



SEP 2013.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

INSTITUTO DE INVESTIGACION DE LA FIEE

520
09 AGO. 2013
SERVICIO DE DOCUMENTACIÓN
INFORMÁTICA Y TRADUCCIÓN



RE
CI
BI
DO
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
VIC. RECTORADO DE INVESTIGACIÓN
257
09 AGO 2013
10.00
FIRMA: R

INFORME FINAL

**“EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN LOS MOTORES
ELÉCTRICOS AL CONTROLAR SU VELOCIDAD”** *OK*

Autor:

Lic. Hugo Florencio LLACZA ROBLES ✓

PERIODO DE EJECUCION:

RESOLUCIÓN RECTORAL N° 673-12-R ✓
Del 01 julio 2012 al 30 de junio 2013 ✓

CIUDAD UNIVERSITARIA

CALLAO 2013

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
Oficina de Secretaría General

Callao, 13 de Agosto del 2012

Señor *Lic. Hugo Florencio Llacza Robles*

Presente.-

Con fecha trece de agosto del dos mil doce, se ha expedido la siguiente Resolución:

RESOLUCIÓN RECTORAL N° 673-2012-R.- CALLAO, 13 DE AGOSTO DEL 2012.- EL RECTOR DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

Vista la solicitud de fecha 18 de junio del 2012, del profesor asociado a dedicación exclusiva Lic. HUGO FLORENCIO LLACZA ROBLES, dirigida al Director del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, adjuntando el Proyecto de Investigación "EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN MOTORES ELÉCTRICOS AL CONTROLAR LA VELOCIDAD", para su respectiva aprobación, de ser el caso.

CONSIDERANDO:

Que, el Estatuto de nuestra Universidad en su Título VI concordante con el Art. 65° de la Ley N° 23733, señala que nuestra Universidad es un centro de enseñanza de carácter científico que se sustenta en la investigación, siendo ésta una función obligatoria tanto de la Universidad que la organiza y conduce libremente como de los profesores dentro de su tarea académica, cuyo cumplimiento recibe el estímulo y el apoyo de la institución.

Que, mediante Resolución N° 008-97-CU del 29 de enero de 1997, se aprobó el Reglamento de Proyectos de Investigación para la presentación y ejecución, así como la asignación presupuestal para su desarrollo de acuerdo con la quinta Disposición Transitoria de este Reglamento;

Que, en efecto, el profesor Lic. HUGO FLORENCIO LLACZA ROBLES, con fecha 18 de junio del 2012, presentó al Director del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, el referido Proyecto de Investigación, incluyendo el presupuesto y el plan de trabajo correspondiente para su ejecución;

Que, el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, según Resolución N° 035-2012-CDIIFIEE de fecha 06 de julio del 2012, así como la Resolución N° 111-2012-CFFIEE de fecha 10 de julio del 2012, aprueban la ejecución, el presupuesto y el cronograma del mencionado Proyecto de Investigación;

Que, el Vicerrector de Investigación mediante Oficio N° 0606-2012-VRI (Expediente N° 16614) recibido el 20 de julio del 2012, remite el Informe N° 207-2012-CDCITRA-VRI del Centro de Documentación Científica y Traducciones, dando su conformidad para la ejecución del citado Proyecto de Investigación; en consecuencia, solicita expedir la respectiva Resolución aprobatoria;

Estando a lo glosado; a la Resolución N° 061-98-CU del 25 de mayo de 1998 y, en uso de las atribuciones que le confieren los Arts. 158° y 161° del Estatuto de la Universidad y el Art. 33° de la Ley N° 23733;

RESUELVE:

- 1° **APROBAR** el Proyecto de Investigación intitulado "EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN MOTORES ELÉCTRICOS AL CONTROLAR LA VELOCIDAD", conforme a las siguientes especificaciones:



INDICE

I-	INDICE.....	2
II-	RESUMEN.....	3
III-	INTRODUCCION.....	4
	3.1 Los armónicos.....	4
	3.2 Origen de los armónicos.....	4
	3.3 Efectos de los armónicos y sus soluciones.....	5
	3.4 Distorsión armónica.....	7
IV-	MARCO TEÓRICO.....	8
	4.1 Motores Eléctricos para variadores de frecuencia.....	8
	4.1.1 Elección de Motor para uso con Variadores de Frecuencia.....	8
	4.1.2 Selección de Motores Eléctricos.....	8
	4.1.3 Motores Vectoriales.....	9
	4.1.4 Perturbaciones causadas por armónicos de corriente y voltaje.....	10
	4.1.5 Efectos en los filtros pasivos.....	13
	4.2 Armónicas de corriente y tensión.....	21
	4.3 Sistema Eléctrico bajo condiciones no Sinusoidales.....	28
	4.3.1 Efectos sobre la potencia.....	28
	4.3.2 Cambio de frecuencia.....	31
	4.3.3 Cambio del resbalamiento.....	32
	4.3.4 Variadores de velocidad y arrancadores electrónicos.....	33
	4.4 El motor.....	34
	4.4.1 El convertidor de frecuencia.....	35
	4.4.2 Selección de un variador de velocidad.....	36
	4.4.3 Circuito recomendado.....	36
	4.5 Descripción del funcionamiento.....	39
	4.5.1 Problemas que surgen en el arranque de motores asíncronos.....	40
	4.5.2 Factores para diseñar un sistema de regulación de velocidad.....	40
	4.5.3 - Ventajas de Variador de Velocidad en el arranque de motores.....	41
	4.5.4 Inconvenientes del Variador de Velocidad para el arranque de motores... ..	41
	4.6 Aplicaciones de los variadores de frecuencia.....	42
	4.7 Principales funciones de los variadores de velocidad Electrónicos.....	43
	4.7.1 Regulación de la velocidad.....	43
	4.8 Composición de un Variador de Frecuencia.....	44
V-	MATERIALES Y MÉTODOS.....	49
	5.1 Diagrama de bloques de un variador de velocidad.....	49
	5.2 Descripción del funcionamiento y componen del variador de velocidad.....	49
	5.3 Ensayos a realizar.....	50
	5.4 Descripción de su implementación.....	51
	5.4.1 Resultados obtenidos.....	51
	5.6 Emisión armónica del variador a través de simulaciones.....	52
VI-	RESULTADOS.....	54
VII-	DISCUSIÓN.....	55
VIII-	REFERENCIALES.....	57
IX-	APÉNDICE.....	58
X-	ANEXO.....	63

II- RESUMEN

Los variadores de velocidad de motores cumplen un rol cada vez más importante en los distintos tipos de industrias, la electrónica de potencia presente en estos variadores de velocidad, lo convierten en una importante carga alineal dentro de los sistemas de potencia, emitiendo corrientes armónicas hacia la red de suministro o de alimentación.

La generación de corrientes armónicas que distorsionan el voltaje y aumentan la posibilidad de resonancia, debido al banco de condensadores para la corrección del factor de potencia, las características de contaminación armónica, identificando la magnitud y el orden de las componentes más importantes, considerando las principales normativa vigente, a nivel nacional e internacional, y la forma de interpretarla en un caso particular, tomado como ejemplo de aplicación, el caso que se presenta cuando existen bancos de capacitores para corrección del factor de potencia y se analiza el peligro de resonancia armónica.

En la actualidad existen severas normas internacionales referidas a Compatibilidad Electromagnética, como así también reglamentos de carácter local a cumplir tanto por las empresas prestatarias del servicio eléctrico como por los propios usuarios; si desea incorporar este tipo de cargas en sus instalaciones deberá analizar previamente los niveles de armónicas emitidos que no sobrepasan los valores permitidos por la normativa vigente.

Los motores utilizan el 40% de la electricidad del mundo, de 60 a 70% en el sector industrial, y entre 30 y 40% en el sector de servicios. De toda la energía eléctrica que usan los motores, alrededor del 90% la utilizan los motores de inducción de CA entre 0,75 y 200 kW. Si estos motores fueran un poco más eficientes, los armónicos que se engendran.

El control de velocidad de máquina de jaula de ardilla cuando el sistema funciona en vacío o con pequeñas cargas, disminuyendo la velocidad de respuesta del par en régimen dinámico. Llegándose a la conclusión de que dichas variaciones dan lugar, bien a saturaciones inadmisibles que pueden llegar a hacer peligrar la propia máquina.

El autor



III- INTRODUCCIÓN

3.1 Los armónicos

En un sistema de potencia eléctrica, los aparatos y equipos que se conectan a él, tanto por la propia empresa como por los clientes, están diseñados para operar a 50 ó 60 ciclos, con una tensión y corriente sinusoidal. Por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias de 50 ó 60 ciclos sobre algunas partes del sistema de potencia o dentro de la instalación de un usuario. La forma de onda existente está compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, incluyendo una referida a la frecuencia fundamental. En la figura 7 se observa la descomposición de una onda distorsionada en una onda sinusoidal a la frecuencia fundamental (60 Hz) más una onda de frecuencia distinta. El término componente armónico o simplemente armónico, se refiere a cualquiera de las componentes sinusoidales mencionadas previamente, la cual es múltiplo de la fundamental. La amplitud de los armónicos es generalmente expresada en por ciento de la fundamental.

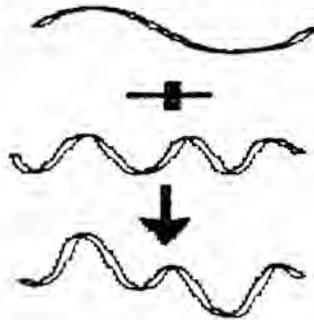


Figura 01. Descomposición de una onda distorsionada

Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan, que son:

- su amplitud: hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico,
- su orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz). Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir $3 * 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$.

3.2 Origen de los armónicos.

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante, estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal adsorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo respecto a la tensión, para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red.

Las cargas armónicas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por dispositivos electrónicos de potencia; (Variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, reactancias saturables, equipos de soldadura, hornos de arco, etc.). de los cuales se desprende las categorías generadoras de armónicos, donde las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión.

Los sistemas de iluminación con lámparas de descarga o lámparas fluorescentes son generadores de armónicos de corriente y ciertas lámparas fluocompactadas modernas, por lo que puede ser sometido a peligrosos sobrecalentamientos si no es seleccionado adecuadamente.

Las máquinas rotativas producen armónicos de rango elevado y de amplitud normalmente despreciable, las pequeñas máquinas sincrónicas son, generadoras de tensiones armónicas de 3er orden que pueden tener una incidencia sobre:

- El calentamiento permanente (aun sin defecto) de las resistencias de puesta a tierra del neutro de los alternadores.
- El funcionamiento de los relés amperimétricos de protección contra los defectos de aislamiento.

La intención final de este trabajo es despertar el interés de profesores, estudiantes profesionales y de la concesionaria local de energía, para la conformación de grupos de estudios que tengan como objetivo investigar la situación actual de la red eléctrica en cuanto a la calidad de potencia se refiere.

3.3 Efectos de los armónicos y sus soluciones

Los armónicos provocan una baja calidad en el suministro de la energía eléctrica y se ha observado un elevado nivel de corrientes armónicas múltiples impares de la fundamental de 60 Hz en los sistemas de distribución eléctrica, que se debe a la amplia difusión de reguladores de velocidad para motores, ordenadores personales y fuentes de alimentación ininterrumpidas (UPS). Otros equipos habitualmente generadores de armónicos son las lámparas de descarga, los circuitos rectificadores y los transformadores sobreexcitados; estas cargas no lineales no se ajustan a la marcha de las corrientes senoidales de las fuentes de suministro de corriente alterna. Estas ondas de trazado no senoidal están constituidas por la suma de muchas componentes de más elevada frecuencia que son a las que se denomina corrientes armónicas, como muestra la figura 2.

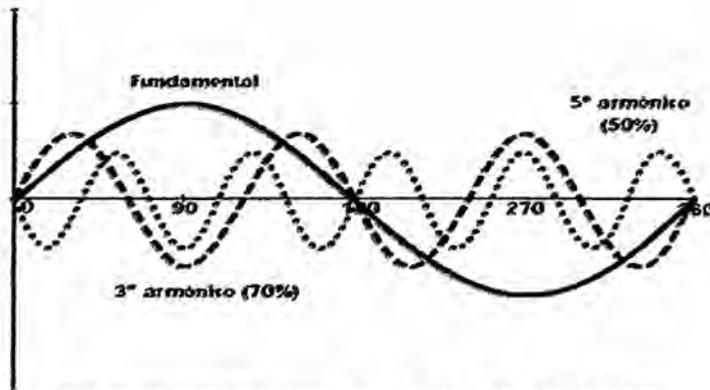


Figura 02 Onda fundamental con 3er Y 5to ARMONICO

Una forma de onda típica de la corriente con espectro armónico de un ordenador personal es la que se muestra donde las corrientes armónicas se clasifican en una de estas tres categorías: corrientes de secuencia positiva, negativa o cero. Estas últimas son las que se conocen con el nombre de armónicos, cuyo orden es múltiplo de tres.

En un sistema trifásico, con neutro distribuido a cuatro hilos, alimentado con cargas no lineales, se encuentran corrientes de secuencia armónica positiva, negativa y cero, mientras que si está distribuido a tres hilos, esto es, con el neutro no distribuido, solamente se observa la presencia de las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa.

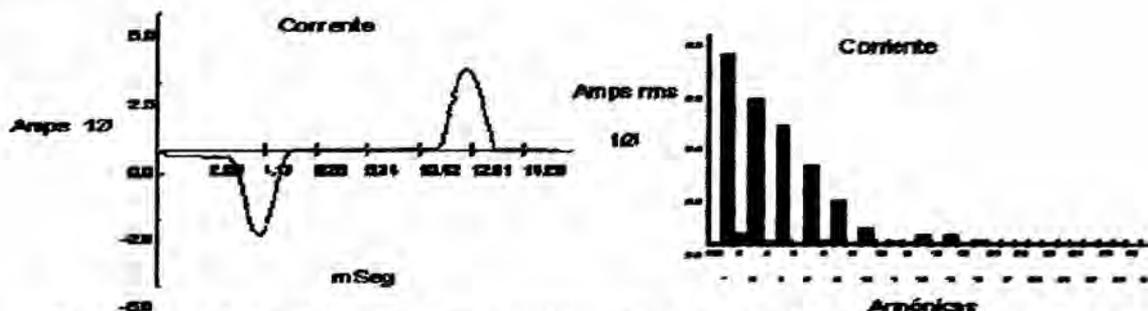


Figura 3: Forma de la onda de corriente y sus armónicos, con su espectro de barra tomado de la pantalla de un analizador.

Orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frecuencia (50	100	150	200	250	300	350	400	450
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Tabla A: Órdenes de los armónicos de secuencia positiva, negativa y cero.

Las corrientes armónicas que fluyen a través de las impedancias de una red de distribución ocasionan unas caídas de tensión armónicas que distorsionan la forma de onda de tensión, como muestra la figura 4. Esta distorsión de la forma de onda es particularmente importante en los sistemas de distribución eléctrica de elevada impedancia. Esta desviación anormal de las fuentes de suministro causa disfunciones en los equipos y fallos prematuros que es lo que se denomina **“Baja calidad de la energía”**

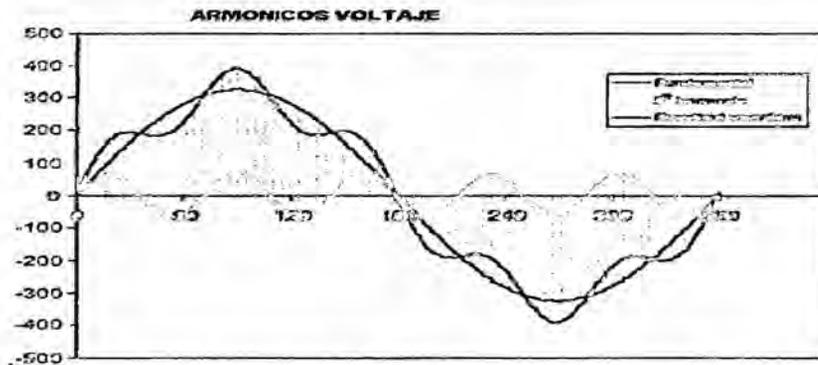


Figura 4: Generación de una forma de onda de tensión distorsionada

3.4. Distorsión Armónica

Cuando el voltaje o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada.

La distorsión puede deberse a:

- **Fenómenos transitorios** tales como arranque de motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito entre otras.

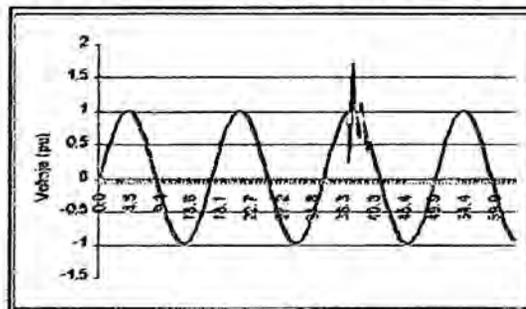


Fig. 05 Condiciones permanentes que están relacionadas con armónicas de estado estable.

- **Características de la Distorsión Armónica**

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal que idealmente deberíamos encontrar, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas.

Para que se considere como distorsión armónica las deformaciones en una señal, se deben de cumplir las siguientes condiciones:

- ✓ Que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita
- ✓ Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o voltaje.
- ✓ Permanente.- Cuando la distorsión armónica se presenta en cualquier instante de tiempo, es decir, que no es pasajera.

IV- MARCO TEÓRICO

4.1 Motores Eléctricos para variadores de frecuencia

4.1.1 Elección de Motor para uso con Variadores de Frecuencia

Los motores AC asíncronos convencionales se han construido considerando en todo momento que van a funcionar conectados directamente a la red eléctrica de cierta tensión (230 V ac, 400 V ac) y en una determinada frecuencia fija. Se ha supuesto por tanto que la relación tensión / frecuencia, que a la postre determina entre otras cosas el par disponible, va a ser fija y constante. Los aislamientos entre bobinados se han dimensionado para baja frecuencia, la única que se espera encontrar en la red.

Por otro lado, la refrigeración de un motor asíncrono convencional suele provenir del propio motor mediante un ventilador acoplado al rotor (auto ventilación), ya que, de nuevo, se supone que el rotor estará girando siempre a la velocidad nominal o cerca de ella, velocidad que sería suficiente para evitar el calentamiento excesivo del motor; todas estas hipótesis son falsas cuando se utilizan variadores-convertidores de frecuencia.

4.1.2 Selección de Motores Eléctricos

Al trabajar con variador de frecuencia, los principales problemas del uso de motores convencionales quedan claros:

- a) Problemas a bajas velocidades: la auto ventilación es insuficiente para el régimen permanente a bajas revoluciones, al menos si se quiere mantener el par nominal, lo que nos obliga a instalar ventilación forzada exterior (dificultades de montaje) o bien a sobredimensionar el motor. Recordemos que en la práctica el factor térmico suele ser el que limita la potencia de utilización del motor.
- b) Problemas a altas velocidades: el fabricante del motor no suele garantizar el rango de velocidades por encima de la nominal durante el que mantiene la potencia constante. De hecho, la auto ventilación provoca una caída muy rápida de la potencia a medida que aumenta la velocidad de giro, debido a la potencia mecánica absorbida por el propio ventilador, potencia que debería estar dedicándose a mover la carga. También las pérdidas magnéticas en el entrehierro aumentan notablemente con la frecuencia. Todo esto

prácticamente invalida al motor convencional para trabajar a velocidades sustancialmente superiores a su nominal.

