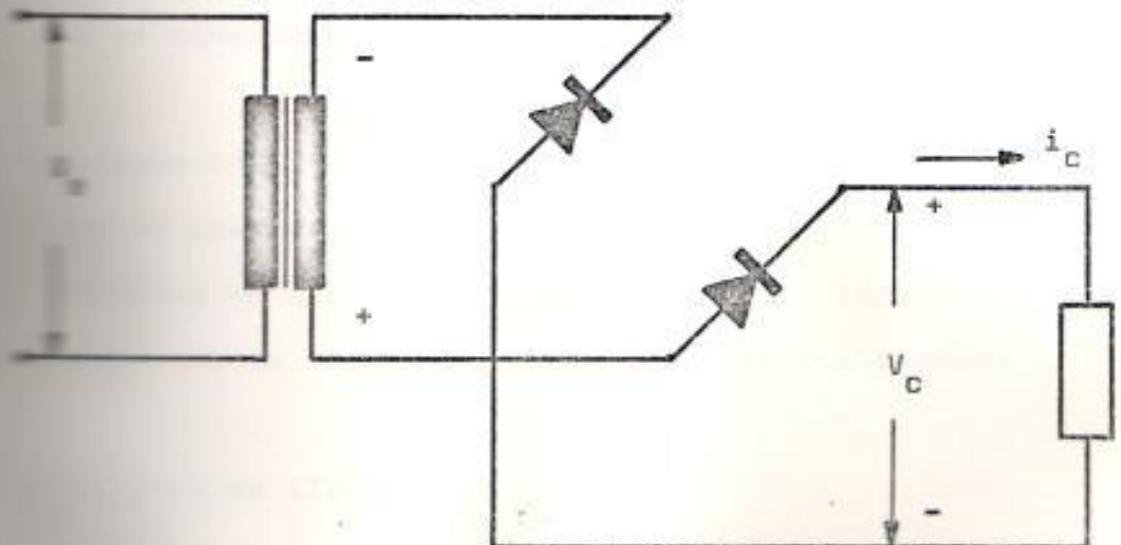


Fig. # 8 Ruta de conducción para el semiciclo negativo de un Rectificador Monofásico de Onda Completa (Tipo Puente).

2.2.2.- CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER DE LA CORRIENTE EN LA CARGA DEL RECTIFICADOR MONOFASICO DE ONDA COMPLETA

El cálculo de los coeficientes de FOURIER, va a realizarse, asumiendo:

1.- La reactancia de conmutación tiene un valor igual a cero, es decir:

$$X_c = 0 \quad (9)$$

2.- El ángulo de retardo es nulo, es decir:

$$\alpha = 0$$

Sin embargo en la realidad, la amplitud de las corrientes armónicas son una función del ángulo de retardo y de la reactancia de conmutación.

Si se considera que:

$$V_e(t) = V_{em} \cos(\omega t) \quad (10)$$

La ecuación (10), representa una función par, entonces su desarrollo en series de FOURIER, sólo tendrá términos en cosenos y probablemente un término constante que se lo considera como un término coseno.

En este caso se llama a:

$$x = \omega t \quad (11)$$

entonces por desarrollo en series de FOURIER, se tendrá que:

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(x) \cdot \cos(2nx) \, dx = \\
 &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} [\cos(2n+1)x + \cos(2n-1)x] \, dx = \\
 &= \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin(2n+1)x}{(2n+1)} + \frac{\sin(2n-1)x}{(2n-1)} \right]_0^{\pi/2} =
 \end{aligned}$$

Finalmente se tiene que:

$$a_n = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin(2n+1)\frac{\pi}{2}}{(2n+1)} + \frac{\sin(2n-1)\frac{\pi}{2}}{(2n-1)} \right] \quad (12)$$

Es decir que la tensión V_c , aplicada a la carga del rec
tificificador monofásico de onda completa, estará dada por
 la expresión:

$$V_c = V_{em} \cdot \frac{4}{\pi} \left[\frac{1}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(4n^2 - 1)} \cos(2n\omega t) \right] \quad (13)$$

De esta manera se obtendría la corriente circulando
 en la carga del rectificador monofásico de onda comple-

$$i_c = \frac{V_c}{R} \quad (14)$$

ANÁLISIS DE LA FORMA DE ONDA, DEPENDIENDO DE LA CARGA
 QUE ESTÁ ALIMENTANDO DICHO RECTIFICADOR

En la expresión obtenida de la tensión y la corriente en la carga del rectificador monofásico de onda completa, relaciones (13) y (14) respectivamente, se aprecia claramente que existe una componente de corriente continua y una serie de armónicos pares.

Esta componente de corriente continua, tiende a saturar el núcleo del transformador, introduciendo armónicos nuevos, lo cual produce un incremento notable de la corriente de magnetización de dicho transformador. Es necesario tener presente que la característica impedancia-frecuencia de un transformador dado, depende de su diseño, tamaño, voltaje, etc. Las pérdidas que no pertenecen a la carga, constituyen entre 15 y 25 por ciento de las pérdidas totales y son una función de la densidad de flujo, éstas pérdidas varían con la frecuencia al exponente 1.5 ($f^{3/2}$). Además, la reactancia varía directamente con la frecuencia (inductancia-constante), así la razón X/R será menor a cualquier armónico que a la frecuencia fundamental.

Todos los transformadores monofásicos cuando se excitan a tensión nominal producen un tercer armónico. Es un error debido a que la curva de saturación de los núcleos de los transformadores reales aumenta de manera pronunciada y se satura rápidamente, haciendo que

se distorsione. Así una tensión puramente sinusoidal a una frecuencia fundamental produce una corriente magnetizante que contiene la frecuencia fundamental más una fuerte componente de tercer armónico. En los transformadores monofásicos, la corriente magnetizante es pequeña comparada con la corriente en la carga y la corriente resultante está sólo ligeramente distorsionada.

Se debe además tener en cuenta los efectos que producen los armónicos sobre las máquinas rotativas y sobre las comunicaciones. Esta introducción de armónicos al sistema de potencia se la realiza a través de la impedancia Z_n y Z_r de la Fig. # 1. Estas armónicas provocan un calentamiento excesivo en las máquinas eléctricas rotativas. En las cargas críticas, las pulsaciones de torques, causadas por las corrientes armónicas en los motores AC pueden ser dañinas para el proceso ó función que desempeñan, se podría incluso tener condiciones de resonancia, si acaso la frecuencia fundamental del sistema mecánico es excitada por los armónicos.

La tensión y la corriente continua de un rectificador también tienen ondulaciones superpuestas. La influencia de las armónicas sobre la exactitud de instrumentos de medición de energía activa ó reactiva y factor de potencia es prácticamente despreciable.

C A P I T U L O 2

RECTIFICADORES DE CARGAS DISTRIBUIDAS EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

2.1.- INTRODUCCION Y GENERALIDADES

El análisis de las señales armónicas en los sistemas eléctricos de potencia ciertamente no es un tópico moderno, antiguamente la inyección de armónicas al sistema eléctrico sólo consideraba a los circuitos rectificadores y los transformadores saturados como fuentes de las señales armónicas. Actualmente gracias a una serie de estudios realizados sobre armónicas, se conoce que cualquier carga no lineal produce armónicos es decir, es una verdadera fuente de corriente de armónicas.

Hay que tener presente el acoplamiento inductivo entre las líneas de transmisión de potencia AC y las líneas telefónicas (verdaderos circuitos abiertos). Este acoplamiento induce voltajes armónicos en los sistemas telefónicos, en los cuales se produce altos niveles de ruido, haciéndose prácticamente imposible entender los mensajes telefónicos.

En los recientes años las técnicas telefónicas utilizan cables subterráneos y anillos de microonda transcontinental, minimizan la exposición de los circuitos de comunicación a las líneas de transmisión AC.

Las corrientes armónicas pueden causar excesivo calentamiento de las máquinas eléctricas rotativas. Las armónicas de $(qn + 1)$, son corrientes de secuencia de fase positiva y las de $(qn - 1)$, son de secuencia de fase negativa. En las máquinas sincrónicas éstas dos corrientes producen un calentamiento adicional en el rotor sólido de las grandes máquinas sincrónicas. Esto produce limitación de la cantidad de carga que puede ser llevada por los generadores sincrónicos.

Usualmente la primera indicación de problemas de armónicas es cuando existe interferencia en la TV (en las señales de video), ésta interferencia se debe a las armónicas generadas por los convertidores.

Los instrumentos de medición son afectados por éstas corrientes armónicas, particularmente cuando se producen condiciones de resonancia, las cuales producen elevados voltajes armónicos en los circuitos. Dispositivos tales como vatímetros y relés de sobrecorriente, que funcionan con disco de inducción, sólo ven circulando la

corriente fundamental, pero debido a las fases desbalanceadas producidas por la distorsión armónica puede producirse la operación errónea de éstos dispositivos.

En todo sistema eléctrico de potencia AC, las corrientes armónicas fluirán por el camino de menor impedancia. Estas armónicas se dividirán de acuerdo a la razón de impedancias de ambas ramas (Fig. # 1). Normalmente la fuente de potencia es el camino de baja impedancia, por lo tanto la mayoría de las corrientes armónicas fluirán hacia ella, sin embargo si existen instalaciones de capacitores de potencia, un problema podría ocurrir cuando la reactancia capacitiva de los capacitores de potencia es igual a la reactancia inductiva equivalente del sistema.

La resonancia paralelo produce una alta impedancia al flujo de la corriente cuya frecuencia corresponde a la frecuencia de resonancia. La resonancia serie produce en cambio un circuito de baja impedancia. La condición de resonancia paralelo puede causar oscilaciones de corrientes que son excitadas por la corriente de la resonancia en paralelo. Estas corrientes que fluyen a través de impedancias producen voltajes armónicos, produciéndose entonces formas de ondas de voltaje distorsionadas tal como se muestra en la fig. # 9 y fig. # 10.

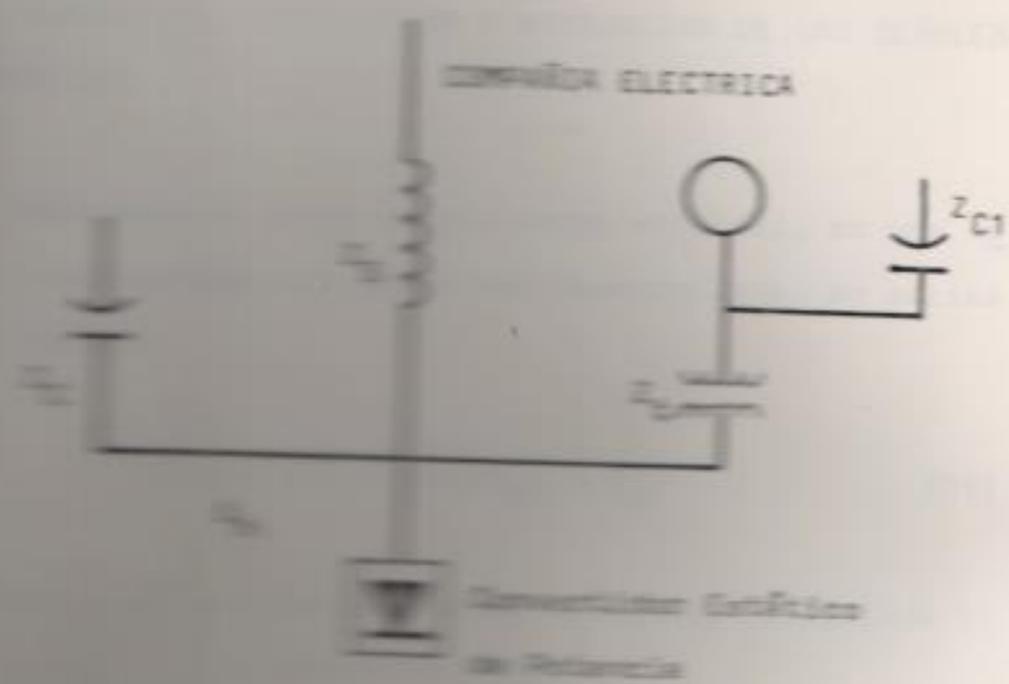


Fig. 470 La impedancia equivalente vista por el Convertidor Estático de Potencia es igual a la impedancia Z_2 en paralelo con Z_S y en serie con $Z_1 = Z_2 Z_S$.

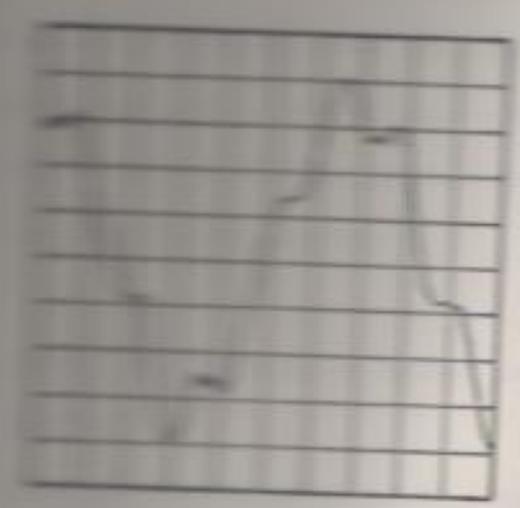


Fig. 471 Estimación de voltaje producido por la re sponse de un circuito de potencia a la re sponse armónica.

LA GENERACION, PROPAGACION Y ATENUACION DE LAS SEÑALES ARMONICAS

La corriente de carga en una carga no lineal, es una señal no sinusoidal que puede ser desarrollada en series de FOURIER:

$$i(t) = \sqrt{2} I^k \text{sen}(k\omega_0 t + \phi_k) \quad (15)$$

donde: I^k = valor RMS de la corriente calculada al armónico de orden k.

ϕ_k = ángulo de fase al armónico de orden k.

Los componentes de FOURIER de la corriente son, deter-
minados en parte por los componentes de FOURIER del voltaje de barra, así mismo ésta corriente no sinusoidal provo-
ca una forma de onda de voltaje en la barra del tipo sinusoidal, la solución de ambos componen-
tes, voltaje y corriente es iterativa, puede ser for-
mada de la siguiente manera:

1.- En todas las barras se deben cumplir las Leyes de KIRCHHOFF.

2.- El término "voltios-amperios reactivos" ó "Q" es utilizado como una cantidad matemática, ésta cantidad, no posee la propiedad de conservación

de "P" ó "potencia activa", la diferencia ó desajuste de potencia activa y voltios-amperios reactivos en la barra es nulo.

3.- El desajuste de corriente en cada barra es cero.

Cuando se tiene una corriente de carga armónica muy baja, la distorsión producida sobre la forma de onda del voltaje y su influencia subsecuente en la corriente de carga puede ser ignorada. Cuando se tienen elevados valores de componentes armónicas, el interesado debería recurrir al procedimiento iterativo mencionado anteriormente. El formato es idéntico que el convencional flujo de potencia de NEWTON-RAPHSON (algoritmo).

Con respecto a la propagación de las señales armónicas desde la carga no lineal, dicha propagación es gobernada por lo siguiente:

1.- Se debería tener presente la distinción entre líneas cortas y líneas largas, a fin de obtener una mayor exactitud. Si uno adopta la limitación de banda 60-1380 Hertz, es aproximadamente 10 Km.

2.- Impedancias paralelos en las barras de carga, por ejemplo: reactores y capacitores paralelos, capacitancia de las líneas, etc. Es importante considerar estos efectos para realizar el estudio del

flujo de potencia de armónicas. Generalmente éstas impedancias paralelos son capacitivas, su impedancia varía inversamente con el orden del armónico, es decir que al incrementarse la frecuencia disminuye su impedancia.

El problema se complica, cuando se tiene diversas fuentes de señales de armónicas en un sistema de potencia.

Con respecto a la atenuación de éstas señales, una serie de filtros pueden ser diseñados y aplicados al sistema, será necesario realizar un análisis para investigar la efectividad de éstos filtros en el control del flujo de corrientes armónicas en los sistemas de potencia. Los capacitores utilizados para mejorar el factor de potencia, deberían ser diseñados para absorber las corrientes armónicas, es por eso que son llamados verdaderos "TRAMPAS DE ARMONICAS". La capacidad térmica de un capacitor en muchos casos es muy grande, esto se debe a las corrientes armónicas adicionales fluyendo a través de la impedancia del capacitor, no debe sobrecalentarse éste dispositivo, sin embargo es muy conocido el hecho de que el capacitor es muy sensible a los valores altos de voltajes, por ésta razón el capacitor necesita tener como dato de placa, un voltaje que sea la suma aritmética del voltaje fundamental y el voltaje armó

nico a través de dicho capacitor. Este voltaje pico es el voltaje que el capacitor deberá resistir sin que algún efecto corona sea perjudicial, así:

$$V = I_1 \cdot X_{c1} + I_k \cdot X_{ck} \quad (16)$$

donde: V = dato de placa del voltaje que deberá tener el capacitor.

I_1 = Corriente fundamental del capacitor.

I_k = Corriente armónica presente en el sistema a la cual el filtro es sintonizado.

X_{c1} = Reactancia capacitiva a la frecuencia fundamental.

X_{ck} = Reactancia capacitiva armónica a la cual el filtro es sintonizado.

Para producirse la atenuación, la reactancia inductiva del reactor sintonizado debe ser igual a la reactancia capacitiva del banco de condensadores a la frecuencia a la cual está sintonizado dicho filtro.

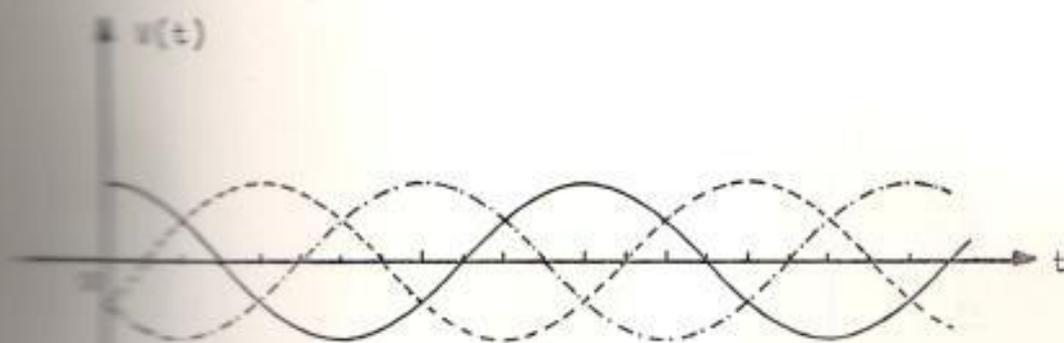
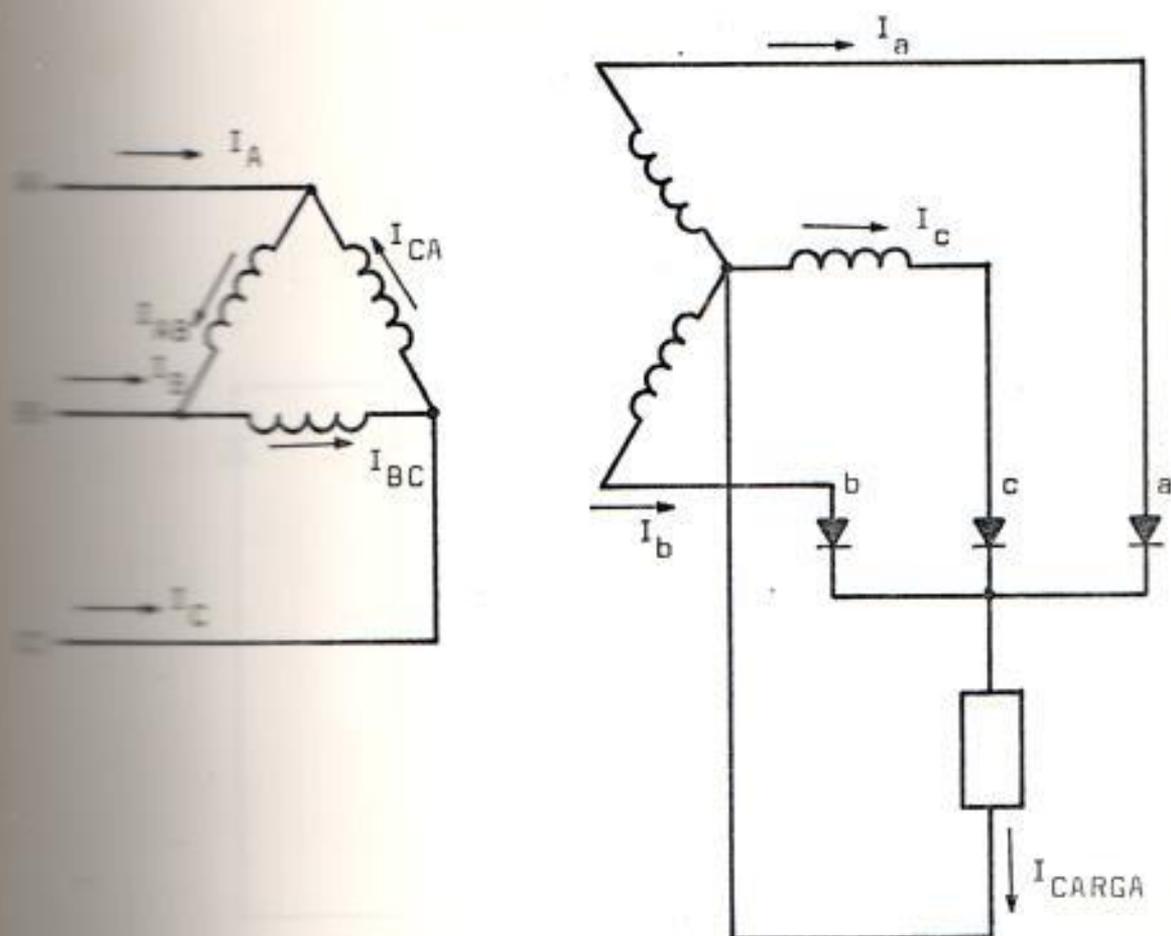
Es necesario tener presente que: "LA SELECCION DEL EQUIPO PARA COMPENSACION DE REACTIVOS Y EL DISEÑO DE FILTROS DE SEÑALES ARMONICAS, ES UNA MEZCLA DE ARTE, CIENCIA Y ECONOMIA".

RECTIFICADORES TRIFASICOS

Prácticamente todos los rectificadores empleados para rectificar grandes potencias requieren el empleo de un transformador, cuyo objeto es cambiar el número de fases y la tensión de la fuente de corriente alterna por un número de fases mayor, generalmente 6 ó 12, y por una tensión conveniente para el funcionamiento de dicho rectificador, así como también proporcionar un terminal negativo a la unidad rectificadora. Este número de fases secundarias se adopta para reducir las ondulaciones de la corriente rectificada, obteniéndose de ésta manera una corriente continua apta para el uso industrial.

El circuito básico de un rectificador trifásico se muestra en la Fig. # 11, en la cual se muestra una conexión "triángulo-estrella". En la Fig. # 12 se muestra en cambio otro tipo de conexión para un rectificador trifásico y es "estrella-estrella".

Los convertidores estáticos de potencia (rectificadores, inversores y otros dispositivos de conmutación), son una fuente de corrientes de armónicas. La distorsión de la forma de onda de la corriente es producida por la conmutación.



11 Rectificador Trifásico, conexión Triángulo-Estrella.

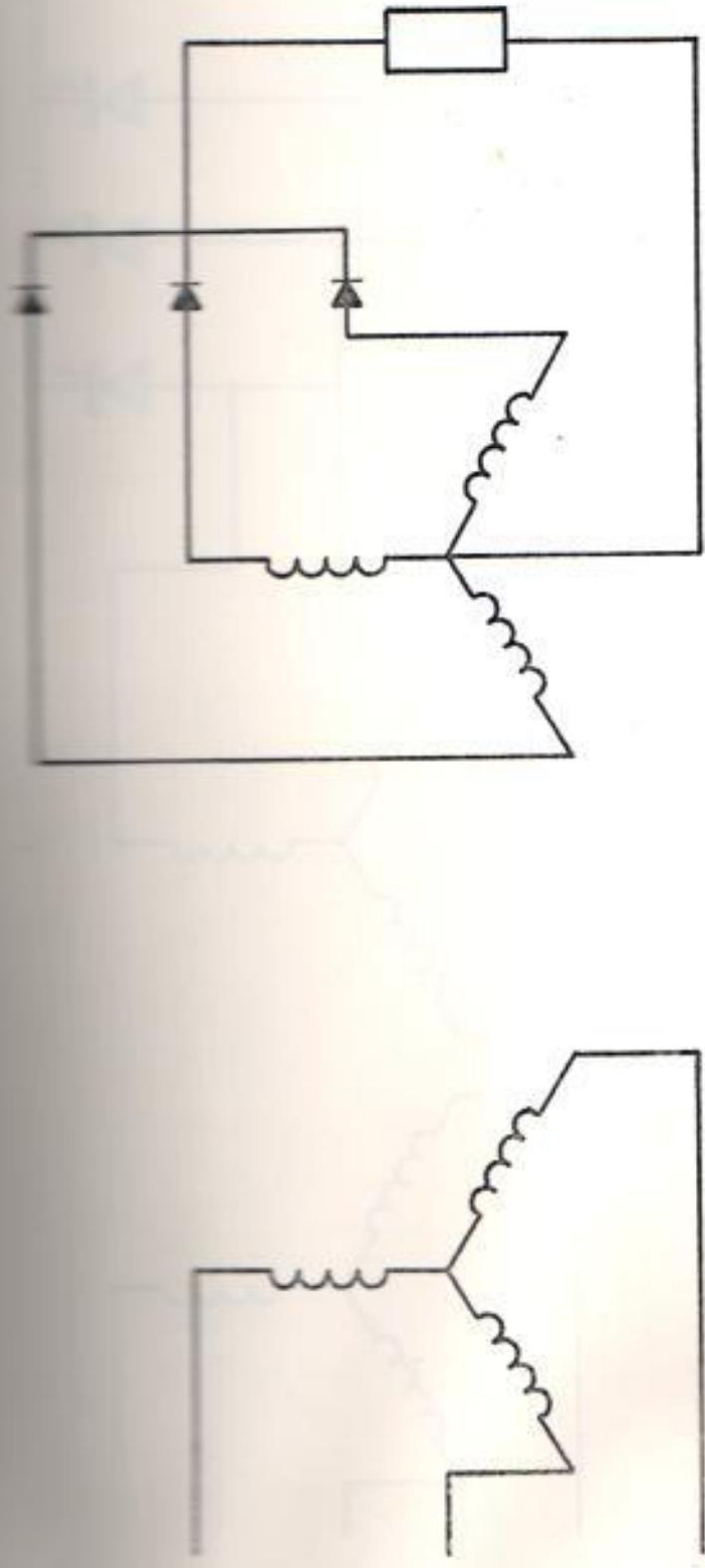


Fig. # 12 Rectificador Trifásico, conexión Estrella-Estrella.

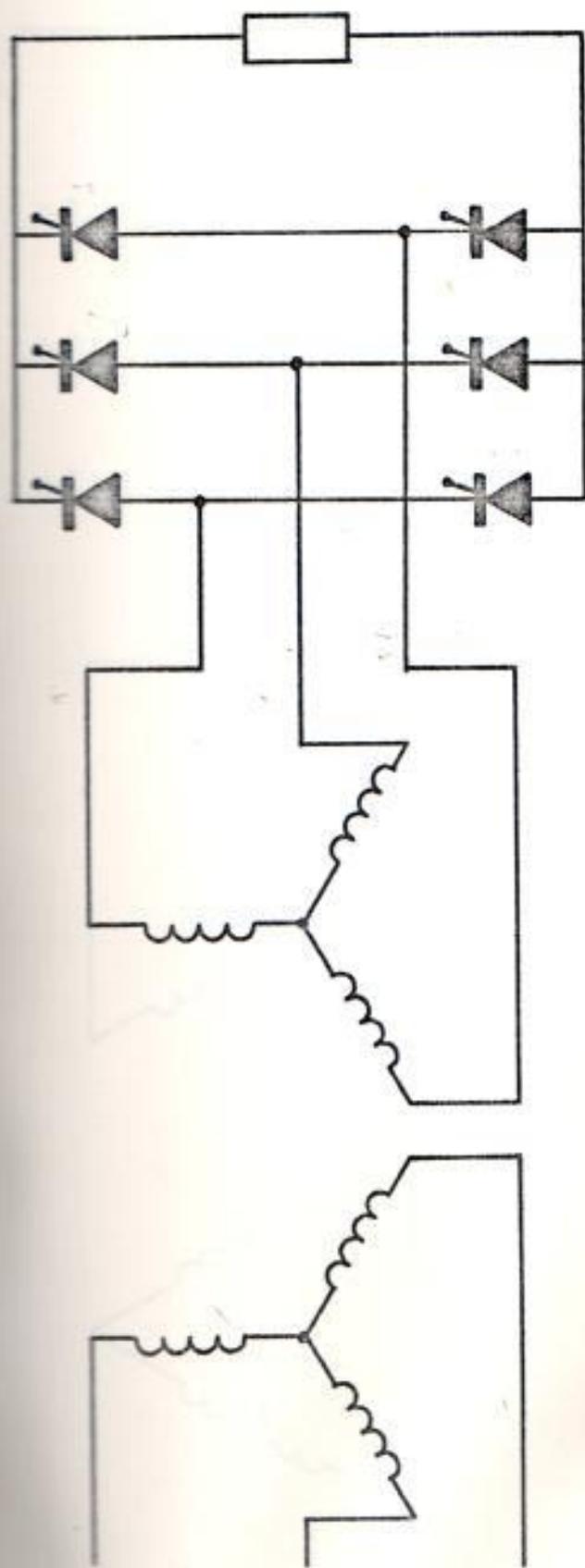


Fig. # 13(a) Circuito Rectificador Trifásico, Norma ANSI-24.

