



T
621-3136
Q7
P.2



ESCUOLA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad

**"AHORRO DE ENERGIA EN MOTORES DE INDUCCION
IMPLEMENTANDO UN CONTROLADOR ELECTRONICO
DEL FACTOR DE POTENCIA"**

INFORME TECNICO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

Especialización: ELECTRONICA

Presentada por:

WALTER LEOPOLDO QUINDE REVELO

Guayaquil - Ecuador

1992

AGRADECIMIENTO

- A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL, POR HABERME BRINDADO LA OPORTUNIDAD DE REALIZARME.
- A TODOS MIS PROFESORES.
- A TODOS MIS COMPANEROS.

DEDICATORIA

- A MI PADRE: POR EL EJEMPLO BRINDADO.
- A MI MADRE (+): POR GUIAR MIS PASOS.
- A MI ESPOSA: POR SU CONSTANCIA Y AYUDA.
- A MIS HIJAS: POR SER MI ESPERANZA.

Jorge Flores Macías

ING. JORGE FLORES MACÍAS
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Alberto Larco G.

ING. ALBERTO LARCO G.
PROFESOR SUPERVISOR

Norman Chootong Ch.

ING. NORMAN CHOOTONG CH.
MIEMBRO PRINCIPAL

DECLARACION EXPRESA

"LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTOS EN ESTA TESIS, ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE; Y, EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA, A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(REGLAMENTO DE EXAMENES Y TITULOS PROFESIONALES DE LA ESPOL).



WALTER LEOPOLDO QUINDE REVELO

R E S U M E N

Cuando la Escuela Superior Politécnica del Litoral ha aportado con su personal humano y sus recursos económicos a una sociedad, lo normal sería que aquellos que se beneficiaron, devuelvan con su saber y experiencia la oportunidad que tuvieron para que otros aprendan.

Se establece así un ciclo en el que se incluyen la actualización y la renovación del pensamiento.

Para unos, su trabajo en la sociedad a la cual se deben, constituye una forma de este aporte.

Para otros, la docencia y su relación más íntima con la ESPOL , constituye una meta.

Lo que sigue no es sino un trabajo nacido de una experiencia que como todas, está llena de errores y satisfacciones. Es la demostración de que podemos discutir, realizar y justificar algo que puede significar beneficio para el país.

El lector no encontrará más que una serie de análisis y conclusiones prácticas que no son nuevas, pero que para el autor significan

el dominio de un campo de la electrónica y la demostración de que algo aprendimos.

INDICE GENERAL

	PAGS.
RESUMEN -----	VI
INDICE GENERAL -----	VIII
INDICE DE FIGURAS -----	XII
INTRODUCCION -----	15
CAPITULO I	
CONSTRUCCION DEL CIRCUITO A BASE DE COMPONENTES PASI- VOS, CONTROL DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN MOTOR DE INDUCCION MONOFASICO -----	17
1.1. OBJETIVOS -----	17
1.2. FUNDAMENTOS TECNICOS -----	17
1.3. MOTORES MONOFASICOS DE CORRIENTE ALTERNA-----	25
1.4. CONSTRUCCION Y PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES DE INDUCCION -----	29
1.4.1. EL MOTOR UNIVERSAL -----	32
1.4.2. MOTOR DE FASE PARTIDA -----	34
1.4.3. MOTOR DE CONDENSADOR PERMANENTE -----	38
1.4.4. MOTOR DE CONDENSADOR DE DOS VALORES-----	40