- c) Destrucción de bobinados: los armónicos presentes en la salida de potencia del variador son ricos en muy altas frecuencias y con el tiempo acaban degradando los bobinados, cuyos aislamientos no están preparados a largo plazo para un bombardeo permanente de transiciones abruptas de tensión.
- d) El motor convencional no suele incorporar conector de fábrica, siendo el técnico el que debe instalarle, operación no siempre fácil y que comporta ciertos riesgos y complicaciones en la operación de puesta en marcha.

4.1.3 Motores Vectoriales

Los llamados motores vectoriales, han sido diseñados y fabricados teniendo presente su utilización con variadores de frecuencia:

- a) La carcasa está construida con chapa magnética, lo que minimiza las pérdidas magnéticas en el entrehierro. Gracias a ello las prestaciones de estos motores a velocidades por encima de la nominal son muy superiores a los asíncronos convencionales.
- b) Incorporan de fábrica la ventilación forzada, a elegir entre radial o axial.
- c) Los bobinados han sido diseñados para soportar a largo plazo los armónicos de muy altas frecuencias, así como altas temperaturas.
- d) Por los motivos anteriores, son motores que trabajan con un rendimiento excelente en un amplio rango de frecuencias del variador. El valor de velocidad hasta el cual se puede contar con potencia constante es conocido y está disponible en catálogo.
- e) Los motores, normalmente se puede elegir, de potencias menor a la necesaria con motores convencionales que están sobredimensionados.
- f) En la mayoría de modelos se incluye un conector montado de serie.
- g) Estos motores incorporan sondas térmicas para su protección, ya que el exceso de temperatura es su principal enemigo.
- h) Además, la velocidad nominal puede elegirse a voluntad entre un muy amplio abanico de valores, sin estar limitados a los pocos valores típicos derivados de la frecuencia de red y el número de polos dependiendo de la frecuencia de la red 50 ó 60 hz

Tipo de carga	Armónicos generados	Comentarios
Transformador	Orden par e impar	Componentes en C: C.
Motor asincrónico	Orden Impar	Inter y Su armónicos
Lámpara descarga	3º + Armónicos	Puede llegar al 30% de I1
Soldadura de arco	3º	
Hornos arco CA	Espectro variable inestable	No lineal-asimétrico
Rectificadores con filtro inductivo	$H = K \times P \pm 1$ $I_h = I_1 / h$	SAI Variadores V
Rectificadores con filtro capacitivo	$H = K \times P \pm 1$ $I_h = I_1 / h$	Alimentación Equipos electrónicos
Ciclo convertidores	Variable	Variadores V
Reguladores PWM	Variable	SAI-Convertidor/ CC-CA

Tabla B. Receptores y espectro de corrientes armónicas inyectadas por diferentes cargas.

4.1.4 Perturbaciones causadas por armónicos de corriente y voltaje.

Los armónicos de corriente y voltajes sobrepuestos a la onda fundamental tienen efectos combinados sobre los equipos y dispositivos conectados a las redes de distribución, para detectar los posibles problemas de armónicos que pueden existir en las redes e instalaciones es necesario utilizar equipos de medida de verdadero valor eficaz, ya que los equipos de valor promedio sólo proporcionan medidas correctas en el caso de que las ondas sean perfectamente sinusoidales. En el caso en que la onda sea distorsionada, las medidas pueden estar hasta un 40 % por debajo del verdadero valor eficaz.

El efecto principal causado por los armónicos consiste en la aparición de voltajes no sinusoidales en diferentes puntos del sistema. Ellos son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes provoca caídas de voltaje deformadas que hacen que a los nodos del sistema no lleguen voltajes puramente sinusoidales. Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico de potencia, más distorsionadas serán los voltajes en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa.

Los voltajes no sinusoidales son causantes de numerosos efectos que perjudican los equipos conectados al sistema. Entre estos efectos se pueden mencionar la reducción de la vida útil del equipamiento de potencia así como la degradación de su eficiencia y funcionamiento en general.

Los armónicos pueden causar errores adicionales en los discos de inducción de los metros contadores. Las fuerzas electrodinámicas producidas por las corrientes instantáneas asociadas con las corrientes armónicas causan vibraciones y ruidos, especialmente en equipos electromagnéticos (transformadores, reactores, entre otros).

Para el caso de equipos protegidos contra sobre voltajes cuyos sistemas de protección también estén diseñados para operar con voltajes sinusoidales, estos pueden operar incorrectamente ante la aparición de formas de onda no sinusoidales. Esta operación incorrecta puede ir desde la sobreprotección del equipo hasta la desprotección del mismo por la no operación ante una forma de onda que podría dañarlo de forma severa. El caso típico se presenta ante formas de onda que presentan picos agudos. Si el dispositivo de medición está diseñado para responder ante valores *rms* de la forma de onda, entonces estos cambios abruptos pudieran pasar sin ser detectados y conllevarían a la desprotección del equipo ante aquellos picos agudos dañinos, que no provoquen un aumento notable de la magnitud medio cuadrática censada. También pudiera ocurrir el caso contrario, el disparo ante valores no dañinos para el equipo protegido.

Efectos a largo plazo.- El principal efecto a largo plazo de los armónicos es el calentamiento.

A- Calentamiento de capacitores, Las pérdidas causadas por calentamiento son debidas a dos fenómenos: conducción e histéresis en el dieléctrico. Como una primera aproximación, ellas son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado para conducción y a la frecuencia para histéresis. Los capacitores son por consiguiente sensibles a sobrecargas, tanto debido a un excesivo voltaje a la frecuencia fundamental o a la presencia de tensiones armónicas.

En los transformadores existirán pérdidas suplementarias debido al efecto pelicular, el cual provoca un incremento de la resistencia del conductor con la frecuencia, también habrá un incremento de las pérdidas por histéresis y las corrientes de eddy o foucault (en el circuito magnético).

B- Calentamiento de cables y equipos, Las pérdidas son incrementadas en cables que conducen corrientes armónicas, lo que incrementa la

temperatura en los mismos. Las causas de las pérdidas adicionales incluyen:

- ✓ Un incremento en la resistencia aparente del conductor con la frecuencia, debido al efecto pelicular.
- ✓ Un aumento del valor eficaz de la corriente para una misma potencia activa consumida.
- ✓ Un incremento de las pérdidas dieléctricas en el aislamiento con la frecuencia, si el cable es sometido a distorsiones de tensión no despreciables.
- ✓ El fenómeno relacionado con la proximidad, de envolventes, de pantallas (conductores revestidos) puestas a tierra en ambos extremos, entre otros.

De una forma general todos los equipos sometidos a tensiones o atravesados por corrientes armónicas, sufren más pérdidas y deberán ser objeto de una eventual disminución de clase. Este sobredimensionamiento no tiene en cuenta sin embargo el aumento del calentamiento debido al efecto pelicular en los conductores.

Muchas de las anomalías que ocasiona la circulación de corrientes de frecuencias que no son propiamente del sistema, a través de él y de los equipos conectados, causando en ocasiones problemas de operación, tanto a la empresa suministradora como al usuario, se deben a las siguientes razones:

- a. Las frecuencias del flujo de potencia de tensiones y corrientes sobrepuestas a las ondas de flujo de 50 ó 60 ciclos, originan altas tensiones, esfuerzos en los aislamientos, esfuerzos térmicos e incrementan las pérdidas eléctricas.
- b. Muchos aparatos eléctricos son diseñados para aceptar y operar correctamente en potencia de 50 ó 60 ciclos, pero no responden bien a cantidades significantes de potencia a diferentes frecuencias. Esto puede causar ruido en el equipo eléctrico, problemas mecánicos y en el peor de los casos falla del equipo.
- c. Los armónicos generados en un sistema eléctrico pueden crear niveles altos de ruido eléctrico que interfieran con las líneas telefónicas cercanas.
- d. La presencia de frecuencias diferentes a la nominal en la tensión y en la corriente, regularmente no son detectables por un monitoreo normal, por mediciones o por el equipo de control; por lo que su presencia no se nota.



La tabla C, muestra también algunos efectos dañinos que ocasionan los armónicos sobre los elementos eléctricos.

Efectos de los armónicos	Causas	Consecuencias
Sobre los conductores	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Las intensidades armónicas provocan el aumento de la IRMS ✓ El efecto pelicular (efecto "skin") reduce la sección efectiva de los conductores a medida que aumenta la frecuencia 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disparos intempestivos de la protección. ✓ Sobrecalentamiento de los Conductores
Sobre el conductor de neutro	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cuando existe una carga trifásica mas neutro equilibrado que genere armónicos impares múltiplos de tres 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cierre de los armónicos homopolares sobre el neutro que provoca calentamiento y sobre intensidades
Sobre los transformadores	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aumento de la IRMS ✓ Las pérdidas por Foucault son proporcionales al cuadrado de la frecuencia, las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aumento de temperatura por efecto joule en los devanados ✓ Aumento en las pérdidas en el hierro
Sobre los motores	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Análogas de los transformadores y generación de un campo adicional al principal 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Análoga a los transformadores mas pérdidas de rendimiento
Sobre los condensadores	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disminución de la impedancia del condensador con el aumento de la frecuencia 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Envejecimiento prematuro, amplificación de los armónicos existentes.

Tabla C. Efectos de los armónicos en dispositivos eléctricos.

Se mencionan algunos efectos perjudiciales que ocasionan los armónicos en los aparatos y sistemas de poca corriente:

- El mal funcionamiento de ciertos aparatos que utilizan la tensión como referencia para el control de los semiconductores o como base de tiempos para la sincronización de ciertos equipos.
- Perturbaciones porque se crean campos electromagnéticos. Así, cuando los conductores de baja intensidad o de transmisión de datos están muy próximos a cables de gran potencia por los que circulan corrientes armónicas, pueden, por inducción, ser receptores de corrientes que pueden provocar fallos en el funcionamiento de los elementos conectados a ellos,
- Por último, la circulación de corrientes armónicas por el neutro provoca una caída de tensión en el conductor, lo que por su propia naturaleza provoca perturbaciones en los intercambios de información entre receptores inteligentes.

4.1.5 Efectos en los filtros pasivos.

En los filtros pasivos también pueden aparecer problemas de sobreesfuerzo del aislamiento por sobretensión o sobre corriente en sus elementos componentes.

Como estos filtros son los más empleados en la descontaminación armónica de los sistemas eléctricos debido a su bajo costo económico y facilidad de operación; también se hace necesario tener en cuenta en el diseño de los mismos la presencia de armónicos.

Existen numerosos equipos modernos que son muy sensibles a los cambios producidos en el voltaje de alimentación de los mismos. Entre ellos están: las computadoras, los modems, las tarjetas de electrónica compleja (de captación de datos, de comunicaciones, etc.), las cargas registradoras y muchos otros equipos domésticos y de oficina. Estos equipos al estar constituidos por complejas y delicadas configuraciones de elementos de baja potencia, necesitan de una fuente de alimentación muy estable que les provea de un voltaje dc de rizado casi nulo. Para ello necesitan de una fuente primaria de ac y de un bloque rectificador con fuente de voltaje estabilizada. Por esta razón los delicados circuitos son sometidos a variaciones notables en el lado dc de sus fuentes, afectando el funcionamiento de los mismos. Esta es la causa del re-arranque de computadoras y de la pérdida de control de las cajas registradoras sometidas a voltajes altamente contaminados. Además, los equipos con alto nivel de integración en sus elementos componentes que estén sometidos a voltajes distorsionados por armónicos durante prolongados períodos de tiempo, pueden presentar daños irreparables.

Los equipos electrónicos que necesitan censar las magnitudes de fase para tener una noción de tiempo con respecto a los comienzos de los períodos de las corrientes y voltajes de alimentación, normalmente basan su funcionamiento en la detección del cruce por cero de las magnitudes que supervisa. Estas detecciones incorrectas pueden dar lugar a operaciones erróneas y en algunos casos al no funcionamiento de los equipos que controlan.

A- Efectos en los transformadores.

Aunque los transformadores son dimensionados para la operación con cargas de 60 Hz, cuando estos alimentan cargas no lineales evidencian un incremento notable en sus pérdidas; tanto en las de núcleo como las de cobre.

Corrientes armónicas de frecuencias más altas provocan pérdidas de núcleo incrementadas en proporción al cuadrado de la corriente de carga *rms* y en

proporción al cuadrado de frecuencia debido al efecto pelicular. El incremento en las pérdidas de cobre se debe a la circulación de corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa transportadas en los conductores de fase provenientes de cargas generadoras de armónicos monofásicas y trifásicas, y a la circulación de las corrientes armónicas triples de secuencia cero que son transportadas en los conductores neutros desde las cargas monolineales generadoras de armónicos.

B- Los armónicos y el efecto pelicular.

El efecto pelicular es el fenómeno donde las corrientes alternas de alta frecuencia tienden a fluir cerca de la superficie más externa de un conductor que fluir cerca de su centro. Esto se debe al hecho de que las concatenaciones de flujo no son de densidad constante a través del conductor, sino que tienden a decrecer cerca de la superficie más exterior, disminuyendo la inductancia e incrementando el flujo de corriente. El resultado neto del efecto pelicular es que el área transversal efectiva del conductor es reducida a medida que la frecuencia es incrementada. Mientras mayor es la frecuencia, menor es el área transversal y mayor es la resistencia. Cuando una corriente de carga armónica esta fluyendo en un conductor, la resistencia en corriente alterna equivalente, para el conductor es elevada, aumentando las pérdidas de cobre.

C- Efectos en los condensadores.

La impedancia de los condensadores disminuye al aumentar la frecuencia, la tensión está deformada, por los condensadores que se usan para la corrección del factor de potencia circulan corrientes armónicas relativamente importantes. Por otra parte, la existencia de inductancias en algún punto de la instalación tiene el riesgo de que se produzcan resonancias con los condensadores, lo que puede hacer aumentar mucho la amplitud de los armónicos en los mismos. Este fenómeno de resonancia puede ocasionar que sea perforado el aislamiento de los capacitores, provocando daños severos.

En la práctica, no se recomienda conectar condensadores en instalaciones que tengan una tasa de distorsión armónica superior al 8%.

D- Esquema equivalente de una instalación tipo.

Para proceder al análisis armónico de una instalación, se realiza una modelización de la red considerando las cargas no lineales como fuentes de intensidad armónicas.

Representado una instalación que se han agrupado todas las cargas de la instalación en tres tipos:

- Cargas generadoras de armónicos.
- Cargas no generadoras (lineales).
- Condensadores para compensación de la energía reactiva.

E- FRECUENCIAS DE LOS ARMONICOS.

Las frecuencias de los armónicos que más problemas generan en el flujo de potencia, son aquellas que son múltiplos enteros de la fundamental como son: 120, 180, 240, 300 y 360 ciclos/segundos y las que siguen. Obsérvese que la frecuencia del sistema es el primer armónico.

En contraste las frecuencias no armónicas, por ejemplo 217 ciclos/segundo, generalmente son generadas e inyectadas al sistema de transmisión y distribución con algún objetivo especial. Estos casos son producidos deliberadamente o en algunos casos inadvertidamente.

Es más difícil detectar una armónica que no es múltiplo de la frecuencia fundamental, porque no altera la longitud de onda de la misma manera, esto significa que no se ve un cambio estable en el osciloscopio cuando se estudia la onda, sin embargo, una vez que se detecta es mucho más fácil identificar su origen.

F- DIFERENTES FORMAS DE ONDA DE LA TENSION Y LA CORRIENTE.

El resultado de la presencia de cargas no lineales es que la forma de onda de la corriente y la tensión en el flujo de potencia pueden ser muy variables.

De hecho como la presencia de armónicas significa que la carga es no lineal, la forma de onda de la tensión y corriente son diferentes, ó mejor dicho significativamente diferentes. Es importante observar como la distorsión armónica para un sistema de potencia es medido y reportado en base a la tensión, ya que un sistema de potencia es diseñado y se espera que opere como una fuente de tensión constante. Sin embargo, los sistemas de potencia son casi una fuente de tensión constante, las cargas no lineales usualmente originan más distorsión en la corriente que en la tensión.

G- INDICES DE DISTORSION ARMONICA.

El método más usado para medir la distorsión armónica en un sistema de potencia es la distorsión total armónica (THD), este puede ser calculado por la corriente o para la tensión, dependiendo de donde se quiera medir la distorsión.

Hay al menos otros dos índices usados en el análisis armónico, generalmente aplicables a circunstancias especiales. Esto incluye el factor de influencia telefónica, que compara el contenido armónico en relación al sistema telefónico, el otro índice es el factor K que es útil para estimar el impacto de las armónicas en las pérdidas eléctricas. Sin embargo, en la mayoría de los casos donde las armónicas son estudiadas en un sistema de potencia para identificar su fuente o diseñar como deshacerse de ellas, el índice de distorsión más apropiada es el THD, medido por separado para la tensión y para la corriente.

La adquisición de datos de una forma periódica (cada 30 min) durante un intervalo de tiempo amplio y el análisis posterior de estos registros, de forma diaria y semanal, para cada orden de armónico y para THD, puede utilizarse como metodología para este tipo de estudios.

En algunos circuitos, una semana de medición puede tomarse como representativa, siempre y cuando la curva de carga sea aproximadamente constante durante el mes.

H- ESTUDIO DE LOS ARMONICOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.

Análisis de armónicos en el dominio de la frecuencia es en algunos casos útil, para estos fenómenos, la contribución armónica por aparato disminuye a medida que más aparatos son incluidos. En general, el factor de diversidad y la diversidad de fase, son las razones más importantes de porque los armónicos de menor orden disminuyen cuando se incrementa el tamaño del grupo, y la atenuación es el mayor fenómeno que reduce la magnitud de las armónicas de mayor nivel.

El factor de coincidencia armónico se define de la siguiente manera.

$$HC = \frac{\text{Distorsion armonica total de grupo de usuarios}}{\text{Sumatorias de las distorsiones armónicas individuales}}$$

En general en la presencia de muchas fuentes similares de armónicos, el nivel de armónicos en el sistema tiende a adquirir un nivel de saturación, en donde el factor de coincidencia reduce su contribución a valores del 70 %.

I- CONTENIDO NORMAL DE ARMONICOS.

Los armónicos crean problemas sólo cuando interfieren con la operación propia del equipo, incrementando los niveles de corriente a un valor de saturación o sobrecalentamiento del equipo o cuando causan otros problemas similares.



También incrementan las pérdidas eléctricas y los esfuerzos térmicos y eléctricos sobre los equipos.

Los armónicos que generalmente originan son daños al equipo por sobrecalentamiento de devanados y en los circuitos eléctricos, esta es una acción que destruye los equipos por una pérdida de vida acelerada, los daños se pueden presentar pero no son reconocidos que fueron originados por armónicos. El nivel de armónicos presente puede estar justamente abajo del nivel que pueden causar problemas, incrementar este valor límite puede presentarse en cualquier momento y pasar a un valor donde no se pueden tolerar.