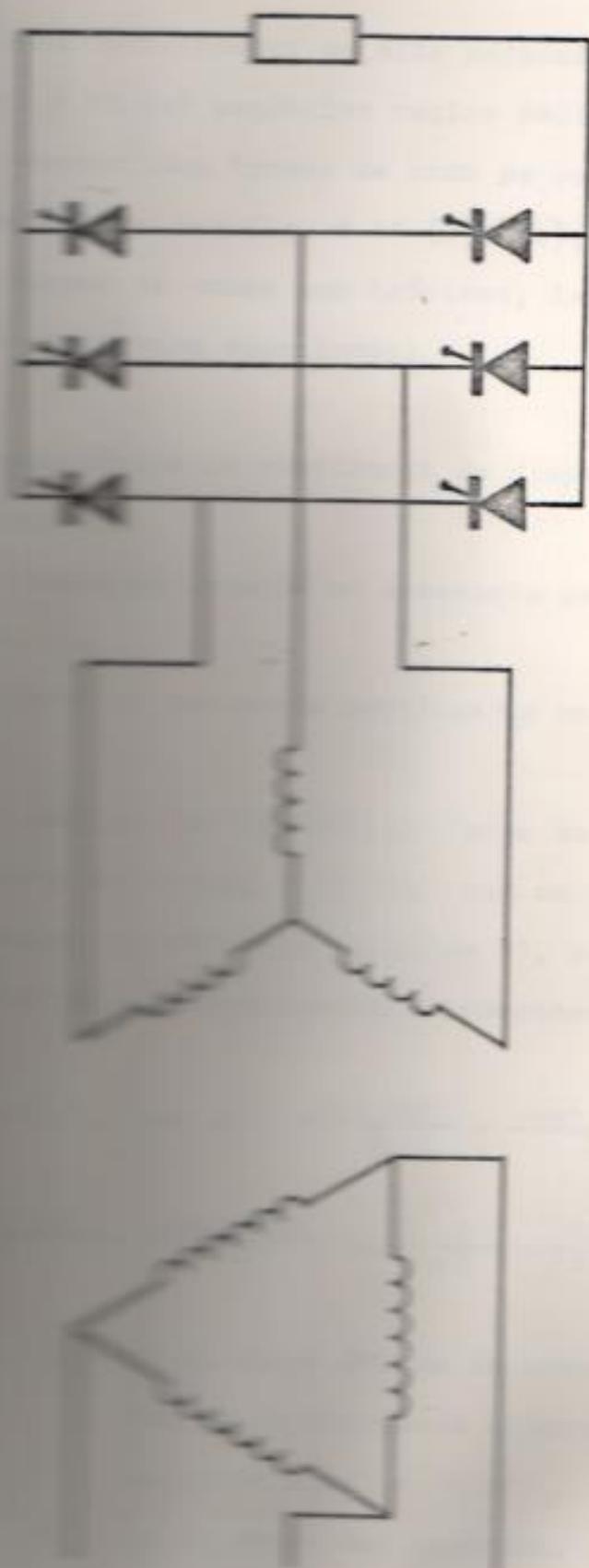


Fig. # 13(b) Circuito Rectificador Trifásico, Norma ANSI-23

Un típico rectificador de alta potencia es mostrado en la Fig. # 13 (a) según las reglas ANSI-24 y (b) ANSI-23 y sus respectivas formas de onda de voltaje y corriente se muestran en las Fig. # 14 (a), (b), (c), (d) y (e). Estas formas de ondas son teóricas, las cuales se basan en las siguientes asunciones:

- 1.- Se desprecia la reactancia de dispersión del transformador.
- 2.- La caída de tensión es constante para todas las cargas.
- 3.- La onda de corriente continua es una línea recta.

Por el análisis de FOURIER, la forma de onda de corriente alterna de la Fig. # 14 (c) que es la corriente en el devanado de corriente continua R1, puede ser descompuesta en la siguiente serie de componentes armónicos:

$$i(t) = \sqrt{3} I_L \left[\sin \omega t - \frac{\sin 5\omega t}{5} - \frac{\sin 7\omega t}{7} + \frac{\sin 11\omega t}{11} + \frac{\sin 13\omega t}{13} + \dots + \frac{2}{\sqrt{3}} \cos \frac{n\pi}{6} \frac{\sin n\omega t}{n} \right] \quad (17)$$

- donde: I_L = es el valor RMS de la componente fundamental de la corriente alterna en la línea y su valor igual a $6/\pi I_D$.
- n = es el orden del armónico.

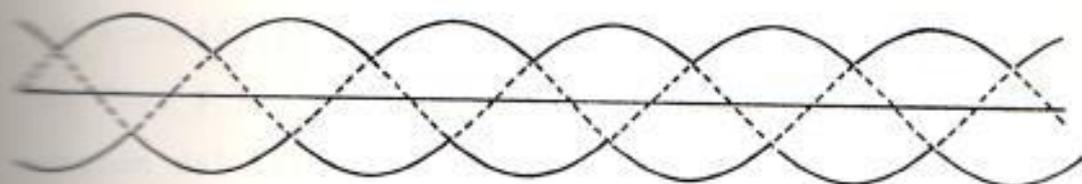


Fig. # 14(a) Voltajes en los devanados DC del transformador, Norma ANSI-23.

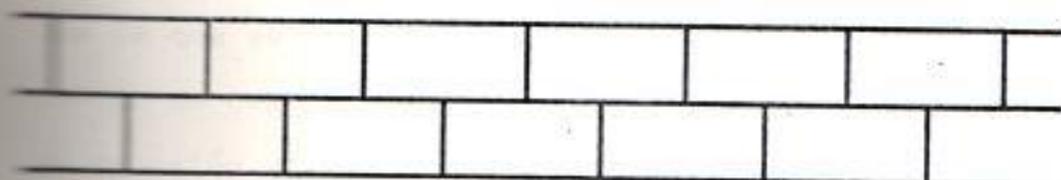


Fig. # 14(b) Corriente en los elementos utilizados para Rectificación.

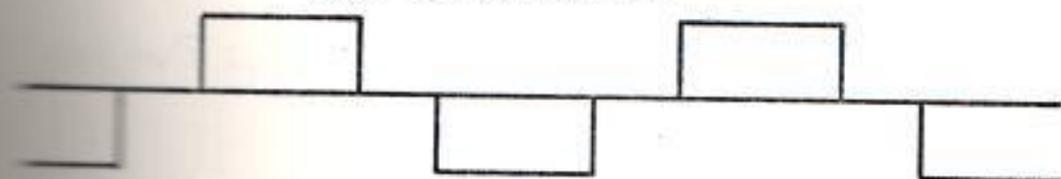


Fig. # 14(c) Corriente en el devanado R1, Norma ANSI-23.

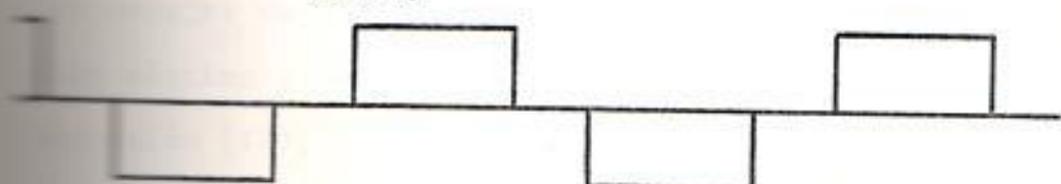


Fig. # 14(d) Corriente en el devanado R2, Norma ANSI-23.

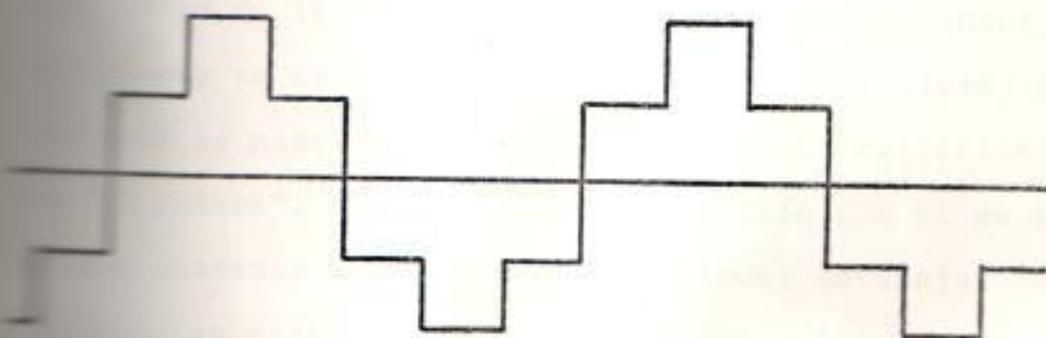


Fig. # 14(e) Corriente en la línea, Norma ANSI-23.

La ecuación (17) fue obtenida para la Fig. # 13 (a), en la Fig. # 13 (b), se muestra una alternativa para la conexión del transformador (ANSI-23), el primario está conectado en triángulo, en éste caso, la corriente en el secundario ó devanado de corriente directa es la misma que la que se muestra en la Fig. # 14 (c), (d) y (e) pero con un cambio de fase de 30° introducido por el tipo de conexión (triángulo-estrella). Por el análisis de FOURIER, para éste caso la corriente será:

$$i(t) = \sqrt{2} I_1 \left[\sin wt + \frac{\sin 5wt}{5} + \frac{\sin 7wt}{7} \dots \right] \quad (18)$$

El espectro de señales armónicas presentado en las expresiones (17) y (18) son idénticos, excepto que para las parejas de armónicos de orden quinto y séptimo, décimo séptimo y décimo noveno, etc. son negativos en la expresión (17), mientras que en la expresión (18) esos mismos armónicos son positivos. Esto sugiere que si se conectan en paralelo dos tipos de rectificadores, con igual valor de la corriente de la línea, éstas parejas alternadas se cancelarán. Es decir que el sistema resultante se podría decir que opera como un rectificador de "12 pulsos". De ésta forma se tendría que si se añaden unidades rectificadoras con igual defaseje una de otra, se crearía rectificadores con diferentes números de pulsos.

ANÁLISIS Y FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE EN LA CARGA ALIMENTADA POR UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO

El análisis será realizado con la ayuda de las series de FOURIER y de la Fig. # 11. Si el circuito de corriente continua no tuviera inductancia, entonces la corriente unidireccional en la carga vendría a ser proporcional al valor instantáneo de la tensión rectificadora. Inicialmente se hará el análisis sin considerar el efecto suavizador que realiza la inductancia de dispersión sobre la forma de la onda de corriente continua.

Se comenzará el análisis, considerando secuencia positiva "ABC" y teniendo presente que en un transformador trifásico conectado en triángulo-estrella donde el lado de alta tensión está conectado en triángulo, los voltajes de línea a neutro del lado de alta tensión adelantados en 30° con respecto a los voltajes de línea a neutro del lado de baja tensión. Si además se considera que:

$$V_A(t) = V_m \cos \omega t \quad (19)$$

$$V_B(t) = V_m \cos(\omega t - 120^{\circ}) \quad (20)$$

$$V_C(t) = V_m \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (21)$$

donde: V_m = amplitud de la tensión del lado de alta tensión.

ω = frecuencia angular de generación, para el presente estudio $f_0 = 60$ Hz.

Para simplificación se tomará:

$$x = \omega t \quad (22)$$

Para la obtención de la tensión en la carga, la misma que es tensión rectificadora y cuya forma de onda se la muestra en la Fig. # 14 (a), se utilizarán los coeficientes de FOURIER, donde para el presente caso el período es igual a $2\pi/3$.

$$a_n = \frac{6}{\pi} \int_0^{\pi/3} \cos(x) \cdot \cos(3nx) \, dx \quad (23)$$

$$a_n = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} [\cos(3n+1)x + \cos(3n-1)x] \, dx =$$

$$= \frac{3}{\pi} \left[\frac{\sin(3n+1)x}{(3n+1)} + \frac{\sin(3n-1)x}{(3n-1)} \right]_0^{\pi/3} =$$

al realizar la evaluación en el intervalo mencionado anteriormente $(0, \pi/3)$, se obtiene:

$$a_n = \frac{3\sqrt{3} (-1)^{n+1}}{\pi (9n^2 - 1)} \quad (24)$$

Como se trata de una función par, entonces su desarrollo en serie de FOURIER sólo tendrá términos en coseno, es decir que:

$$b_n = 0 \quad (25)$$

Si se considera una relación de transformación de uno a uno (1:1), entonces la tensión en la carga del rectificador trifásico estará dada por:

$$v_L = \left[\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3\sqrt{3} (-1)^{n+1}}{\pi (9n^2 - 1)} \cos(3n\omega t) \right] v_m \quad (26)$$

entonces, la corriente en la carga de dicho rectificador trifásico estará dada por:

$$i_L = \frac{v_L}{R} \quad (27)$$

Las formas de la onda de la corriente en la carga que a muestra un rectificador trifásico como el que muestra en la Fig. # 11, no es del todo una corriente continua pura, sino que tiene un cierto nivel de corriente continua dado por el término independiente de la expresión (26) y una serie de armónicos múltiplos de tres.

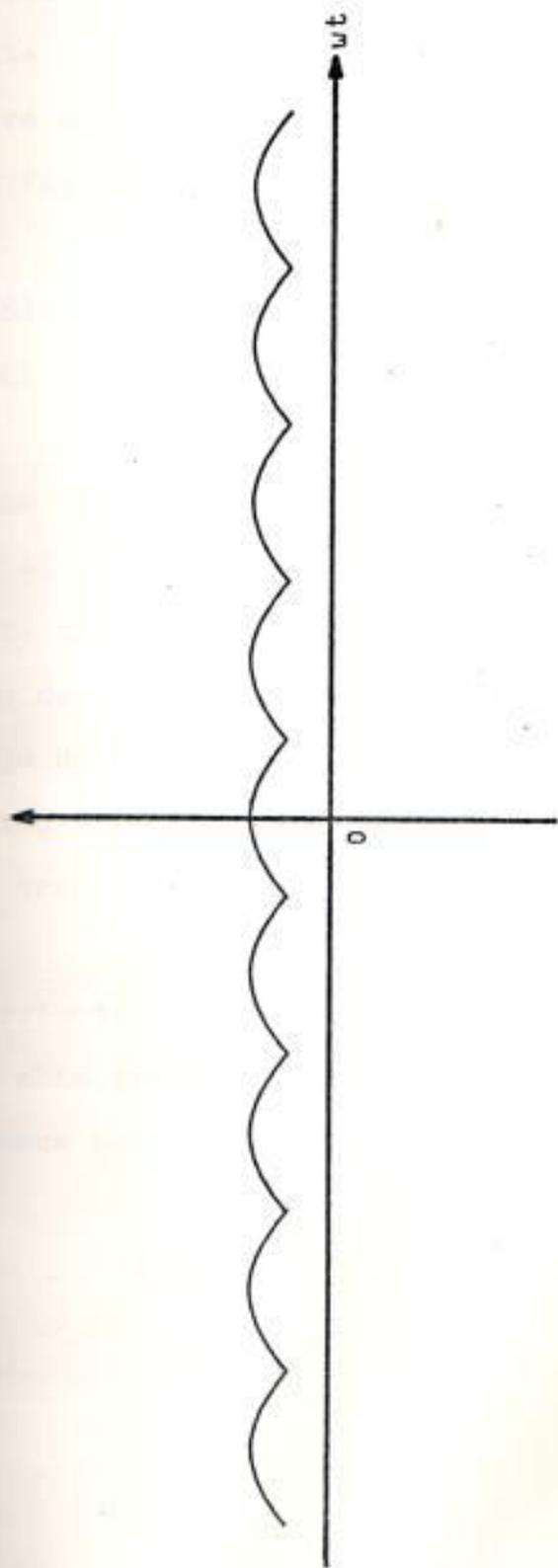


Fig. # 15 Forma de onda de la corriente en la carga que alimenta un Rectificador Trifásico.

La forma de onda de la corriente en la carga que alimenta un rectificador trifásico como el que se muestra en la Fig. # 11 es del tipo que se muestra en la Fig. # 15.

ANÁLISIS Y FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE EN LA LÍNEA DEL TRANSFORMADOR

Para un transformador trifásico, conectado en Δ - Y , donde el lado de alta tensión está conectado en Δ , se debe tener presente que el voltaje de línea a neutro del lado de alta tensión, adelanta en 30° al voltaje de línea a neutro del lado de baja tensión. Los diagramas vectoriales de tensión y corriente de dicho transformador se muestran en la Fig. # 16.

La corriente en la línea del transformador en el lado de alta tensión, para cada una de las fases, estará dada por las siguientes relaciones:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} \quad (28)$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB} \quad (29)$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC} \quad (30)$$

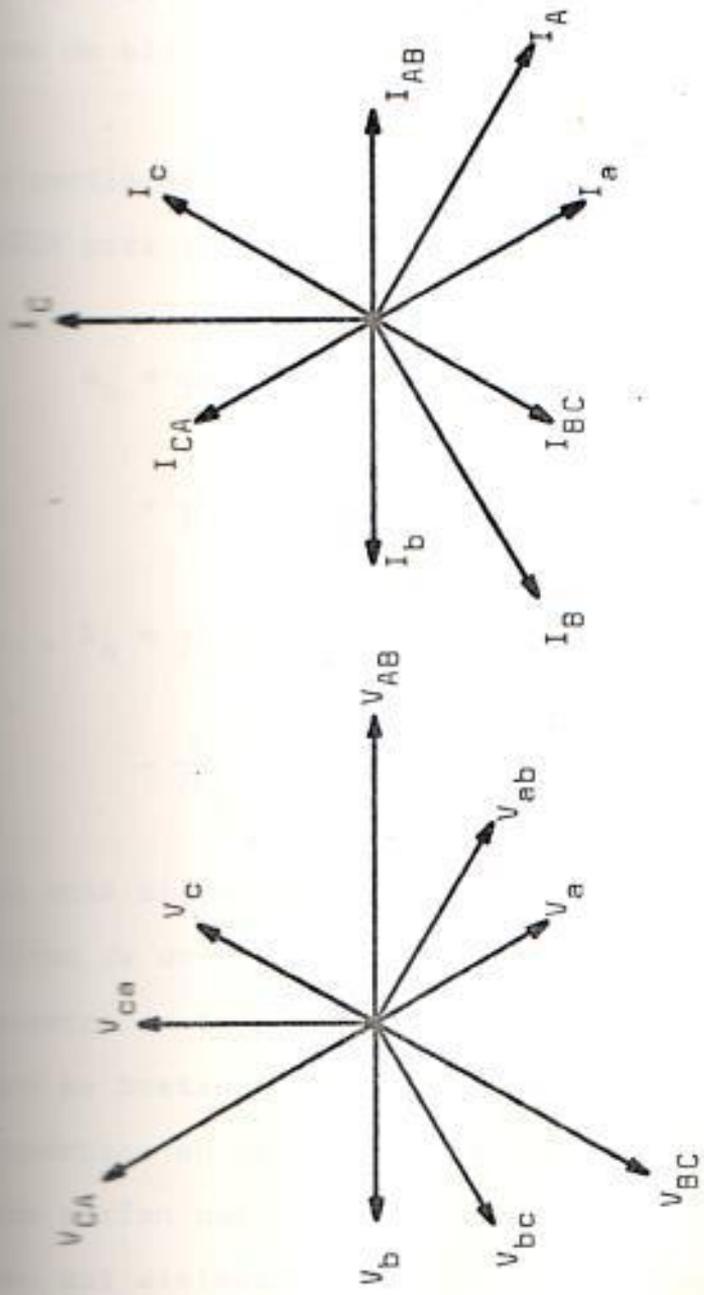


Fig. # 16 Diagramas vectoriales de tensión y corriente en un transformador trifásico conectado en Δ - Y , donde el lado Δ es el lado de alta tensión.

Las formas de onda de las corrientes de las líneas del transformador trifásico, se muestran en las Fig. # 17 (a), (b), y (c), donde es fácil darse cuenta que cada una de ellas está defasada 120° .

A continuación se obtendrán los coeficientes de FOURIER para la corriente en la línea "A":

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} \cos(x) \cdot \cos(nx) dx - \frac{1}{\pi} \int_{\pi/3}^{\pi} \cos(x - 2\pi/3) \cdot \cos(nx) dx \quad (31)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} \cos(x) \cdot \text{sen}(nx) dx - \frac{1}{\pi} \int_{\pi/3}^{\pi} \cos(x - 2\pi/3) \cdot \text{sen}(nx) dx \quad (32)$$

Se nota claramente la introducción de armónicos en la línea de un transformador trifásico como el que se muestra en la Fig. # 11, su espectro de señales armónicas es bastante fuerte, esto produciría unos voltajes armónicos en los devanados del transformador, los cuales serían peligrosos, pues a la larga dañarían el nivel del aislamiento de dichos devanados.

Si se tiene como en éste caso "tres fases", los ánodos son disparados en secuencia regular, cada uno de ellos

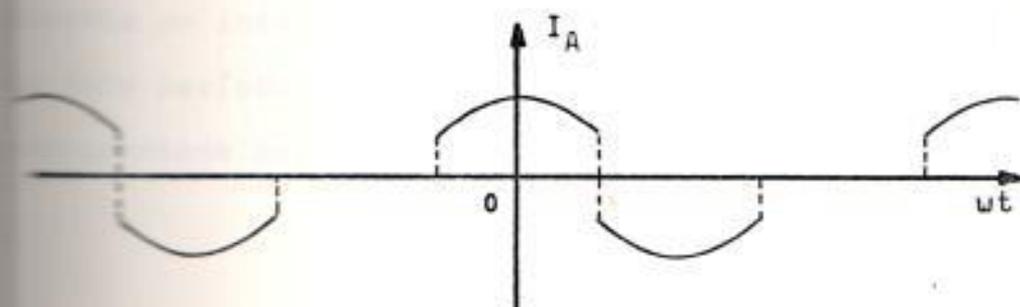


Fig. # 17(a) Corriente en la Línea A (I_A), para el Rectificador Trifásico de la Fig. # 11.

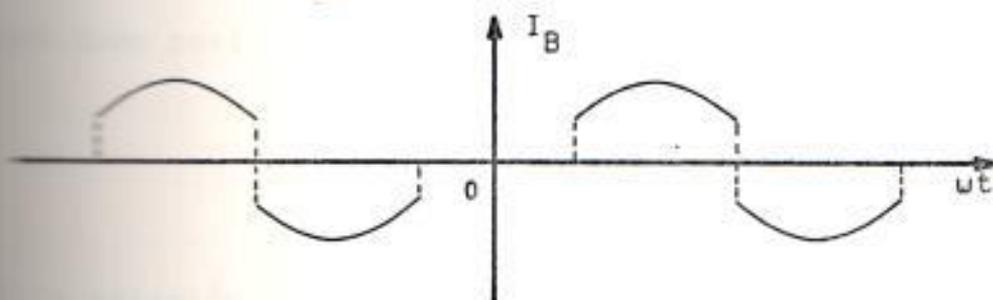


Fig. # 17(b) Corriente en la Línea B (I_B), para el Rectificador Trifásico de la Fig. # 11.

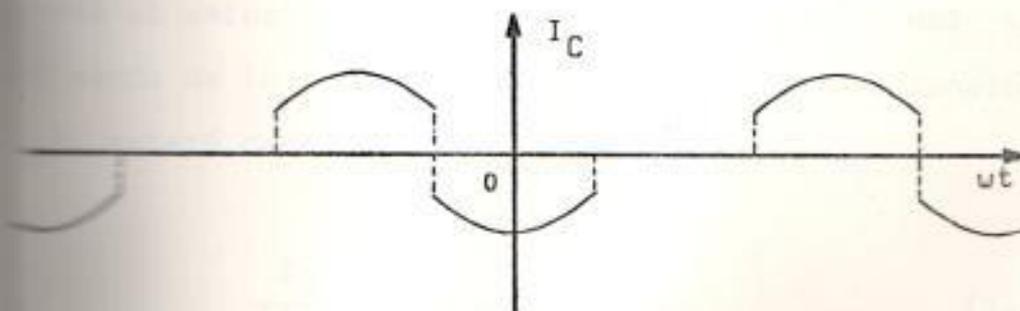


Fig. # 17(c) Corriente en la Línea C (I_C), para el mismo caso.

proporcionará a la carga la corriente constante " I_d ", durante un intervalo de $2\pi/3$ grados eléctricos. Durante este período, la tensión de ánodo a cátodo, estará representada por:

$$V_A = V_m \cos(\omega t)$$

Considerándose una caída de tensión en los elementos de rectificación de valor " V_r " (asumiéndola constante) entonces el valor medio de la tensión rectificadora, estará dado por:

$$E_d = V_m \frac{\text{sen}(\pi/n)}{(\pi/n)} \quad (33)$$

En la relación (33), el valor de " n " significa el número de fases del circuito rectificador, si se considera " V_m ", como la tensión eficaz entre línea y neutro de cada uno de los devanados del transformador, y despreciando el valor de " V_r ", entonces la relación del valor medio de la tensión rectificadora " E_d " a la tensión " V_m ", estará dada por:

$$\frac{E_d}{E_A} = \sqrt{2} \frac{\text{sen}(\pi/n)}{(\pi/n)} \quad (34)$$

Para el presente caso ($n=3$), $E_d/E_A = 1.17$

Mientras que la relación del valor medio de la tensión rectificadora " E_d " a la tensión " E_A " para el caso de un rectificador monofásico toma un valor de 0.90. Al incrementarse el número de fases, ésta relación se incrementa, de tal manera que cuando tiende al infinito el número de fases, dicha relación tiende a un valor de 1.4142.

ANÁLISIS Y FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE EN LA FASE DEL TRANSFORMADOR

Las formas de onda de las corrientes de las fases del transformador trifásico de la Fig. # 11, pueden ser apreciadas claramente en las Fig. # 18 (a), (b) y (c), en las cuales es fácil darse cuenta que están defasadas 120° entre ellas.

A continuación se obtendrán los coeficientes de FOURIER para la corriente en la fase entre las líneas "A" y "C":

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} -\cos(x) \cdot \cos(nx) dx \quad (35)$$

$$b_n = 0 \quad (36)$$

Por el hecho de que es una función par, los coefi-

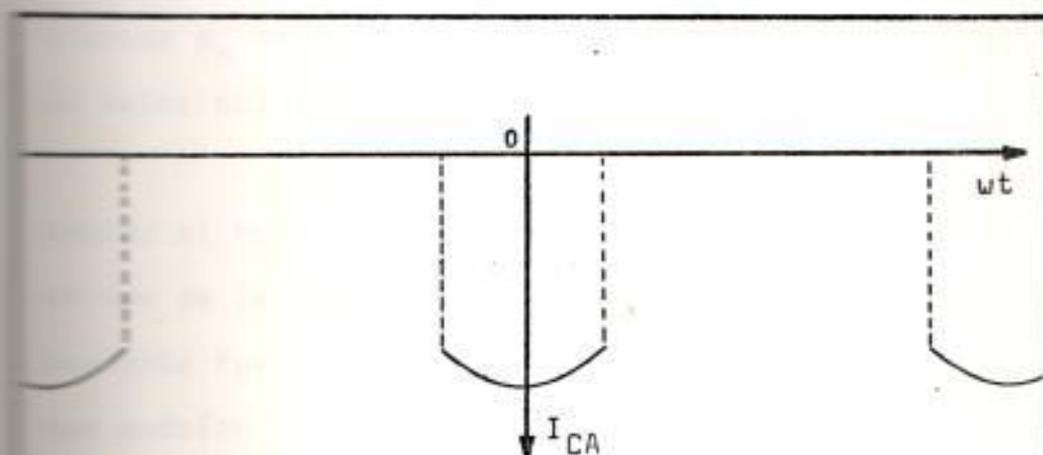


Fig. # 18(a) Corriente entre las fases C y A de un Rectificador Trifásico.

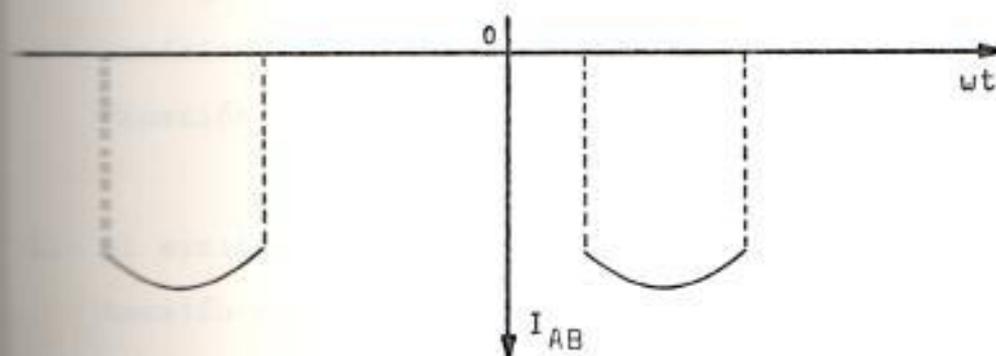


Fig. # 18(b) Corriente entre las fases A y B de un Rectificador Trifásico.

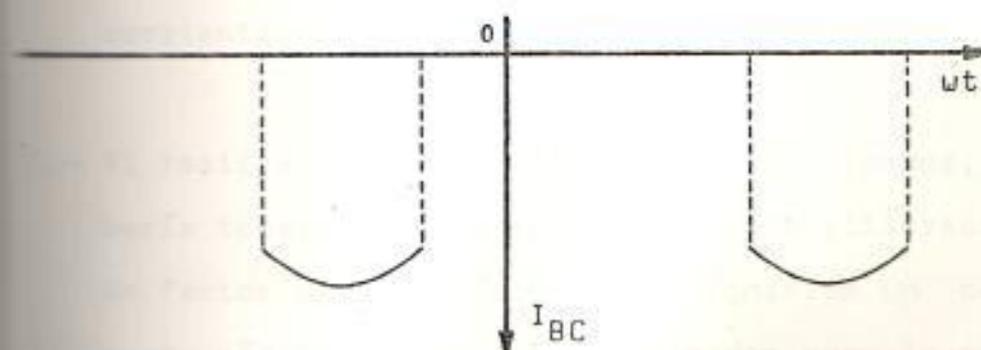


Fig. # 18(c) Corriente entre las fases B y C de un Rectificador Trifásico.

cientes b_n de la serie de FOURIER, tienen todos ellos un valor nulo.