BIBLIOTECA

VI

VIII

XII

15

17

17

17

25

29

32

34

38

40



	<u>PAGS.</u>
1.5. CALCULOS Y ANALISIS DEL CIRCUITO -----	41
1.6. LISTA DE MATERIALES Y COMPONENTES-----	51
1.7. CONCLUSIONES -----	53
1.8. APLICACION PRACTICA -----	54
 CAPITULO II	
AGREGANDO POCOS COMPONENTES AL CIRCUITO INTEGRADO HV- 1000 -----	60
2.1. CARACTERISTICAS -----	60
2.2. DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO-----	61
2.3. ESPECIFICACIONES -----	62
2.4. APLICACIONES -----	63
2.5. USO DEL CIRCUITO INTEGRADO EN LOS MOTORES DE IN DUCCION -----	63
2.6. RESULTADOS Y PRUEBAS ESPECIFICAS PARA DETERMINAR - LA APLICABILIDAD DEL CIRCUITO HV-1000 -----	69
2.7. RAZONES POR LA QUE EL HV-1000 ACTUA Y COMO LO HACE	76
2.8. APLICACION PRACTICA DEL CIRCUITO INTEGRADO HV-1000	79
2.8.1. ESTUDIO DE LAS ARMONICAS QUE PRODUCEN LA ACCION AHORRADORA DEL CIRCUITO -----	87
2.8.2. FUENTE DE ARMONICAS Y SU ANALISIS -----	90
2.8.3. EFECTO DE LAS SENALES ARMONICAS SOBRE LAS MAQUINAS ELECTRICAS -----	93

	<u>PAGS.</u>
2.8.4. CORRECTA SELECCION DE FILTROS PARA MINIMIZAR LAS SENALES ARMONICAS -----	94
2.8.5. TIPOS VARIOS DE FILTROS USADOS PARA ATENUAR SENALES ARMONICAS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA -----	94
2.9. EVALUACION ECONOMICA DE LA EFICIENCIA DEL MOTOR CON EL HV-1000 -----	96
2.9.1. SOBREPREGIO POR KILOVATIO AHORRADO -----	96
2.9.2. POR RESTITUCION SIMPLE -----	98
2.9.3. ANALISIS DEL VALOR ACTUAL -----	99
2.10. METODOS DE PRUEBA DE LA EFICIENCIA CON EL HV-1000 -----	100
2.10.1. METODO DEL FRENO -----	101
2.10.2. METODO DEL DINAMOMETRO -----	101
2.10.3. METODO DE LA MAQUINA DUPLICADA -----	102
2.10.4. METODO DE LAS MEDIDAS DE ENTRADA -----	102
2.10.5. METODO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE -----	102
 CAPITULO III	
COMPROBACION EXPERIMENTAL DEL AHORRO DE ENERGIA DEL HV-1000 IMPLEMENTANDO UN SISTEMA MOTOR - GENERADOR-	
3.1. DATOS Y CARACTERISTICAS -----	103

	<u>PAGS.</u>
3.2. PARTE EXPERIMENTAL: SU EXPLICACION -----	106
3.2.1. SELECCION DEL MOTOR ADECUADO -----	106
3.2.2. SIMULACION DE LA CARGA -----	107
3.2.3. REALIZACION DEL CIRCUITO DE CONTROL -----	108
3.2.4. EQUIPO DE MEDICION Y TRANSDUCTORES -----	109
3.2.5. DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA -----	110
CAPITULO IV	
PRESENTACION DEL PROYECTO EN EL CIRCUITO IMPRESO-----	115
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	116
BIBLIOGRAFIA -----	118

INDICE DE FIGURAS

Nº		PAGS.
CAPITULO I		
1.1.	FORMAS DE ONDAS DE VOLTAJE QUE RESULTAN CON EL CONTROLADOR -----	26
1.2.A.	AHORROS TIPICOS OBTENIDOS POR EL USO DEL CONTROLADOR APLICADO A UN MOTOR MONOFASI CO -----	27
1.2.B.	POTENCIA DESPERDICIADA EN MOTOR SIN CAR GA Vs. VOLTAJE DE LINEA -----	27
1.3.	DIAGRAMA DE BLOQUES -----	28
1.4.A.	CONSTRUCCION DE UN ESTATOR MONOFASICO---	30
1.4.B.	ESTATOR REPRESENTADO MEDIANTE EL SIMBOLO CONVENCIONAL PARA UNA BOBINA-----	30
1.5.	MOTOR DE FASE PARTIDA -----	35
1.6.	MOTOR DE CONDENSADOR PERMANENTE-----	39
1.7.	MOTOR DE CONDENSADOR DE DOS VALORES-----	40
1.8.	FUENTE DE PODER -----	41
1.9.	GENERADOR DE ONDA CUADRADA DE VOLTAJE-	42