En la tabla D se puede visualizar los límites de Distorsión de Corriente Armónica para Sistemas de Distribución (120 V hasta 69,000 V),

Máxima distorsión de corriente en porciento de la carga (IL)						
Orden de los armónicos (armónicos impares)						
ISC/IL	2-11	11-16	17-22	23-34	Mayor de 34	Demanda Total de distorsión
< 20*	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 < 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100<1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20
Los armónicos pares se limitan al 25 % del límite del armónico impar superior						
* Todos los equipos de generación están limitados a estos valores de distorsión independientemente de la razón Isc / IL						
Donde: Isc: máxima corriente de cortocircuito en PCC, A IL: máxima corriente de carga (componente fundamental) en PCC, A						

Tabla D. Orden de los armónicos

Se recomienda que la corriente de carga sea calculada como la corriente promedio de la demanda máxima para los doce meses precedentes.

Como puede verse en la tabla anterior la estándar de IEEE también fija límites del total de distorsión armónica que puede existir en cualquier parte de un sistema de potencia y de cualquiera de los armónicos que puedan estar presentes. Se recomienda no más del 5 % del total de distorsión armónica en el nivel de distribución (todas las tensiones entre 2.3 y 69 kV), con no más del 3 % de distorsión atribuible a cualquier armónica. El nivel recomendado de THD es menor

para mayores tensiones, 2.5 % de 69 a 13.8 kV con ninguna contribución individual mayor de 1.5 %, para mayores tensiones el límite es 1.5 % de THD total con no más del 1 % de cualquier armónica. En general los niveles de THD en un sistema de potencia son menores a mayores tensiones, esto se debe a que es menos posible que se disipe la energía de los armónicos y por tanto se propaga a través del sistema.

J- FLUJO DE POTENCIA ARMÓNICO.

El flujo de potencia armónico de sus fuentes de generación a través del sistema de potencia hacia las cargas, obedece exactamente las mismas leyes que para la frecuencia de 50 y 60 ciclos. Los armónicos atraviesan los transformadores, motores de todo tipo y la mayoría de otros equipos con una pequeña atenuación. La excepción son los equipos construidos específicamente para bloquear o adsorber la distorsión armónica, como ciertos tipos de combinación de transformadores conectados en delta-estrella, que fuerzan a ciertas armónicas a cancelarse ellas mismas por diferencias de fase.

Adicionalmente los alimentadores con capacitores serie o paralelo, situaciones con severo desbalance, líneas largas con significativa capacitancia serie pueden amplificar las armónicas. La capacitancia causa resonancia a ciertas frecuencias, teniendo como resultado que estas líneas puedan llevar corrientes armónicas de varias veces la magnitud que les fue inyectada.

K- METODOS PARA ANALIZAR LOS ARMONICOS.

Existe una gran variedad de métodos analíticos usados para estudiar los armónicos y evaluar las soluciones de su problemática. Todos los métodos de análisis de armónicos emplean aproximaciones, linealizaciones de uno u otro tipo, presentando ventajas y desventajas los diferentes métodos, ninguno de ellos es el mejor en todas las situaciones. Ocasionalmente, dos o más métodos nos darán ligeras diferencias en los resultados cuando se usan para estudiar el mismo problema, en muy raras ocasiones pueden tenerse recomendaciones contradictorias de cómo reducir los armónicos. En general, estos métodos pueden agruparse en cuatro principales categorías.

L- Recomendaciones para disminuir el efecto de los armónicos.

Usualmente la solución al problema de armónicos es eliminar los síntomas y no el origen, los aparatos que crean los armónicos generalmente constituyen una pequeña parte de la carga, eliminar su uso no es posible, modificar esos equipos para que no causen armónicos tampoco es factible. Lo que nos queda es reducir los síntomas ya sea incrementando la tolerancia del equipo y del sistema a los



armónicos o modificar los circuitos y los sistemas para reducir su impacto, atrapar, o bloquear los armónicos con filtros. Por supuesto hay excepciones. En casos de sobrecarga, daño de equipo o diseño inapropiado, estas causas que generan armónicos pueden ser corregidas, similarmente un aparato o equipo particular que produce un alto nivel de armónicos debe ser modificado o reemplazado.

Un aspecto que con frecuencia es mal evaluado, es que los armónicos han sido un problema reciente debido al efecto de adición y multiplicación de los mismos, la presencia de estos efectos es lo que causa problemas, individualmente ninguno es problemático por sí mismo. Por ejemplo, la distorsión armónica causada por un motor de inducción, que se usa para hacer circular aire para uso agrícola, puede haber sido tolerado por muchos años, pero inesperadamente causa problemas de flicker porque el conductor neutro se abrió. Es común en el caso de severos problemas de armónicas, que se ligen dos o más factores que contribuyan a agravar el problema, particularmente cuando se adiciona equipo nuevo o que existen cambios de equipo, siendo la sospecha del problema los nuevos equipos. Cuando se presentan causas simultáneas que generan altos niveles de armónicas, usualmente sólo una es la mayor causa del problema, contribuyendo las otras causas a crear resonancia o a ayudar en su propagación.

El primer paso que se recomienda en cualquier investigación sobre el problema de armónicas es inspeccionar el equipo y el circuito eléctrico. Estos problemas son causados o empeorados por cargas desbalanceadas, mala conexión a tierra, problemas con el conductor neutro, por problemas con equipo o por uso inapropiado. Esto puede ser identificado con una inspección cuidadosa con equipo apropiado.

Desde el punto de vista de sobretensiones transitorias y armónicas, disminuyendo la impedancia a tierra e incrementando la ampacidad del neutro con frecuencia se resuelven problemas de calidad de la potencia (incluyendo armónicas). Los problemas de puesta a tierra contribuyen de un 33 a un 40% de los problemas relacionados con la calidad de energía.

Los filtros son elementos cuya impedancia varía con la frecuencia. También tienen el potencial de crear y amplificar el problema de las armónicas, a menos que cuidadosamente sean localizados y diseñados, en algunos casos un diagnóstico y diseño pobres, origina que el remedio sea peor que la enfermedad. Los filtros pasivos son los más simples, más económicos, pero menos flexibles y efectivos para filtrar armónicas. Son elementos puramente pasivos, usados por las empresas como circuitos en paralelo en la entrada de los servicios con

problemas de generación de armónicas, evitando de esta manera que entren al sistema de distribución. También los filtros pueden instalarse directamente en un equipo particular donde existe un grave problema de generación de armónicas, evitando de esta manera que circulen en la instalación eléctrica del usuario.

4.2 Armónicas de corriente y tensión

Las armónicas son corrientes o tensiones cuya frecuencia son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la alimentación. Por ejemplo si la frecuencia fundamental es de 50 Hz, la segunda armónica tendrá una frecuencia de 100 Hz, la tercer de 150 Hz y así sucesivamente.

Actualmente las armónicas son un subproducto de la electrónica moderna, se manifiestan donde hay un gran número de ordenadores personales, motores de velocidad regulables (ASD) y otros equipos que absorben corriente en forma de impulsos. Cuando hay armónicas, la forma de la onda no se presenta en forma sinusoidal, sino más bien aparece distorsionada, decimos que estas ondas no son sinusoidales, la forma de onda de tensión y de corriente ya no representan una relación simple entre sí, de ahí el término de "no linealidad" que se les aplica.

A- Armónicas de corriente

Las armónicas son creadas por cargas no lineales que absorben corrientes en impulsos bruscos en vez de hacerlo suavemente en forma sinusoidal. Estos impulsos crean ondas de corrientes distorsionadas que originan a su vez corrientes armónicas de retorno hacia otras partes del sistema de alimentación.

Este fenómeno se manifiesta especialmente en lo equipos provistos de fuentes de alimentación de entrada con condensadores y diodos, tales como, ordenadores personales, UPS's y material electro médico.

Las causas eléctricas del fenómeno son que la tensión alterna de entrada, una vez rectificadas por los diodos, se utiliza para cargar un condensador de gran capacidad; entonces el equipo electrónico absorbe corriente de esta elevada tensión continua para alimentar el resto del circuito.

Normalmente, las fuentes de alimentación con condensadores y diodos que llevan incorporados los equipos de oficina son cargas monofásicas no lineales. Por el contrario en la plantas industriales, las causas más frecuentes de corrientes armónicas son cargas trifásicas no lineales, como motores de accionamiento controlados electrónicamente y UPS's



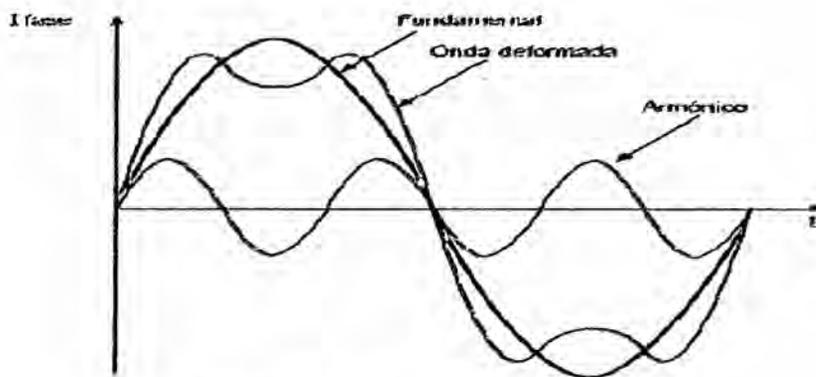


Fig.7- Imagen de una onda deformada

La variación en función del tiempo, de las magnitudes eléctricas de corriente y tensiones en las redes industriales alternas se aparta bastante de una sinusoidal pura (véase figura 7).

B- Armónicas de tensión

La relación entre la corriente armónica absorbida por las cargas no lineales y la impedancia de la fuente del transformador de alimentación se rige por la ley de Ohm, por lo que provoca armónicas de tensión, la impedancia de fuente la constituye el transformador de alimentación y los componentes del ramal.

La propia red de alimentación puede ser una fuente indirecta de armónicas de tensión, todas las cargas que comparten un transformador o un ramal con fuerte carga armónica podrían resultar afectadas por las armónicas de tensión producidas. En un ambiente de oficinas, los ordenadores personales son particularmente sensibles a las armónicas de tensión.

El rendimiento de la fuente de alimentación con condensadores y diodos depende críticamente de la magnitud de la tensión de pico. Las armónicas de tensión pueden provocar un achatamiento de los máximos de amplitud de la onda de tensión, reduciendo de este modo la tensión de pico. En el peor de los casos se puede producir un "reset" del ordenador a causa del fallo en la alimentación.

En el entorno industrial, los motores de inducción y capacitores para la corrección del factor de potencia también pueden resultar gravemente afectados por las armónicas de tensión.

Los condensadores de corrección de factor de potencia pueden formar un circuito resonante con las partes inductivas de un sistema de distribución de corriente. Si la frecuencia resonante está cerca de la tensión armónica, la corriente armónica resultante podría aumentar considerablemente, sobrecargando los condensadores y quemando los fusibles de éstos. La salida de condensador por falla, desintoniza el circuito y la resonancia desaparece.



C- Componentes simétricos

Los circuitos trifásicos presentan ciertas peculiaridades con respecto a las armónicas superiores de tensiones y corrientes. El método de componentes simétricos es muy usado en los sistemas de potencia como herramienta de cálculo, pudiendo extenderse al caso de la respuesta frente a armónicas de corriente. Las corrientes armónicas en sistemas balanceados pueden ser de secuencia positiva, negativa o nula (homopolar) como se observa en la Tabla E

Número de armónica	Secuencia	Número de armónica	Secuencia
1	Positiva	13	Positiva
3	Cero	15	Cero
5	Negativa	17	Negativa
7	Positiva	19	Positiva
9	Cero	21	Cero
11	Negativa	23	Negativa

Tabla E Componentes simétricas

Las corrientes armónicas de secuencia positiva se representan por fasores que rotan con la secuencia A-B-C, las de secuencia negativa poseen secuencia A-C-B, en cambio las triple o de secuencia cero se encuentran en fase.

Los sistemas de distribución trifásica de tres conductores bajo estado estacionario no experimentan corrientes armónicas de secuencia cero, no existiendo camino monofásico para su circulación, como sería la existencia de un neutro.

D- Maquinas rotativas

Los motores, en general, no introducen armónicas importantes, salvo el caso de algunos motores monofásicos de potencia fraccionaria que presentan corrientes con ondas triangulares. Las pequeñas máquinas síncronas son sin embargo generadores que pueden tener una incidencia sobre el calentamiento permanente de las resistencias de puesta a tierra del neutro de los alternadores, como también afecta al buen desempeño de los relés amperimétricos de protección contra los defectos de aislamiento. La Tabla F muestra las armónicas típicas producidas por un motor de rotor bobinado, dando las posibles causas.

Frecuencia en Hz	Corriente % Fundamental	Causa
20	3	Desbalance de polos
40	2,4	Desbalance de las fases rotóricas
50	100	Fundamental
80	2,3	Desbalance de polos
220	2,9	Armónica 5ª y 7ª
320	3	Armónica 5ª y 7ª
480	0,3	Armónica 11ª y 13ª
580	0,4	Armónica 11ª y 13ª

Tabla F Armónicas típicas de motor rotor bobinado

E- Horno a Arco

Las armónicas producidas por un horno de arco, usado en la producción de acero, son imprevisibles debido a la variación aleatoria del arco. La corriente del arco es no periódica y su análisis revela un espectro continuo, incluyendo armónicas de orden entera y fraccionaria (interarmónicas). En tanto, mediciones indican que armónicas enteras entre la 2ª y la 7ª predominan sobre las demás, siendo que su amplitud decae con el orden.

Cuando el horno actúa en el refinado del material, la forma de onda se torna simétrica desapareciendo las armónicas pares. En la fase de fusión típicamente, las corrientes armónicas presentan amplitud de hasta 8% de la fundamental, en cuanto en el refinado, valores típicos son entorno al 2%.

F- Lámparas fluorescentes (con balasto electromagnético)

Las lámparas fluorescentes se prenden y apagan cada medio ciclo, pero el parpadeo es apenas perceptible a 50 o 60 Hz. El encendido ocurre a veces tras el cruce del voltaje por cero. Una vez encendida, la lámpara presenta característica de resistencia negativa.

Las formas de onda de corriente son ligeramente distorsionadas, puntiagudas y presentan un segundo pico característico. La armónica dominante es el tercero, en el orden del 15% a 20% de la fundamental

La típica forma de onda es presentada en la fig. 8.

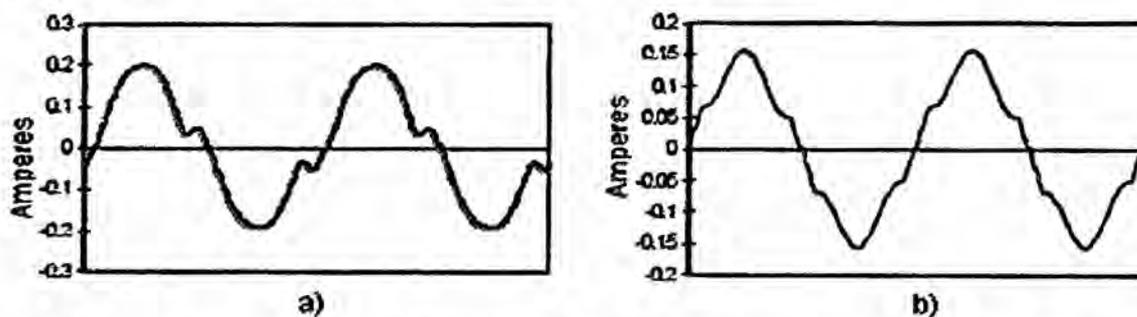


Fig. 8 Forma de onda de corriente de fluorescente a) Con balasto magnético THDi=18.5% b) Con balasto electrónico THDi=11.6%

Actualmente abundan fluorescentes con balastos electrónicos que presentan una menor distorsión armónica total de corriente (THDi) ante un fluorescente con balasto magnético de la misma potencia, como se puede observar en la figura de arriba.

G- Convertidores estáticos trifásicos

Los puentes rectificadores y en general los convertidores estáticos (diodos y tiristores) son generadores de corrientes armónicas. Así en un puente de Graetz, la corriente continua consumida hace aparecer una corriente no sinusoidal, que

A handwritten signature in black ink, located in the bottom right corner of the page.

cuando la carga es muy inductiva tiene forma escalonada (figura 9), o que tiene unos picos cuando al puente de diodo le sigue un condensador, como en el caso de la figura 9

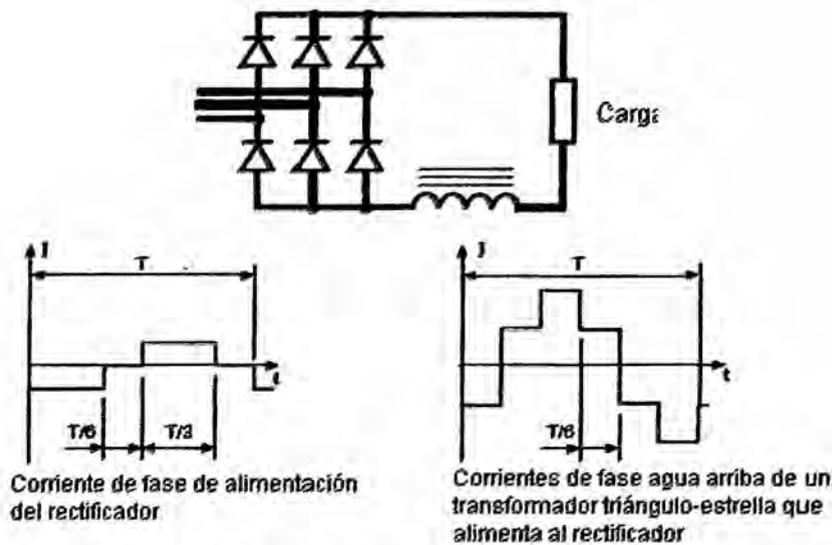


Fig. 9 Rectificador trifásico con carga inductiva

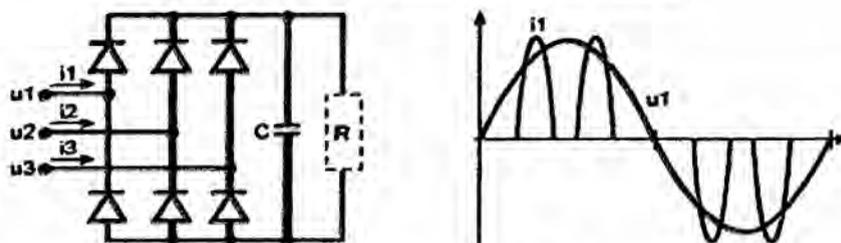


Fig. 10. Rectificador trifásico con carga capacitiva.

A pesar de tener forma diferente, las dos corrientes tienen los mismos componentes característicos. Los componentes de armónicas características de las crestas de la corriente de alimentación de los rectificadores tiene rango n (son de orden n), con $n = (k * p) \pm 1$ donde $k = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$ y $p = N^\circ$ de ramas del rectificador, por ejemplo:

- Puente de Graetz $p=6$
- Puente hexafásico $p=6$
- Puente dodecafásico $p=12$

De este modo, para los rectificadores citados, las armónicas presentes serán del orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, etc.

con $p=6$, y de orden 11, 13, 23, 25, etc.