Debido al hecho de que el espectro de armónicos en ca da una de las fases del transformador trifásico es bastante fuerte, se podrían producirse algunos daños que podrían dejar prácticamente sin utilización a dicho transformador, entre ellos deberían cuidarse:

- 1.- Voltajes armónicos, producidos por las corrientes armónicas del espectro presente debido a la rectificación.
- 2.- Al excitar los transformadores monofásicos a la tensión nominal, producen un tercer armónico. Este ocurre debido a que la curva de saturación de los transformadores reales aumenta de manera pronunciada y se satura rápidamente, haciendo que la corriente magnetizante se distorsione.
- 3.- Al realizar la selección de un transformador, debería tomarse en cuenta su factor de utilización. Un factor de utilización bajo significa un costo mucho más elevado del transformador para la cantidad de potencia de corriente continua producida. Resulta que el factor de utilización tiene un va-

El máximo teórico para "2.7 fases", lo cual indica que la rectificación trifásica proporciona una conversión con mayor rendimiento en función del coste de dicho transformador, a pesar de su elevado contenido de rizado y su baja relación entre tensión de corriente continua y tensión eficaz de corriente alterna.

~~PROGRAMA~~ PROGRAMA PARA LA OBTENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER EN FORMA RECURSIVA DE LAS CORRIENTES EN LA CARGA EN LA LINEA Y EN LA FASE DEL TRANSFORMADOR

En continuación se presenta un diagrama de flujo para la obtención de los coeficientes de FOURIER tanto en la carga como en la línea y en la fase del transformador, para lo cual se definirán ciertas constantes para entender su operación:

M = Precisión seleccionada para la obtención de los coeficientes de FOURIER, para obtener una buena precisión, deberá seleccionar un valor de M mayor que 100.

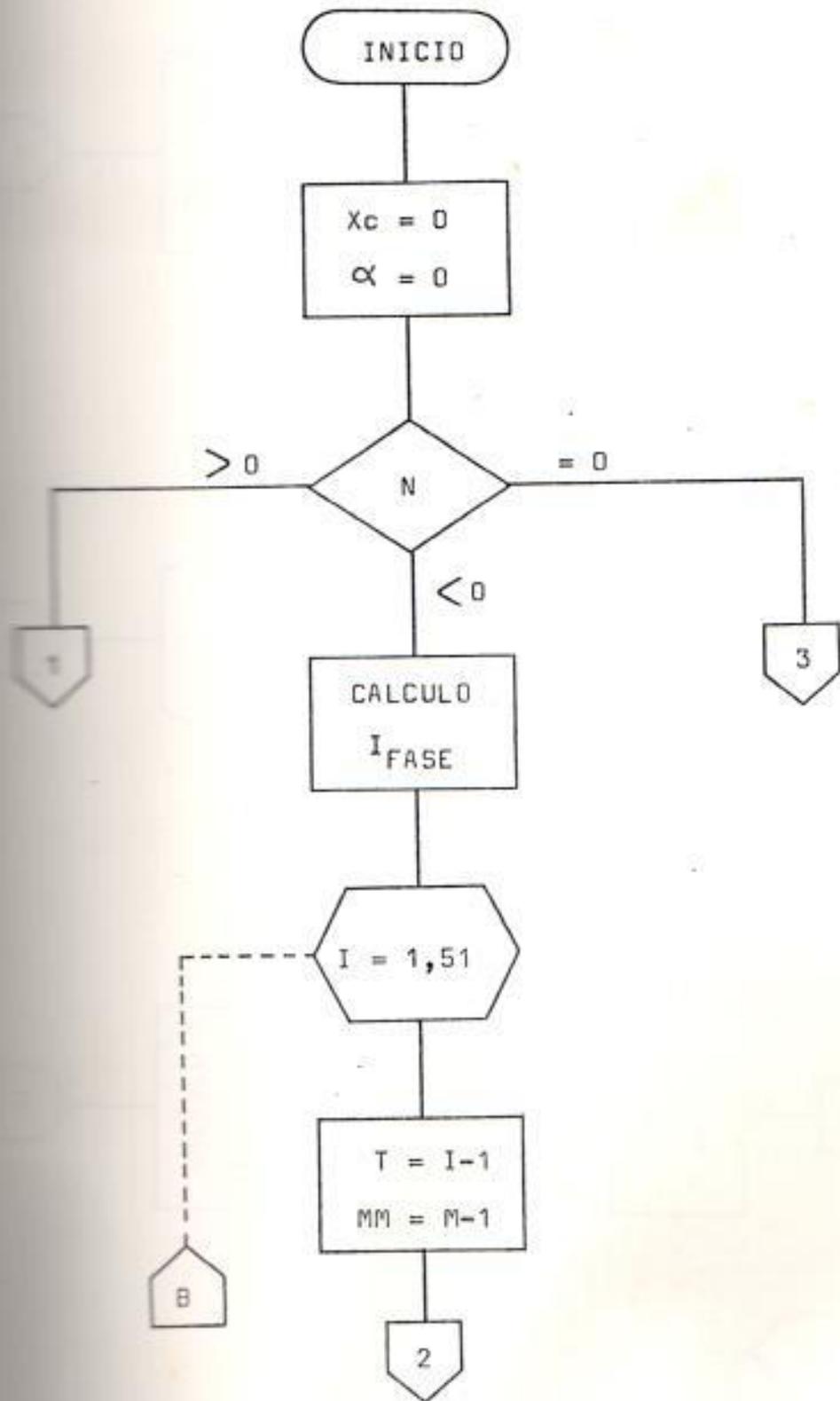
N = Indica la decisión que se tomará. Un valor de N menor que cero indica la obtención de los coeficientes de FOURIER en la FASE del transformador. Un valor de N mayor que cero indica la ob

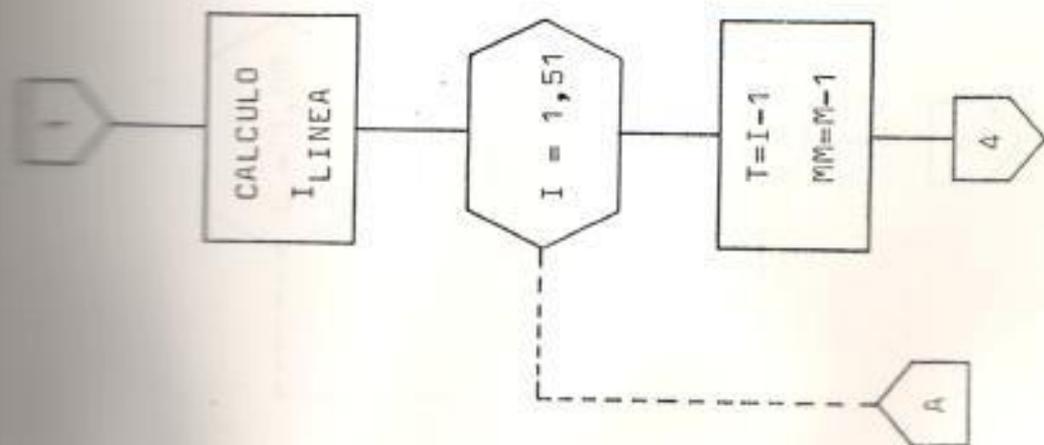
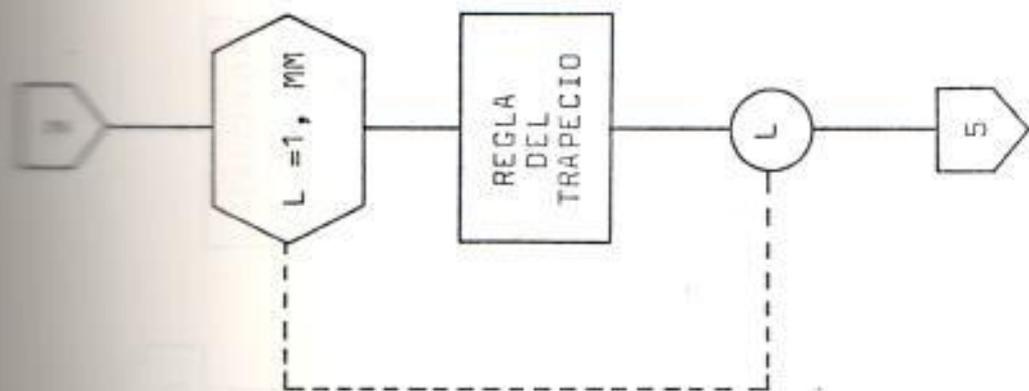
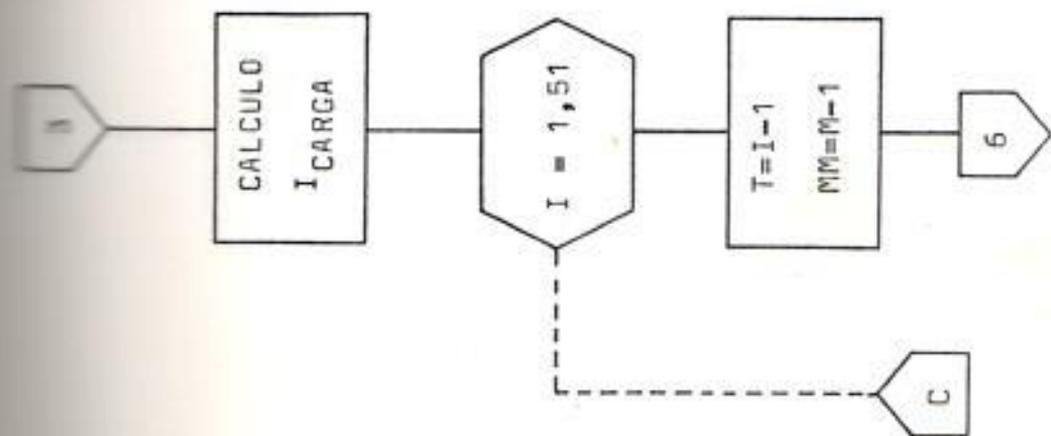
tención de los coeficientes de FOURIER en la LÍNEA del transformador. Un valor de N igual a cero, indica la obtención de los coeficientes de FOURIER en la carga servida por el transformador.

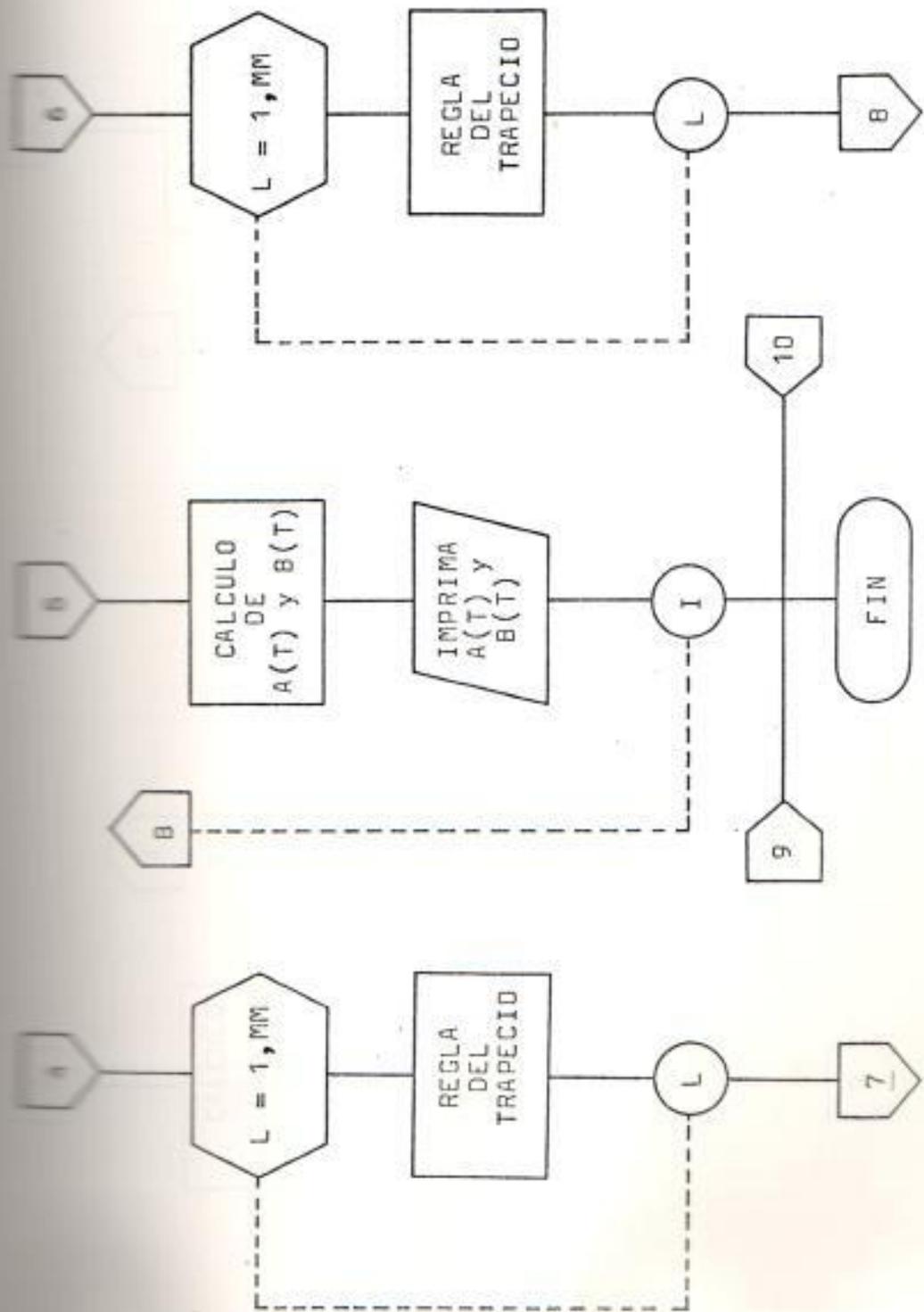
- Δ = Incremento de los intervalos de integración.
- T = Identifica el coeficiente que se está calculando pudiendo tomar valores de 0, 1, 2, . . .
- X_c = Representa la reactancia de conmutación, en caso ideal su valor es cero.
- α = Ángulo de retardo, en nuestro caso se lo considerará nulo, aunque en la realidad la amplitud de las señales armónicas son una función tanto del ángulo de retardo como de la reactancia de conmutación.

Los coeficientes de FOURIER, para los tres casos: corriente en la línea, en la fase y en la carga, son designados por $A(T)$ y $B(T)$, donde T puede tomar valores de 0, 1, 2, . . .

Para la obtención de estos coeficientes se utiliza la regla "TRAPEZOIDAL", su diagrama de flujo es como si-







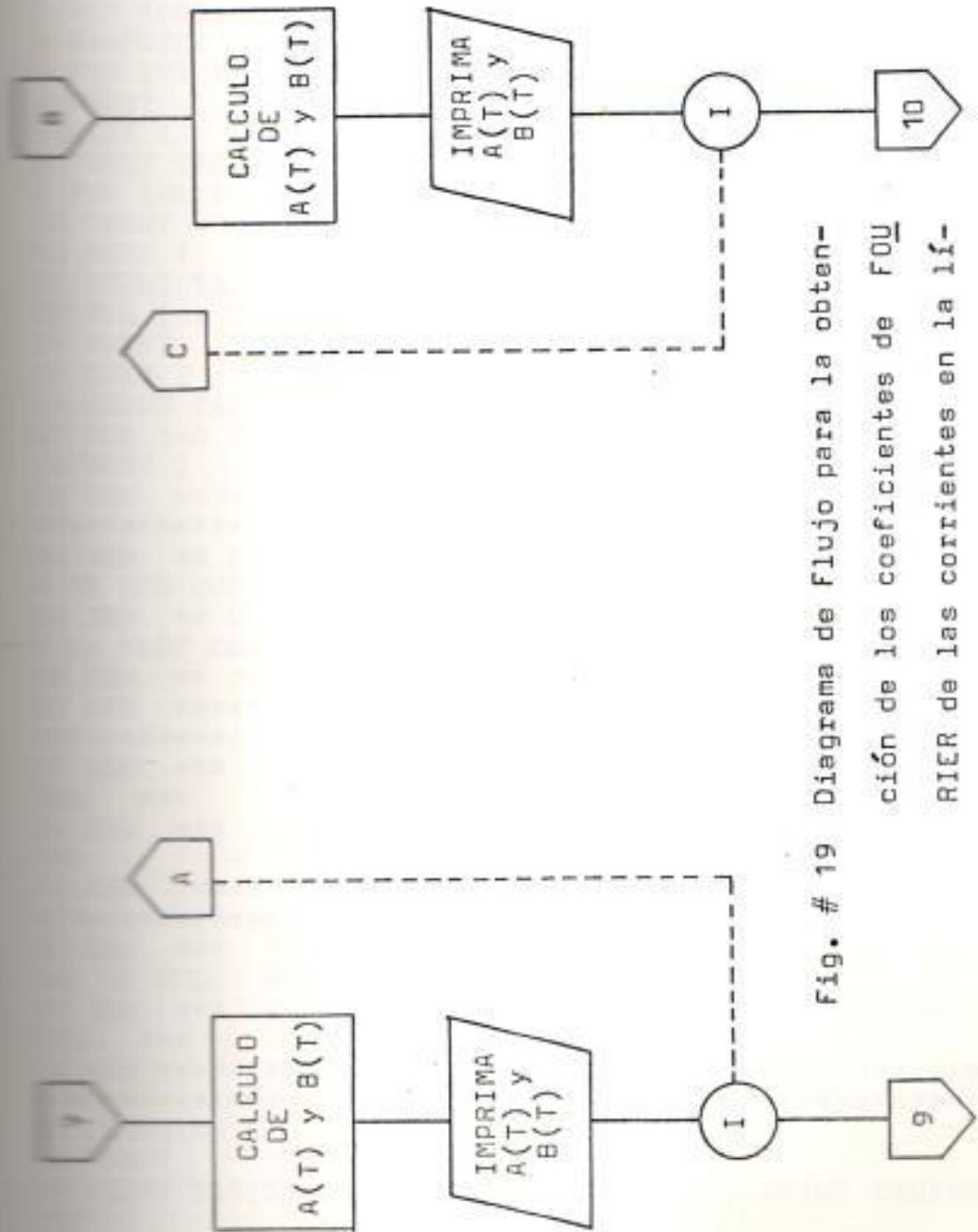


Fig. # 19 Diagrama de Flujo para la obtención de los coeficientes de FOU RIER de las corrientes en la línea, fase y carga.

```

2 OPEN #7, "P:"
3 DIM A(60), B(60)
4 GRAPHICS 0
5 FOR I=1 TO 6
6 PRINT
7 NEXT I
8 PRINT TAB(5); "ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA"
9 FOR I=1 TO 4
10 PRINT
11 NEXT I
12 PRINT TAB(16); "D E L"
13 FOR I=1 TO 4
14 PRINT
15 NEXT I
16 PRINT TAB(12); "L I T O R A L"
17 FOR I=0 TO 1000
18 NEXT I
19 REM *****
20 REM *****
21 REM ** PROGRAMA PARA LA OBTENCION EN FORMA RECURSIV
22 REM ** DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER **
23 REM ** DE LA CORRIENTE EN LA CARGA, EN LA LINEA Y E
24 REM ** LA FASE DEL TRANSFORMADOR **
25 REM ** CONECTADO A UN RECTIFICADOR TRIFASICO **
26 REM *****
27 REM *****
28 REM *** ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITO
29 REM ***
30 REM *** FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
31 REM ***
32 REM *****
33 REM *****
34 REM *** EL VALOR DE LA REACTANCIA DE CONMUTACION (
35 REM ES NULO ***
36 REM *** EL VALOR DEL ANGULO DE RETARDO (ALPHA) ES
37 REM NULO ***
38 REM *****
39 REM *****
40 GRAPHICS 0
41 PRINT
42 PRINT TAB(3); "DECISION A TOMARSE"; :PRINT TAB(26); "
43 ";
44 INPUT N
45 IF N<>0 GO TO 300

```

```

98 REM *****
*****
100 REM ** COEFICIENTES DE FOURIER PARA LA CORRIENTE
EN LA CARGA DE UN RECTIFICADOR TRIFASICO **
102 REM *****
*****
104 PRINT #7, TAB(20); "COEFICIENTES DE FOURIER DE LA COR
RIENTE"
106 PRINT #7
108 PRINT #7, TAB(25); "EN LA CARGA DE UN RECTIFICADOR"
110 PRINT #7
112 PRINT #7, TAB(36); "TRIFASICO"
114 REM *****
*****
116 REM ** M ES LA PRECISION SELECCIONADA PARA LA OB
TENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER **
118 REM *****
*****
120 PRINT
122 PRINT
124 PRINT TAB(2); "PRECISION DESEADA; M=";
126 INPUT M
128 PRINT #7
130 PRINT #7
132 PRINT #7, TAB(23); "T"; :PRINT #7, TAB(36); "A(T)"; :PRIN
T #7, TAB(53); "B(T)"
134 PRINT #7, TAB(21); "_____"; :PRINT #7, TAB(32); "_____
_____"; :PRINT #7, TAB(51); "_____ "
136 PRINT #7
138 XI=3.14159264
140 XI1=X1/3
142 DEF F1(X)=COS(3*T*X)*COS(X)
144 REM *****
*****
146 REM ** H ES EL VALOR DEL INCREMENTO PARA LA OBT
ENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER EN FORMA RECURSIVA
**
148 REM *****
*****
150 H=2*XI1/M
152 FOR I=1 TO 51
154 T=I-1
156 SMI=F1(XI1)+F1(-XI1)
158 MI=M-1
160 FOR L=1 TO MM

```

```

220 SUM1=SUM1+2*F1(-X11+L*H)
230 NEXT L
240 A(T)=SUM1*H/(2*X11)
250 IF T>0 GO TO 270
260 A(T)=A(T)/2
270 PRINT #7, TAB(22);T;:PRINT #7, TAB(32);A(T);:PRINT #7
.TAB(52);"0.0000"
280 NEXT I
290 STOP
300 IF N>0 GO TO 510
310 REM *****
*****
320 REM ** COEFICIENTES DE FOURIER PARA LA CORRIENTE
EN LA FASE DE UN RECTIFICADOR TRIFASICO **
330 REM *****
*****
340 PRINT #7, TAB(20);"COEFICIENTES DE FORIER DE LA CORR
IENTE"
350 PRINT #7
360 PRINT #7, TAB(25);"EN LA FASE DE UN RECTIFICADOR"
370 PRINT #7
380 PRINT #7, TAB(36);"TRIFASICO"
390 REM *****
*****
400 REM ** M ES LA PRECISION SELECCIONADA PARA LA OB
TENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER **
410 REM *****
*****
420 PRINT
430 PRINT
440 PRINT TAB(2);"PRECISION DESEADA; M=";
450 INPUT M
460 PRINT #7
470 PRINT #7
480 PRINT #7, TAB(23);"T";:PRINT #7, TAB(36);"A(T)";:PRIN
T #7, TAB(53);"B(T)"
490 PRINT #7, TAB(21);"_____";:PRINT #7, TAB(32);"_____
_____";:PRINT #7, TAB(51);"_____
_____";:PRINT #7
500 DEF F1(X)=-COS(T*X)*COS(X)
510 REM *****
*****
520 REM ** H ES EL VALOR DEL INCREMENTO PARA LA OBT
ENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER EN FORMA RECURSIVA

```

```

1000 DIM *****
*****
1000 F1=2*X11/M
1000 FOR I=1 TO 51
1000 T=I-1
1000 SUM1=F1(-X11)+F1(X11)
1000 MM=M-1
1000 FOR L=1 TO MM
1000 SUM1=SUM1+2*F1(-X11+L*H)
1000 NEXT L
1000 A(T)=SUM1*H/(2*X1)
1000 IF T>0 GO TO 500
1000 A(T)=A(T)/2
1000 PRINT #7, TAB(22); T; :PRINT #7, TAB(32); A(T); :PRINT #7
, TAB(32); "0.0000"
1000 NEXT I
1000 STOP
1000 DIM *****
*****
1000 DIM ** COEFICIENTES DE FOURIER PARA LA CORRIENTE
EN LA LINEA DE UN RECTIFICADOR TRIFASICO **
1000 DIM *****
*****
1000 PRINT #7, TAB(20); "COEFICIENTES DE FOURIER DE LA COR
RIENTE"
1000 PRINT #7
1000 PRINT #7, TAB(25); "EN LA LINEA DE UN RECTIFICADOR"
1000 PRINT #7
1000 PRINT #7, TAB(36); "TRIFASICO"
1000 DIM *****
*****
1000 DIM ** M ES LA PRECISION SELECCIONADA PARA LA OB
TENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER **
1000 DIM *****
*****
1000 PRINT
1000 PRINT
1000 PRINT TAB(2); "PRECISION DESEADA; M=";
1000 INPUT M
1000 PRINT #7
1000 PRINT #7
1000 PRINT #7, TAB(22); "T"; :PRINT #7, TAB(33); "A(T)"; :PRIN
T #7, TAB(50); "B(T)"
1000 PRINT #7, TAB(20); "_____"; :PRINT #7, TAB(29); "_____
"; :PRINT #7, TAB(46); "_____";

```

```

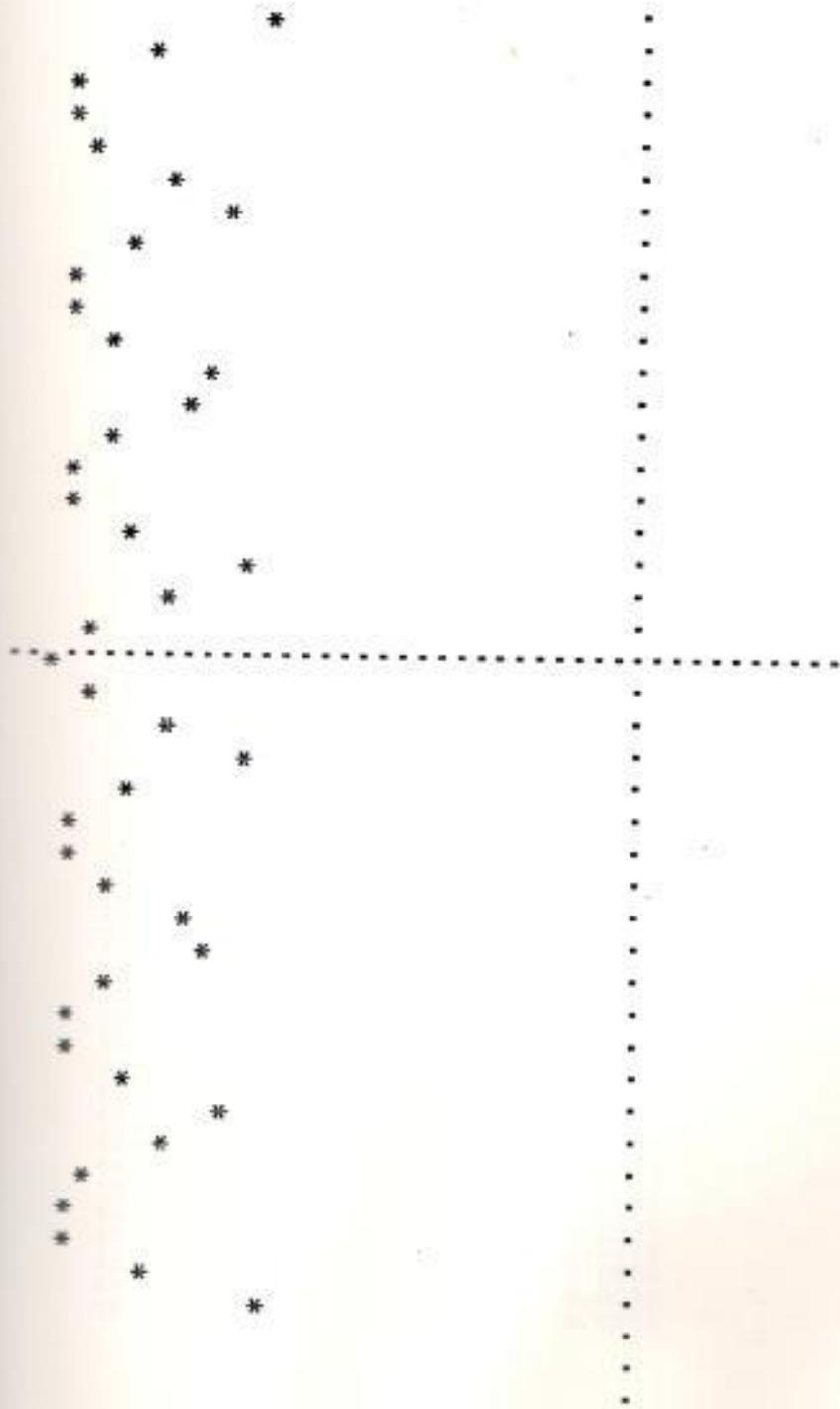
888 PRINT #7
889 X1=3.14159264
890 X11=X1/3
891 DEF F1(X)=COS(T*X)*COS(X)
892 DEF F11(X)=-COS(T*X)*COS(X-2*X11)
893 DEF F2(X)=SIN(T*X)*COS(X)
894 DEF F22(X)=-SIN(T*X)*COS(X-2*X11)
895 REM *****
896 REM *****
897 REM ** H ES EL VALOR DEL INCREMENTO PARA LA OBTENICION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER EN FORMA RECURSIVA
898 REM *****
899 REM *****
900 H=2*X11/M
901 FOR I=1 TO 51
902 T=I-1
903 SUM1=F1(X11)+F1(-X11)
904 SUM11=F11(X11)+F11(X1)
905 SUM2=F2(X11)+F2(-X11)
906 SUM22=F22(X11)+F22(X1)
907 MM=M-1
908 FOR L=1 TO MM
909 SUM1=SUM1+2*F1(-X11+L*H)
910 SUM11=SUM11+2*F11(X11+L*H)
911 SUM2=SUM2+2*F2(-X11+L*H)
912 SUM22=SUM22+2*F22(X11+L*H)
913 NEXT L
914 A(T)=(SUM1+SUM11)*H/(2*X1)
915 B(T)=(SUM2+SUM22)*H/(2*X1)
916 IF T>0 GO TO 700
917 A(T)=A(T)/2
918 PRINT #7, TAB(21);T;:PRINT #7, TAB(30);A(T);:PRINT #7
919 TAB(4);B(T)
920 NEXT I
921 STOP

```

COEFICIENTES DE FOURIER DE LA CORRIENTE
EN LA CARGA DE UN RECTIFICADOR
TRIFASICO

T	A(T)	B(T)
0	.826989	0.0000
1	.206764	0.0000
2	-.047272	0.0000
3	.02069	0.0000
4	-1.15815E-02	0.0000
5	7.39911E-03	0.0000
6	-5.13589E-03	0.0000
7	3.77426E-03	0.0000
8	-2.89167E-03	0.0000
9	2.28718E-03	0.0000
10	-1.85505E-03	0.0000
11	1.53544E-03	0.0000
12	-1.29248E-03	0.0000
13	1.10336E-03	0.0000
14	-9.53476E-04	0.0000
15	8.32493E-04	0.0000
16	-7.33521E-04	0.0000
17	6.5151E-04	0.0000
18	-5.82804E-04	0.0000
19	5.24639E-04	0.0000
20	-4.75019E-04	0.0000
21	4.32405E-04	0.0000
22	-3.95282E-04	0.0000
23	3.63092E-04	0.0000
24	-3.34794E-04	0.0000
25	3.09812E-04	0.0000
26	-2.87598E-04	0.0000
27	2.67792E-04	0.0000
28	-2.50222E-04	0.0000
29	2.34276E-04	0.0000
30	-2.20151E-04	0.0000
31	2.07172E-04	0.0000
32	-1.95406E-04	0.0000
33	1.84833E-04	0.0000
34	-1.75137E-04	0.0000
35	1.66011E-04	0.0000
36	-1.57891E-04	0.0000
37	1.50424E-04	0.0000
38	-1.43357E-04	0.0000
39	1.3714E-04	0.0000
40	-1.31217E-04	0.0000
41	1.25715E-04	0.0000
42	-1.20548E-04	0.0000
43	1.16044E-04	0.0000
44	-1.11688E-04	0.0000
45	1.07561E-04	0.0000
46	-1.03784E-04	0.0000
47	9.99828E-05	0.0000
48	-9.68866E-05	0.0000
49	9.37244E-05	0.0000
50	-9.04105E-05	0.0000

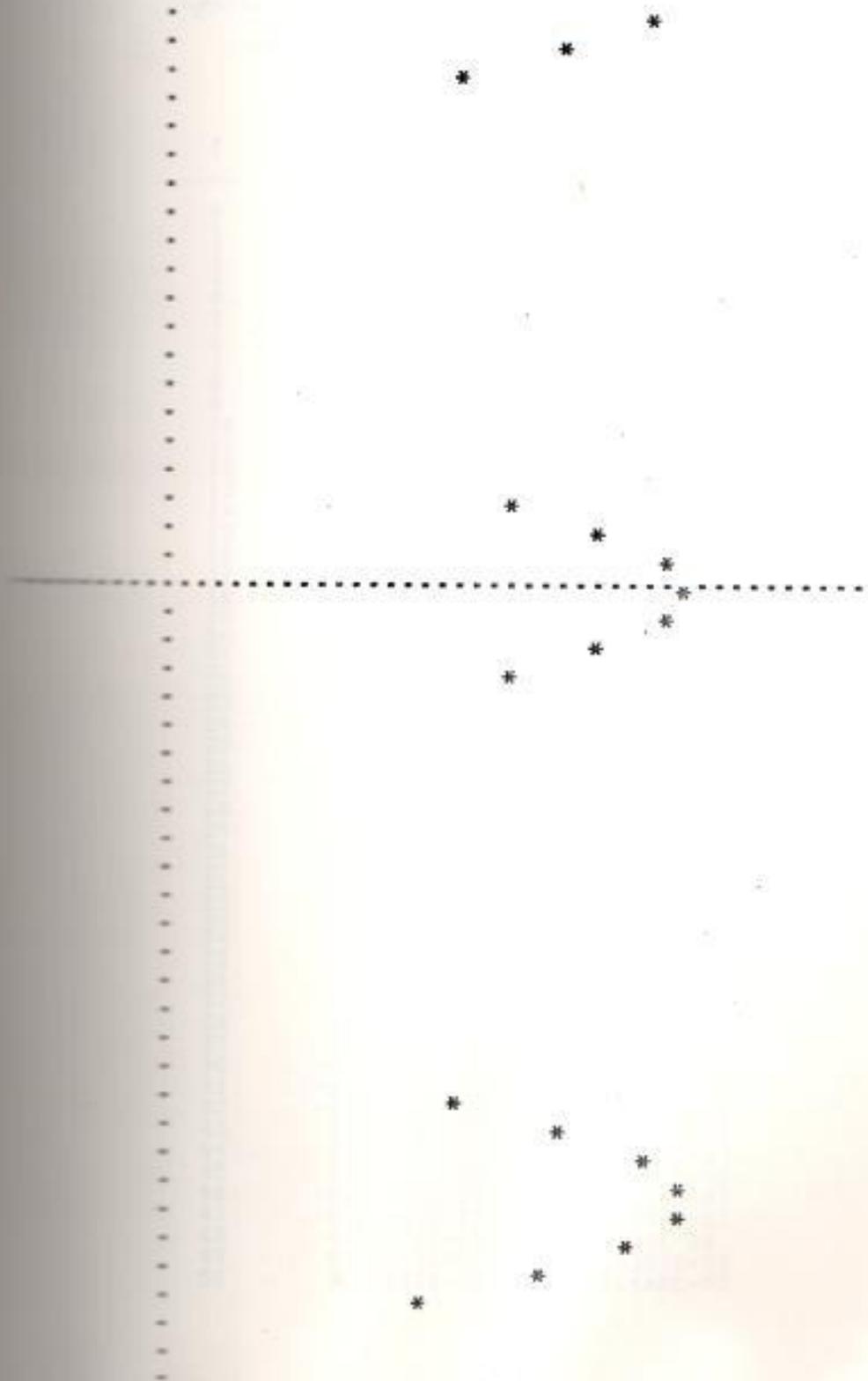
ANÁLISIS DE LA CORRIENTE EN LA CARGA DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO



COEFICIENTES DE FUORIER DE LA CORRIENTE
EN LA FASE DE UN RECTIFICADOR
TRIFASICO

T	A(T)	B(T)
0	-.275663	0.0000
1	-.471162	0.0000
2	-.275663	0.0000
3	-6.89214E-02	0.0000
4	5.51205E-02	0.0000
5	6.89062E-02	0.0000
6	1.57573E-02	0.0000
7	-.034438	0.0000
8	-3.93631E-02	0.0000
9	-6.89666E-03	0.0000
10	2.50327E-02	0.0000
11	2.75413E-02	0.0000
12	3.86051E-03	0.0000
13	-1.96551E-02	0.0000
14	-2.11722E-02	0.0000
15	-2.46637E-03	0.0000
16	1.61727E-02	0.0000
17	1.71887E-02	0.0000
18	1.71196E-03	0.0000
19	-1.37328E-02	0.0000
20	-1.44608E-02	0.0000
21	-1.25809E-03	0.0000
22	1.19274E-02	0.0000
23	1.24747E-02	0.0000
24	9.63891E-04	0.0000
25	-1.05369E-02	0.0000
26	-1.09635E-02	0.0000
27	-7.62395E-04	0.0000
28	9.43252E-03	0.0000
29	9.77454E-03	0.0000
30	6.18349E-04	0.0000
31	-8.53377E-03	0.0000
32	-8.81419E-03	0.0000
33	-5.11015E-04	0.0000
34	7.78777E-03	0.0000
35	8.02195E-03	0.0000
36	4.30827E-04	0.0000
37	-7.15837E-03	0.0000
38	-7.35696E-03	0.0000
39	-3.67788E-04	0.0000
40	6.61994E-03	0.0000
41	6.79057E-03	0.0000
42	3.17825E-04	0.0000
43	-6.15387E-03	0.0000
44	-6.30212E-03	0.0000
45	-2.77498E-04	0.0000
46	5.74633E-03	0.0000
47	5.87638E-03	0.0000
48	2.44507E-04	0.0000
49	-5.38674E-03	0.0000
50	-5.50183E-03	0.0000

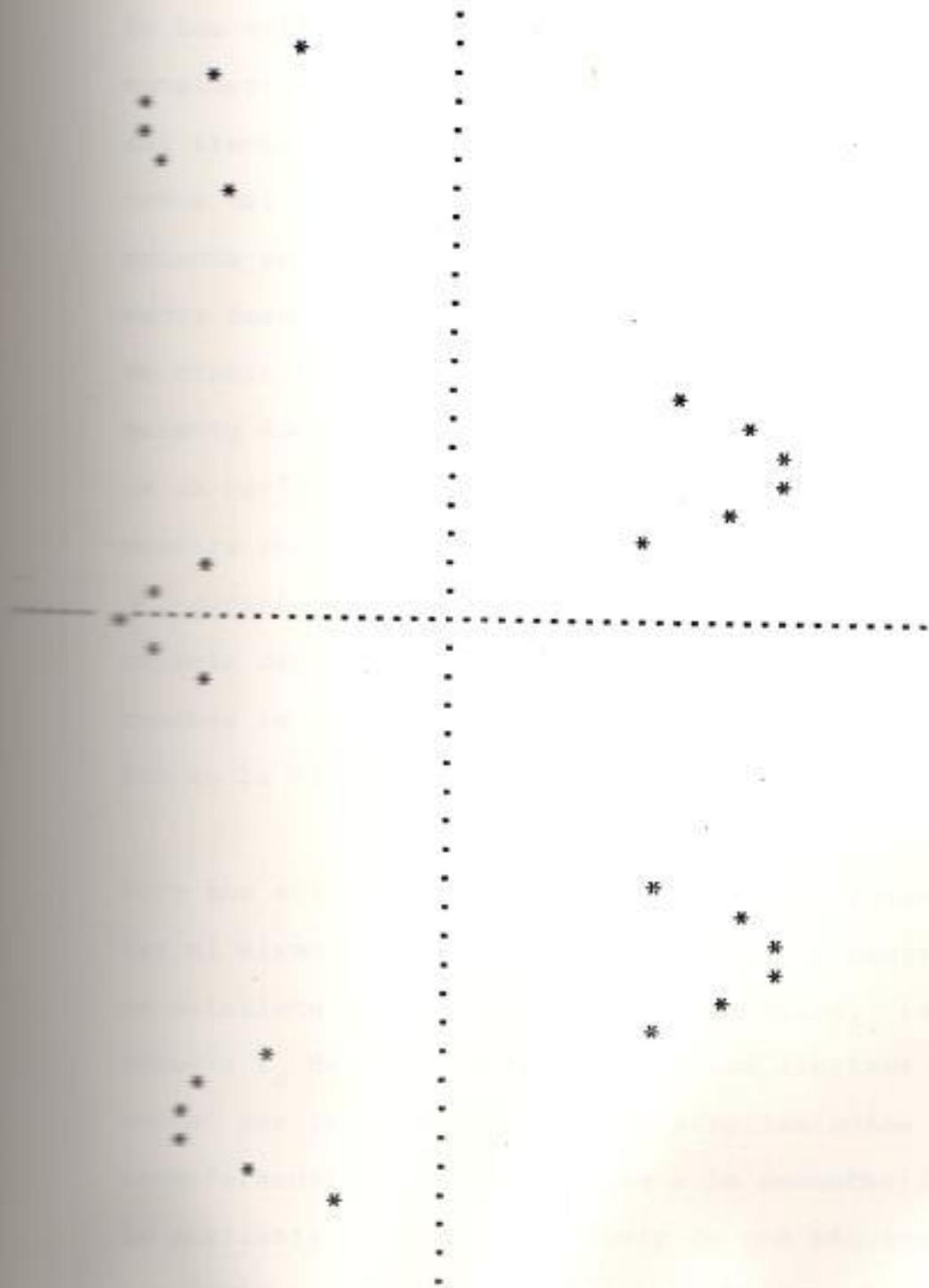
FORMA DE LA CORRIENTE EN LA FASE DE UN RECTIFICADOR
TRIFASICO



COEFICIENTES DE FOURIER DE LA CORRIENTE
EN LA LINEA DE UN RECTIFICADOR
TRIFASICO

T	A(T)	B(T)
0	0	0
1	.706743	-.408039
2	.413495	.238731
3	6.35783E-09	-1.20451E-08
4	-8.26809E-02	4.77354E-02
5	-.103359	-5.96745E-02
6	-3.49681E-08	4.76837E-09
7	5.16571E-02	-2.98241E-02
8	5.90446E-02	3.40894E-02
9	-6.35783E-08	-1.09027E-08
10	-3.75491E-02	2.16789E-02
11	-.041312	-2.38514E-02
12	-3.85443E-08	-1.11014E-08
13	2.94827E-02	-1.70218E-02
14	3.17584E-02	1.83357E-02
15	3.17891E-08	2.35099E-08
16	-2.42591E-02	.014006
17	-2.57831E-02	-1.48859E-02
18	2.70208E-08	4.67648E-08
19	2.05993E-02	-.011893
20	2.16912E-02	1.25234E-02
21	-8.02676E-08	-3.71889E-09
22	-1.78911E-02	1.03294E-02
23	-1.87122E-02	-1.08034E-02
24	3.19878E-08	1.86761E-08
25	1.58054E-02	-9.12526E-03
26	1.64454E-02	9.4947E-03
27	-9.17912E-08	2.89044E-08
28	-1.41488E-02	8.16873E-03
29	-1.46617E-02	-8.46498E-03
30	-3.49681E-08	7.52051E-08
31	1.28006E-02	-7.39055E-03
32	1.32214E-02	7.63338E-03
33	-1.48962E-07	1.02314E-08
34	-1.16816E-02	6.74433E-03
35	-.012033	-6.9471E-03
36	2.24014E-08	-8.19564E-08
37	1.07375E-02	-6.19927E-03
38	1.10355E-02	6.37126E-03
39	2.31465E-08	7.3264E-08
40	-9.92995E-03	5.73297E-03
41	-1.01859E-02	-5.88074E-03
42	-4.92235E-08	-3.49506E-08
43	9.23079E-03	-5.32935E-03
44	9.4532E-03	5.45771E-03
45	2.00445E-07	3.43887E-08
46	-8.61946E-03	4.97643E-03
47	-8.81464E-03	-5.08907E-03
48	6.59376E-08	1.6868E-08
49	8.08013E-03	-4.66509E-03
50	8.25257E-03	4.76468E-03

FORMA DE LA CORRIENTE EN LA LINEA DE UN RECTIFICADOR TRIFASICO



ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, FORMAS DE PREVENIR POSIBLES DAÑOS

En los análisis realizados anteriormente, no se ha considerado el efecto que produce la inductancia del transformador. Debido al hecho de que los devanados del transformador poseen inductancia, la corriente en un ánodo no puede aumentar instantáneamente desde cero hasta el valor total de I_d , ni puede disminuir repentinamente hasta cero cuando el siguiente ánodo empieza a funcionar. Entonces, existe un período de "SUPERPOSICION", cuya duración se muestra en la Fig. # 20 (a), indicada por el ángulo ϕ , durante el cual el primer ánodo conduce la corriente decreciente i_1 , mientras el segundo ánodo conduce la corriente creciente i_2 , tal como se muestra en la Fig. # 20 (b).

Para que esto sea posible, los dos ánodos deben estar al mismo potencial. Esto equivale a decir que se establece un cortocircuito entre ellos. La corriente i_c de éste cortocircuito está limitada solamente por la impedancia de los arrollamientos del transformador, esto es similar a la conmutación de la corriente en el arrollamiento de una máquina de corriente continua cuando las escobillas pasan de

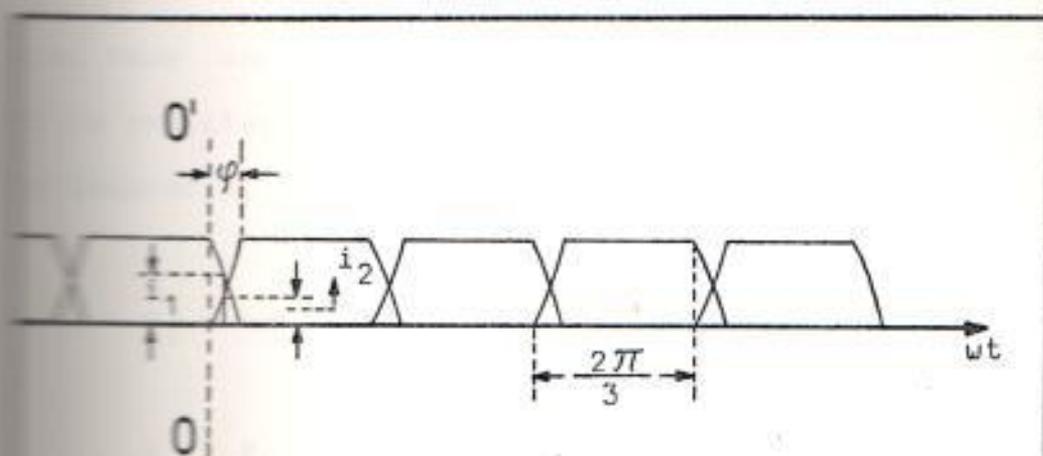
un segmento colector a otro.

Con fines analíticos se supondrá que la inductancia total en el circuito de corriente continua es suficiente mente grande como para justificar la aproximación de que la corriente I_d permanece constante, matemáticamente hablando:

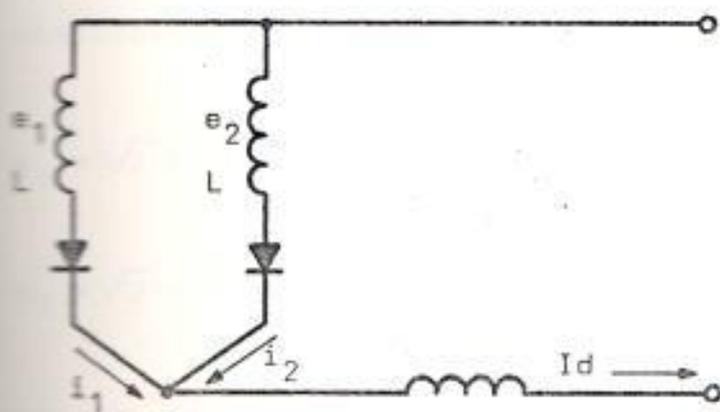
$$I_d = i_1 + i_2 = \text{constante} \quad (37)$$

Las ondas de tensión del secundario del transformador que corresponden a las ondas de corriente de cada elemento rectificador de cada fase, se muestran gráficamente en la Fig. # 20 (c), como e_1 , e_2 y e_3 , debido a la superposición de las corrientes, la tensión de corriente continua durante el período de superposición ϕ_s puede considerarse como la media de los correspondientes valores instantáneos (siempre que se despreceie la caída en los elementos rectificadores) e_1 y e_2 y a además los otros. Luego la tensión de corriente continua toma la forma de diente de sierra, tal como se muestra en la Fig. # 20 (c) por línea de trazo grueso.

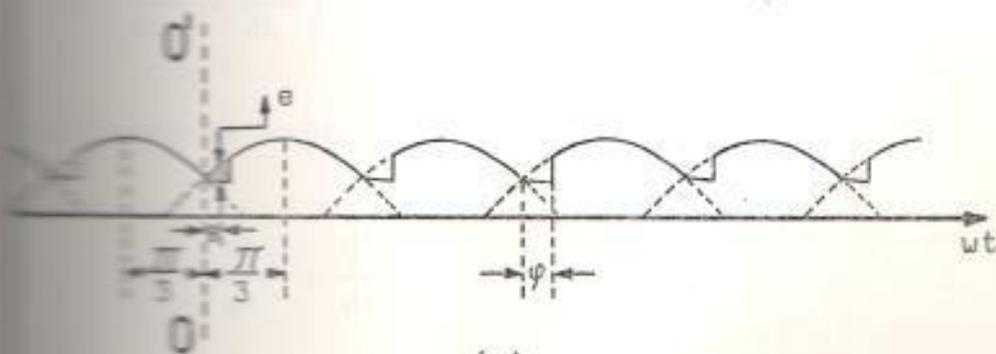
Las dos ramas que funcionan simultáneamente se encuentran conectadas en paralelo, la diferencia de poten



(a)



(b)



(c)

20 Efecto de la SUPERPOSICION sobre la ten
sion de Corriente Continua.

debe ser igual para cada una de ellas. Entonces, si la resistencia de los devanados del transformador se desprecia, se tendría:

$$e_1 - L \frac{di_1}{dt} = e_2 - L \frac{di_2}{dt} \quad (38)$$

$$e_1 - e_2 = L \left(\frac{di_1}{dt} - \frac{di_2}{dt} \right) \quad (39)$$

Según se aprecia en la Fig. # 20 (c), las ondas de la fuerza electromotriz e_1 y e_2 están representadas por:

$$e_1 = \sqrt{2} E_a \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) \quad (40)$$

$$e_2 = \sqrt{2} E_a \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right) \quad (41)$$

Finalmente se obtendría:

$$L \left(\frac{di_1}{dt} - \frac{di_2}{dt} \right) = -2\sqrt{2} E_a \sin \frac{\pi}{3} \sin \omega t \quad (42)$$

Reemplazando la expresión (37), se tiene que:

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} = 0 \quad (43)$$

Finalmente al combinar las expresiones (42) y (43), resulta que:

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\sqrt{2} E_a}{L} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \operatorname{sen} \omega t \quad (44)$$

Por lo tanto:

$$i_2(t) = \frac{\sqrt{2} E_a}{\omega L} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} (1 - \cos \omega t) \quad (45)$$

$$i_1(t) = I_d - \frac{\sqrt{2} E_a}{\omega L} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} (1 - \cos \omega t) \quad (46)$$

Las expresiones (45) y (46), pueden simplificarse observando en la Fig. # 20 (a), que cuando $\omega t = \varphi$, $i_1 = 0$ el resultado final sería:

$$i_1(t) = I_d \left(1 - \frac{1 - \cos \omega t}{1 - \cos \varphi} \right) \quad (47)$$

$$i_2(t) = I_d \left(\frac{1 - \cos \omega t}{1 - \cos \varphi} \right) \quad (48)$$

Se puede concluir, que el efecto de la superposición consiste en reducir la tensión media de corriente continua, en una cantidad proporcional al área de la figura triangular rayada de la Fig. # 20 (c). Entonces el área bajo la curva e_2 entre los puntos F y G, dividida por la base $2\pi/3$, sería la tensión media de corriente continua si no existiese superposición y si se desprecia la caída en los elementos rectificadores es un valor igual a la expresión (34), deducida ante-

discrepante. Al valor de la expresión (34), se le debe restar una cantidad e igual al área rayada dividida por la base $2\pi/3$; si las curvas e_1 y e_2 se las refieren al origen O , la ordenada e en el punto θ^0 a la derecha del origen es:

$$e = e_2 - \frac{1}{2} (e_1 + e_2) = \frac{1}{2} (e_2 - e_1) \quad (49)$$

donde se tiene que:

$$e_\varphi = \frac{1}{2\pi/3} \int_0^\varphi e \, d\theta \quad (50)$$

$$e = \sqrt{2} E_a \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \operatorname{sen} \theta \quad (51)$$

Finalmente se tiene que:

$$e_\varphi = \frac{E_d}{2} (1 - \cos \varphi) \quad (52)$$

Con lo que el valor medio neto de la tensión rectificadora E_{φ} puede escribirse de la siguiente manera:

$$(E_{\varphi})_{\text{neto}} = \sqrt{2} E_a \frac{\operatorname{sen}(\pi/3)}{\pi/3} - \frac{3\omega L}{2\pi} I_d \quad (53)$$

De la expresión (53), se demuestra que la tensión de corriente continua disminuye linealmente a medida que aumenta la corriente de carga. La disminución se hace

mayor conforme se aumenta el número de fases del secundario. En ausencia de dispositivos reguladores de tensión, la caída en la tensión de corriente continua suele ser del 5 al 7% del valor nominal, siempre que se mantenga constante la tensión de alimentación alterna.

Mientras más pequeño es el tiempo en el que cada elemento rectificador conduce corriente (tiempo de trabajo), tanto menos se aprovecha ese elemento rectificador y el correspondiente devanado secundario del transformador, porque aumenta la relación entre la corriente eficaz y la corriente media.

En adargo, si bien es cierto que el aprovechamiento eficiente, tal como fue definido anteriormente, correspondiente al sistema trifásico simple, aumenta la saturación con corriente continua del núcleo del transformador. Además, introduce armónicas pares en el circuito primario y grandes ondulaciones en la tensión continua. Para evitar todas estas dificultades, es necesario hacer que el número de fases secundarias sea un múltiplo par del número de fases primarias. Para lograr esto y conservar las ventajas del sistema trifásico, es costumbre agrupar las 6 ó 12 fases secundarias en grupos de 3 fases. Esto se logra por medio de TRANSFORMADORES INTER-CONECTADOS, llamados BOBINAS DE ABSORCIÓN.

RECTIFICADORES HEXAFÁSICOS ESTRELLA

Un circuito básico de un rectificador hexafásico estrella se muestra en la fig. # 21, en la cual el lado de alta tensión se encuentra conectado en triángulo.

Para uso de convertidores estáticos de potencia, se prefiere la conexión hexafásica en estrella debido a que proporciona un neutro (que puede ser conectado a tierra). En un sistema de éste tipo, las tensiones de las seis fases están defasadas sucesivamente 60 grados eléctricos. Si la carga es una resistencia y si se desprecia el efecto de la reactancia del transformador, cada elemento rectificador conducirá la corriente continua de la carga durante un sexto del período, cuando su potencial sea más positivo al que cualquiera de los otros elementos rectificadores.

Para el análisis correspondiente de éste tipo de rectificador, serán tomadas en consideración las hipótesis siguientes:

- 1.- Se desprecia la reactancia de dispersión del transformador.
- 2.- La caída de tensión es constante para todas las

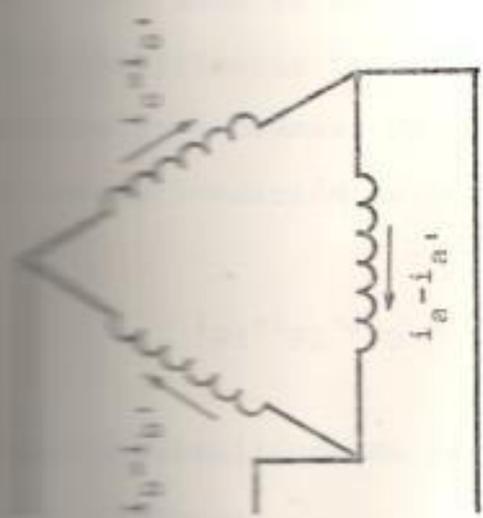
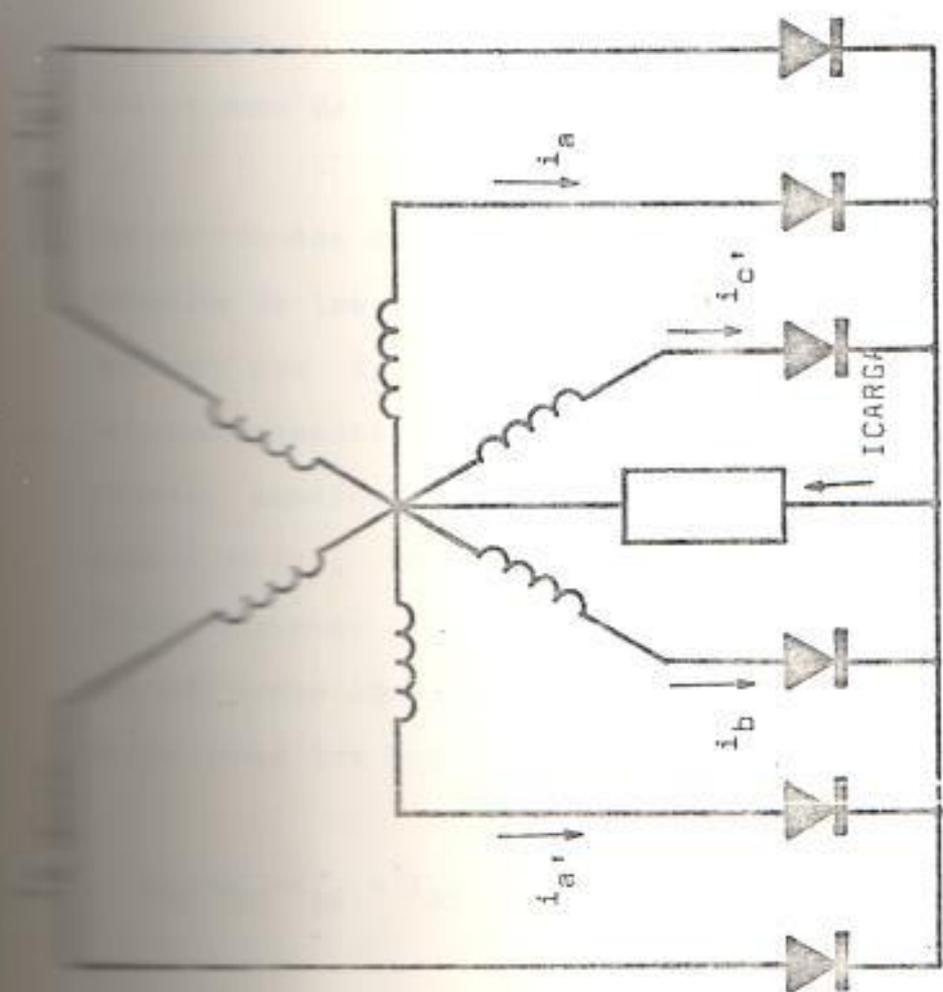


FIG. # 21 RECTIFICADOR HEXAFASICO ESTRELLA

cargas.