Con $p=12$.

Estas armónicas, llamadas características, son de orden impar y sus intensidades, cuando están próximas a la forma ideal, es fácilmente constatable que las armónicas 5 / e 7 / tienen amplitudes bastante grandes, y que pueden ser suprimidas utilizando un puente dodecafásico ($p=12$).

Los espectros de corriente son sensiblemente diferentes a las nuevas componentes armónicas pares e impares, llamadas no características y de pequeña amplitud, y que modificada las amplitudes características por diversos factores:

En el caso de puente de tiristor, un desfase de las armónicas en función del ángulo de retardo del cebado.

- ✓ Los puentes mixtos diodos-tiristores son generadores de armónicas de orden par. Su empleo se limita a pequeñas potencias ya que la armónica de orden dos es muy molesta y difícil de eliminar.
- ✓ Los otros convertidores de potencia tales como los graduadores (reguladores), los ciclos convertidores, etc., tienen espectros variables y más ricos en armónicas que los rectificadores. Se destaca la sustitución por los rectificadores de técnicas PWM "*Pulse Width Modulation*", que trabajan con una frecuencia de corte de unos 20 KHz. Y que están diseñados para producir un nivel de armónicos muy bajo.

H- Electrodomésticos en general

La fuente de energía, constituida por un rectificador monofásico y un condensador, utilizada en electrodomésticos y ordenadores, debido al efecto acumulativo de estos aparatos en ausencia de filtrado, causan a veces, mayor distorsión que los convertidores individuales de gran potencia

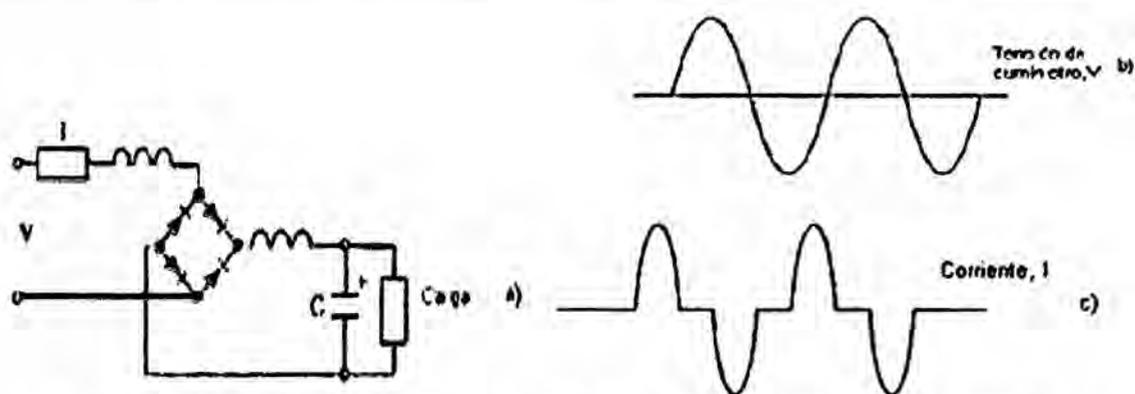


Fig. 11. Rectificador en puente monofásico a) Circuito. b) Tensión de alimentación. c) corriente

El rectificador en puente (figura 11) constituye en condiciones normales de funcionamiento, una fuente de energía muy económica y poco sensible a las variaciones de tensión de la red. Una gran parte de los equipos electrónicos modernos utilizan inversores cuya fuente de energía es de este tipo; también se emplea esta configuración en los aparatos de televisión y en los ordenadores personales.

El circuito de la figura 11 produce, en cada medio ciclo de la frecuencia fundamental, un pulso de corriente muy estrecho; debido al alto porcentaje de cargas del mismo tipo, estos impulsos se acumulan causando un considerable contenido armónica. El uso de la rectificación de media onda, habitual en los antiguos receptores de televisión, no está permitido de reducir la saturación asimétrica en los transformadores de distribución. Los receptores en color, requieren picos de corriente dos o tres veces mayores que los monocromáticos. Estudios realizados demuestran que la armónica dominante, la tercera, se acumula en el hilo neutro, originando fuertes corrientes en un conductor que debería tener una intensidad nula.

I- Corriente armónica en una red real

En la figura 12 es medida la corriente fundamental y armónica en la barra de 440V, cuya fuente de perturbación es un rectificador con la información de carga correspondiente. Como puede ser visto la 5ª armónica en este caso es de 28% correspondiente a 632 A de la fundamental.

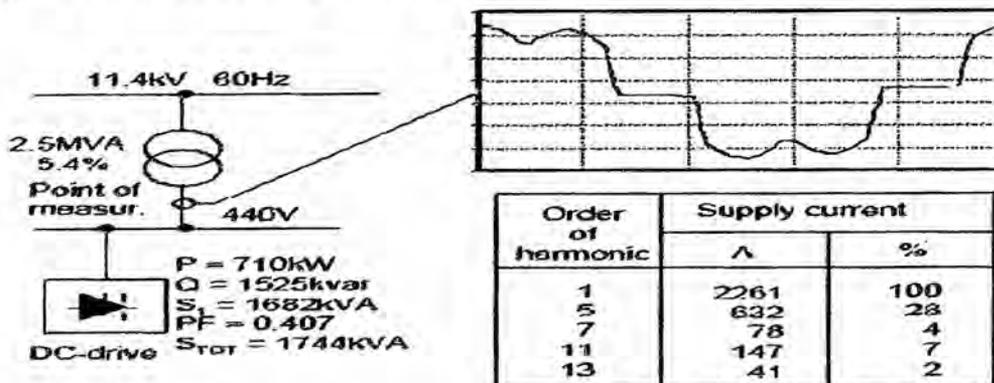


Fig. 12 Corriente fundamental y armónica del rectificador con alta carga

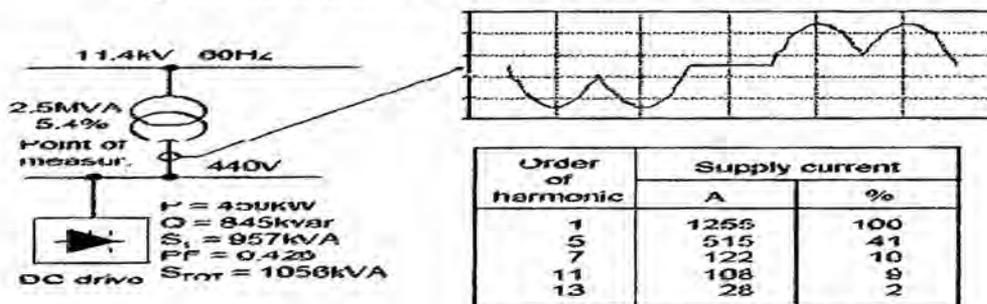


Fig. 13 Corriente fundamental y armónica del rectificador con baja carga

En la figura 13, el rectificador es el mismo que de la figura 12, pero con la carga disminuida. La corriente fundamental disminuye de 2261 A a 1255 A. Sin embargo el porcentaje de armónica es claramente aumentado. Para demostrar que los armónicos de estos tipos de cargas se suman aritméticamente, la medición fue realizada en uno de los variadores, luego en la barra principal.

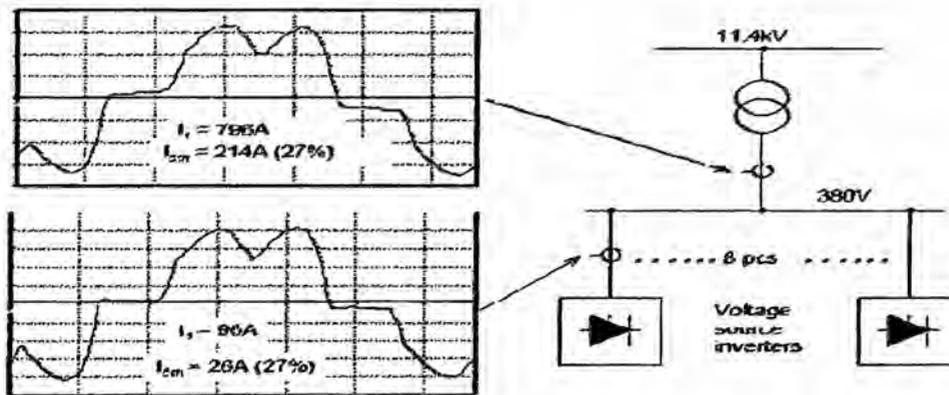


Fig. 14 Corriente medida de una fuente armónica.

K- Índice armónica

Tanto para las compañías eléctricas como a los usuarios, en la actualidad, representan una preocupación creciente la proliferación de los equipos perturbadores (no lineales), llevando a la necesidad de establecer índices armónicas con el propósito de valorar el contenido armónica en el sistema eléctrico; en el análisis de armónicas existen varios índices importantes usados para describir el efecto de las armónicas. En esta sección presentamos los índices como:

Distorsión armónica total (THD, *Total Harmonic Distortion*), Podemos definir a la distorsión armónica total, como una medida de la similitud entre la forma de onda y su componente fundamental. También representa una medida del valor eficaz, o sea el calentamiento producido por la armónica relativa a la fundamental.

4.3 Sistema Eléctrico bajo condiciones no Sinusoidales

El factor de potencia se define en la forma convencional, como el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente fundamentales, mientras que en presencia de cargas distorsionantes la definición ya no es válida. Por otro lado las potencias aparente y reactiva se modifican en gran medida por la presencia de armónicas.

4.3.1 Efectos sobre la potencia

La teoría convencional de potencia activa y reactiva tiene su validez físicamente confirmada apenas para sistemas, operando en régimen permanente y sin distorsión, en el caso monofásico³⁰. En el caso de un sistema trifásico, el mismo debe ser además balanceado (esa teoría considera al sistema trifásico como si fuese compuesto por tres sistemas monofásicos independientes, sin considerar el acoplamiento entre las fases).

La potencia activa, o el valor medio de la potencia instantánea, definen el total de la energía que está siendo consumida o esta siendo entregada por la carga (funcionando como fuente de potencia) en cada frecuencia.

Los valores rms de la tensión y corriente obtenidas de la serie de Fourier son:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_k^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_{k,rms}^2} \quad , \quad I_{rms} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_k^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{k,rms}^2}$$

La potencia activa promedio armónica es dada por:

$$P_{prom} = \frac{1}{T} \int_T v(t)i(t)dt = \sum_{k=0}^{\infty} V_{k,rms} I_{k,rms} \cos(\theta_{vk} - \theta_{ik}) =$$

$$P_{0,prom} + P_{1,prom} + P_{2,prom} + P_{3,prom} + \dots + P_{\infty,prom}$$

Los términos de potencia armónica..., 2 3 + + *prom prom P P* son principalmente pérdidas y son usualmente menores a la potencia total. Sin embargo la pérdida por armónica puede ser parte sustancial de las pérdidas totales.

Se ve por la ecuación (2.2) que tanto el componente fundamental como las armónicas pueden producir potencia activa, si existen los mismos componentes espectrales de la tensión y corriente, y que su desfase no sea de 90°.

En cuanto a la potencia reactiva presente en cada frecuencia armónica, conocida como potencia reactiva de Budeanu se define como se lo demuestra en esta fórmula.

$$Q = \frac{1}{T} \int_T v(t)i(t)dt = \sum_{k=0}^{\infty} V_{k,rms} I_{k,rms} \sin(\theta_{vk} - \theta_{ik}) =$$

$$Q_{0,prom} + Q_{1,prom} + Q_{2,prom} + Q_{3,prom} + \dots + Q_{\infty,prom}$$

Para un valor de Q positivo en una determinada frecuencia, la carga no lineal se comporta como inductor y para un valor de Q negativo la carga se comporta como un capacitor en aquella frecuencia.

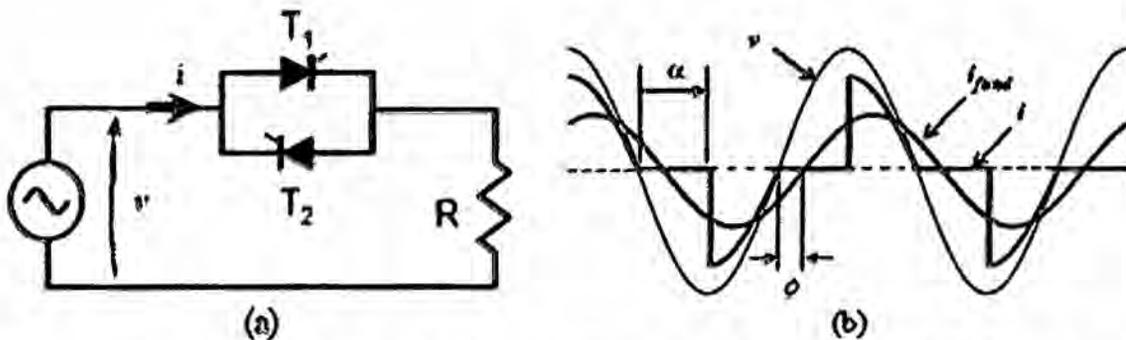


Fig. 15 (a) Fuente monofásica de alimentación de una lámpara a través de un "dimmer"; (b) formas de ondas de tensión y corriente

Cabe destacar que el concepto de potencia reactiva en la teoría convencional está en conexión directa con los elementos inductivos y capacitivos, estando inclusive el nombre "reactivo" relacionado con el término "reactancia". Para las cargas de la época en que esta teoría fue desarrollada, la idea de que la potencia reactiva esté relacionada con la energía almacenada en los elementos reactivos, era perfectamente correcto. Mas, si se toma un ejemplo de un circuito muy simple



y común como un controlador de lámpara incandescente ("*dimmer*") como se muestra en la figura 15(a), y su respectiva forma de onda, mostrado en la figura 15(b) vemos que existe un desfase entre el componente fundamental de la corriente y la tensión apenas por causa de la operación de los tiristores, sin que existan elementos reactivos (almacenadores de energía).

En principio digamos que la regulación a voluntad de la velocidad de los motores eléctricos es un régimen transitorio en el que se modifica la velocidad angular del conjunto motor-máquina accionada como consecuencia de una acción de mando determinada.

Recordemos que el comportamiento dinámico del conjunto motor-máquina accionada está regido por la siguiente ecuación diferencial:

$$T_m - T_r = J \cdot dO / dt$$

Donde T_m es el par motor, T_r el par resistente, J es el momento de inercia del conjunto motor-máquina accionada y O es la velocidad angular de dicho conjunto.

Por lo tanto, para que el conjunto modifique su velocidad angular se necesita variar el par motor para que sea distinto del par resistente, de manera de generar una aceleración angular. El proceso finaliza cuando se equilibra el par motor con el par resistente, estabilizándose la velocidad de giro del motor.

Como la cupla es el producto de la corriente por el flujo, además de un factor que caracteriza al tipo de máquina, esta variación del par motor generalmente está asociada a una variación de la corriente absorbida, la que no debe superar determinado límite por el calentamiento de los conductores involucrados.

En este estudio no deben dejarse de lado otros aspectos que también resultan importantes, como por ejemplo el consumo de energía disipada en forma de calor y las perturbaciones sobre la red de baja tensión.

Estas perturbaciones incluyen principalmente a los transitorios de conmutación, la generación de armónicas y las caídas de tensión (muy notables en los elementos de iluminación), que pueden afectar el funcionamiento de otros elementos conectados a la misma, lo que resulta crítico en las instalaciones con muchos motores que realizan frecuentes cambios de velocidad.

Para finalizar esta introducción digamos que los dispositivos de variación de velocidad pueden ser de operación manual (regulación manual) o por un dispositivo automático especial (regulación automática).



Aplicación a los motores asincrónicos trifásicos

Los motores asincrónicos son máquinas de velocidad esencialmente constante. Recordemos que la expresión que nos da el valor de la velocidad de un motor asincrónico en RPM es:

$$N = (1 - s) N_s = (1 - s) 60 f / p$$

Donde s representa el resbalamiento, N_s las RPM sincrónicas, f la frecuencia y p el número de pares de polos.

En consecuencia, para regular la velocidad se puede operar sobre los distintos componentes de la ecuación dada.

4.3.2 Cambio de frecuencia

La preferencia actual por la regulación a frecuencia variable se debe a la posibilidad de utilizar el sencillo y robusto motor de jaula de ardilla; cuyo mantenimiento es más fácil que el de un motor de contactos deslizantes, lo que resulta muy importante en máquinas que operan bajo condiciones ambientales difíciles. Además este tipo de motor eléctrico resulta más económico y compacto que los restantes.

Asimismo, este método permite transformar fácilmente un equipo de velocidad fija en un accionamiento de velocidad variable, sin realizar grandes modificaciones.

Con este tipo de regulación se puede obtener un amplio control de velocidades, con el máximo par disponible en todas las frecuencias con un elevado rendimiento. Si se prolonga la característica al cuadrante generador se puede obtener un frenado muy eficiente por reducción de frecuencia, con una recuperación de energía hacia la red de alimentación.

Los mismos se construyen generalmente con tiristores gobernados por un microprocesador que utiliza un algoritmo de control vectorial del flujo, y consisten básicamente en un convertidor estático alterna-alterna (cicloconvertidor) ó alterna-continua-alterna (convertidor de enlace), que permiten la modificación progresiva de la frecuencia aplicada, con la consiguiente modificación de la corriente y el par motor. En algunos casos se agregan filtros de armónicas.

En el cicloconvertidor se sintetiza una onda de menor frecuencia a partir de una alimentación polifásica de mayor frecuencia, conectando sucesivamente los terminales del motor a las distintas fases de la alimentación. La onda sintetizada generada es rica en armónicos y en algunos casos el circuito puede generar subarmónicos que podrían llegar a producir problemas si excitasen alguna resonancia mecánica del sistema.



Por otro lado, el cicloconvertidor ofrece una transformación simple de energía de buen rendimiento, permite la inversión del flujo de potencia para la regeneración y la transmisión de la corriente reactiva; proporcionando una gama de frecuencias de trabajo que va desde valores cercanos a cero hasta casi la mitad de la frecuencia de alimentación, con fácil inversión de fase para invertir el sentido de rotación.

En ciertos casos este tipo de convertidor se emplea en motores asincrónicos de rotor bobinado con alimentación doble, estando el estator conectado a la red y el rotor al convertidor.

La tensión y frecuencia de salida se controlan por la duración relativa de las conexiones con las distintas polaridades (modulación del ancho de pulso) de manera de conservar constante el cociente tensión / frecuencia para mantener el valor del flujo magnético en el motor.

Aunque la onda de tensión obtenida no es sinusoidal, la onda de corriente tiende a serlo por efecto de las inductancias presentes. Además, de este modo se obtiene una amplia gama de frecuencias por encima y por debajo de la correspondiente al suministro, pero exige dispositivos adicionales c.c./c.a. para asegurar el flujo de potencia recuperada.

Hay que considerar que las corrientes poliarmónicas generan un calentamiento adicional que disminuye el rendimiento y puede llegar a reducir el par (por ejemplo, el 5º armónico produce un campo giratorio inverso).