El- La onda de corriente continua es una línea recta.

Las corrientes en los seis elementos rectificadores procedentes de los correspondientes secundarios, se representarán por $i_{S1}, i_{S2}, \dots, i_{S6}$, cada una de las cuales es sucesivamente igual a la potencia de salida de corriente continua I_d , tal como se lo indica en la Figura # 12 (a). Las fuerzas magnetomotivas resultantes en las diversas ramas del núcleo del transformador deben ser todas iguales y el número de espiras es el mismo en todas las bobinas, se tiene que:

$$i_{P1} - i_{S1} + i_{S4} = i_{P2} - i_{S3} + i_{S6} = i_{P3} - i_{S5} + i_{S2} \quad (54)$$

Como i_{P1}, i_{P2} e i_{P3} son los correspondientes valores instantáneos de las corrientes en los devanados del primero. Pero como ya se había mencionado antes, los devanados del primario forman un circuito trifásico, las corrientes instantáneas del primario cumplen en todo momento con la condición de que:

$$i_{P1} + i_{P2} + i_{P3} = 0 \quad (55)$$

Combinación simultánea de las expresiones (54) y (55),
se obtienen las relaciones:

$$\begin{aligned}
 i_{p1} = & 2/3 i_{s1} + 1/3 i_{s2} - 1/3 i_{s3} - \\
 & - 2/3 i_{s4} - 1/3 i_{s5} + 1/3 i_{s6}
 \end{aligned} \tag{56}$$

$$\begin{aligned}
 i_{p2} = & -1/3 i_{s1} + 1/3 i_{s2} + 2/3 i_{s3} + \\
 & + 1/3 i_{s4} - 1/3 i_{s5} - 2/3 i_{s6}
 \end{aligned} \tag{57}$$

$$\begin{aligned}
 i_{p3} = & -1/3 i_{s1} - 2/3 i_{s2} - 1/3 i_{s3} + \\
 & + 1/3 i_{s4} + 2/3 i_{s5} + 1/3 i_{s6}
 \end{aligned} \tag{58}$$

Las relaciones (56), (57) y (58), trazadas como se muestra en la Fig. # 22 (b) dan las formas escalonadas de onda que indican una relación trifásica, así como la presencia de armónicos.

El valor eficaz ó RMS de la corriente del primario es la raíz cuadrada de los valores medios al cuadrado en el intervalo angular y viene dado por:

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} I_d \tag{59}$$

La corriente media de corriente continua obtenida de la ecuación (34), para (n=6), tiene un valor igual a:

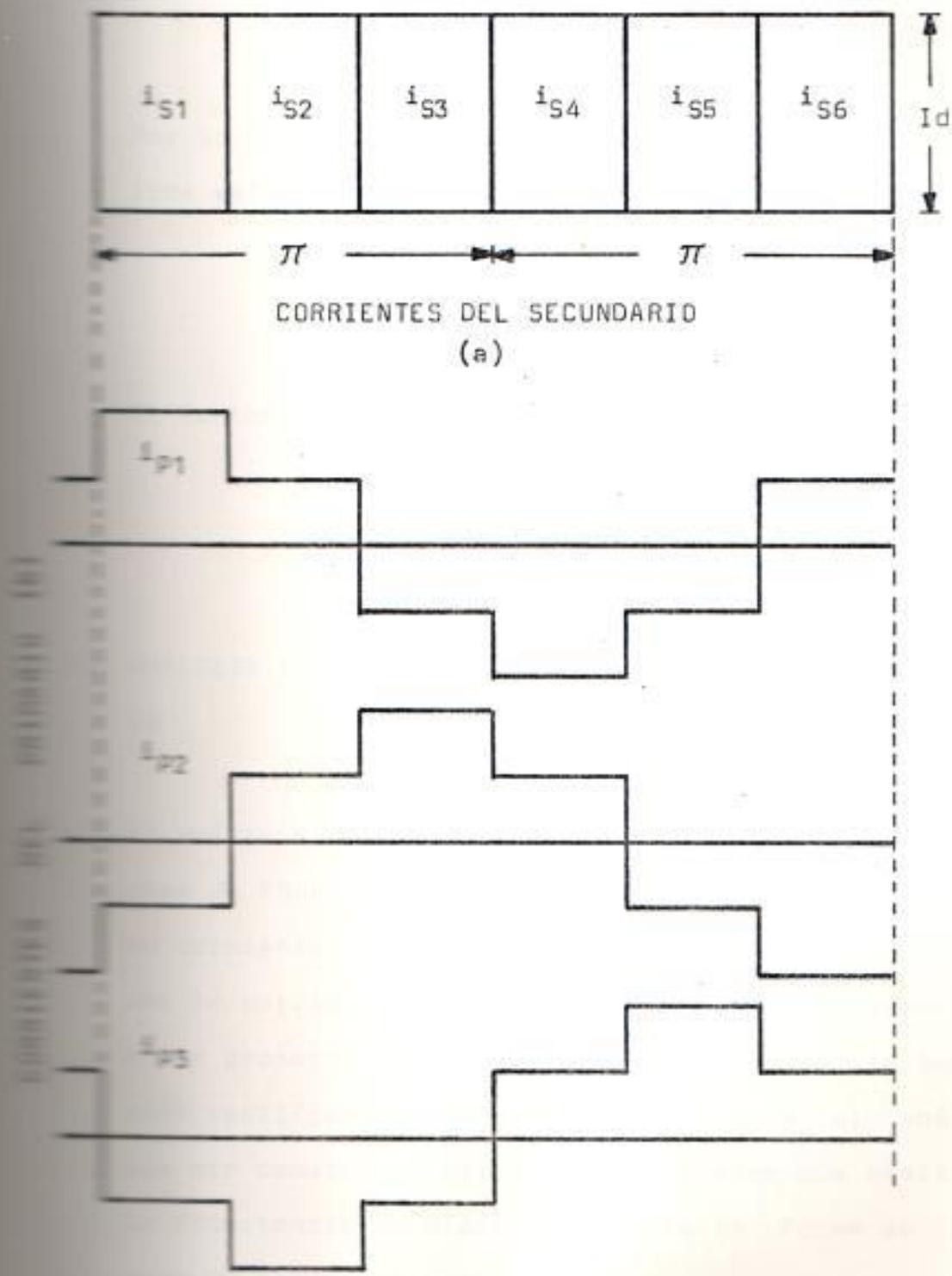


Fig. # 22 Corrientes del primario y del secundario, Rectificador Hexafásico Estrella.

$$E_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_a \quad (60)$$

Por lo que la potencia de corriente continua de salida está dada por la expresión:

$$P_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_a I_d \quad (61)$$

El factor de potencia aparente es:

$$\frac{P_d}{P_1} = \frac{3}{\pi} = 0,955 \quad (62)$$

ANÁLISIS Y FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE EN LA CARGA

El análisis será realizado con la ayuda de las series de FOURIER y de la Fig. # 21. Si el circuito de corriente continua no tuviera inductancia, entonces la corriente unidireccional en la carga vendría a ser proporcional al valor instantáneo de la tensión rectificadora. Inicialmente se hará el análisis sin considerar el efecto suavizador que realiza la inductancia de dispersión sobre la forma de la onda de corriente continua.

Se comenzará el análisis, considerando secuencia po

activa "ABC" y teniendo presente que se trata de una conexión "HEXAFASICA ESTRELLA". Cada una de las fases del lado de baja tensión, están defasadas 60 grados eléctricos entre sí, por lo tanto cada uno de los elementos rectificadores conducirá la corriente continua de la carga durante un sexto del período.

El período para la obtención de los coeficientes de FOURIER de la corriente en la carga del presente rectificador es de $2\pi/6$, luego:

$$a_n = \frac{12}{\pi} \int_0^{\pi/6} \cos(x) \cdot \cos(6nx) dx \quad (63)$$

$$a_n = \frac{6}{\pi} \int_0^{\pi/6} [\cos(6n+1)x + \cos(6n-1)x] dx =$$

$$= \frac{6}{\pi} \left[\frac{\sin(6n+1)x}{(6n+1)} + \frac{\sin(6n-1)x}{(6n-1)} \right]_0^{\pi/6} =$$

Después de realizar la evaluación en el intervalo mencionado anteriormente $(0, \pi/6)$, se obtiene:

$$a_n = \frac{6 (-1)^{n+1}}{\pi(36n^2 - 1)} \quad (64)$$

Como se trata de una función par, entonces su desarrollo en series de FOURIER sólo tendrá términos en cosenos, es decir que:

$$b_n = 0 \quad (65)$$

La forma de onda de la corriente en la carga que alimenta un rectificador hexafásico estrella como el que se muestra en la Fig. # 21 no es del todo una corriente continua pura, tiene un cierto nivel de corriente continua dado por el término a_0 del desarrollo de las series de FOURIER y una serie de armónicos que son múltiplos de seis.

La relación entre las tensiones de corriente continua e corriente alterna es superior comparada con el rectificador trifásico.

ANÁLISIS Y FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE EN LA LÍNEA DEL TRANSFORMADOR

A continuación se mostrará en forma clara la manera de obtener los coeficientes de FOURIER para la corriente en una de las líneas del transformador que alimenta la carga conectada al rectificador:

$$\begin{aligned}
 i_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \cos(x) \cdot \cos(nx) \, dx + \\
 &+ \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} \cos(x - \pi/3) \cdot \cos(nx) \, dx - \\
 &- \frac{1}{\pi} \int_{5\pi/6}^{7\pi/6} \cos(x - \pi) \cdot \cos(nx) \, dx -
 \end{aligned}$$

$$- \frac{1}{\pi} \int_{7\pi/6}^{3\pi/2} \cos(x + 2\pi/3) \cdot \cos(nx) \, dx \quad (66)$$

$$\begin{aligned} e_n = & \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \cos(x) \cdot \sin(nx) \, dx + \\ & + \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} \cos(x - \pi/3) \cdot \sin(nx) \, dx - \\ & - \frac{1}{\pi} \int_{7\pi/6}^{\pi/6} \cos(x - \pi) \cdot \sin(nx) \, dx - \\ & - \frac{1}{\pi} \int_{5\pi/6}^{3\pi/2} \cos(x + 2\pi/3) \cdot \sin(nx) \, dx \quad (67) \end{aligned}$$

Claramente se nota la introducción de armónicos en la línea del transformador que alimenta al rectificador.

El espectro de señales de armónicas causaría daños en los devanados del transformador, produciendo a la larga destrucción del aislamiento. Generalmente cuando se emplea un solo transformador para obtener seis fases en el secundario, se utiliza un transformador tri fasico no acorazado con los devanados del primario conectados en triángulo, debido a que evita el efecto perturbador de una posible componente de corriente con línea superpuesta a la componente normal de corriente en cada uno de los devanados del secundario.

Las formas de onda de la corriente en la LINEA de éste transformador se muestra en la Fig. # 23.

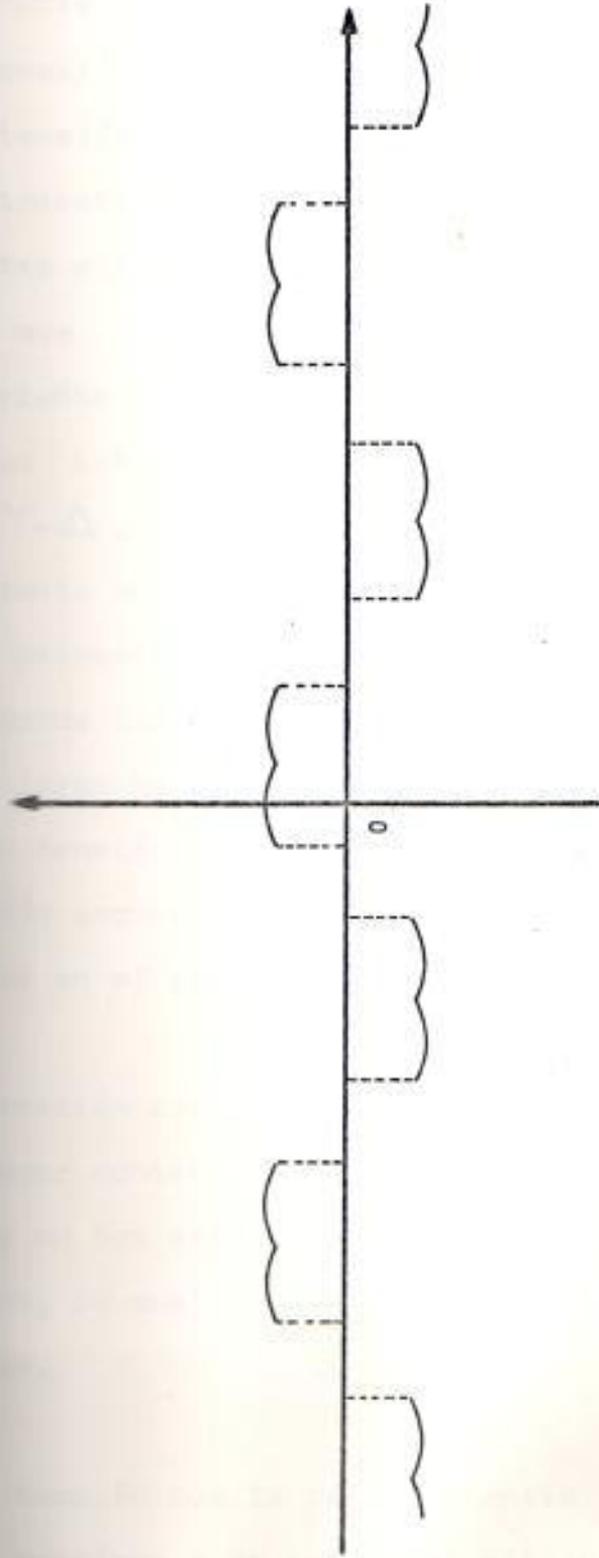


Fig. # 23 Forma de Onda de la Corriente en la LINEA del Transformador que alimenta un Rect. Hexafásico Estrella.

Generalmente en los sistemas de alta tensión se utiliza la conexión Δ - Y para elevar y la Y - Δ para reducir la tensión. La conexión a tierra del punto neutro de los transformadores conectados en Δ - Y no introduce dificultad alguna a causa de los armónicos de tercer orden, ya que la componente armónica de tercer orden de la corriente de excitación puede fluir en el primario. Cuando se trata de transformadores que están conectados en Y - Δ , la corriente armónica de tercer orden de la corriente de excitación no puede fluir en los devanados del primario, sino que aparece en el circuito secundario, donde las tres corrientes armónicas están en fase a lo largo del circuito en Δ . Si la forma de la onda de la tensión aplicada contiene armónicos, entonces la tensión secundaria (su forma de onda), no será la misma que en el primario.

En cooperación con el rectificador monofásico, se obtiene un menor contenido de rizado en la componente fundamental y en los armónicos de orden superior en la onda de salida, lo cual requiere de filtros de alisado menos complejos.

Se nota también que la relación entre tensiones de corriente continua y de corriente alterna es superior.

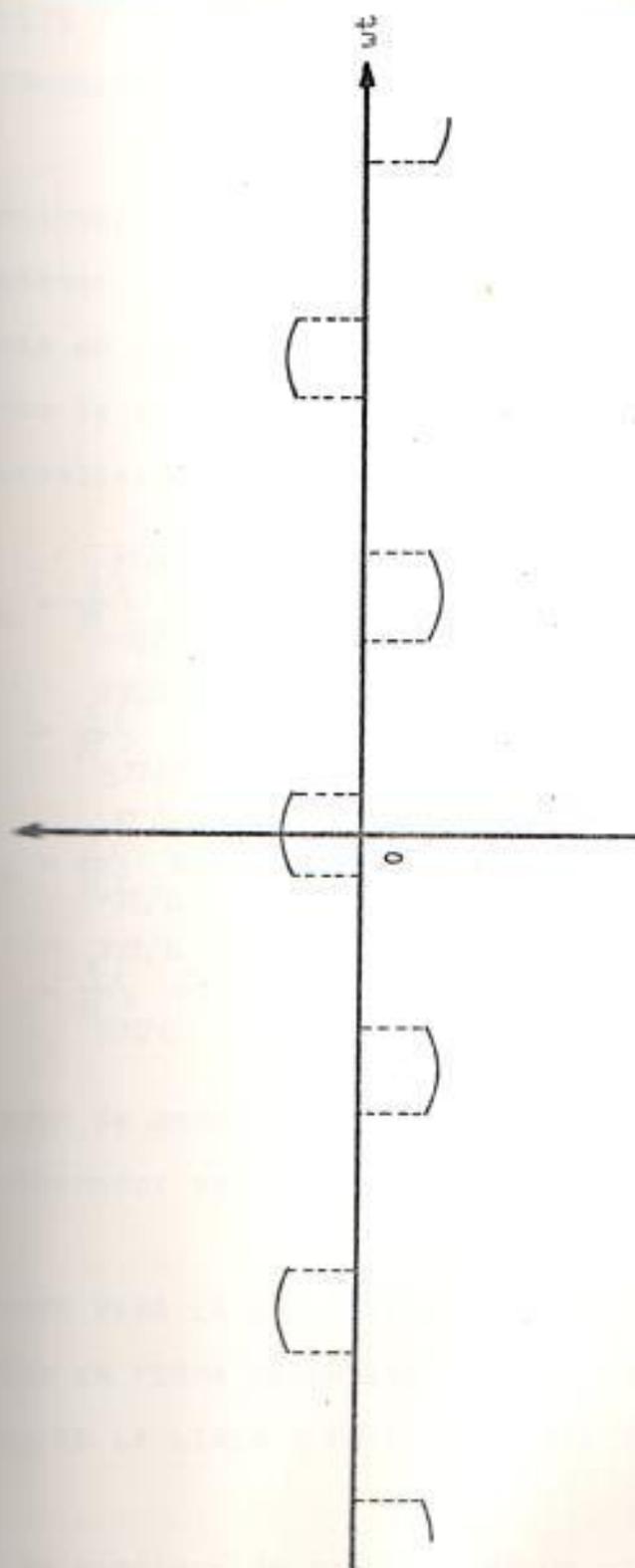


Fig. # 24 Forma de Onda de la Corriente en la FASE del Transformador que alimenta un Rect. Hexafásico Estrella

ANÁLISIS Y FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE EN LA FASE DEL TRANSFORMADOR

En continuación se mostrará en forma clara la manera de obtener los coeficientes de FOURIER para la corriente en una de las fases del transformador que alimenta la carga conectada al rectificador hexafásico en estrella:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \cos(x) \cdot \cos(nx) dx - \frac{1}{\pi} \int_{5\pi/6}^{7\pi/6} \cos(x - \pi) \cdot \cos(nx) dx \quad (68)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \cos(x) \cdot \sin(nx) dx - \frac{1}{\pi} \int_{5\pi/6}^{7\pi/6} \cos(x - \pi) \cdot \sin(nx) dx = 0 \quad (69)$$

La forma de onda de la corriente en la FASE de éste transformador se muestra en la Fig. # 24.

PROGRAMA PARA LA OBTENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER EN FORMA RECURSIVA DE LAS CORRIENTES EN LA CARGA, EN LA LINEA Y EN LA FASE DEL TRANSFORMADOR

Para la comprensión completa de un programa, es necesario la elaboración de un diagrama de flujo en el

que se muestra la secuencia operacional del mismo. Cabe indicar que el diagrama de flujo para el rectificador hexafásico estrella es similar al diagrama de flujo de la sección 2.2.1.4, la variante radica en las funciones definidas por intervalos, tal como se mostró en las expresiones (63) al (69). Para la obtención de estos coeficientes se utiliza la regla "TRAPEZOIDAL".

M = Precisión seleccionada para la obtención de los coeficientes de FOURIER. Si desea obtener buena precisión, deberá seleccionar un valor de M mayor que 100.

N = Indica la decisión a tomarse. Si N es mayor que cero, el programa obtendrá los coeficientes en la LINEA del transformador. Un valor de N menor que cero, obtendrá los coeficientes en la FASE del transformador. Finalmente un valor de N igual a cero, obtendrá los coeficientes en la carga servida por el transformador.

H = Incremento de los intervalos de integración.

K = coeficiente que se está calculando, puede tomar valores de 0, 1, 2, ...


```

100 REM ** COEFICIENTES DE FOURIER PARA LA CORRIENTE
110 LA CARGA DE UN RECTIFICADOR HEXAFASICO ESTRELLA **
120 REM *****
130 PRINT #7, TAB(20); "COEFICIENTES DE FOURIER DE LA COR
140 PRINT #7
150 PRINT #7, TAB(25); "EN LA CARGA DE UN RECTIFICADOR"
160 PRINT #7
170 PRINT #7, TAB(31); "HEXAFASICO ESTRELLA"
180 REM *****
190 REM ** M ES LA PRECISION SELECCIONADA PARA LA OB
200 TENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER **
210 REM *****
220 PRINT
230 PRINT
240 PRINT TAB(2); "PRECISION DESEADA; M=";
250 INPUT M
260 PRINT #7
270 PRINT #7
280 PRINT #7, TAB(23); "T"; :PRINT #7, TAB(36); "A(T)"; :PRIN
290 T #7, TAB(53); "B(T)"
300 PRINT #7, TAB(21); "_____"; :PRINT #7, TAB(32); "_____
310 _____"; :PRINT #7, TAB(51); "_____";
320 PRINT #7
330 GO TO 3.14159264
340 GO TO 3.14159264
350 DEF F1(X)=COS(6*T*X)*COS(X)
360 REM *****
370 REM ** H ES EL VALOR DEL INCREMENTO PARA LA OBT
380 ENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER EN FORMA RECURSIVA
390 REM *****
400 GO TO 3.14159264/M
410 FOR I=1 TO 51
420 X11=-1
430 SUM1=-F1(X11)+F1(-X11)
440 X11=-1
450 FOR L=1 TO MM
460 SUM1=-SUM1+2*F1(-X11+L*H)
470 NEXT L
480 ACT1=-SUM1*H/(2*X11)

```

```

1000 IF T>0 GO TO 270
1001 A(T)=A(T)/2
1002 PRINT #7,TAB(22);T;:PRINT #7,TAB(32);A(T);:PRINT #7
1003 TAB(32);"0.0000"
1004 NEXT I
1005 STOP
1006 IF W>0 GO TO 510
1007 REM *****
1008 REM *****
1009 REM ** COEFICIENTES DE FOURIER PARA LA CORRIENTE
1010 REM EN LA FASE DE UN RECTIFICADOR HEXAFASICO ESTRELLA **
1011 REM *****
1012 REM *****
1013 PRINT #7,TAB(20);"COEFICIENTES DE FOURIER DE LA COR
1014 REM *****
1015 PRINT #7
1016 PRINT #7,TAB(25);"EN LA FASE DE UN RECTIFICADOR"
1017 PRINT #7
1018 PRINT #7,TAB(31);"HEXAFASICO ESTRELLA"
1019 REM *****
1020 REM *****
1021 REM ** M ES LA PRECISION SELECCIONADA PARA LA OB
1022 REM TENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER **
1023 REM *****
1024 REM *****
1025 PRINT
1026 PRINT
1027 PRINT TAB(2);"PRECISION DESEADA; M=";
1028 INPUT M
1029 PRINT #7
1030 PRINT #7
1031 PRINT #7,TAB(23);"T";:PRINT #7,TAB(36);"A(T)";:PRIN
1032 T=TAB(33);"B(T)"
1033 PRINT #7,TAB(21);"_____"";:PRINT #7,TAB(32);"_____"
1034 PRINT #7,TAB(51);"_____"
1035 PRINT #7
1036 DD=-3.14159264
1037 DD1=DD/6
1038 DEF F1(X)=COS(T*X)*COS(X)
1039 DEF F2(X)=-COS(T*X)*COS(X-X1)
1040 REM *****
1041 REM *****
1042 REM ** H ES EL VALOR DEL INCREMENTO PARA LA OBTEN
1043 REM CION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER EN FORMA RECURSIVA
1044 REM *****
1045 REM *****

```

```

*****
380 B=2*X11/M
390 FOR I=1 TO 51
400 T=I-1
410 SUM1=F1(X11)+F1(-X11)
420 SUM2=F2(5*X11)+F2(7*X11)
430 MM=M-1
440 FOR L=1 TO MM
450 SUM1=SUM1+2*F1(-X11+L*H)
460 SUM2=SUM2+2*F2(5*X11+L*H)
470 NEXT L
480 A(T)=(SUM1+SUM2)*H/(2*X1)
490 IF T>0 GO TO 500
500 A(T)=A(T)/2
510 PRINT #7, TAB(22);T;:PRINT #7, TAB(32);A(T);:PRINT #7
   TAB(52);"0.0000"
520 NEXT I
530 STOP
540 REM *****
*****
550 REM ** COEFICIENTES DE FOURIER PARA LA CORRIENTE
EN LA LINEA DE UN RECTIFICADOR HEXAFASICO ESTRELLA **
560 REM *****
*****
570 PRINT #7, TAB(20);"COEFICIENTES DE FOURIER DE LA COR
RIENTE"
580 PRINT #7
590 PRINT #7, TAB(25);"EN LA LINEA DE UN RECTIFICADOR"
600 PRINT #7
610 PRINT #7, TAB(31);"HEXAFASICO ESTRELLA"
620 REM ** M ES LA PRECISION SELECCIONADA PARA LA OB
TENCION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER **
630 REM *****
*****
640 PRINT
650 PRINT
660 PRINT TAB(2);"PRECISION DESEADA; M=";
670 INPUT M
680 PRINT #7
690 PRINT #7
700 PRINT #7, TAB(22);"T";:PRINT #7, TAB(33);"A(T)";:PRIN
T #7, TAB(50);"B(T)"
710 PRINT #7, TAB(20);"_____";:PRINT #7, TAB(29);"_____
_____";:PRINT #7, TAB(46);"_____
"
720 PRINT #7
730 EI=3.14159264

```

```

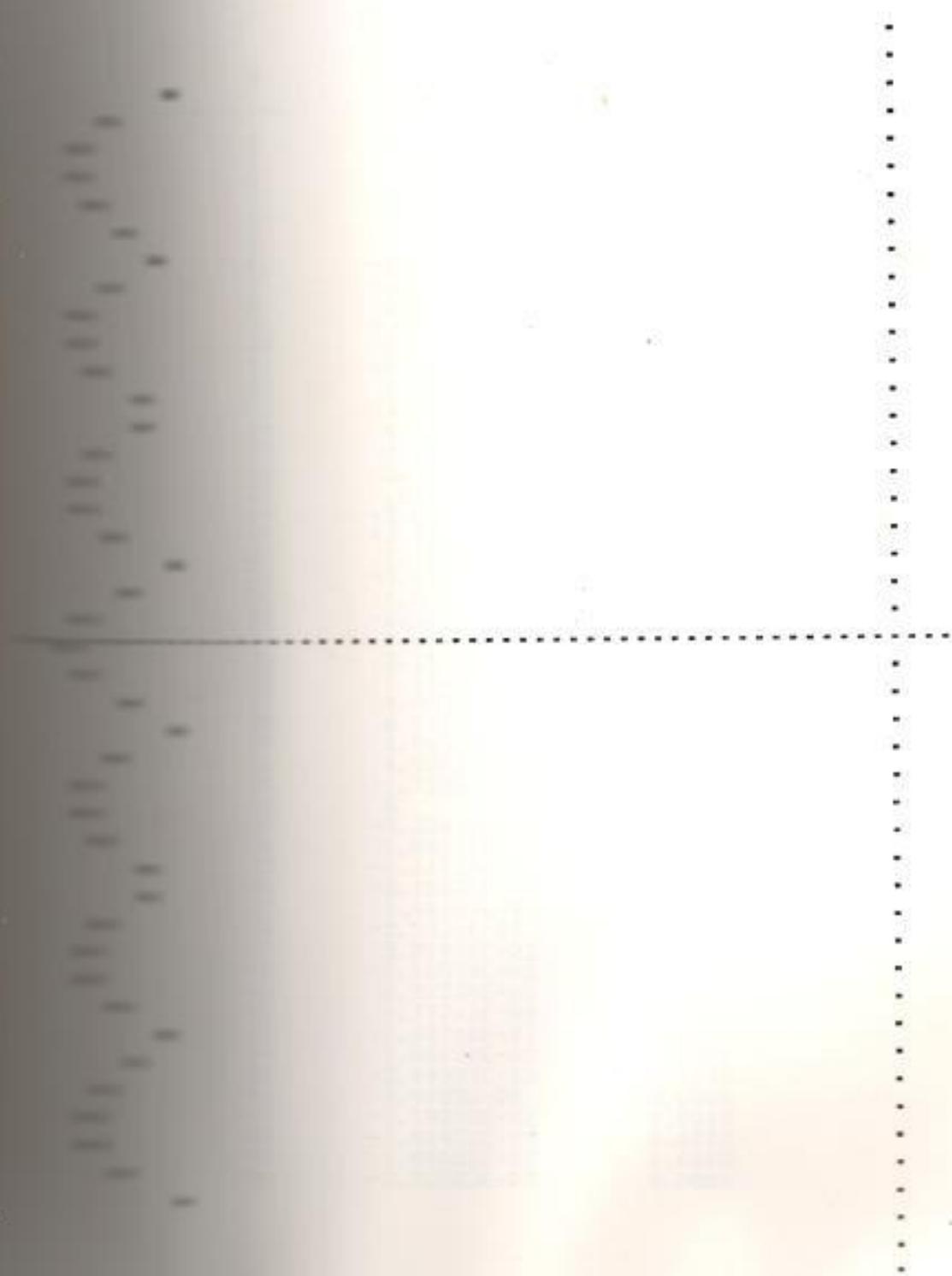
570 X11=X1/6
571 DEF F1(X)=COS(T*X)*COS(X)
572 DEF F11(X)=COS(T*X)*COS(X-X1/3)
573 DEF F12(X)=-COS(T*X)*COS(X-X1)
574 DEF F13(X)=-COS(T*X)*COS(X-2*X1/3)
575 DEF F2(X)=SIN(T*X)*COS(X)
576 DEF F21(X)=SIN(T*X)*COS(X-X1/3)
577 DEF F22(X)=-SIN(T*X)*COS(X-X1)
578 DEF F23(X)=-SIN(T*X)*COS(X-2*X1/3)
579 REM *****
*****
580 REM ** H ES EL VALOR DEL INCREMENTO PARA LA OBTEN
ACION DE LOS COEFICIENTES DE FOURIER EN FORMA RECURSIVA
**
581 REM *****
*****
582 H=2*X11/M
583 FOR I=1 TO 51
584 T=I-1
585 SUM1=F1(X11)+F1(-X11)
586 SUM11=F11(X11)+F11(3*X11)
587 SUM12=F12(5*X11)+F12(7*X11)
588 SUM13=F13(7*X11)+F13(9*X11)
589 SUM2=F2(X11)+F2(-X11)
590 SUM21=F21(X11)+F21(3*X11)
591 SUM22=F22(5*X11)+F22(7*X11)
592 SUM23=F23(7*X11)+F23(9*X11)
593 MM=M-1
594 FOR L=1 TO MM
595 SUM1=SUM1+2*F1(-X11+L*H)
596 SUM11=SUM11+2*F11(X11+L*H)
597 SUM12=SUM12+2*F12(5*X11+L*H)
598 SUM13=SUM13+2*F13(7*X11+L*H)
599 SUM2=SUM2+2*F2(-X11+L*H)
600 SUM21=SUM21+2*F21(X11+L*H)
601 SUM22=SUM22+2*F22(5*X11+L*H)
602 SUM23=SUM23+2*F23(7*X11+L*H)
603 NEXT L
604 A(T)=(SUM1+SUM11+SUM12+SUM13)*H/(2*X1)
605 B(T)=(SUM2+SUM21+SUM22+SUM23)*H/(2*X1)
606 IF T>0 GO TO 700
607 A(T)=A(T)/2
608 PRINT #7, TAB(21);T;:PRINT #7, TAB(30);A(T);:PRINT #7
TAB(47);B(T)
609 NEXT I
610 STOP

```

COEFICIENTES DE FOURIER DE LA CORRIENTE
 EN LA CARGA DE UN RECTIFICADOR
 HEXAFASICO ESTRELLA

T	A(T)	B(T)
0	.954932	0.0000
1	5.45719E-02	0.0000
2	-.01336	0.0000
3	5.91733E-03	0.0000
4	-3.32589E-03	0.0000
5	2.12893E-03	0.0000
6	-1.47917E-03	0.0000
7	1.0877E-03	0.0000
8	-8.33712E-04	0.0000
9	6.59654E-04	0.0000
10	-5.351E-04	0.0000
11	4.42947E-04	0.0000
12	-3.7295E-04	0.0000
13	3.18337E-04	0.0000
14	-2.75173E-04	0.0000
15	2.40275E-04	0.0000
16	-2.11728E-04	0.0000
17	1.88049E-04	0.0000
18	-1.68257E-04	0.0000
19	1.51484E-04	0.0000
20	-1.37157E-04	0.0000
21	1.2493E-04	0.0000
22	-1.14119E-04	0.0000
23	1.04932E-04	0.0000
24	-9.67643E-05	0.0000
25	8.95671E-05	0.0000
26	-8.31168E-05	0.0000
27	7.73117E-05	0.0000
28	-7.22858E-05	0.0000
29	6.75906E-05	0.0000
30	-6.37054E-05	0.0000
31	5.98652E-05	0.0000
32	-5.64288E-05	0.0000
33	5.34518E-05	0.0000
34	-5.06898E-05	0.0000
35	4.78453E-05	0.0000
36	-4.55365E-05	0.0000
37	4.34026E-05	0.0000
38	-4.12048E-05	0.0000
39	3.95831E-05	0.0000
40	-3.78283E-05	0.0000
41	3.62109E-05	0.0000
42	-3.4616E-05	0.0000
43	3.35565E-05	0.0000
44	-3.2299E-05	0.0000
45	3.10982E-05	0.0000
46	-3.00719E-05	0.0000
47	2.87821E-05	0.0000
48	-2.80985E-05	0.0000
49	2.70601E-05	0.0000
50	-2.5828E-05	0.0000

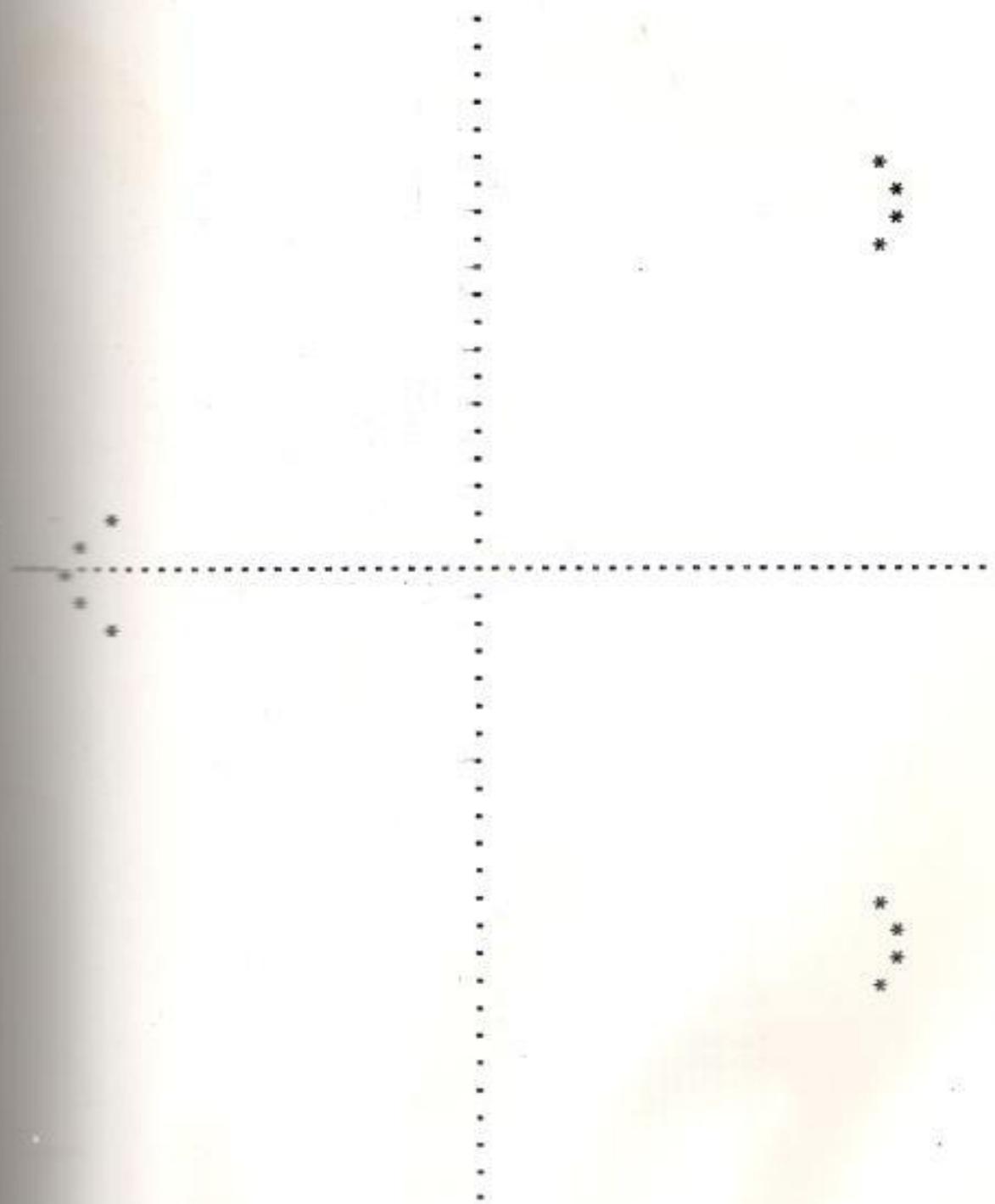
FORMA DE LA CORRIENTE EN LA CARGA DE UN RECTIFICADOR
HEXAFASICO ESTRELLA



COEFICIENTES DE FOURIER DE LA CORRIENTE
 EN LA FASE DE UN RECTIFICADOR
 HEXAFASICO ESTRELLA

T	A(T)	B(T)
0	0	0.0000
1	.608998	0.0000
2	2.54313E-08	0.0000
3	.413491	0.0000
4	5.08626E-08	0.0000
5	.137827	0.0000
6	-2.22524E-08	0.0000
7	-6.89063E-02	0.0000
8	-6.35783E-09	0.0000
9	-.124027	0.0000
10	1.90735E-08	0.0000
11	-5.51204E-02	0.0000
12	2.36432E-08	0.0000
13	3.93631E-02	0.0000
14	4.13259E-08	0.0000
15	7.38011E-02	0.0000
16	2.22524E-08	0.0000
17	.034438	0.0000
18	-2.88089E-08	0.0000
19	-2.75413E-02	0.0000
20	2.22524E-08	0.0000
21	-5.25741E-02	0.0000
22	1.58946E-08	0.0000
23	-2.50328E-02	0.0000
24	1.15037E-07	0.0000
25	2.11722E-02	0.0000
26	1.11262E-08	0.0000
27	4.08273E-02	0.0000
28	6.51677E-08	0.0000
29	1.96551E-02	0.0000
30	4.95464E-08	0.0000
31	-1.71887E-02	0.0000
32	0	0.0000
33	-3.33615E-02	0.0000
34	1.90735E-08	0.0000
35	-1.61727E-02	0.0000
36	-8.16335E-08	0.0000
37	1.44609E-02	0.0000
38	-5.5631E-09	0.0000
39	2.81938E-02	0.0000
40	-5.16574E-08	0.0000
41	1.37328E-02	0.0000
42	1.37712E-08	0.0000
43	-1.24748E-02	0.0000
44	2.86102E-08	0.0000
45	-2.44023E-02	0.0000
46	2.9405E-08	0.0000
47	-1.19275E-02	0.0000
48	-7.01472E-08	0.0000
49	1.09636E-02	0.0000
50	-3.73522E-07	0.0000

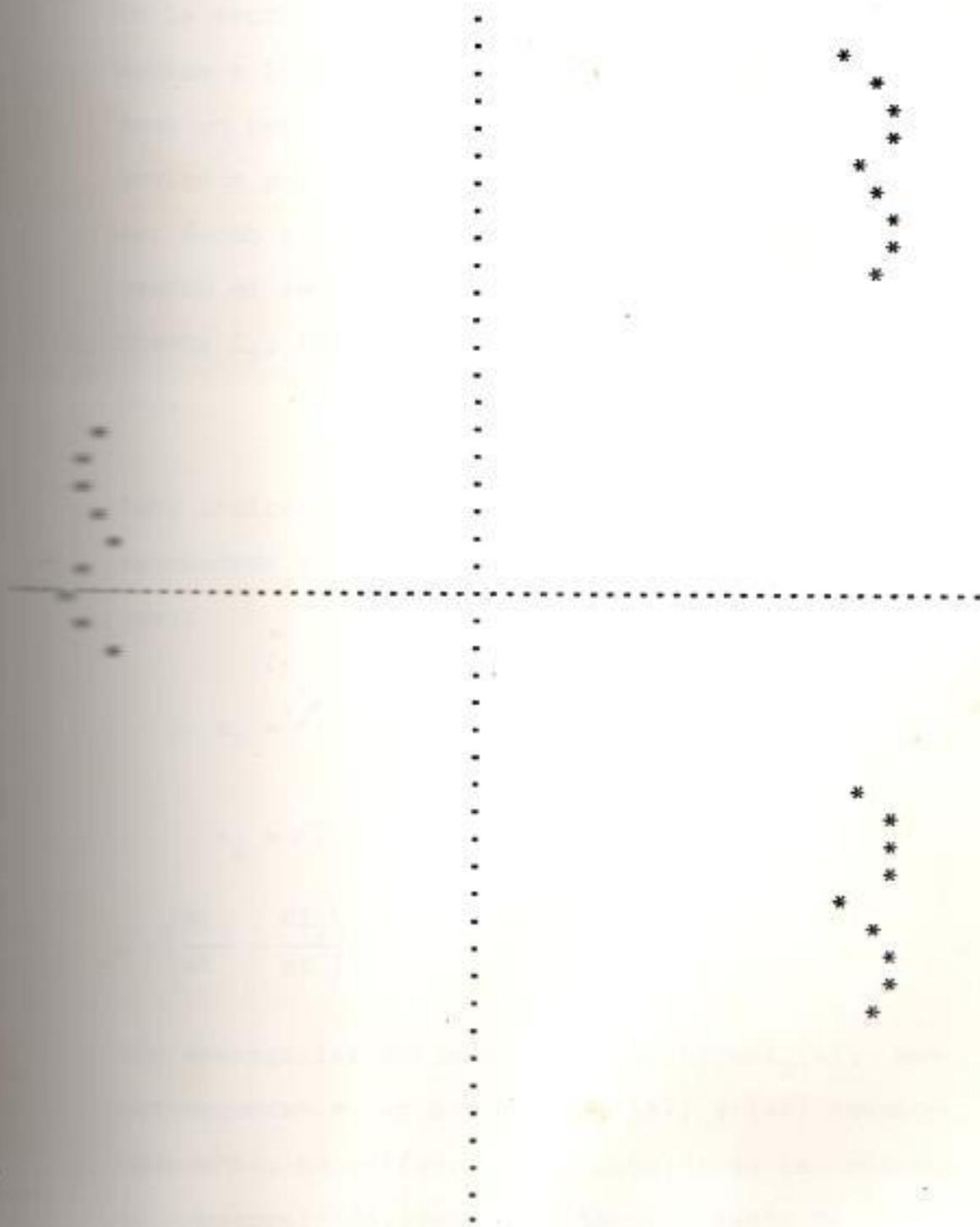
GRAFICA DE LA CORRIENTE EN LA FASE DE UN RECTIFICADOR
HEXAFASICO ESTRELLA



COEFICIENTES DE FOURIER DE LA CORRIENTE
EN LA LINEA DE UN RECTIFICADOR
HEXAFASICO ESTRELLA

T	A(T)	B(T)
0	.238732	0
1	.706747	.119364
2	-.238732	.321603
3	.310113	5.96848E-02
4	-4.77418E-02	-.211334
5	.103368	-5.96798E-02
6	1.36438E-02	4.72498E-02
7	-5.16738E-02	-2.98342E-02
8	3.40981E-02	-8.09251E-02
9	-9.30066E-02	-5.97025E-03
10	2.16923E-02	7.37628E-02
11	-4.13329E-02	2.38637E-02
12	-3.34078E-03	-2.31192E-02
13	2.95121E-02	.017039
14	-1.83515E-02	4.73169E-02
15	5.53288E-02	2.13349E-03
16	-1.40265E-02	-.04482
17	2.58167E-02	-1.49054E-02
18	1.48014E-03	1.53419E-02
19	-2.06412E-02	-1.19174E-02
20	1.25465E-02	-3.34504E-02
21	-3.93997E-02	-1.08711E-03
22	1.03573E-02	3.21866E-02
23	-1.87584E-02	1.08302E-02
24	-8.32322E-04	-1.14791E-02
25	1.58601E-02	9.1569E-03
26	-9.52511E-03	2.58584E-02
27	3.05807E-02	6.57806E-04
28	-8.20396E-03	-2.50957E-02
29	1.47208E-02	-8.49912E-03
30	5.32972E-04	9.16544E-03
31	-.012868	-7.42939E-03
32	7.67114E-03	-2.10618E-02
33	-2.49726E-02	-4.4084E-04
34	6.78697E-03	2.05514E-02
35	-1.21045E-02	6.98863E-03
36	-3.70613E-04	-7.62298E-03
37	1.08176E-02	6.24569E-03
38	-6.4164E-03	1.77536E-02
39	2.10877E-02	3.16105E-04
40	-5.78294E-03	-.017388
41	1.02702E-02	-5.92949E-03
42	2.72729E-04	6.52004E-03
43	-9.3238E-03	-5.38302E-03
44	5.51029E-03	-1.53321E-02
45	-1.82353E-02	-2.37868E-04
46	5.0338E-03	.015057
47	-8.91171E-03	5.14524E-03
48	-2.09187E-04	-5.69169E-03
49	8.18599E-03	4.72615E-03
50	-4.82448E-03	1.34813E-02

EFICACIA DE LA CORRIENTE EN LA LINEA DE UN RECTIFICADOR
HEXAFASICO ESTRELLA



ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y FORMAS DE PREVENIR POSIBLES DAÑOS

En la sección 2.2.1.5 se mencionó el hecho de que debido a la inductancia del transformador, se produce un período de superposición cuya duración es indicada por el ángulo α , durante el cual el primer ánodo conduce la corriente decreciente i_1 , en cambio el segundo ánodo conduce la corriente creciente i_2 , tal como se lo muestra en la Fig. # 20 (b).

Cabe indicar que todo lo dicho en la sección antes mencionada se cumplirá, con unas ligeras variantes como:

$$e_1 = \sqrt{2} E_a \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right)$$

$$e_2 = \sqrt{2} E_a \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right)$$

$$L \left(\frac{di_1}{dt} - \frac{di_2}{dt} \right) = -2\sqrt{2} E_a \sin \frac{\pi}{6} \sin \omega t$$

Sin embargo las expresiones de $i_1(t)$ e $i_2(t)$, que corresponden a las expresiones (47) y (48) respectivamente, no varían. La conclusión es la misma, la superposición, reduce la tensión media de co-

corriente continua en una cantidad proporcional al área triangular rayada de la Fig. # 20 (c). Otras expresiones que serán afectadas son:

$$e_{\varphi} = \frac{1}{2\pi/6} \int_0^{\varphi} e \, d\theta$$

$$e = \sqrt{2} E_a \operatorname{sen} \frac{\pi}{6} \operatorname{sen} \theta$$

Finalmente el valor medio de la tensión rectificadora (neto) E_d :

$$(E_d)_{\text{neto}} = \sqrt{2} E_a \frac{\operatorname{sen}(\pi/6)}{\pi/6} - \frac{6\omega L}{2\pi} I_d$$

En la expresión anterior, se ve claramente que conforme aumenta la corriente de carga, la tensión de corriente continua disminuye en forma lineal. Esta tensión de corriente continua, para el caso de un rectificador hexafásico, disminuye mayormente que para el caso de un rectificador trifásico.

Es importante tener presente la superposición que se produce para el cálculo de la potencia en el secundario del transformador para de ésta manera, poder realizar una buena selección del tipo de transformador, es decir poder especificar su potencia ó el proyecto secundario de los transformadores para los rectificadores.

III.- COMPARACION DE LOS DOS TIPOS DE RECTIFICADORES

Es necesario considerar algunos factores para la adecuada selección de un tipo de rectificador. Un factor que es importante considerar es la relación que existe entre la potencia rectificada y la potencia aparente, del arrollamiento del secundario del transformador. Esta relación se denomina FACTOR DE UTILIZACIÓN ó FACTOR DE APROVECHAMIENTO, para el caso de un rectificador trifásico, toma un valor de 67,5%, y para el hexafásico 55,1%, en realidad éste factor va ria en forma inversa al número de fases.

El sistema trifásico es el denominado "optimum matemático". Este sistema puede utilizar y convertir la energía suministrada con el mejor aprovechamiento. Sin embargo el sistema trifásico comparado con el sistema hexafásico, tiene mayor contenido de armónicas, introduce grandes ondulaciones en la tensión contínua.

Para la mayoría de aplicaciones comerciales en las que se manejan grandes cantidades de corriente contínua, el sistema trifásico es poco satisfactorio. La corriente contínua en cada devanado del secundario, tiene siempre el mismo sentido, provocando luego una

corriente de excitación excesivamente elevada debido a la magnetización que produce la corriente continua en el núcleo del hierro. Su efecto resultante es un sobrecalentamiento de los transformadores. Esto, junto con las desventajas de un mayor contenido de rizado y una relación menor entre la tensión de corriente contínua y la tensión eficaz de corriente alterna, se aconseja el uso de la rectificación hexafásica, a pesar de que el factor de utilización del transformador sea algo inferior.

Para la rectificación hexafásica, se aconseja trabajar con un transformador trifásico no acorazado, con los primarios conectados en Δ , que es la disposición que se suele utilizar cuando se emplea un sólo transformador para obtener las seis fases del secundario, ya que de ésta manera se evita el efecto perturbador de una posible componente de corriente continua superpuesta a la componente normal de corriente alterna en cada uno de los devanados del secundario. Si existiese una tal componente de corriente continua ejerciendo fmm en cada rama del núcleo, sería representada por un término adicional en cada una de las expresiones de (54), pero permanecerían como igualdades con el no acorazado, por lo que éstos términos residuales se eliminarían. Al u utilizar tres transformadores monofásicos ó un transfor

rador trifásico acorazado, no sucedería lo anteriormente explicado, esos términos adicionales no se anularían, no deben emplearse éstas últimas combinaciones, porque la excitación resultante de corriente continua introduciría una polarización perjudicial en la magnetización del núcleo.

Por lo que se ha mencionado anteriormente, es evidente que en la determinación de la potencia nominal, así como el proyecto más económico de los transformadores para los rectificadores, es importante la consideración del factor de aprovechamiento y su corrección cuando existe superposición.

Partiendo del análisis anterior, de la carga de los arrollamientos secundarios debida a la corriente anódica, así como la caída de tensión debida a la reactancia y a las pérdidas de cobre, puede determinarse la potencia nominal del transformador.

La construcción mecánica de los transformadores utilizados en los rectificadores, difiere de los transformadores normales, en que los arrollamientos están entrelazados y se encuentran completamente sujetos para que puedan resistir los efectos producidos por esfuerzos mecánicos debidos a distribución anormal de corriente.

C A P I T U L O 3

FORMAS DE REDUCIR LAS ARMONICAS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA

EFFECTOS DE LAS SEÑALES ARMONICAS EN LOS EQUIPOS ELEC- TRICOS

La primera indicación de que existen problemas de ar-
mónicas es cuando se observa interferencia en las se-
ñales de video. Los sobrevoltajes producidos por las
señales armónicas en los sistemas de potencia, pueden
conducir daño a los bancos de condensadores utiliza-
dos ya sea para mejorar el factor de potencia en la
carga que se encuentran conectados ó como trampas de
estas señales armónicas. Estos sobrevoltajes provo-
can un incremento de temperatura del dieléctrico, re-
sultando así una disminución de la vida útil de estos
componentes.

Independientemente del nivel de armónicas, la influencia de
estas señales en la exactitud de los instrumentos de
medición de energía activa ó reactiva y factor de po-

tencia, es prácticamente despreciable.

Cuando existen condiciones de resonancia, ahí en verdad es cuando los instrumentos de medición son realmente afectados debido a la producción de sobrevoltajes por la presencia de éstas señales armónicas.

Los dispositivos tales como vatímetros y relés de sobrecorriente, que funcionan mediante disco de inducción, sólo ven circulando la corriente fundamental, pero debido a las fases desbalanceadas que son producto de la distorsión armónica, puede producirse la operación errónea de estos dispositivos.

III- EFECTOS DE LAS SEÑALES ARMONICAS SOBRE LAS MAQUINAS ELECTRICAS

Cuando un banco de transformadores es energizado, una elevada corriente de excitación se produce, el valor de ésta corriente puede ser muchas veces la magnitud de la corriente de plena carga. Si un capacitor está en serie con el transformador cuando ocurre la energización, una condición de resonancia puede ocurrir, la cual produce que persista una elevada corriente. Esta condición es conocida como ferroresonancia.

La ferresonancia es básicamente una condición sub-armónica. Anteriormente se mencionó que las pérdidas en el núcleo aumentan con la frecuencia, por ende aumentan por la presencia de señales armónicas en los sistemas de potencia. Además por la presencia de armónicas se produce el envejecimiento del dieléctrico en forma más acelerada, disminuyendo en forma más rápida su vida útil.

Las corrientes armónicas pueden causar un excesivo calentamiento en la maquinaria rotativa. Las corrientes armónicas de secuencia de fase positiva y negativa, ambas causan calentamiento adicional en el rotor sólido de las grandes máquinas sincrónicas. Esto limita la cantidad de carga rectificadora que pueden servir los generadores sincrónicos.

En las cargas críticas, las pulsaciones de torque producidas por las corrientes armónicas en los motores de corriente alterna pueden ser peligrosas para los procesos a que están destinados. Podría incluso producirse condición de resonancia cuando la frecuencia natural del sistema mecánico es excitada por las señales armónicas. Además puede producirse inestabilidad en los sistemas transportadores, los cuales pueden operar en forma errónea por la presencia de armónicas.

3.3.- ALTERNATIVAS PARA LA CORRECTA SELECCION DE FILTROS PARA ATENUAR LAS SEÑALES ARMONICAS

Si la cantidad de corriente armónica requerida por la carga es insignificante, las armónicas producidas pueden ser ignoradas. Un cálculo razonable para determinar si es éste ó no el caso, es determinando la razón de cortocircuito (SCR) del sistema con respecto a la carga del convertidor estático de potencia, la cual es definida como:

$$SCR = \frac{\text{MVA de Cortocircuito del Sistema}}{\text{MW del Convertidor}} \quad (70)$$

Si la razón de cortocircuito es mayor que 20, la probabilidad de problemas de armónicas es baja.

Los bancos de condensadores pueden crear una condición de resonancia paralelo, produciendo entonces unas grandes oscilaciones de corrientes y resultando voltajes armónicos que pueden persistir en el sistema. Estos sobrevoltajes y sobrecorrientes pueden deteriorar rápidamente el nivel del aislante. Para determinar si la posibilidad de problemas armónicos existe, la frecuencia de resonancia paralelo puede ser determinada por:

$$n_r = \frac{\text{MVA de Cortocircuito del Sistema}}{\text{MVAR del banco de Condensadores}} \quad (71)$$

La expresión (71), permite obtener el orden del armónico en el cual se produce la resonancia paralelo. La localización de la resonancia paralelo se la puede obtener de la Fig. # 25, la cual está dada en función de la capacidad de cortocircuito del sistema (MVA) y la capacidad del banco de condensadores (MVAR). Si el orden del armónico determinado por la expresión (71) ó por la Fig. # 25, está dentro de la quinta, séptima, décimocuarta ó decimatercera armónica, existe una elevada probabilidad de producción de voltajes armónicos excesivos y grandes oscilaciones de corrientes armónicas.

DIVERSOS TIPOS DE FILTROS UTILIZADOS PARA LA ATENUACIÓN DE LAS SEÑALES ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA

Las instalaciones de grandes convertidores estáticos de potencia, necesitan un suministro de potencia reactiva. La potencia reactiva proveniente de los bancos de condensadores de potencia es la más económica.

En la Fig. # 26 se muestra un sistema industrial, con la aplicación de filtros paralelos sintonizados.



Fig. 25 Localización de la resonancia paralelo en función de MVA_{SC} y los $MVAR_{capac.}$

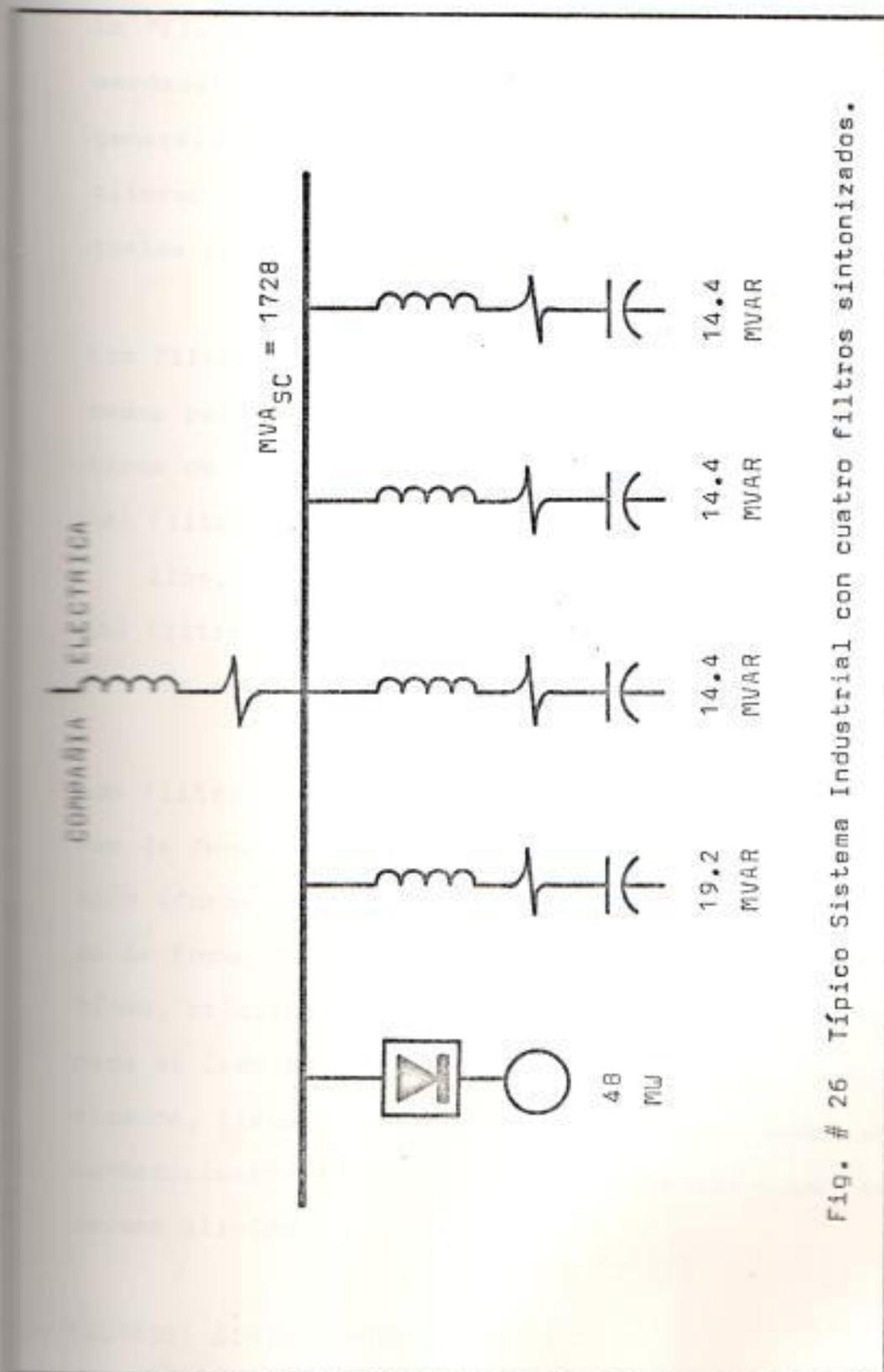


Fig. # 26 Típico Sistema Industrial con cuatro filtros sintonizados.