También cabe acotar que la vibración de los motores aumenta cuando se los alimentan con convertidores electrónicos de frecuencia y que la componente de alta frecuencia de la tensión de modo común de los convertidores de frecuencia puede causar un acoplamiento con la tierra a través de la capacidad que se forma en los rodamientos, donde las pistas actúan como armaduras y la capa de grasa como dieléctrico.

Estos convertidores poseen protecciones contra asimetría, falla de tiristores, sobre temperatura y sobrecarga; además de vigilancia del tiempo de arranque con limitación de la corriente, control de servicio con inversión de marcha, optimización del factor de potencia a carga parcial, maximización del ahorro de energía durante el proceso.

4.3.3 Cambio del resbalamiento

El resbalamiento varía con la carga, pero la variación de la carga no proporciona un método práctico de control de la velocidad. Sin embargo, es posible cambiar la



característica par/velocidad de varias maneras, de modo que para cada par de carga se necesita un valor de s distinto.

Estos métodos proporcionan una mala utilización de la potencia y capacidad del motor, pero el control suele ser sencillo y justificable en algunas aplicaciones. En el caso de variación de la tensión se pueden utilizar tiristores conectados en serie con el estator para interrumpir el paso de la corriente durante una fracción del período (control de fase) o en algunos períodos completos (encendido alternado), reduciéndose así la tensión media aplicada.

El control de fase produce armónicos de orden elevado, mientras que el encendido intermitente puede generar subarmónicos que podrían entrar en resonancia con el sistema mecánico.

En el caso de variación de la resistencia rotórica se aprovecha la propiedad de los motores asíncronos de modificar la velocidad a la que se produce la máxima cupla variando la resistencia del circuito rotórico. En este método, por medios manuales o automáticos, en forma continua o escalonada, se va modificando la resistencia rotórica mediante un reóstato conectado a los anillos rozantes del motor de rotor bobinado.

Si se sustituye la resistencia por un elemento activo, la energía no se desperdicia y se puede alcanzar velocidades súper sincrónicas y corregir el factor de potencia. De esta manera, inyectando una tensión secundaria de frecuencia de resbalamiento y con un ángulo de fase determinado se puede variar el resbalamiento resultante e introducir una componente reactiva adecuada.

Un método para lograr esto consiste en acoplar mecánicamente un segundo motor asíncrono y alimentarlo de los anillos rozantes del primero (control en cascada), otro es utilizar un convertidor de frecuencia de colector y un tercero es emplear un motor polifásico de inducción a colector con rotor alimentado (motor Schräge). Dado que estos métodos en la actualidad sólo tienen un interés meramente académico no serán desarrollados.

4.3.4 Variadores de velocidad y arrancadores electrónicos

El comando y protección electrónica de motores provee un desempeño mayor que las soluciones tradicionales electromecánicas; cuando la necesidad sea arrancar un motor, la opción será elegir entre los métodos tradicionales electromecánicos de arranque (directo o a tensión reducida como estrella triángulo o autotransformador para motores jaula, o con resistencias rotóricas para motores de rotor bobinado, entre otros), y un arrancador electrónico progresivo.



Si las necesidades de la aplicación son de variar velocidad y controlar el par, las opciones son utilizar alguna solución mecánica, un motor especial (de corriente continua, servo, etc.), ó un motor asincrónico jaula de ardilla con variador de frecuencia.

Los variadores de velocidad son dispositivos electrónicos que permiten variar la velocidad y la cupla de los motores asincrónicos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables.

Se utilizan estos equipos cuando las necesidades de la aplicación sean:

- Dominio de par y la velocidad
- Regulación sin golpes mecánicos
- Movimientos complejos
- Mecánica delicada
- Variadores de velocidad

4.4 El motor

Los variadores de velocidad están preparados para trabajar con motores trifásicos asincrónicos de rotor jaula. La tensión de alimentación del motor no podrá ser mayor que la tensión de red.

A tensión y frecuencia de placa del motor se comporta de acuerdo al gráfico siguiente:

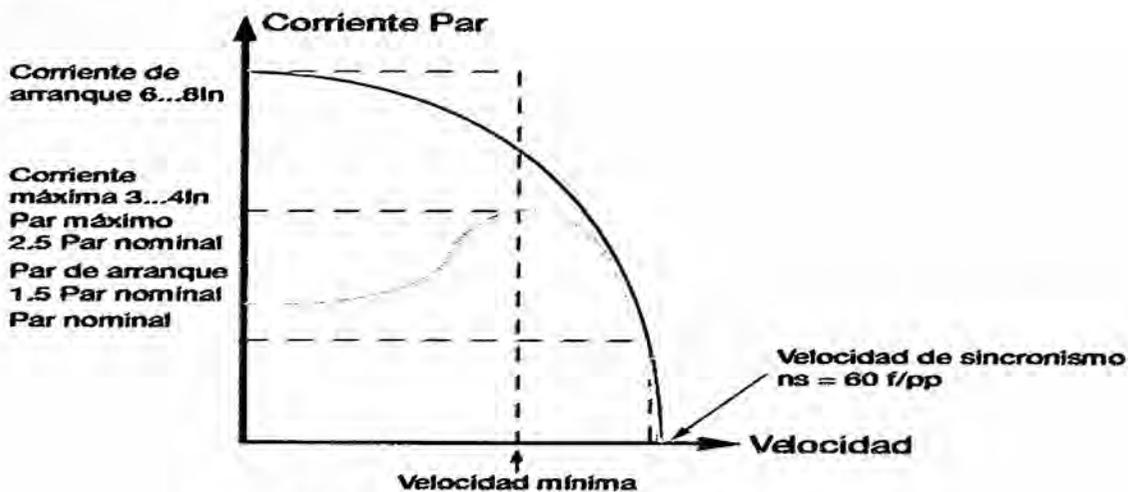


Fig.16: Funcionamiento del motor controlado

El dimensionamiento del motor debe ser tal que la cupla resistente de la carga no supere la cupla nominal del motor, y que la diferencia entre una y otra provea la cupla acelerante y desacelerante suficiente para cumplir los tiempos de arranque y parada.



4.4.1 El convertidor de frecuencia

Se denominan así a los variadores de velocidad que rectifican la tensión alterna de red (monofásica o trifásica), y por medio de seis transistores trabajando en modulación de ancho de pulso generan una corriente trifásica de frecuencia y tensión variable. Un transistor más, llamado de frenado, permite direccionar la energía que devuelve el motor (durante el frenado regenerativo) hacia una resistencia exterior. A continuación se muestra un diagrama electrónico típico:

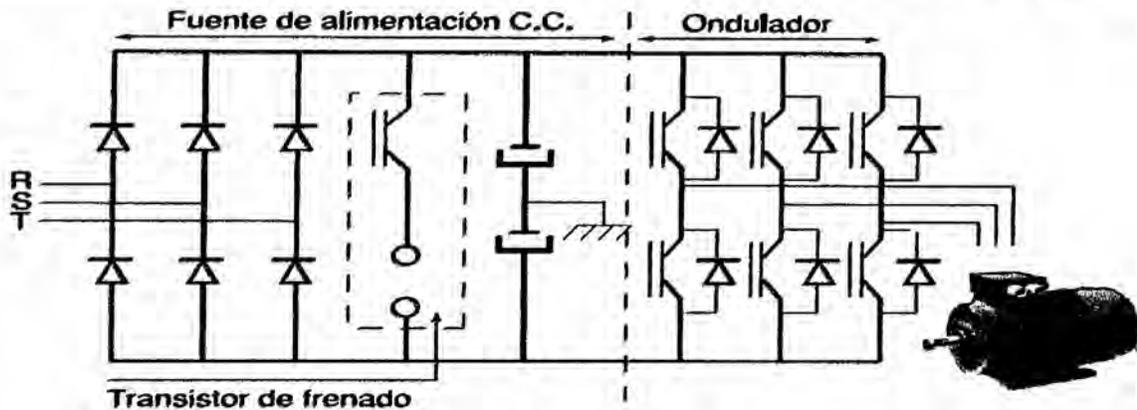


Fig.17: Diagrama de un convertidor de frecuencia

La estrategia de disparo de los transistores del ondulador es realizada por un microprocesador que, para lograr el máximo desempeño del motor dentro de todo el rango de velocidad, utiliza un algoritmo de control vectorial de flujo.

Este algoritmo por medio del conocimiento de los parámetros del motor y las variables de funcionamiento (tensión, corriente, frecuencia, etc.), realiza un control preciso del flujo magnético en el motor manteniéndolo constante independientemente de la frecuencia de trabajo. Al ser el flujo constante, el par provisto por el motor también lo será.

En el gráfico se observa que desde 1Hz hasta los 50 Hz el par nominal del motor

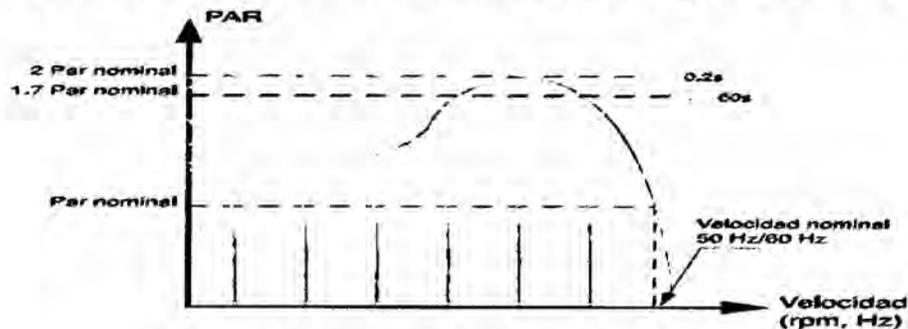


Fig.18: Grafico de variaciones de frecuencia

Está disponible para uso permanente, el 170% del par nominal está disponible durante 60 segundos y el 200% del par nominal está disponible durante 0,2 seg.

4.4.2 Selección de un variador de velocidad

Para definir el equipo más adecuado para resolver una aplicación de variación de velocidad, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- **Tipo de carga:** Par constante, par variable, potencia constante, cargas por impulsos.
- **Tipo de motor:** De inducción rotor jaula ardilla o bobinado, corriente y potencia nominal, factor de servicio, rango de voltaje.
- **Rangos de funcionamiento:** Velocidades máximas y mínimas. Verificar necesidad de ventilación forzada del motor.
- **Par en el arranque:** Verificar que no supere los permitidos por el variador. Si supera el 170% del par nominal es conveniente sobredimensionar al variador.
- **Frenado regenerativo:** Cargas de gran inercia, ciclos rápidos y movimientos verticales requieren de resistencia de frenado exterior.
- **Condiciones ambientales:** Temperatura ambiente, humedad, altura, tipo de gabinete y ventilación.
- **Aplicación multimotor:** Prever protección térmica individual para cada motor. La suma de las potencias de todos los motores será la nominal del variador.
- **Consideraciones de la red:** Micro interrupciones, fluctuaciones de tensión, armónicas, factor de potencia, corriente de línea disponible, transformadores de aislación.
- **Consideraciones de la aplicación:** Protección del motor por sobre temperatura y/o sobrecarga, contactor de aislación, bypass, re arranque automático, control automático de la velocidad.
- **Aplicaciones especiales:** Compatibilidad electromagnética, ruido audible del motor, bombeo, ventiladores y sopladores, motores en paralelo, etc.

4.4.3 Circuito recomendado

El circuito para utilizar un variador debe constar con algunos de los siguientes elementos:

- a- **Interrupción automática:** Su elección está determinada por las consideraciones La corriente de línea corresponde a la corriente absorbida por el variador a la potencia nominal de utilización, en una red impedante que limite la corriente de cortocircuito a:
 - 22kA para una tensión de alimentación de 400v-50Hz.



- 65kA para una tensión de alimentación de 460v-60Hz.

b- Contactor de línea: Este elemento garantiza un seccionamiento automático del circuito en caso de una emergencia o en paradas por fallas. Su uso junto con el interruptor automático garantiza la coordinación tipo 2 de la salida y facilita las tareas de puesta en marcha, explotación y mantenimiento.

La selección es en función de la potencia nominal y de la corriente nominal del motor en servicio S1 y categoría de empleo AC1

c- Inductancia de línea: Estas inductancias permiten garantizar una mejor protección contra las sobretensiones de red, y reducir el índice de armónicos de corriente que produce el variador, mejorando a la vez la distorsión de la tensión en el punto de conexión.

Esta reducción de armónicos determina una disminución del valor rms de corriente tomado de la fuente de alimentación, y una reducción del valor rms de corriente tomado por los componentes de la etapa de entrada del inversor (rectificador, contactor de precarga, capacitores).

La utilización de inductancias de línea está especialmente recomendada en los siguientes casos:

- Red muy perturbada por otros receptores (parásitos ,sobretensiones)
- Red de alimentación con desequilibrio de tensión entre fases >1,8% de la tensión nominal.
- Variador alimentado por una línea muy poca impedancia (cerca de transformadores de potencia superior a 10 veces el calibre del variador). La inductancia de línea mínima corresponde a una corriente de cortocircuito I_{cc} de 22000 A
- Instalación de un número elevado de convertidores de frecuencia en la misma línea.
- Reducción de la sobrecarga de los condensadores de mejora del cos
- Si la instalación incluye una batería de compensación de factor de potencia.

La selección es de acuerdo a la corriente nominal del variador y su frecuencia de conmutación. Existen inductancias estándar para cada tipo de variador.

d- Filtro de radio perturbaciones: estos filtros permiten limitar la propagación de los parásitos que generan los variadores por conducción, y



que podrían perturbar a determinados receptores situados en las proximidades del aparato (radio, televisión, sistemas de audio, etc.).

Estos filtros sólo pueden utilizarse en redes de tipo TN (Puesta al neutro) y TT (neutro a tierra).

Existen filtros estándar para cada tipo de variador. Algunos variadores los traen incorporados de origen.

- e- **Resistencia de frenado:** Su función es disipar la energía de frenado, permitiendo el uso del variador en los cuadrantes 2 y 4 del diagrama par-velocidad. De este modo se logra el máximo aprovechamiento del par del motor, durante el momento de frenado y se conoce como frenado dinámico.

Normalmente es un opcional ya que sólo es necesaria en aplicaciones donde se necesitan altos pares de frenado.

La instalación de esta resistencia es muy sencilla: se debe ubicar fuera del gabinete para permitir su correcta disipación, y el variador posee una bornera donde se conecta directamente. De acuerdo al factor de marcha del motor se determina la potencia que deberá disipar la resistencia. Existen tablas para realizar esta selección. El valor óhmico de la resistencia es característico del variador y no debe ser modificado.

f- La instalación del convertidor de frecuencia

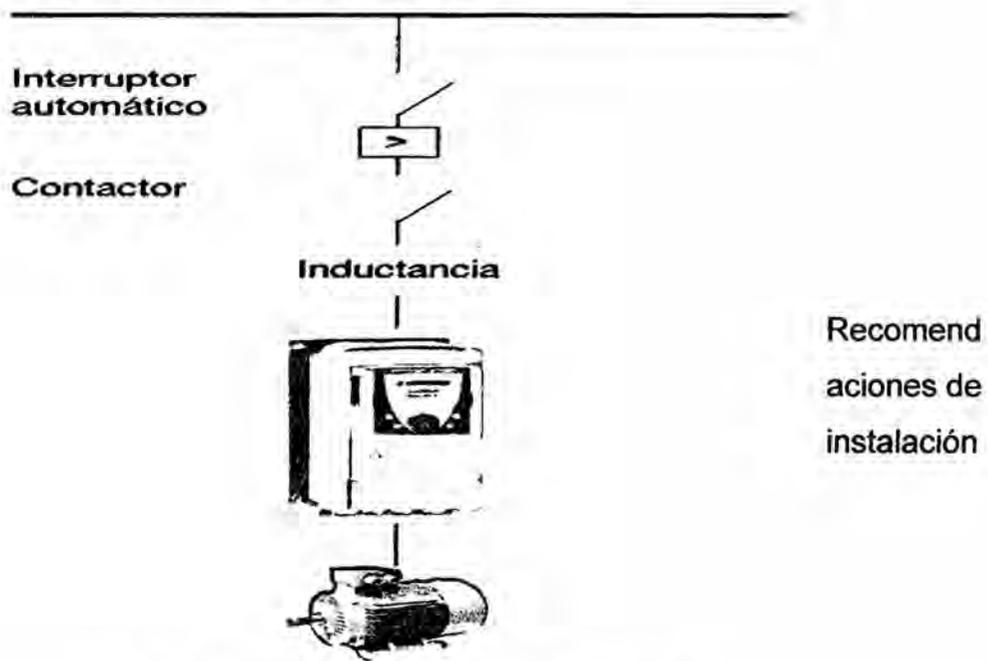


Fig.19: Representación unifilar de un convertidos de frecuencia

g- Principio de funcionamiento

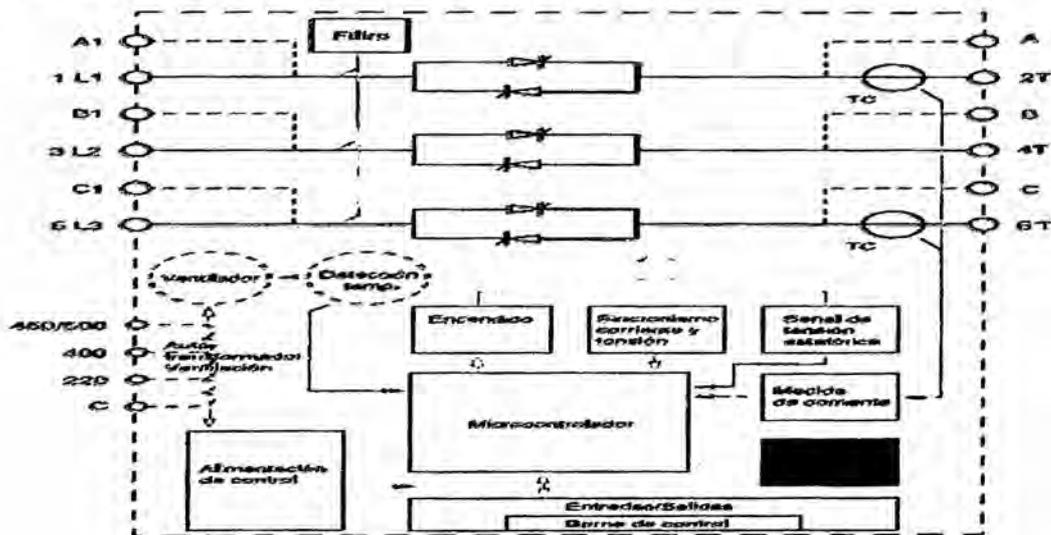


Fig.20: Diagrama del principio de funcionamiento

Son equipos electrónicos tiristorizados que, mediante el control de las tres fases del motor asincrónico, regulan la tensión y la corriente durante su arranque y la parada, realizando un control efectivo del par.

Los sensores de corriente incorporados le envían información al microprocesador, para regular el par ante las diferentes condiciones de carga y proteger al motor de sobrecargas.

4.5. Descripción del funcionamiento

Los variadores son convertidores de energía encargados de modular la energía que recibe el motor. Otra definición sería, los variadores de velocidad son dispositivos que permiten variar la velocidad y la acopla de los motores asíncronos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables.