Un "FILTRO", es un dispositivo que actúa como una verdadera trampa para determinadas frecuencias. En general, los filtros consisten de reactores, capacitores ó la combinación de estos en unidades las cuales pueden ó no pueden ser sintonizadas.

Los filtros en los sistemas de potencia, son utilizados para reducir las armónicas. En realidad los tipos de filtros son dos:

- (a) Filtros para el lado de corriente continua, ellos, son relativamente sencillos y baratos.
- (b) Filtros para el lado de corriente alterna, son más costosos y complicados.

Los filtros para el lado de corriente continua tienen la función de atenuar el efecto de superposición (forma de onda tipo diente de sierra), haciendo la forma de onda de la tensión de corriente continua, prácticamente una línea recta. Los filtros para el lado de corriente alterna, aquellos sintonizados, tienen por objetivo comportarse como un cortocircuito virtual para las frecuencias que se desean eliminar.

FILTROS SINTONIZADOS

Los filtros sintonizados son de dos tipos, denomi-

datos comúnmente por:

a.- Filtros de Resonancia Paralelo: Estos tipos de filtros consisten de un reactor y un capacitor conectados en serie, su combinación conectada en paralelo con el circuito. Su característica impedancia-frecuencia, se muestra en la Fig. # 27 (a).

b.- Filtros Trampa de Ondas: Estos tipos de filtros, consisten de un reactor y un capacitor conectados en paralelo, su combinación conectada en serie con el circuito. Su característica impedancia-frecuencia, se muestra en la Fig. # 27 (b).

La principal característica de un filtro sintonizado a cierta de la frecuencia a la cual actúa como tal, es la constante del filtro "Q". Esta constante es denominada FACTOR DE CALIDAD, la cual es la relación de la reactancia del reactor a la resistencia de la combinación, tomada a la frecuencia fundamental (60 Hz).

El valor que generalmente se utiliza para el factor de calidad es de 30, a veces se utilizan valores inferiores a 30, a fin de prevenir las pérdidas producidas por las altas frecuencias. Un filtro con un factor de calidad elevado, requerirá de una pequeña capacidad de vol-

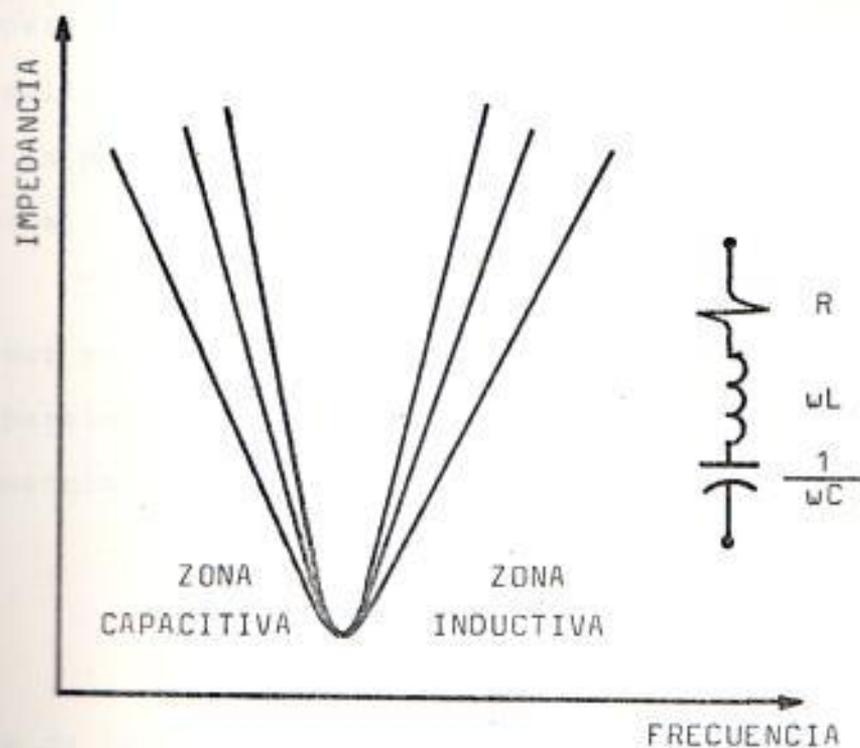
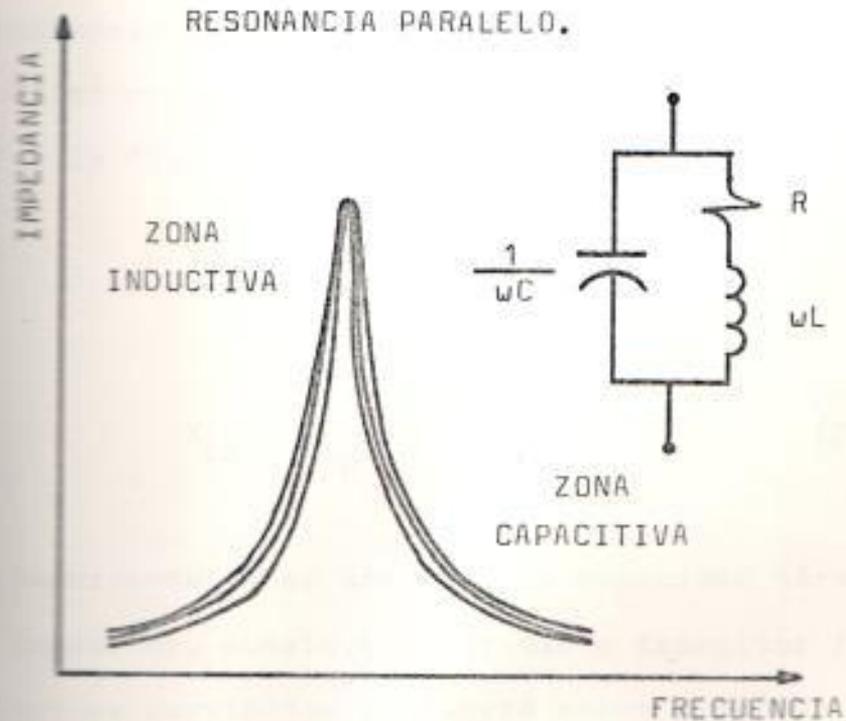


Fig. # 27 (a) IMPEDANCIA-FRECUENCIA, Filtros de RESONANCIA PARALELO.



(b) Filtros TRAMPA DE ONDA.

tiros-esperios. Sin embargo un filtro de elevado factor de calidad requiere de una sintonización más exacta y es menos efectivo para frecuencias armónicas adyacentes.

Para poder encontrar el valor de la reactancia del filtro paralelo, es necesario recordar la relación de resonancia (a la frecuencia f):

$$X_{Lf} = X_{Cf} \quad (72)$$

Si trata de lograr que a una frecuencia " f " determinada, la reactancia inductiva del reactor sea igual a la reactancia capacitiva del capacitor, el orden del armónico no es sino la relación entre la frecuencia " f " y la frecuencia fundamental " f_0 ", así:

$$h = f/f_0 \quad (73)$$

$$X_{Lo} = \frac{X_{Co}}{h^2} \quad (74)$$

Es muy importante tener presente la capacidad térmica del capacitor, puesto que por dicho capacitor fluyen elevadas corrientes y, deberá estar diseñado para soportar los consiguientes sobrevoltajes.

FILTROS PASA BAJO

Un filtro pasa bajo es aquel dispositivo por medio del cual todas las señales comprendidas en la banda $0 \leq f \leq f_1$ se transmiten sin pérdidas, mientras que a aquellas señales con frecuencias fuera de ésta banda es decir $f > f_1$, dan una transmisión nula. La respuesta ideal de un filtro pasa bajo es mostrada en la fig. # 28 (a), en realidad ésta característica es totalmente irrealizable.

Anteriormente se había tratado los filtros sintonizados, en los cuales su sintonización se la obtenía normalmente por medio de taps en los reactores que sirven como parte del filtro. Un filtro pasa bajo, no es sino un filtro paralelo no sintonizado, estos filtros no sintonizados consisten en un reactor en serie con el suministro ó fuente y, un capacitor paralelo por cada fase.

Este tipo de filtros del lado de corriente alterna, son utilizados para convertidores estáticos de potencia de pequeño tamaño. Un diagrama esquemático se muestra en la Fig. # 28 (b).

La combinación de un reactor serie y un capacitor

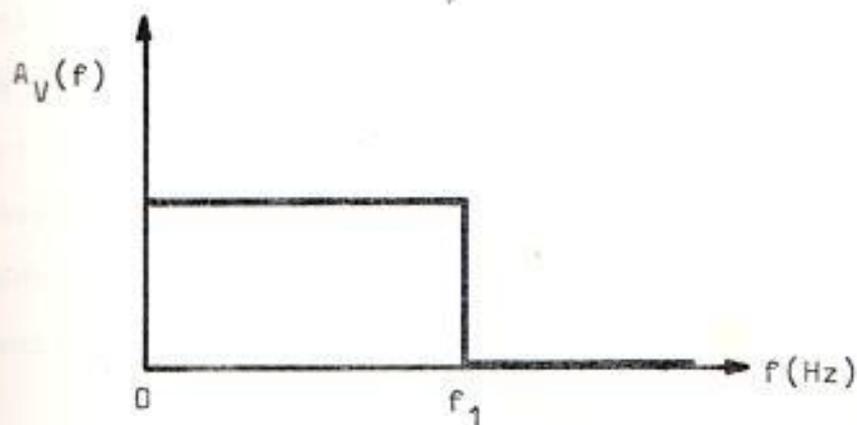


Fig. # 28(a) Característica ideal de un FILTRO PASA BAJO.

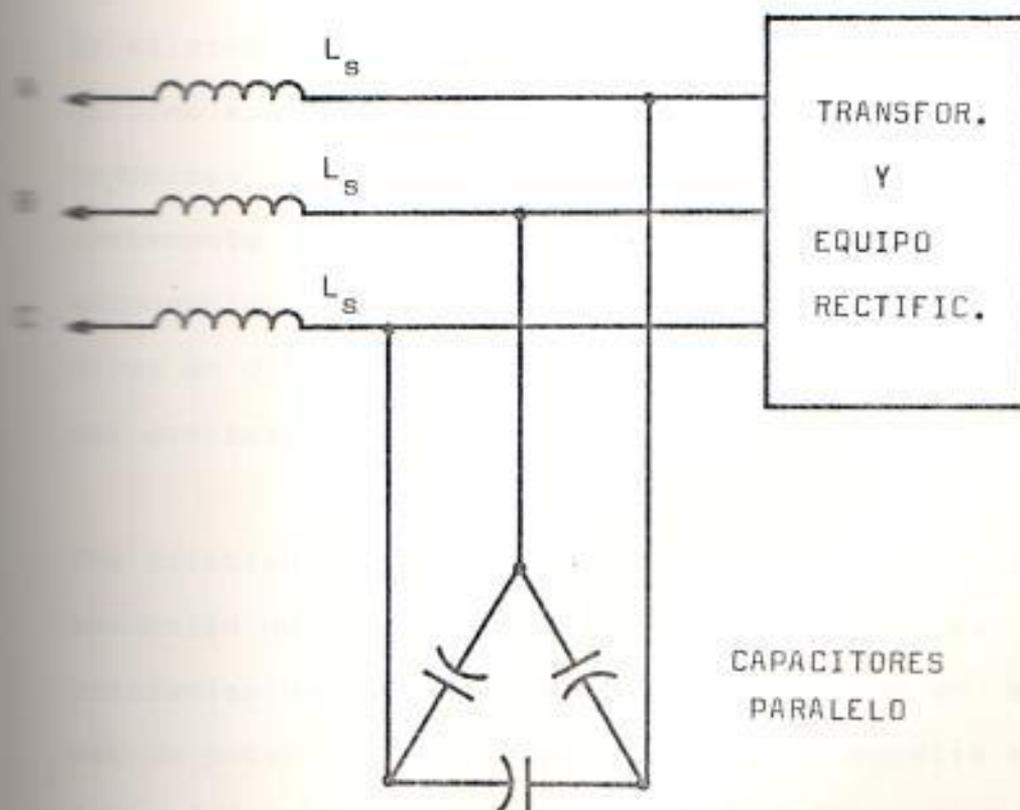


Fig. # 28(b) Diagrama esquemático de un FILTRO PASA BAJO (FILTRO PARALELO NO SIN TONIZADO).

paralelo proporciona una frecuencia natural menor que la más baja frecuencia del convertidor, la cual se entra por debajo de los 300 Hz. Es necesario realizar una investigación de la efectividad del filtro no sintonizado analizando su comportamiento en un banda de frecuencia desde 60 Hz, hasta los 1380 Hz.

3.4.- LIMITES ADMISIBLES DE ARMONICAS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA

En el presente tiempo no existe una especificación uniforme sobre los límites admisibles del contenido de armónicas existentes en los sistemas de potencia. El incremento en la industria del uso de dispositivos semiconductores cada vez se hace mayor, pudiendo producirse un difícil problema en el futuro, lo cual debe ser previsto desde ahora.

The British Electricity Council, provee de una recomendación que es un documento en el cual indica las corrientes de señales armónicas permisibles en sistemas de potencia. Esta recomendación se muestra en la Tabla # 2. Otra recomendación es la máxima carga instaleda en los convertidores tomando en cuenta la Tabla # 2, ésta recomendación se muestra en la Tabla # 3.

The "Commission Communautaire de Normalisation", recomienda que la distorsión de voltaje debe ser del 2% ó menor. Otros autores recomiendan una distorsión del 3% ó menor. La aplicación práctica para minimizar la interferencia del funcionamiento de los convertidores con otros equipos eléctricos es limitar el factor de distorsión de voltaje a un máximo de 4% al 5%, el criterio dependerá del Ingeniero diseñador. Un buen diseño de un sistema de potencia, minimizará su interrupción y su operación errática.

Los filtros armónicos pueden reducir el flujo de corrientes armónicas al sistema de potencia en forma apreciable, y puede ser el medio más económico de control de éstas indeseables corrientes armónicas, aparte de que sirven como proveedores de reactivos.

Es necesario analizar correctamente el funcionamiento del sistema de potencia al producirse la inyección de armónicas hacia el mismo, el problema posible es la inestabilidad. Se debería observar la primera resonancia paralelo, revisar la región del cuarto armónico $\pm 2,5\%$, si hay problemas en ésta región la capacitancia debería ser incrementada ó disminuída. Es necesario realizar un flujo de potencia, pues al atenuar las armónicas, a veces se tiene que sacrificar el factor de potencia.

TABLA # 2

CORRIENTES ARMONICAS PERMISIBLES EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA, RECOMENDACION
REALIZADA POR THE BRITISH ELECTRICITY COUNCIL

VOLTAJE EN EL PUNTO A ANALI ZARSE (KVS).	5 (AMPS)	7 (AMPS)	11 (AMPS)	13 (AMPS)
0.415	65.00	42.00	63.00	53.00
6.6/11.00	9.70	6.30	10.00	8.50
33.00	9.60	6.30	7.00	6.00
66.00	4.80	3.20	3.50	3.00
132.00	3.00	2.50	3.30	2.80

Inv. No. 207 - 077

TABLA # 3

MAXIMA CARGA A INSTALARSE EN LOS CONVERTIDORES CORRESPONDIENTE A LAS
 CORRIENTES ARMONICAS DE LA TABLA # 2

VOLTAJE EN EL PUNTO A ANALI ZARSE (KVS).	NUMERO DE PULSOS	NUMERO DE PULSOS
0.415	0.25	0.75
6.60	0.60	1.80
11.00	1.00	5.00
33/66	3.00	7.00
132.00	----	14.00

C A P I T U L O 4

PREVENCIÓN Y ATENUACIÓN DE LAS ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA

ANÁLISIS DE UN SISTEMA REAL

Una vez que se ha entendido todo el fenómeno referente a las señales armónicas en los sistemas de potencia, es necesario realizar un análisis del mismo para conocer como reaccionará el sistema de potencia a corrientes de diferentes frecuencias.

Para la mayoría de los sistemas industriales, el diagrama unifilar puede ser reducido al mostrado en la Fig. # 29. El análisis es realizado, definiendo algunos términos básicos y ciertas relaciones de impedancias tales como:

Z_{TRAG} Es la impedancia equivalente que ve el convertidor conectado en la barra A. Se debe considerar a los rectificadores como fuentes de corrientes generadoras de armónicas.

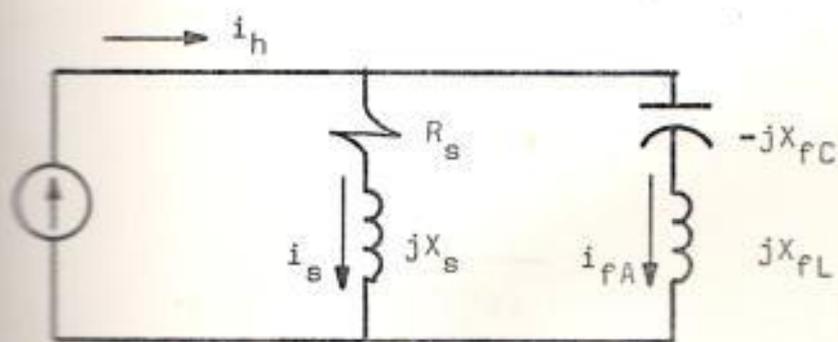
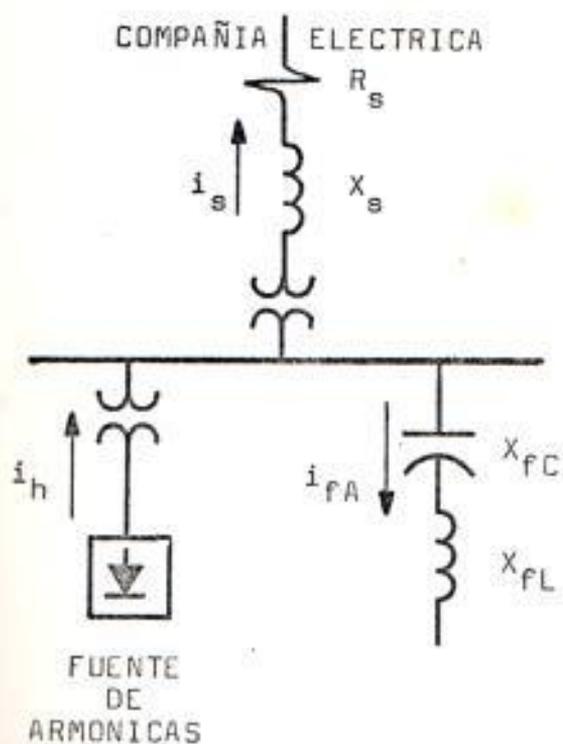


Fig. # 29 Diagrama unifilar que contiene FUENTES DE ARMONICAS y su correspondiente circuito equivalente (por fase).

ZANG Es el ángulo de la impedancia ZMAG.

ρ_s Es la corriente en por unidad de la fundamental que fluye hacia el sistema.

ρ_f Es la corriente en por unidad de la fundamental que fluye hacia el sistema de filtros ó al banco de capacitores.

$$i_h = i_s + i_{fA} \quad (75)$$

$$i_s = \rho_s i_h \quad (76)$$

$$i_{fA} = \rho_f i_h \quad (77)$$

$$1 = \rho_s + \rho_f \quad (78)$$

$$\rho_s = \frac{Z_{fA}}{Z_s + Z_{fA}} \quad (79)$$

$$\rho_f = \frac{Z_s}{Z_s + Z_{fA}} \quad (80)$$

Si el factor de distribución ρ_s es grande a una frecuencia armónica particular coincidente con una de las armónicas generadas por la fuente de armónicas, enton-

ces la amplificación de la corriente armónica ocurrirá y las corrientes que fluyen hacia el capacitor y hacia el sistema (fuente), pueden ser excesivas. Cuando se tiene la condición de que $Z_s + Z_{fA} \rightarrow 0$ a una misma frecuencia, el sistema está en resonancia a esa frecuencia. Es decir que para evitar esas condiciones se debería tener un valor bajo de ω a esas frecuencias.

En conclusión, la función de un reactor sintonizado es la de producir un escape de toda esa corriente elevada, haciéndose en conjunto con el capacitor, un cortocircuito virtual a esas frecuencias, comportándose como una verdadera trampa de las señales armónicas.

Un ejemplo numérico, mostrará como éstas relaciones dan suficiente información para conocer la performance de un filtro no sintonizado y un filtro sintonizado. Los parámetros asumidos son:

Voltaje en la Barra A = 13.8 KV

MVA de Cortocircuito del sistema = 476

MVAR del capacitor = 19.04

$$\omega \sqrt{L_s} = 10$$

Se debe tener presente el comportamiento de la reactancia inductiva, la cual es proporcional a la frecuencia,

y la reactancia capacitiva la cual es inversamente proporcional a la frecuencia. Por lo tanto se tiene que:

$$X_s = \frac{h(13.8)^2}{476} = 0.4h$$

$$X_{fC} = \frac{(13.8)^2}{19.04 h} = \frac{10}{h}$$

$$R_s = \frac{X_s}{10} = 0.04h$$

Además el factor de distribución ρ_f está dado por:

$$\rho_f = \frac{0.04 + j0.4}{0.04 + j(0.4 - 10/h^2)}$$

Los factores de distribución ρ_s y ρ_f son graficados y mostrados en la Fig. # 30 (a), para el caso de filtro no sintonizado. Se puede apreciar que la resonancia se produce a la Quinta armónica, luego es necesario eliminar esta condición instalando un reactor sintonizado a esta frecuencia. La reactancia de éste reactor a la frecuencia fundamental de 60 Hz. es:

$$X_{fL} = \frac{X_{fC}}{(5)^2} = \frac{10}{25} = 0.4$$

Como el factor de distribución ρ_f , cambiará por existir la presencia del reactor, sintonizado a la frecuencia

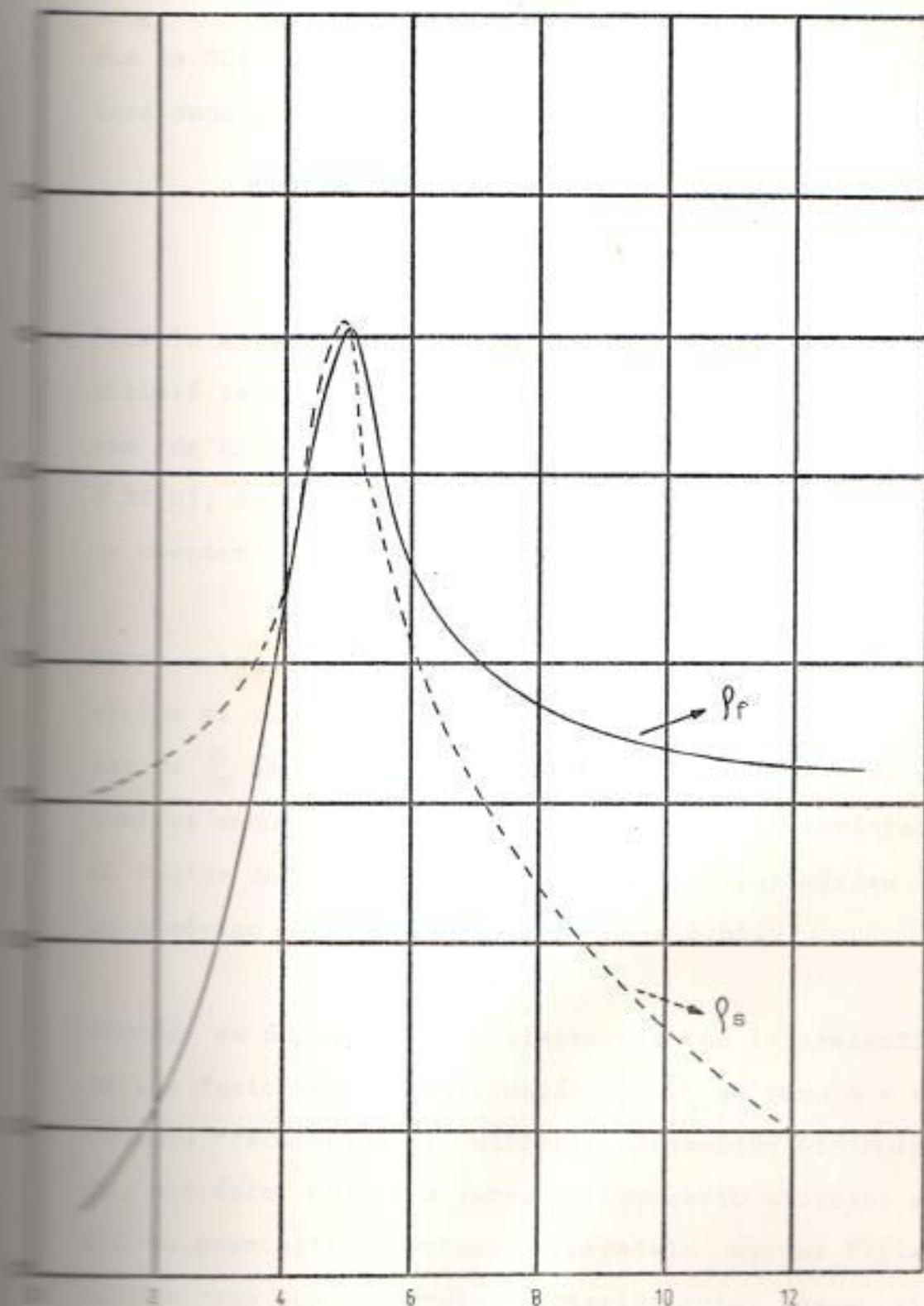


Fig. # 30(a) Factores de Distribución de Corriente Armónica vs el Orden del Armónico. Sin el Reactor Sintonizado.

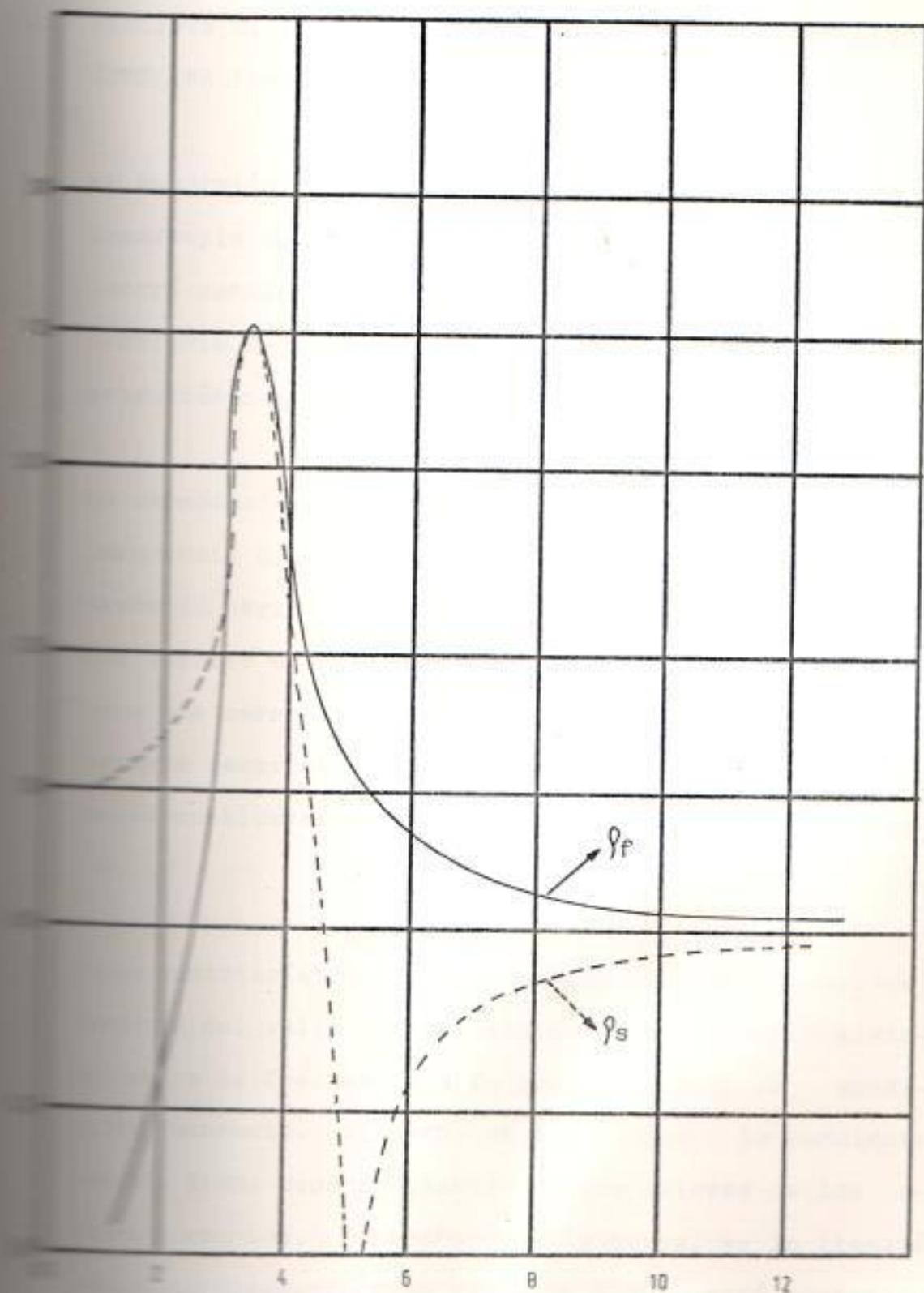
cia de 300 Hz., luego el factor de distribución es
tará dado por:

$$= \frac{0.04 + j0.40}{0.04 + j(0.80 - 10.0/h^2)}$$

Para la obtención del factor de distribución ρ_s , se a
plicará la expresión (78). Las gráficas de los factor
res de distribución ρ_s y ρ_f se muestran en la Fig.
30(b), en la cual se considera la instalación de
un reactor sintonizado a la quinta armónica.

Puede notarse en la Fig. # 30 (b) que a la quinta ar-
mónica el valor de ρ_f es igual a la unidad y el va-
lor de ρ_s es igual a cero. Al instalar el reactor el
cual se encuentra sintonizado a la quinta armónica,
el factor de distribución ρ_f tiene un valor máximo a
un armónico de orden bajo, cercano a 3.54.

Además se puede apreciar claramente que la relación
de los factores de distribución ρ_f / ρ_s se reduce a e-
levadas frecuencias al utilizar el reactor sintonizad
o, por éste motivo a veces es necesario utilizar un
filtro pasa alto conectado en paralelo con el filtro
sintonizado que se mencionó anteriormente. Para sis-
temas grandes es necesario realizar un flujo de carga
para ver si se han producido sobrevoltajes.



30(b) Factores de Distribución de Corriente Armónica vs el Orden del Armónico. Con el Reactor Sintonizado.

ANÁLISIS DE LA CARACTERÍSTICA IMPEDANCIA - FRECUENCIA COMO UNA FUNCIÓN DEL FACTOR DE CALIDAD "Q"

La condición de resonancia de una red se da cuando la impedancia de la red es puramente resistiva, luego se tendrá condición de resonancia cuando la tensión y la corriente en los terminales de entrada están en fase, produciéndose la respuesta de amplitud máxima.

La impedancia ZMAG mencionada en la sección 4.1, es la impedancia que ve el convertidor estático de potencia desde la barra a la cual está conectado, ésta impedancia variará con la frecuencia, obteniéndose de ésta manera una característica de ZMAG vs FRECUENCIA. Es necesario recordar que los equipos de rectificación, deberán considerarse como verdaderas fuentes de corriente.

Esta característica, tiene un pico que depende exclusivamente del valor de la resistencia del reactor sintonizado a la frecuencia a la que se produce la condición resonante. El ancho de ésta curva ó la pendiente de sus lados depende también de los valores de los otros elementos. El ancho de ésta curva, se lo llamará más cuidadosamente como ANCHO DE BANDA, será expresado en términos de otro parámetro muy importante, éste pa-

ámetro es llamado "FACTOR DE CALIDAD"; "Q".

Es necesario hacer notar de que la agudeza de la curva característica de un circuito resonante, está determinada por la máxima cantidad de energía que puede almacenarse en el circuito, en comparación con la energía que se pierde durante un período completo de la respuesta. Así pues, se puede definir "Q" como:

$$Q = 2\pi \frac{\text{Máxima energía almacenada}}{\text{Energía total perdida por período}} \quad (81)$$

Una relación muy útil para obtener el factor "Q", es:

$$Q = \frac{2\pi f_o L}{R} = \frac{1}{2\pi f_o CR} \quad (82)$$

La expresión (82) indica el método físico de obtener el factor de calidad como función de la reactancia inductiva y la resistencia ó de la reactancia capacitiva y la resistencia, ambas a la frecuencia f_o (60 Hz.).

Los circuitos que poseen un elevado factor de calidad, tienen un ancho de banda menor, es decir poseen mayor selectividad de frecuencias ó mayor calidad. Hay que tener mucho cuidado al realizar la selección de Q. Una característica importante que merece ser destacada

es de que al producirse resonancia paralelo, la impedancia ZMAG tiene un valor elevado al flujo de la corriente cuya frecuencia corresponda a la frecuencia de resonancia. La condición de resonancia paralelo puede producir la oscilación de elevadas corrientes que son excitadas por la corriente de frecuencia resonante. Estas corrientes fluyendo a través de las impedancias del sistema de potencia, producen elevados voltajes armónicos, los cuales sumados al voltaje de frecuencia fundamental producen formas de onda de voltaje distorsionadas. Esta distorsión produce que las corrientes armónicas fluyan al resto del sistema.

La solución sería realizar un estudio de la característica impedancia vs frecuencia, analizar la frecuencia para la cual se produce la condición de resonancia paralelo (elevada impedancia ZMAG), realizar luego un diseño de filtros (sección 4.1) previo con un valor de factor de calidad nulo (ideal), a continuación realizar un nuevo estudio de la característica impedancia vs frecuencia y luego comenzar a variar el factor de calidad del reactor sintonizado ó de todos los reactores sintonizados si acaso fue necesario utilizar varios filtros. En cada caso se analizará la característica de ZMAG vs FRECUENCIA. Finalmente se selecciona la característica más funcional.

PROGRAMA PARA LA OBTENCION DE LA CARACTERISTICA IMPEDANCIA-FRECUENCIA (VARIANDO LA CAPACIDAD DEL BANCO DE CONDENSADORES Y EL FACTOR DE CALIDAD)

El comportamiento de un sistema de potencia frente al flujo de señales armónicas se lo puede analizar de una manera completa, estudiando la característica de la impedancia del sistema de potencia a diversas frecuencias, es decir realizando un análisis de su característica IMPEDANCIA vs FRECUENCIA.

El procedimiento utilizado para la obtención de la característica Impedancia-frecuencia de un sistema de potencia, es el siguiente:

1. Se realiza la lectura de toda la información necesaria del sistema de potencia, es decir datos sobre las impedancias de las líneas, reactores, capacitores, admitancias en derivación, etc.
2. Entrada de datos de las barras que tienen instalación de filtros de armónicas, excepto la barra a analizar su espectro de armónicas. (Barra 8)

3. Datos sobre los FACTORES DE CALIDAD deseados en los diseños de los filtros de armónicas a instalarse en la barra problema.
4. Entrada de la barra problema (B) y los MVAR del equipo compensador de reactivo instalado en dicha barra.
5. Se utilizará un máximo de cinco filtros, del tipo sintonizado de resonancia paralelo, para esto se utiliza el código BCD, es decir servirá como un contador y a la vez un lazo de las diferentes alternativas, las cuales son un total de 32, con tanto desde la alternativa cero hasta la 31.
6. El espectro de las señales de armónicas será estudiado en la gama de frecuencias desde 60-1.200 Hz. con incremento de 10 Hz., esto viene a constituir un nuevo lazo para la formación sólida de el objetivo que se persigue.
7. Se define una variable "S", la cual sirve para dimensionar la magnitud de la impedancia observada desde la barra B por el equipo rectificador. Esta variable "S", tiene un valor mínimo de cero

y un valor máximo de 114, es por eso que en la di mensión se tiene (35,120), además se tiene la asignación de la frecuencia en por unidad de la fundamental a la variable "KK", es decir $F/60$.

8. A continuación se inicia el proceso iterativo de la formación de la matriz YBARRA(KK), desde 1 hasta 20. En ese mismo subprograma, se tiene la modificación de la YBARRA por la presencia de fil tros, con excepción de la barra B, pues en ésta es donde se van a instalarse recién los filtros.
9. Luego se tiene un pequeño subprograma que decide los valores de los elementos que constituirán los filtros a instalarse en la barra B, dependiendo los factores de calidad seleccionados en 31 numeral 3.
10. Después se tiene un subprograma que invierte la matriz YBARRA, dando como resultado la matriz ZBARRA. Esta matriz ZBARRA, es obtenida para cada u na de las 32 alternativas un número de 114 veces.
11. Finalmente se tiene un subprograma que permite la obtención de la impedancia ZMAG vista desde la ba

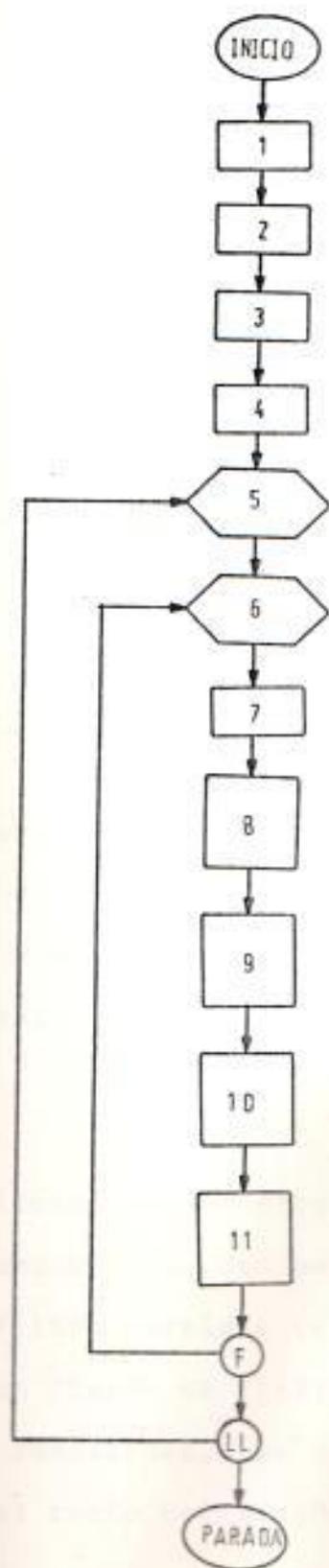


Fig. #31 Diagrama de Flujo para la obtención de la característica IMPEDANCIA-FRECUENCIA.

ra B , tanto su magnitud y ángulo de fase. Este pequeño subprograma también permite la obtención gráfica de la característica IMPEDANCIA-FRECUENCIA, visualizando así como es el comportamiento del sistema de potencia frente al flujo de armónicas.

El diagrama de flujo para el programa que permite obtener la característica Impedancia-Frecuencia de un sistema de potencia, se muestra en la Fig. # 31.

31- DISEÑO DE FILTROS

Si es requerida la supresión de las corrientes armónicas, es necesario la utilización de FILTROS PARALELO, los cuales producen la reducción del flujo de las corrientes armónicas en los sistemas de potencia.

Los capacitores pueden proveer compensación de reactivos como bien pueden ser un importante componente de un filtro paralelo (ó filtros paralelos). Al realizar un diseño de filtros, algunas decisiones deben ser realizadas, las cuales permitirán continuar con el resto del diseño, entre ellas se tiene:

- 1.- Cuál es la cantidad de VARS que necesita la carga conectada en la barra problema?
- 2.- Cuál es la cantidad de VARS que debería ser aumentada?
- 3.- Cuál es el voltaje en la barra problema, analizando a carga nominal, sin carga y con sobrecarga.
- 4.- Si acaso la variación de voltaje es muy grande, existen máquinas sincrónicas que pueden ser equipadas con reguladores de VARS?
- 5.- Si la respuesta es negativa, Qué tipo de control de VARS incluyendo capacitores, ajustará éste tipo de necesidad?
- 6.- Es necesario decidir la cantidad de filtros que deberían ser empleados. Generalmente se tienen filtros sintonizados para Quinta, Séptima, Undécima y Decimatercera armónica, en algunos sistemas de potencia se utilizan un filtro pasa alto, todo depende del criterio del diseñador.
- 7.- La filosofía del diseño del filtro debe ser decidi

da. Es decir que se debería definir un tipo de filtro denominado "FILTRO MINIMO", el cual suprime las armónicas al menor costo y suministra la compensación de reactivos, pero a veces se tiene que sacrificar una de éstas características.

8.- Usualmente el tamaño del filtro sintonizado a la Quinta armónica (el capacitor), será de mayor tamaño que los filtros para las señales armónicas de orden elevado. La recomendación realizada por las normas ANSI Standar C55.1 es:

- a) KVAR: 135%
- b) CORRIENTE: 180% del valor RMS
- c) VOLTAJE: 110% del valor RMS

El tamaño del capacitor normalmente será seleccionado basándose en los requerimientos de compensación de potencia reactiva. Este banco total, es dividido en varios bancos, de acuerdo a la cantidad necesaria de filtros a utilizarse para la atenuación de las señales armónicas en el sistema de potencia que se está estudiando, puede ser 2, 3, 4 ó 5 bancos.

La manera de particionar el banco total de capacitores es completamente arbitraria. Generalmente se instalan filtros de Quinta, Séptima, Décimaprimer, Décimatercera y Décimaséptima armónica.

En la selección adecuada del factor de calidad de cada uno de los filtros paralelos a instalarse en la barra problema, puede considerarse las recomendaciones dadas en la sección 3.3.1.1 (Filtros sin tonizados), acerca del valor adecuado del factor de calidad "Q".

PROGRAMA QUE PERMITE LA OBTENCION DEL TIPO DE FILTRO MAS FUNCIONAL

Este pequeño subprograma, ha sido unido al programa principal de la sección 4.2.1, éste subprograma empieza desde la línea 2622, terminando en la línea 3270. Su entendimiento es bastante sencillo y por ese motivo no hace falta una descripción detallada de los pasos que realiza, en síntesis utiliza el algoritmo conocido como "ORDENAMIENTO BURBUJA" ó llamado también como "ORDENAMIENTO SECUENCIAL".

Los listados de los programas tanto el de la sección 4.2.1 (PROGRAMA PARA LA OBTENCION DE LA CARACTERISTICA IMPEDANCIA-FRECUENCIA) como el de la presente sección 4.3.1 se presentan en el ANEXO 1.

C A P I T U L O 5

ESTUDIO DEL FLUJO DE POTENCIA DE ARMONICAS

5.1.- FORMULACION DEL FLUJO DE POTENCIA DE ARMONICAS

Si en un Sistema de Potencia se tiene flujo de señales armónicas, se van a producir distorsiones de la forma de onda de voltaje, esto se debe a que se superponen los voltajes armónicos a la forma de onda de voltaje fundamental. Cuando se produce RESONANCIA PARALELO, el equipo rectificador que se encuentre conectado a la barra problema (B) en éstas condiciones, observa una impedancia elevada, es decir se producen oscilaciones de corriente entre la reactancia inductiva del sistema de potencia y la reactancia capacitiva de los capacitores utilizados para la compensación de reactivos.

Una forma de realizar un estudio de los valores que afectan las corrientes armónicas fluyendo hacia el sistema de potencia, es mediante el método descrito en el Capítulo 4, Sección 4.1, por el cual se obtie-

nen los factores de distribución de las corrientes en por unidad de la corriente del equipo rectificador.

Este procedimiento es bastante complejo, para facilitar su comprensión se explica a continuación los pa sos a seguirse para la determinación del flujo de co rriente de armónicas que no es más que el fiel reflejo del flujo de potencia de dichas señales armónicas, dicho procedimiento es el siguiente:

1. Lectura de toda la información del sistema de potencia a estudiarse, entre esa información se tie nen: Número de Barras del Sistema, Número de Líneas, Barras de Carga, Barras de Generación, Número de transformadores con TAP fuera de su posición nominal, admitancias en derivación, etc.
2. Datos de las Barras que tienen instalación de Fil tros ó trampas de armónicas, con excepción de aque lla Barra a la cual se va a realizar el estudio de la generación, propagación y su correspondiente a tenuación de las señales armónicas.
3. Entrada de los FACTORES DE CALIDAD de los diferen tes filtros a diseñarse en la BARRA B, además exis ten

- te la entrada de la Barra a estudiarse y el valor de los MVAR del equipo compensador de reactivo instalado en esa barra.
4. El Diseño consta de un máximo de cinco filtros del tipo sintonizado, para esto se utiliza el código BCO ($2^5 = 32$ alternativas), lo cual da el número de posibles combinaciones de los cinco tipos de filtros.
 5. El estudio se lo hará en la gama de frecuencias comenzando desde la frecuencia fundamental que tiene un valor de 60 Hz. hasta los 1200 Hz., que es equivalente a decir armónico de orden 20.
 6. El proceso iterativo comienza con la formación de la matriz YBARRA, la cual se obtiene para todas las frecuencias (incrementadas en 10 Hz.).
 7. Este paso es equivalente al paso 9 de la Sección anterior, es decir 4.2.1.
 8. Equivalente al 10 de la Sección 4.2.1.
 9. Finalmente se tiene un subprograma que permite obte

ner los valores en por unidad de las corrientes que fluyen hacia el sistema de potencia, hacia el sistema equivalente de filtros, hacia cada uno de los diferentes filtros a ser instalados en cada una de las alternativas, a continuación se tiene un sub-programa que de cada una de las alternativas que se vaya desarrollando en el computador, selecciona de cada una el menor valor del factor de distribución de la corriente de armónicas inyectadas al sistema de potencia, de todos esos menores valores, se escoge aquel que tenga el menor valor, luego se procede a ordenar las opciones, a fin de que el ingeniero diseñador, seleccione la opción más funcional del sistema de filtros a instalarse en la barra problema.

El Diagrama de Flujo del presente programa se muestra claramente en la Fig. # 32, el listado de las instrucciones, se lo adjunta en el ANEXO 2.

Para que un trabajo quede del todo concluido, es necesario que contenga hasta los más mínimos detalles, por eso es que adjunto en el ANEXO 3 un programa de FLUJO DE CARGA, el cual utiliza el Método de NEWTON-RAPHSON. En éste programa se toma en consideración las instala-

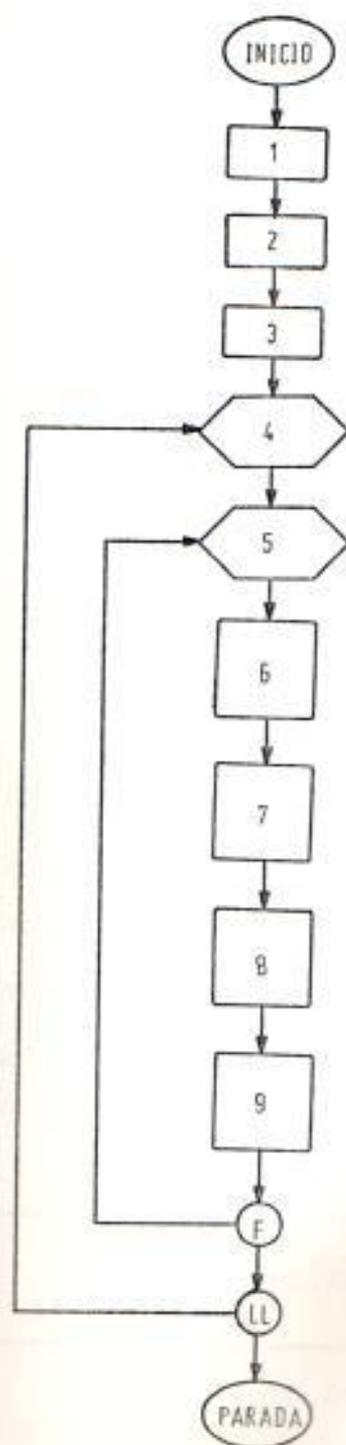


Fig. # 32 Diagrama de Flujo para la obtención del Flujo de P_0 tencia de Armónicas.

ciones de filtros en un sistema de potencia, es necesario como se mencionó anteriormente analizar las variaciones que se producirían al instalarse un nuevo sistema de filtros en lo referente al flujo de potencia, pérdidas totales (tanto activas como reactivas) y los voltajes que se tienen en cada barra del sistema de potencia a estudiarse.

3.2 - APLICACION PRACTICA

A Manera de ejemplo, se realizará el análisis de la GENERACION, PROPAGACION Y ATENUACION DE LAS SEÑALES ARMONICAS causadas por la instalación de un equipo rectificador en el siguiente sistema de potencia, cuyo Diagrama Unifilar se muestra en la Fig. # 33 y cuyos datos son los siguientes:

D A T O S D E L I N E A S

BARRAS		IMPEDANCIAS	SUCEPTANCIAS
1	2	$0.02 + j0.06$	$0.0 + j0.030$
1	3	$0.08 + j0.24$	$0.0 + j0.025$
2	3	$0.06 + j0.20$	$0.0 + j0.020$
2	4	$0.06 + j0.18$	$0.0 + j0.020$

2	5	$0.04 + j0.40$	$0.0 + j0.015$
3	4	$0.01 + j0.05$	$0.0 + j0.010$
4	5	$0.08 + j0.40$	$0.0 + j0.025$

DATOS DE GENERACION, CARGAS Y VOLTAJES

BARRA	VOLTAJES (P.U.)	GENERACION		CARGAS	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	$1.06 + j0.0$	0	0	0	0
2	$1.00 + j0.0$	70	50	60	40
3	$1.00 + j0.0$	0	0	40	25
4	$1.00 + j0.0$	0	0	60	20
5	$1.00 + j0.0$	0	0	60	20

Las diferentes alternativas de instalación de sistemas de FILTROS y alternativas del flujo de potencia se encuentran en el ANEXO 4. En éste Anexo, se incluye un estudio de la característica IMPEDANCIA-FRECUENCIA para el presente sistema de potencia, cuyo diagrama unifilar como se mencionó anteriormente, se encuentra en la fig. # 33.

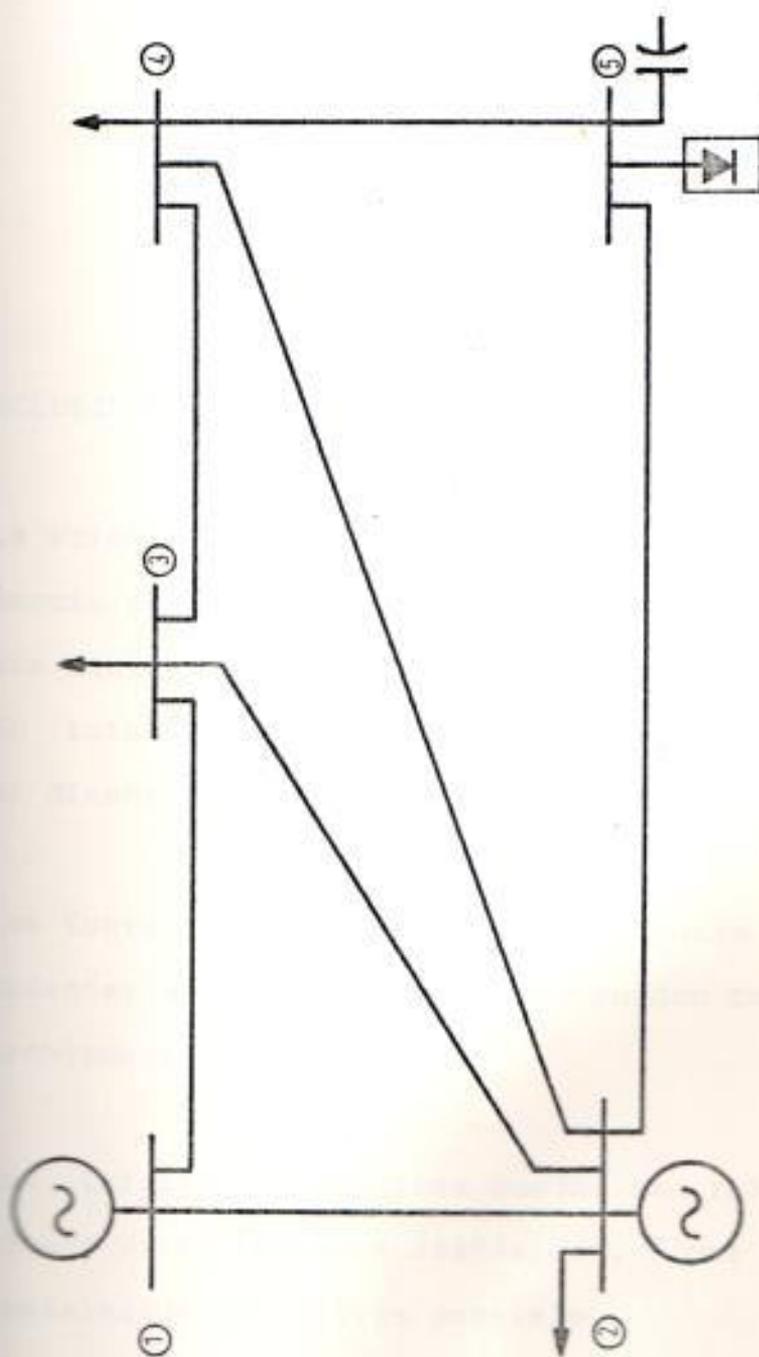


Fig. # 33 Diagrama Unifilar de un Sistema de Potencia a estudiar su Flujo de Señales Armónicas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La Primera Resonancia Paralelo de un Sistema de Potencia es principalmente una función de la inductancia equivalente del sistema de potencia y del tamaño total del banco de capacitores utilizados para el diseño de filtros.
- Los Convertidores Estáticos de Potencia generan corrientes armónicas, las cuales pueden causar serios problemas.
- Las Corrientes Armónicas pueden ser reducidas por el uso de circuitos multifásicos, ó por la adecuada instalación de filtros paralelo.
- Los filtros de las corrientes armónicas, pueden re-

ducir apreciablemente el flujo de corrientes armónicas al sistema de potencia, además de ser un medio efectivo del control de éstas indeseables corrientes armónicas, sirve como medio de compensación de reactivos, en conclusión su aplicación es bastante económica.

- Para realizar el análisis de un Sistema de Potencia, la asunción de barras de voltaje del tipo sinusoidal, puede no ser adecuada debido a la interacción entre las corrientes y los voltajes de las señales armónicas, muy en especial cuando se producen condiciones de resonancia.

III.- RECOMENDACIONES

- Para Sistemas Industriales, se aconseja realizar un estudio de su característica Impedancia-frecuencia con la ayuda del Programa del Anexo 1, pues ellos tienen tendencia a tener resonancias paralelo cerca de la banda de 300-420 Hz, además se aconseja realizar un flujo de carga de éste sistema mediante la ayuda del Programa del Anexo 3.

- Para prevenir excesiva distorsión de voltaje, una Razón de Corto Circuito adecuada (SCR) es un valor mayor que 20, si acaso no se tienen instalados ningún tipo de filtros.

- Si un sistema opera normalmente a un factor de potencia de 0.80 y requiere conocer el tamaño del banco de condensadores a fin de cambiar su factor de potencia a 0.95, se aconseja multiplicar la capacidad (MW) del convertidor estático de potencia por el factor de 0.421, es decir:

MVAR a ser aumentados = 0.421 MW del Convertidor.

- Actualmente no existe una especificación uniforme sobre la cantidad de Corrientes Armónicas, Distorsión de Voltaje e Interferencia Telefónica permitidas, se recomienda prestar atención a las Tablas # 2 y # 3, en las cuales se tiene un resumen de éstas cantidades permitidas.

- Se debe sobredimensionar la capacidad del banco de condensadores a utilizarse como filtros de armónicas, evitando de ésta manera su rápido envejecimiento.

B I B L I O G R A F I A

1. EVANS, R. D., "Coordination of Power and Communication Systems", Westinghouse Electric Corporation, Pennsylvania, 1964, Capítulo 23, Pag. 772-776.
2. GRADY, W.M. Y HEYDT, G.T., "Distributed Rectifier Loads in Electric Power Systems", IEEE, 1984, Dallas-Texas, WM 219-2.
3. KIMBARK, E.W., "Direct Current Transmission", N. Y., 1971, John Wiley & Sons, Inc., Vol. 1, Capítulo 8.
4. KNOWLTON, A.E., "Standard Handbook for Electrical Engineers", Editorial Labor, Tomo I, Pag. 1035 a 1050.
5. MOORE, A.H., "Application of Power Capacitors to Electrochemical Rectifier Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-13 No. 5, Septiembre-Octubre 1977.

6. OCTAVIO, C., "Influência Da Operação De Rectificadores sobre os Sistemas Energéticos", Rio de Janeiro-Brasil, 1969, BR-11/69, Pag. 1-43.
7. SMITH, R.L. Y STATFORD, R.P., "Application Considerations in Handling effects of SCR Generated Harmonics in Cement Plant", IEEE Transactions on Industry Applications, PID 80-46, Agosto 1980.
8. STEEPER, D.E. Y STRATFORD, R.P., "Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial Power Systems Using Thyristor Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-12, No. 3, Mayo-Junio 1976, T00-75-50.
9. STRATFORD, R.P., "Harmonic Pollution on Power Systems-a Change in Philosophy", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-16, No. 5, 1980 Septiembre-Octubre, Pag. 617-623.
10. STRATFORD, R.P., "Rectifier Harmonics in Power Systems", IEEE/IAS Trans. on Industry Applications in 1978, Pag. 1275-1280.