Los variadores de velocidad son dispositivos electrónicos que permiten variar la velocidad y la cupla de los motores asíncronos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables.

Se utilizan estos equipos cuando las necesidades de la aplicación sean:

- Dominio de par y la velocidad
- Regulación sin golpes mecánicos
- Movimientos complejos
- Mecánica delicada

El control de los motores eléctricos mediante conjuntos de conmutación "Todo o Nada" es una solución bien adaptada para el accionamiento de una amplia gama de máquinas. No obstante, conlleva limitaciones que pueden resultar incómodas en ciertas aplicaciones.



4.5.1 Problemas que surgen en el arranque de motores asíncronos.

- El pico de corriente en el arranque puede perturbar el funcionamiento de otros aparatos conectados a la red,
- Las sacudidas mecánicas que se producen durante los arranques y las paradas pueden ser inaceptables para la máquina así como para la seguridad y comodidad de los usuarios,
- Funcionamiento a velocidad constante.

Los arrancadores y variadores de velocidad electrónicos eliminan estos inconvenientes. Adecuados para motores de corriente tanto alterna como continua, garantizan la aceleración y deceleración progresivas y permiten adaptar la velocidad a las condiciones de explotación de forma muy precisa. Según la clase del motor, se emplean variados de tipo rectificador controlado, convertidor de frecuencia o regulador de tensión.

4.5.2 Factores para un sistema de regulación de velocidad.

- a) Límites o gama de regulación.
- b) Progresividad o flexibilidad de regulación.
- c) Rentabilidad económica.
- d) Estabilidad de funcionamiento a una velocidad dada.
- e) Sentido de la regulación (aumento o disminución con respecto a la velocidad nominal).
- f) Carga admisible a las diferentes velocidades.
- g) Tipo de carga (par constante, potencia constante, etcétera).
- h) Condiciones de arranque y frenado.
- i) Condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc.)
- j) Tipo de motor (potencia, corriente, voltaje, etc.).
- k) Rangos de funcionamiento (vel. máx., mín.)
- l) Aplicación como o multimotor.
- m) Consideraciones de la red (microinterrupciones, fluctuaciones de tensión, armónicas, factor de potencia, corriente de línea disponible).

Motor asíncrono	En uso normal	Con variador de velocidad
Corriente de arranque	Muy elevado, del orden de 6 a 8 veces la corriente nominal con valor eficaz 10-20 el valor de cresta.	Limitado con el motor (en general cerca de 1.5 veces la corriente nominal)
Par de arranque	Elevado no controlado del orden de 2 a 3 veces el par nominal C_n	Del orden de 105 veces el par nominal C_n y controlado durante toda la aceleración.
Arranque	Brutal cuya duración solo depende de las características del motor y de la carga arrastrada (Par resistente, inercia)	Progresivo, sin brusquedades y controlado (rampa lineal de velocidad)
Velocidad	Variado ligeramente según la carga (Próxima velocidad de sincronismo N_s)	Variación posible o parte de cero hasta un valor superior a la velocidad de sincronismo N_s
Par máximo C_m	Elevado, del orden de 2-3 veces al par nominal C_n	Elevado disponible para todo el rango de velocidades (del orden de 1.5 veces el par nominal)

Frenado eléctrico	Relativamente complejo. Necesita protecciones y esquema particular	Fácil
Inversión del sentido de marcha	Fácil solamente después de paro del motor	Facil
Riesgo de bloqueo	Si en caso de exceso de par (par resistente > Cm) o encaso de bajada de tensión	No
Funcionamiento del motor en el plano par-velocidad		

Tabla G: Comparación de las características de funcionamiento que demuestran el gran interés de los Variadores de velocidad de tipo >>>convertidor de frecuencia

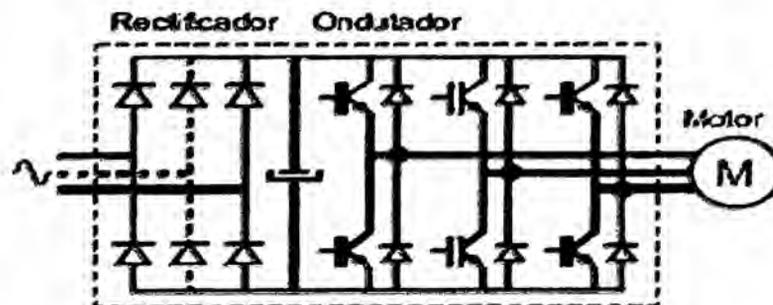


Fig. 21: Esquema de principio de un convertidor de frecuencia

4.5.3 Ventajas de Variador de Velocidad en el arranque de motores.

- El variador de velocidad no tiene elementos móviles, ni contactos.
- La conexión del cableado es muy sencilla.
- Permite arranques suaves, progresivos y sin saltos.
- Controla la aceleración y el frenado progresivo.
- Limita la corriente de arranque.
- Permite el control de rampas de aceleración y deceleración regulables en el tiempo.
- Consigue un ahorro de energía cuando el motor funcione parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia
- Puede detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida de un equipo. Protege al motor.
- Puede controlarse directamente a través de un autómata o microprocesador.
- Se obtiene un mayor rendimiento del motor.
- Nos permite ver las variables (tensión, frecuencia, r.p.m, etc...).

4.5.4 Inconvenientes del Variador de Velocidad para el arranque de motores.

- Es un sistema caro, pero rentable a largo plazo.
- Requiere estudio de las especificaciones del fabricante.
- Requiere un tiempo para realizar la programación.



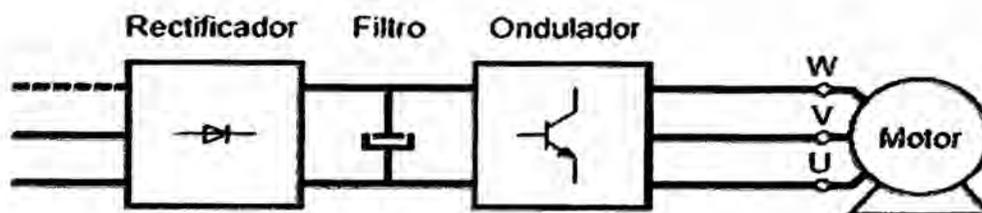


Fig. 22: Esquema de principio de un convertidor de Frecuencia (Diagrama de bloques)

4.6 Aplicaciones de los variadores de frecuencia

Los variadores de frecuencia tienen sus principales aplicaciones en los siguientes tipos de máquinas:

- **Transportadoras.** Controlan y sincronizan la velocidad de producción de acuerdo al tipo de producto que se transporta, para dosificar, para evitar ruidos y golpes en transporte de botellas y envases, para arrancar suavemente y evitar la caída del producto que se transporta, etc.
- **Bombas y ventiladores centrífugos.** Controlan el caudal, uso en sistemas de presión constante y volumen variable. En este caso se obtiene un gran ahorro de energía porque el consumo varía con el cubo de la velocidad, o sea que para la mitad de la velocidad, el consumo es la octava parte de la nominal.
- **Bombas de desplazamiento positivo.** Control de caudal y dosificación con precisión, controlando la velocidad. Por ejemplo en bombas de tornillo, bombas de engranajes. Para transporte de pulpa de fruta, pasta, concentrados mineros, aditivos químicos, chocolates, miel, barro, etc.
- **Ascensores y elevadores.** Para arranque y parada suaves manteniendo la cupla del motor constante, y diferentes velocidades para aplicaciones distintas.
- **Extrusoras.** Se obtiene una gran variación de velocidades y control total de de la cupla del motor.
- **Centrífugas.** Se consigue un arranque suave evitando picos de corriente y velocidades de resonancia.
- **Prensas mecánicas y balancines.** Se consiguen arranques suaves y mediante velocidades bajas en el inicio de la tarea, se evitan los desperdicios de materiales.
- **Máquinas textiles.** Para distintos tipos de materiales, inclusive para telas que no tienen un tejido simétrico se pueden obtener velocidades del tipo random para conseguir telas especiales.



- **Compresores de aire.** Se obtienen arranques suaves con máxima cupla y menor consumo de energía en el arranque.
- **Pozos petrolíferos.** Se usan para bombas de extracción con velocidades de acuerdo a las necesidades del pozo.

4.7 Funciones de los variadores de velocidad electrónicos

a) Aceleración controlada

La aceleración del motor se controla mediante una rampa de aceleración lineal o en «S». Generalmente, esta rampa es controlable y permite por tanto elegir el tiempo de aceleración adecuado para la aplicación.

b) Variación de velocidad.- Un variador de velocidad no puede ser al mismo tiempo un regulador. En este caso, es un sistema, rudimentario, que posee un mando controlado mediante las magnitudes eléctricas del motor con amplificación de potencia, pero sin bucle de realimentación: es lo que se llama "en bucle abierto".

La velocidad del motor se define mediante un valor de entrada (tensión o corriente) llamado consigna o referencia. Para un valor dado de la consigna, esta velocidad puede variar en función de las perturbaciones (variaciones de la tensión de alimentación, de la carga, de la temperatura). El margen de velocidad se expresa en función de la velocidad nominal.

4.7.1 Regulación de la velocidad

Un regulador de velocidad es un dispositivo controlado. Posee un sistema de mando con amplificación de potencia y un bucle de alimentación: se denomina, «bucle abierto».

La velocidad del motor se define mediante una consigna o referencia.

El valor de la consigna se compara permanentemente con la señal de alimentación, imagen de la velocidad del motor. Esta señal la suministra un generador tacométrico o un generador de impulsos colocado en un extremo del eje del motor.

Si se detecta una desviación como consecuencia de una variación de velocidad, las magnitudes aplicadas al motor (tensión y/o frecuencia) se corrigen automáticamente para volver a llevar la velocidad a su valor inicial.

Gracias a la regulación, la velocidad es prácticamente insensible a las perturbaciones.

La precisión de un regulador se expresa generalmente en % del valor nominal de la magnitud a regular.



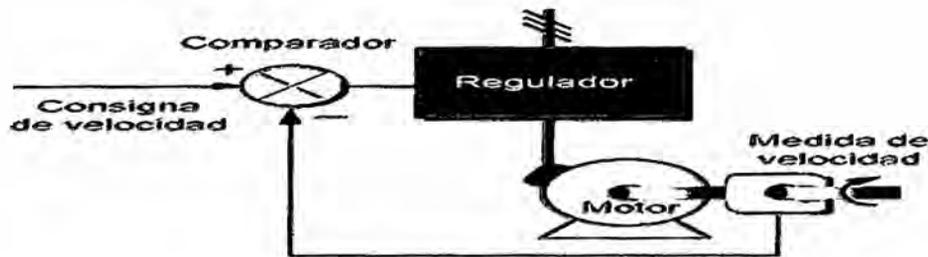


Fig. 23: Principio de funcionamiento de la regulación de velocidad

4.8 Composición de un variador de frecuencia

Los variadores de frecuencia están compuestos por:

- **Etapa Rectificadora.** Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.
- **Etapa intermedia.** Filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos.
- **Inversor.** Convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBT's (Isolated Gate Bipolar Transistors) para generar los pulsos controlados de tensión. Los equipos más modernos utilizan inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones por sobre corriente, sobretensión, baja tensión, cortocircuitos, puesta a masa del motor, sobre temperaturas, etc.

Etapa de control. Esta etapa controla los IGBT para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia. Y además controla los parámetros externos en general, etc. Los variadores más utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia

El módulo de potencia

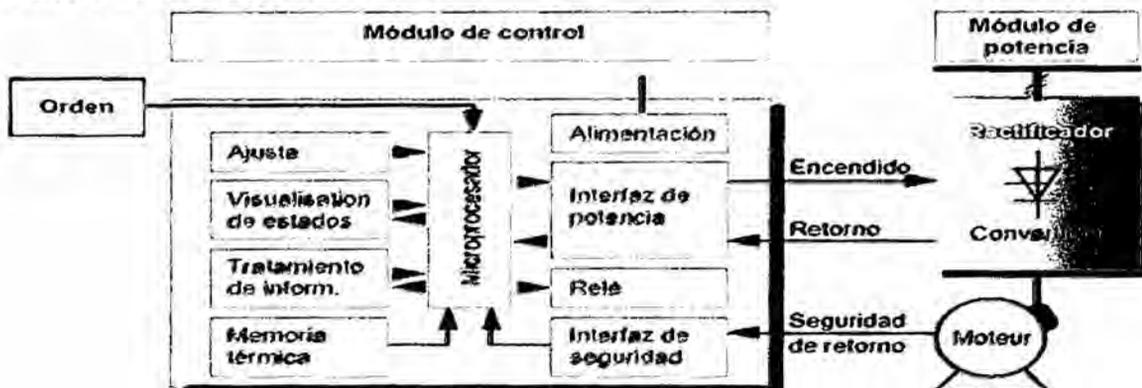


Fig. 24: Estructura general de un variador de velocidad electrónico



Los variadores más utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia.

El Inversor convierte la tensión continua de la etapa intermedia en una tensión de frecuencia y tensión variables. Los IGBT envían pulsos de duración variable y se obtiene una corriente casi senoidal en el motor.

La frecuencia portadora de los IGBT se encuentra entre 2 a 16kHz. Una portadora con alta frecuencia reduce el ruido acústico del motor pero disminuye el rendimiento del motor y la longitud permisible del cable hacia el motor. Por otra parte, los IGBT's generan mayor calor.

Las señales de control para arranque, parada y variación de velocidad (potenciómetro o señales externas de referencia) estén aisladas galvánicamente

¿Qué son los variadores?

Un variador de c.a. es un dispositivo utilizado para controlar la velocidad de rotación de un motor de inducción. La velocidad de rotación del motor se rige por la frecuencia de la corriente de alimentación aplicada. Por lo tanto, la mejor manera de controlar la velocidad del motor consiste en controlar la frecuencia de corriente aplicada.

$$\text{Velocidad} = 120 \times f/p$$

Donde **f** = frecuencia y **p** = número de polos.

Polo hace referencia al tipo de construcción del motor. La velocidad de rotación de un motor de 4 polos conectado a 50 Hz será de 1.500 rpm, mientras que la de un motor de 2 polos será de 3.000 rpm.

Además de cambiar la frecuencia, el variador también varía el voltaje aplicado al motor para asegurar que existe el par necesario en el eje del motor sin que surjan problemas de sobrecalentamiento.

A continuación se muestra el diagrama de los principales bloques de un variador, con su respectiva descripción:



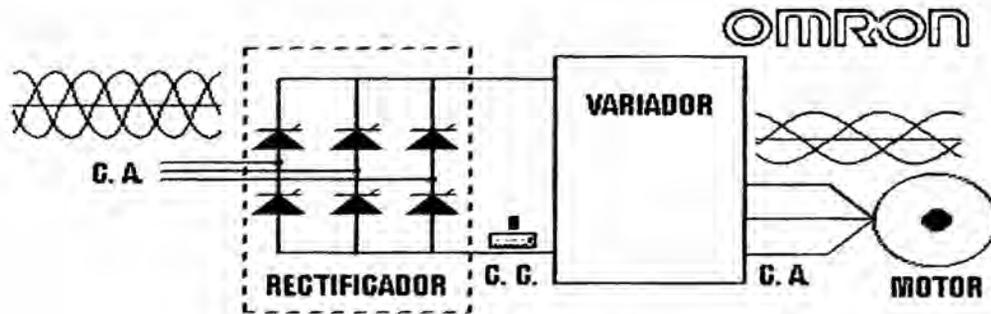


Fig 25 Variador simplificado

a- **Rectificador:** Esta parte incluye 4 ó 6 diodos, en función de si se trata de un variador de entrada monofásico o trifásico, que rectifican la frecuencia fijada del voltaje de entrada que se suministra al enlace de c.c.

b- **Enlace de c.c.:** Esta parte está integrada por condensadores que almacenan el voltaje del rectificador que se utiliza en la fase inversora del variador. El voltaje existente puede alcanzar los 800 Vc.c., por lo que debe extremarse la precaución y no tocar ningún componente de esta parte. Esta área también sirve para absorber el exceso de energía del proceso de regeneración, término que se emplea para describir la energía que "genera" el motor cuando se detiene de forma precipitada una carga con un momento de inercia muy elevado. Si se desean obtener altos niveles de frenado se precisan transistores y resistencias adecuados.

c- **Variador:** El variador contiene seis transistores empleados a modo de conmutadores que reconstituyen el enlace de c.c. en un patrón de frecuencia y voltaje variables para controlar el motor c.a. El sistema más empleado para ello es la modulación de la duración de los pulsos (PWM).

d- **Circuito de control:** En esta parte se utiliza la información del usuario, como la velocidad definida, para controlar las funciones del variador y generar la velocidad y el par necesarios para el eje del motor. El circuito de control también sirve para proteger el variador en determinadas situaciones y para proporcionar al usuario información sobre el estado del variador.

Si se controlan la frecuencia y el voltaje aplicados con precisión, el usuario puede estar seguro de conseguir un buen rendimiento del proceso y del producto; avances como los variadores de control vectorial de flujo en lazo abierto y en lazo cerrado, descritos más adelante.

Los efectos de la frecuencia de alimentación conocidos como 'armónicos' son producto del variador cuando éste obtiene corriente de la red eléctrica. Los armónicos distorsionan el suministro de alimentación y pueden tener efectos adversos sobre los equipos que utilizan el mismo suministro.

Una manera de combatir esta distorsión consiste en reducir los efectos armónicos del suministro. Para ello es preciso duplicar el número de veces que se obtiene corriente del suministro, también reducir la corriente obtenida por cada pulso, la corriente extraída y, con ello, el contenido armónico de la línea de suministro. Este método de gestión de la calidad de la alimentación eléctrica se conoce como control de 12 pulsos.

El variador normal de 6 pulsos consta de 6 elementos rectificadores (dos por fase: uno para el medio ciclo positivo y otro para el medio ciclo negativo).

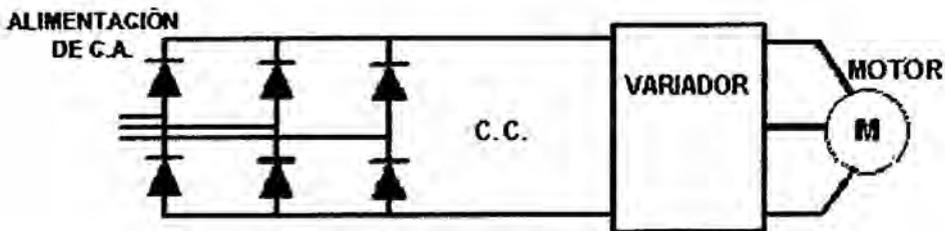


Fig. 26 Variador de 6 pulsos

El variador que utiliza el control de 12 pulsos consta de dos unidades de rectificación con 6 elementos rectificadores cada una (12 en total); la segunda unidad se conecta mediante un transformador de desplazamiento de fase.

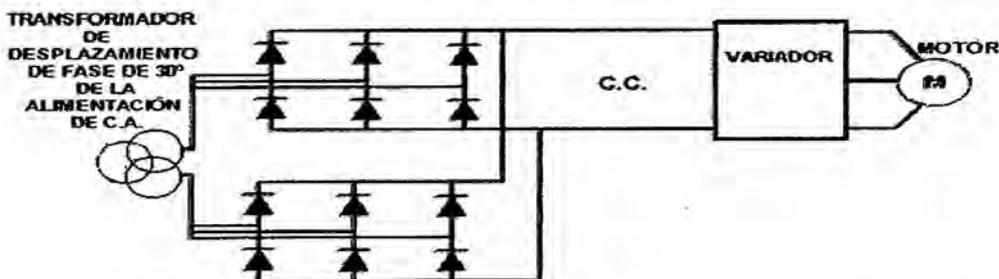


Fig. 27 Variador de 12 pulsos

El resultado sobre la corriente de entrada es visible cuando se utiliza el control de 12 pulsos.



Entrada de 6 pulsos sin reactancia. La distorsión de corriente es del 88%



Entrada de 12 pulsos con transformador de desplazamiento de fase. La distorsión de corriente es del 12%

Fig. 28 Espectro de las resultantes

e- La respuesta es el control vectorial

En los variadores vectoriales, el módulo variador controla las corrientes que generan flujo y par a fin de optimizar el empleo de la corriente que genera el par



motor. Gracias a la tecnología mejorada de los circuitos de control, la reacción a la carga también se ha visto mejorada, al igual que el mantenimiento de la velocidad.

Corriente total (I_s) distribuida entre el vectorial de la corriente generadora de flujo (I_d) y la corriente generadora de par (I_q).

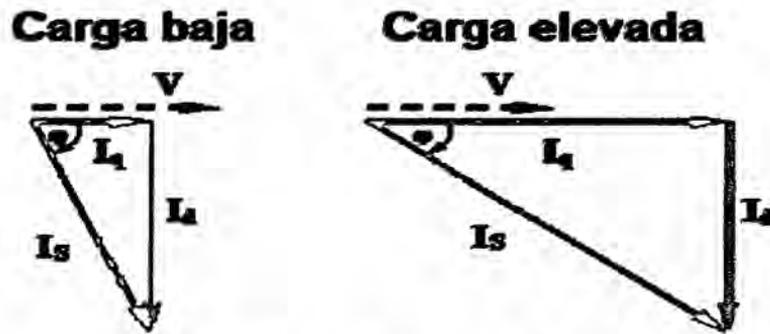


Fig 29 Angulo de defasaje respecto de las carga

V.- MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Diagrama de bloques de un variador de velocidad

Los métodos tradicionales y modernos para el control y regulación de la velocidad de estos motores que se usan a diario en múltiples aplicaciones comerciales e industriales, requiere de una información adecuada.

Una gran parte de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, como por ejemplo los trenes laminadores, los mecanismos de elevación, las máquinas-herramientas, etc. En los mismos se requiere un control preciso de la velocidad para lograr una adecuada productividad, una buena terminación del producto elaborado, o garantizar la seguridad de personas y bienes.

Los principales factores a considerar para el diseño de un sistema de regulación de velocidad son:

- Límites de regulación.
- Progresividad o flexibilidad de regulación.
- Rentabilidad económica.
- Estabilidad de funcionamiento a una velocidad dada.
- Sentido de la regulación (aumento o disminución con respecto a la velocidad nominal).
- Carga admisible a las diferentes velocidades.
- Tipo de carga (par constante, potencia constante, etc.).
- Condiciones de arranque y frenado.

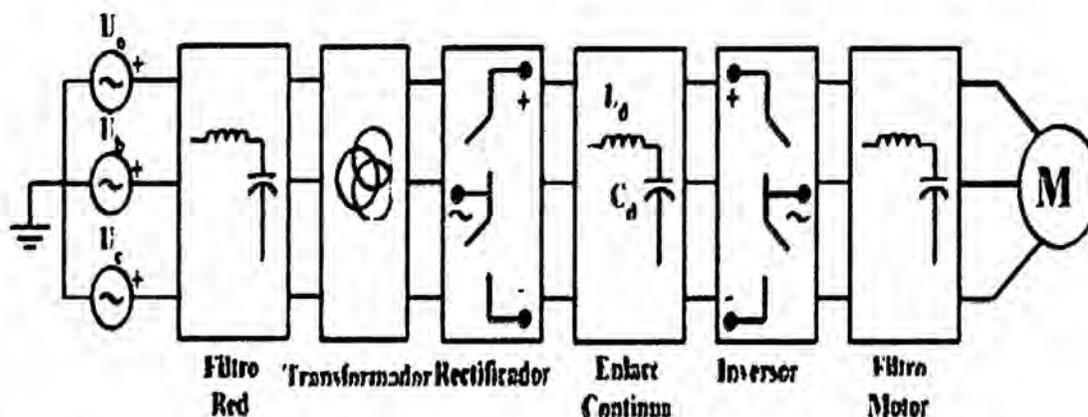


Fig. 30. Modelo de Diagrama en bloques general de un variador de velocidad.

5.2 Descripción del funcionamiento y componen del variador de velocidad:

- **Filtro lado red:** Reduce el contenido armónico y mejora el factor de potencia.

- **Transformador:** Suele ser un transformador con múltiples secundarios para la reducción de las corrientes armónicas.
- **Rectificador:** Convierte la tensión alterna del sistema a una tensión continua fija o ajustable. Las topologías más comunes incluyen rectificadores multipulso con diodos, rectificadores controlados y rectificadores PWM.
- **Enlace de continua:** Puede ser un capacitor que provee una tensión de continua estable para los convertidores tipo fuente de tensión (VSC) o un inductor para suavizar la corriente de continua en los convertidores tipo fuente de corriente (CSI).
- **Inversor:** Se clasifica generalmente en convertidores tipo fuente de tensión (VSC) y convertidores tipo fuente de corriente (CSI). Los VSC convierten la tensión continua en tres tensiones alternas con magnitud y frecuencia ajustables. Los CSI, en cambio, convierten la corriente continua en tres corrientes alternas ajustables.
- **Filtro lado motor:** La acción de conmutación del rectificador y del inversor genera señales de modo común. Si no se mitigan, estas señales aparecen en el neutro del bobinado de estator del motor lo que puede provocar un fallo prematuro de la aislación de los bobinados del motor.

5.3 Ensayos a realizar

Por cuestiones inherentes a su funcionamiento, los variadores de velocidad de motores emiten armónicas hacia la red de suministro. Dichas armónicas deben ser contenidas dentro de determinados límites ya que de lo contrario, aquellos usuarios que posean este tipo de cargas en sus instalaciones serán pasibles de penalidad.

Previo a la adquisición del producto, los futuros usuarios de variadores velocidad encuentran que los propios fabricantes no suelen brindar información detallada sobre la correspondiente emisión de armónicas por parte de los equipos. Adicionalmente, cuando lo hacen, esta información es brindada sólo para la situación óptima en términos de emisión, que es justamente cuando el equipo funciona en condiciones nominales de carga.

Los usuarios, en gran porte deben analizar pormenorizadamente tanto el impacto que éstos producirán dentro de sus propias instalaciones como las perturbaciones que serán emitidas



Parte de este análisis de impacto, normalmente se efectúan ensayos para determinar de forma práctica y fehaciente de las armónicas que producen los variadores de velocidad, bajo las condiciones de funcionamiento en las que éstos trabajarán una vez puestos en servicio.

5.4 Descripción de su implementación

En lo que se refiere a Normas IEC, se detalla el procedimiento que debe emplearse para realizar el ensayo de emisión de armónicas de un equipo de baja tensión y corriente nominal mayor a 16 A.

La topología que debe implementarse para el caso de equipos trifásicos es la que aparece en la Figura 31. En este caso en particular es justamente el manejo del cual se quiere determinar la emisión de armónicas. Se requiere básicamente de un generador de tensión trifásico con bajos niveles de armónicas (se explicitan los niveles máximos permitidos para cada componente) y de un medidor de corrientes armónicas trifásico que cumpla con las especificaciones establecidas.

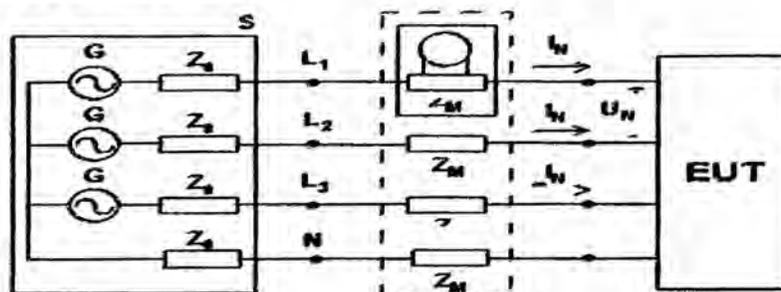


Fig. 31. Esquema para determinar la emisión de armónicas de un equipo trifásico según Normas IEC

5.4.1 Resultados obtenidos

Una vez implementada la topología de la Figura 31 se efectuaron las mediciones de armónicas a la entrada del variador.

Previo al comienzo de las mediciones se dejó que el sistema ingrese a régimen permanente con el *drive* funcionando en condiciones nominales de par y velocidad. Una vez logrado esto se registraron armónicas hasta la 40ª durante un período de tiempo considerable.

Las formas de onda de las corrientes se muestran en la Figura 32, mientras que las componentes armónicas hasta la 20ª junto al *THD* (*Total Harmonic Distortion*, expresadas como porcentaje de la componente fundamental).



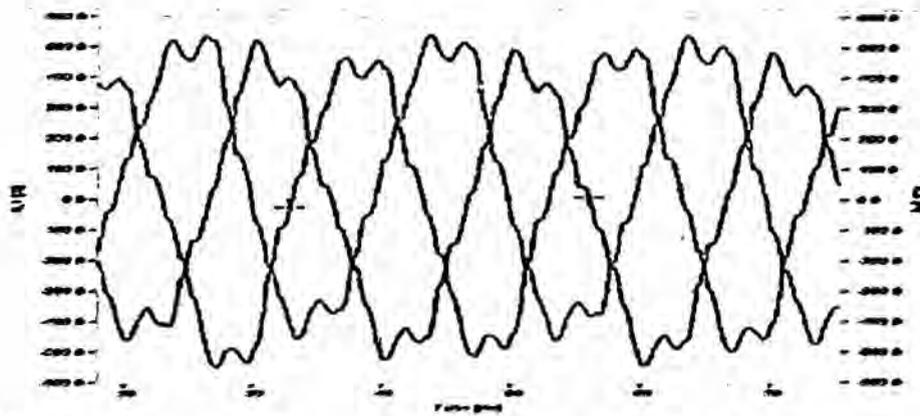


Fig. 32 . Oscilogramas de las tres corrientes a la entrada del variador, funcionando a plena carga

Se observa que el THD resultó del orden de 10 %. Las armónicas que presentaron valores más elevados fueron las impares no múltiplos de 3, como es característico en este tipo de cargas.

Los valores de armónicas registrados, en general, cumplieron con los niveles establecidos las armónicas 17ª y 19ª (resaltadas en amarillo) resultaron superiores a sus respectivos límites.

En la Norma se brindan tablas adicionales con valores de emisión más permisivos, las que pueden ser empleadas sólo en caso de asegurarse valores de la relación potencia de cortocircuito/potencia nominal de, al menos, el doble que el anterior.

Por lo comentado anteriormente en cuanto a la mayor emisión de armónicas cuando el variador funciona en condiciones distintas a la nominal, resultó de interés repetir el mismo ensayo, pero con el drive trabajando a la mitad de su potencia.

5.6 Emisión armónica del variador a través de simulaciones

Con el fin de caracterizar el comportamiento del variador de velocidad como carga perturbadora se realizó un modelo completo del mismo, adoptando como estructura de control del convertidor, motor el control orientado al campo (COC) lo que actualmente es un estándar industrial en los variadores de media y baja tensión y gran potencia. El objeto de las simulaciones fue determinar la emisión del variador de velocidad en cuatro estados de carga del motor: 25 %, 50 %, 75 % y 100 %. En cada uno de los estados de carga mencionados se analizó la emisión de corrientes armónicas del convertidor lado red, adoptando las siguientes configuraciones: rectificador con diodos de 6, 12 y 18 pulsos y rectificador con *PWM*.

En la Figura 33 se presenta el diagrama general del variador de velocidad y del

motor controlado en el programa SIMULINK de MATLAB.

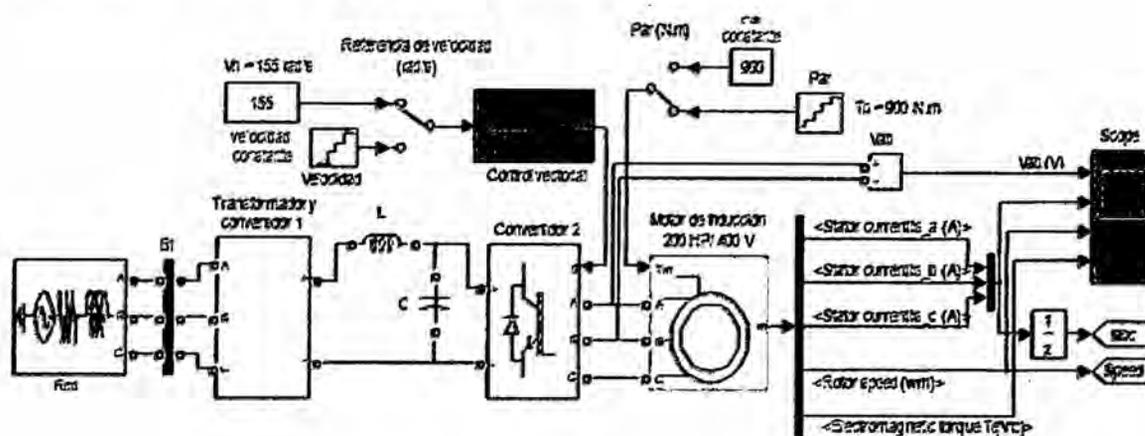


Fig. 33. Modelo SIMULINK del variador de velocidad y el motor de inducción.

A continuación se describen brevemente los parámetros característicos del motor y la estrategia de control del convertidor lado motor.

Control orientado al campo (COC)

El control orientado al campo (COC) también conocido como control vectorial para motores de inducción emula el control de un motor de continua. Utilizando una orientación del campo adecuada, la corriente del estator puede ser descompuesta en una componente que produce flujo y en una componente que produce par.

El vector de corriente en el estator puede descomponerse en dos componentes en el sistema de referencia d-q. La componente de corriente en el eje d se conoce como corriente que produce el flujo, mientras que la componente de corriente en el eje q se conoce como corriente que produce el par. En el COC se mantiene normalmente en su valor nominal, la corriente del par se controla en forma independiente. Con este control desacoplado es posible lograr un variador de gran desempeño. En la Figura 34 se presenta un diagrama en bloques general del control.

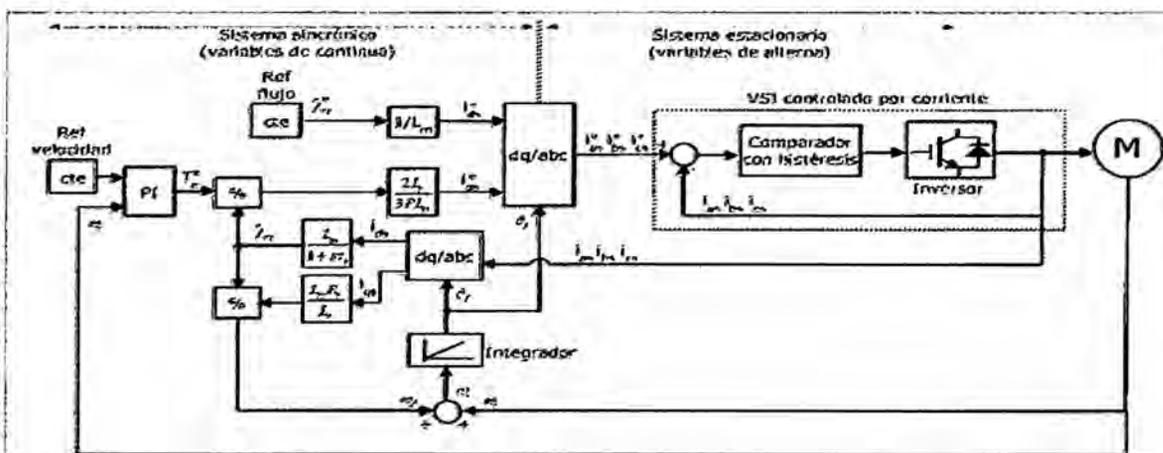


Fig. 34. Diagrama en bloques del Control Orientado al Campo Indirecto

VI. RESULTADOS

Recomendaciones a futuras líneas de investigación; El presente trabajo ha realizado las siguientes aportaciones:

- 6.1 La aplicación de la transformada "Wavelets" al análisis de la señal que alimenta el motor de inducción permitiendo la obtención de las frecuencias y las amplitudes, de la tensión y de la corriente de la señal fundamental y de sus armónicos, lo que ha permitido solventar los problemas que presentaba la transformada rápida de Fourier.
- 6.2 Evaluación del origen de las pérdidas y su distribución en los motores alimentados con convertidor de frecuencia. A tal fin, se emplea el método de los elementos finitos para evaluar las pérdidas armónicas (el desplazamiento de la corriente en los conductores del rotor y las pérdidas en el hierro) y un método experimental basado en el análisis armónico que permite la determinación de las pérdidas dependientes de la carga en el hierro y en el cobre.
- 6.3 La aplicación de modificaciones en la máquina para disminuir las pérdidas por la presencia de armónicos; originan y su validación experimental, mediante el cual se modifica la estructura (nuevas ranuras rotóricas), que disminuyen el fenómeno del desplazamiento de la corriente, transformado de ranuras abiertas en ranuras cerradas, utilizado de chapa magnética de bajas pérdidas.

Los nuevos diseños y ensayos de motores que se hayan de alimentar con convertidor de frecuencia, con el fin de menguar los armónicos que son perjudiciales para el rendimiento (altas temperaturas, etc.), nos permite seleccionar convenientemente los motores y no uso común, Obtener modelos que permita, de una forma rápida y sin necesidad de utilizar grandes cálculo, la previsión del comportamiento del motor.

Como futuras líneas de investigación se proponen:

- a) Desarrollo de instrumentos de medida que incorporen la transformada Wavelets para visualizar y calcular las componentes armónicas de las señales que alimentan el motor.
- a) Desarrollo de modelos de FEM que permitan el cálculo de las pérdidas en un estado magneto dinámico

VII- DISCUSIÓN /

- a. Los variadores de velocidad de motores son cargas fuertemente alineales y por lo tanto generan armónicas que se propagan hacia la red de suministro. Estos niveles de emisión deben ser controlados ya que de lo contrario los usuarios pueden recibir importantes penalidades.
- b. La información brindada por los fabricantes, en cuanto a niveles de emisión de armónicas, suele no ser suficiente. Esto conlleva a determinar dichos niveles de emisión en forma práctica, es decir a través de un ensayo normalizado.
- c. Mediante un modelo detallado del variador de velocidad y sus sistemas de control asociados se determinó la distorsión de corriente para los distintos tipos de convertidores lado red y para distintas condiciones de carga y velocidad. En el ensayo el contenido armónico del variador comercial duplicó al valor obtenido en el modelo. Esta diferencia es atribuible básicamente a la ineficaz cancelación de armónicas lograda en la implementación del sofisticado transformador que forma parte del variador ensayado.
- d. Se describieron las características de contaminación armónica de los accionamientos de velocidad variable usados en baja tensión (ASD). Se destacaron las armónicas principales (5° y 7°), y se vio la importancia de instalar un reactor de línea (choke), ya que permite, a muy bajo costo, prácticamente triplicar la potencia máxima que puede ser abastecida dentro de los límites que fijan tanto las normas nacionales como las internacionales.
- e. Se implementó un caso de aplicación y se estudió el fenómeno que se presenta cuando existen bancos de capacitores para corrección del factor de potencia, analizándose el peligro de resonancia armónica. Por último, se presentaron los rudimentos de las técnicas de mitigación por medio de filtros. Para instalaciones con bancos existentes se recomienda el uso del "filtro C" sintonizado a una frecuencia levemente

inferior a la del menor armónico presente, ya que posibilita la reconversión del banco, disminuyendo el monto de la inversión inicial.

- f. Para conseguir un redimiendo óptimo en los motores de inducción trifásicos alimentados con convertidor de frecuencia, se requiere que tengan un diseño especial para esta aplicación; Los motores resultantes de los diseños propuestos cumplen con los requisitos mecánicos, eléctricos y térmicos deseados y produce un ahorro de los materiales a emplear en su construcción.
- g. El desarrollo de un método experimental basado en el análisis de armónico, que permite la determinar de la suma de pérdidas del hierro y del cobre que dependen de la carga.
- h. El número de cargas no lineales conectadas a la red aumenta día a día de forma considerable los armónicos, para reducir los armónicos generados por estas cargas y propagados por la red eléctrica, es necesario colocar filtros entre la carga o cargas perturbadoras y la red. Los tipos de filtros a colocar dependen del tipo de cargas no lineales.
- i. La combinación de varios filtros activos, o activos y pasivos permite mejorar las prestaciones compensando distintos tipos de perturbaciones.



VIII.- REFERENCIALES

1. Cabañas Fernández y otros. "Mantenimiento predictivo en los devanados de las máquinas eléctricas rotativas de alta tensión" 2002.
2. Cabañas, M.F. "Técnicas para el mantenimiento y Diagnóstico de Máquinas Eléctricas Rotativas". BOIXAREU. 1998 primera edición
3. Casarotto carlos – Alexis Stillger. Contacto: cfcasarotto@yahoo.com Dpto. Electrotecnia - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional del Comahue Buenos Aires 1400. (8300) Neuquén – ARGENTINA. Tel-Fax: 0299 4488305
4. G. Barbera, F. Issouribehere, "Compatibilización de perturbaciones de variadores de velocidad de motores con redes de AT". XI ERIAC - Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRE. Ciudad del Este, Paraguay, Mayo 2005.
5. Ing. González Quintero, José Ángel. Compensación de potencia Reactiva en Sistemas Contaminados con Armónicos, Tesis en opción al título de Master en Ingeniería Eléctrica. Universidad Central de las Villas. Santa Clara. 1998.
6. Odriozola Arteaga, Luis. "Evaluación del estado del aislamiento en bobinados de máquinas eléctricas rotativas". Enero/Feb. 2004.
7. Villada, Fernando; Moreno Germán; Valencia Jaime. "El mantenimiento predictivo y su efecto en la optimización de costos de mantenimiento". Revista facultad de Ing. Medellín. Universidad de Antioquia. 2002.

Revistas y boletines

8. Fuentes de Distorsión Armónica, Soporte Científico Técnico, Boletín No. 4, Año I/99 By AWD. FARAGAUSS.
9. Horacio Torres. Energía Eléctrica, Un Producto con Calidad, CEL.. ICONTEC.
10. Cuaderno Técnico N° 183, Armónicos: rectificadores y compensadores activos. Schneider Electric
11. Información Técnica, Generalidades sobre Armónicos, CD Schneider Electric, 1998

Referencias de Internet

- a) www.elbobinadorcasero.com.
- b) www.mantenimientomundial.com
- c) Internet: www.cmcm.mx (1º Congreso Mejicano de Confiabilidad y mantenimiento – Octubre del 2,003).
- d) Internet: www.google.com.pe - Normas Técnicas sobre vibraciones VDI 2056,



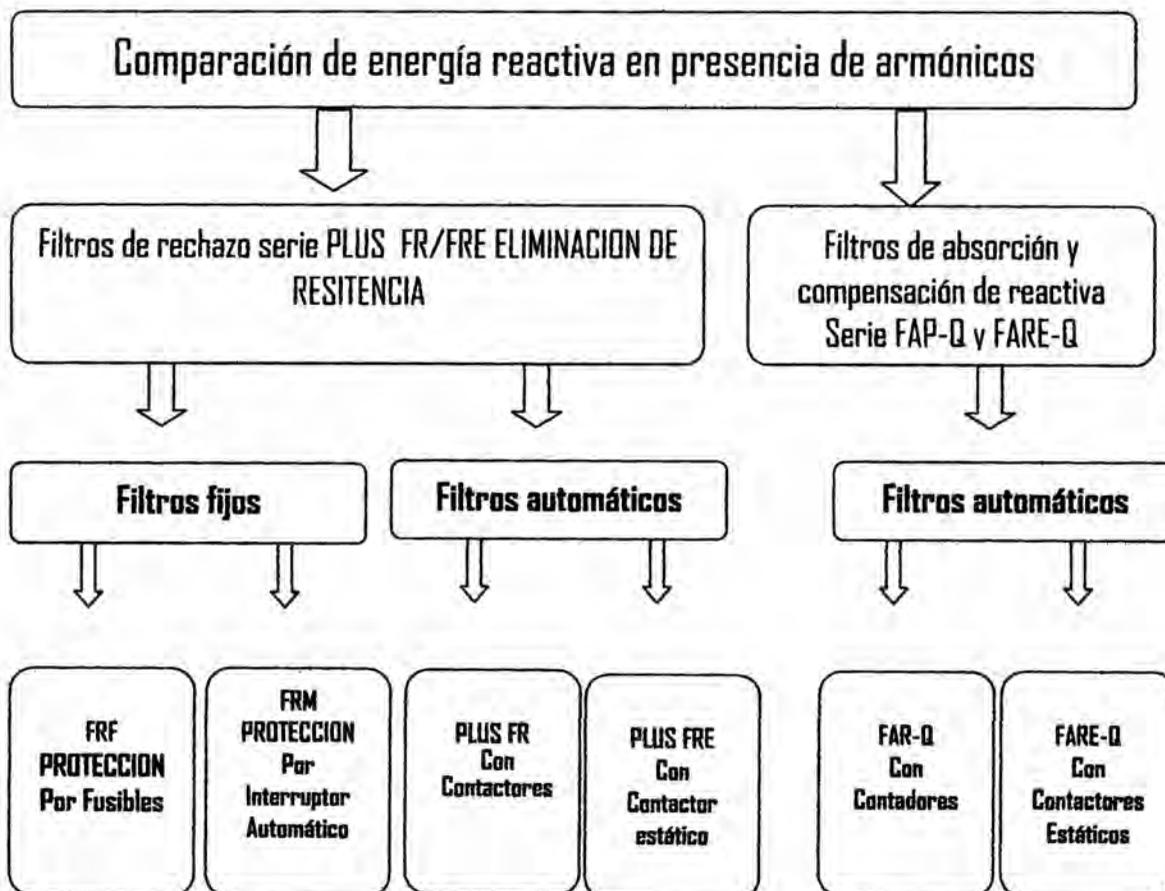
IX. APÉNDICE
(Autoría Propia)



Apéndice 01.- Se muestra los diferentes armónicos para las diferentes topologías de rectificadores

Convertir	Orden de los armónicos								THD	
	Pulsos	5	7	11	13	17	19	23	25	Up - 45th
AFE		0.037	0.005	0.001	0.019	0.022	0.015	0.004	0.003	50%
18		0.21	0.011	0.007	0.005	0.045	0.039	0.005	0.003	66%
12		0.026	0.016	0.073	0.057	0.002	0.001	0.003	0.016	11%
6		0.175	0.11	0.045	0.029	0.015	0.009	0.009	0.008	27%

Apéndice 02.- El empleo de energía eléctrica para los diferentes casos trae consigo la presencia de energía reactiva, acompañado de armónicos, que son perjudiciales para una alimentación limpia o pura



Apéndice 03.- Los Armónicos, afectan directamente a la onda sinusoidal de tensión y corriente:

a- Límite de la distorsión de corriente.- Con estos valores se determinan los valores máximos permitidos de distorsión de corriente de cada usuario

Limites de distorsión de corriente						
Validos para redes de 120 V a 69KV						
Distorsión armónica en % de IL (h impar)						
ISC/IL	H < II	II ≤ h ≤ 17	17 ≤ h ≤ 27	35 ≤ h ≤ 35	35 ≤ h	THI
< 20	4.0	2.0	1.5	0.60	0.30	5.00
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.00	0.50	8.00
50 < 100	10.0	4.5	4	1.50	0.70	12.00
100 < 1000	12.0	5.5	5	2.00	1.00	15.00
> 1000	15.0	7.0	6	2.50	1.40	20.00

Donde

ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.
 IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.
 TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima.

b- Límite de la distorsión de voltaje.- La Norma y el Reglamento que establece los limites de distorsión de voltaje

Limites de distorsión de voltaje		
Voltaje nominal	Vh/Vi. 100 (%)	THV (%9
Vnom. ≤ 69 Kv	3.0	5.0
69 Kv > Vnom. ≤ 161 Kv	1.5	2.5
Vnom. > 161 Kv	1.0	1.5

c- Corrientes y pares de arranque en función de los métodos de arranque

	Corriente de línea de arranque	Par de arranque
Directo en línea	4.7 I _n	1.5 -2.4 T _n
Y/Δ	1.6 – 2.8 I _n	0.5 – 0.8 T _n
Autotransformador	4 – 7 (V _s / V _n)	1.5 – 2.4 (V _s /V _n) ² T _n
Arranque suave	4 - 7 (V _s /V _n) I _n	1.5 – 2.4 (V _s /V _n) ² T _n
Variador de velocidad	1 - 1.5 I _n	1 – 1.5 T _n

d- La siguiente tabla muestra un resumen, causas y efectos que provocan los armónicos en la vida de los equipos.

EQUIPOS	CAUSAS Y EFECTOS
Transformador	Sobrecalentamiento si en factor "K" es elevado (Superior a 2.7), y la carga e superior al 90% de la nominal
Capacitor	Los capacitores pueden llegar a quemarse si la corriente es 1.3 veces la corriente nominal
Motores de inducción	Sobre calentamiento y vibraciones excesivas si la distorsión de tensión es superior a 50%
Cables de conexión	Sobrecalentamiento si el valor efectivo de la corriente es superior a la que soporta el cable
Equipos de computación	Perdidas de algunos datos y daños en algunos componentes electrónicos debido a que el voltaje máximo es superior al nominal o que exista una diferencia de voltaje entre el neutro y tierra

e- En el sector residencial es posible identificar tres tipos de cargas perfectamente diferenciadas en la siguiente tabla

CARGAS LINEALES FP 1	CARGAS LINEALES FP < 1	CARGAS NO LINEALES
Lámparas incandescentes	Refrigeradora	lámparas ahorradoras
Ducha eléctrica	Lavadora de ropa	Televisores
Secadora de pelo	Licuadaora	Equipos de sonido
Tostadora	Batidora	Computadoras
Sanduchera	En general equipos que funcionan con motor monofásico que no tengan compensación capacitiva	Cargador de laptop
Termostato		Cargador de celular
Estufa		D V D
Plancha		Microondas
En general equipos con resistencias únicas		Impresora
		En general todo equipo que necesita de electrónica para funcionar

f- Maquinas rotativas

Los motores, en general, no introducen armónicas importantes, salvo el caso de algunos motores monofásicos de potencia fraccionaria que presentan corrientes con ondas triangulares.

Armónicas típicas de motor rotor bobinado

Frecuencia en Hz	Corriente % fundamental	Causas
20	3	Desbalance de polos
40	2.4	desbalance de fases rotóricos
50	100	Fundamental
80	2.3	Desbalance de polos
220	2.9	Armónico 5° y 7°
320	3	Armónico 5° y 7°
490	0.3	Armónico 11 y 13°
590	0.4	Armónico 11° y 13°

X. ANEXOS



1 Tipos de arranque en motores de inducción.

Métodos de arranque	Arranque directo de la red	Valido para motores pequeños
	Arranque mediante inserción de resistencia en el rotor	Valido para motores de rotor bobinado y anillo rozantes
	Arranque con resistencia en el estator	Procedimiento poco empleado como remedio de urgencia
	Arranque Estrella-Triangulo	El método mas barato utilizado cuando se dispone de 6 terminales en el motor
	Arranque con autotransformador	Reducción de la tensión durante el arranque mediante auto transformador
	Arranque con arrancadores estáticos	Mediante un equipo electrónico muy usado en la actualidad

2 Inconvenientes para el uso motores eléctricos

Al trabajar con variador de frecuencia, los principales problemas que ocasiona el uso de motores convencionales:

- Problemas a bajas velocidades.
- Problemas a altas velocidades.
- Destrucción de bobinados.
- Caso de aplicaciones en lazo cerrado.

3 Con alimentación no sinusoidal

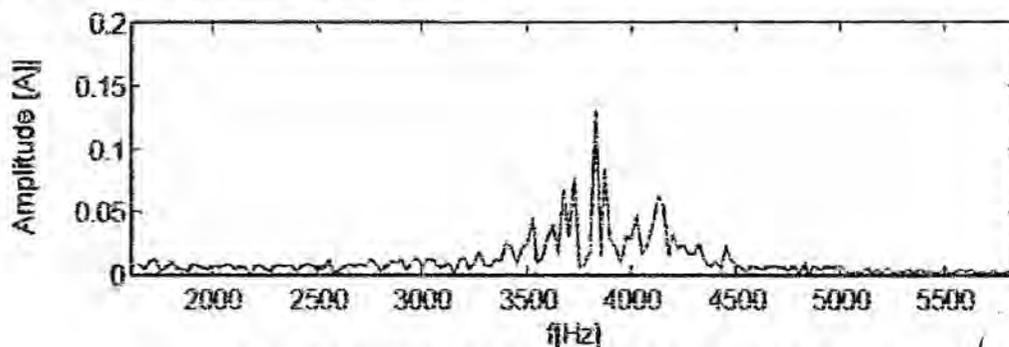


Figura 35 Armónicos de corriente de la portadora en estator.

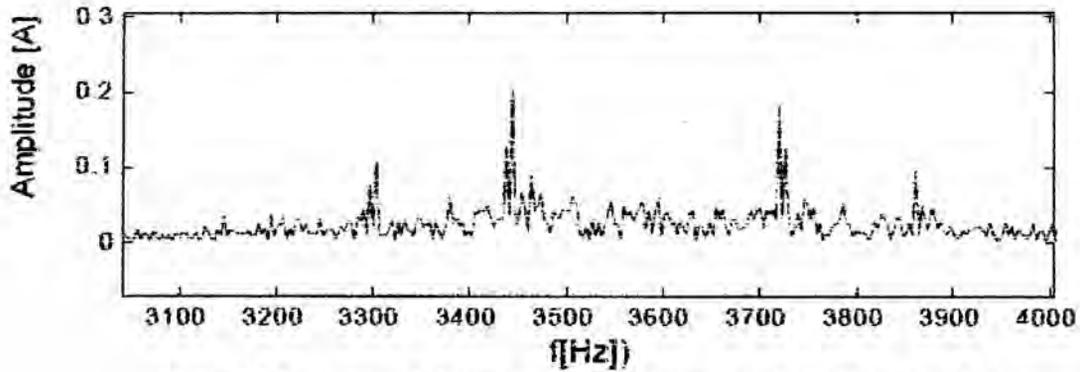


Figura 36 Armónicos de la corriente medidos en rotor inducidos portadora.

Hay tantos circuitos equivalentes como armónicos se consideran. Las constantes de estos circuitos equivalentes se obtienen a partir de las del motor en régimen sinusoidal con las siguientes reglas:

- Las reactancias se multiplican por v .
- Las resistencias habrá que corregirlas con las fórmulas que dan el coeficiente de aumento de resistencia por efecto del desplazamiento de la corriente

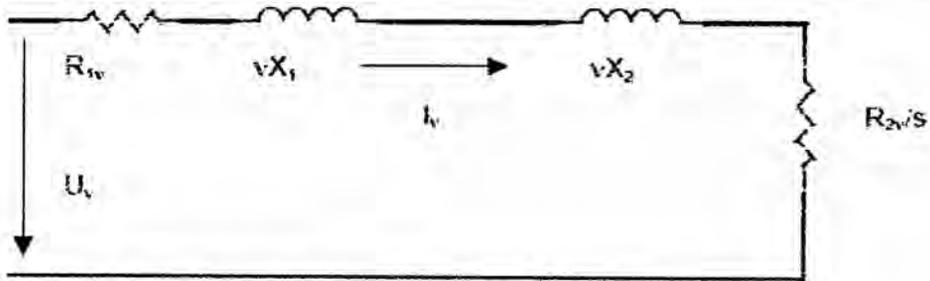


Figura 37 Circuito equivalente para el armónico de orden v .

$$I_v = \frac{U_v}{v \cdot (X_1 + X_2)}$$

4. Tensión características de los convertidores de frecuencia PWM

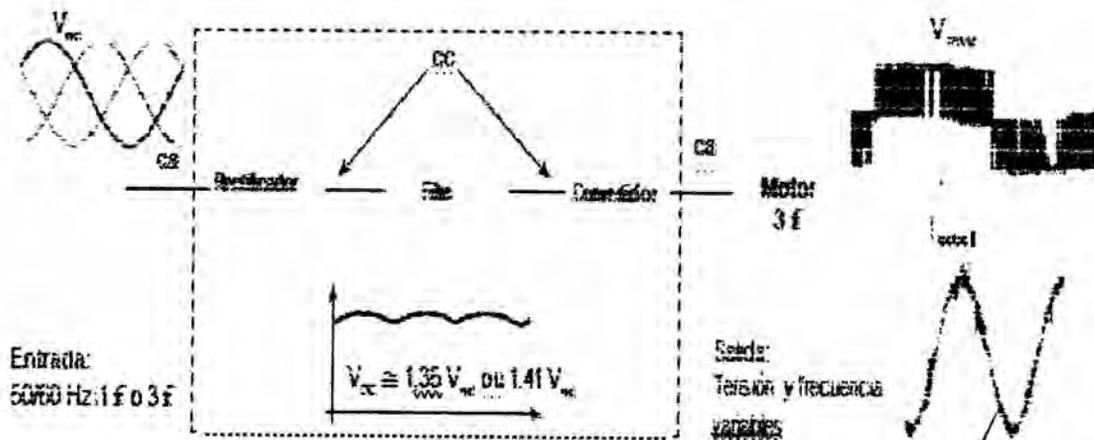


Fig. 38 El diagrama ilustra las etapas de funcionamiento