<u>Nº</u>		<u>PAGS.</u>
1.10.	GENERADOR DE ONDA CUADRADA DE CORRIENTE	43
1.11.	GENERADOR DE RAMPA -----	44
1.12.	CIRCUITO LOGICO -----	46
1.13.	CIRCUITO SUMADOR E INTEGRADOR Y FILTROS PASABAJO -----	47
1.14.	CIRCUITO DE DISPARO -----	48
1.15.	CARACTERISTICAS DEL MOTOR CON CARGA CON EL CONTROLADOR -----	56
1.16.	CARACTERISTICAS DEL MOTOR CON CARGA SIN EL CONTROLADOR -----	57
1.17.	RENDIMIENTO DEL CONTROLADOR PARA DIFE RENTES VALORES DEL FACTOR DE POTENCIA--	59
CAPITULO II		
2.1.	FORMA DE ONDA DE VOLTAJE A TRAVES DEL MOTOR -----	64
2.2.	RELACION θ_c V_c θ_T PARA UN MOTOR TIPICO	65
2.3.	AHORRO DE POTENCIA EN FUNCION DE LA CARGA -----	66
2.4.	RELACION DE LAS ONDAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE CON LA FUNCION DE PROCESAMIENTO ANALOGICO -----	67

<u>Nº</u>		<u>PAGS.</u>
2.5.	CIRCUITO CONTROLADOR DE POTENCIA CON EL HV-1000 -----	84
2.6.	CONEXION GRUPO MOTOR - GENERADOR -----	85

INTRODUCCION

En la complejidad de la vida moderna, la electrónica juega un papel determinante. En cada caso tenemos aplicaciones muy particulares que deben ser cubiertas. Uno de esos casos particulares lo constituyen los equipos más próximos a la casa, tales como ventiladores, compresores, taladros eléctricos, bombas, etc., en los cuales se quiere reducir las pérdidas de energía sin ver restringidas las condiciones de seguridad y de operación.

Se trata pues, de construir un circuito que reduzca las pérdidas de potencia sin encarecer el costo total de la inversión.

Entonces, para evitar las pérdidas de energía en los sistemas donde se usan motores eléctricos, especialmente los de inducción, se agrega un circuito electrónico que es conocido como CONTROLADOR DEL FACTOR DE POTENCIA.

Existen dos tipos de formas de analizar el problema:

- Construyendo el circuito a base de componentes pasivos;
- Agregando pocos componentes al circuito integrado HV-1000.



C A P I T U L O I

CONSTRUCCION DEL CIRCUITO EN BASE DE COMPONENTES PASIVOS.
CONTROL DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN MOTOR DE INDUCCION MONOFASIC
O

1.1. OBJETIVOS

El objetivo del Sistema de Control del Factor de Potencia es tomar una muestra del voltaje y de la corriente a trav
vés del motor para disminuír la potencia de entrada al motor proporcionalmente al desfase detectado entre las señales de voltaje y corriente. Esto es, damos una menor potencia al motor, tanto como disminuye la carg
a de éste.

1.2. FUNDAMENTOS TECNICOS

Se estima que alrededor del 65 % de la energía consumida se desperdicia. Uno de los factores contribuyentes a éste desperdicio es la gran cantidad de energía barata

de que disponemos.

Una tercera parte de éste 65 % de desperdicio es inevitable, puesto que la conversión de una forma de energía a otra resulta en algo de energía perdida.

Se han desarrollado varios programas para evitar el desperdicio. Uno de ellos es el llamado Controlador de Factor de Potencia que reduce las pérdidas de energía en los motores eléctricos.

Como existe una gran mayoría de motores eléctricos que son de tipo fraccionario (menos que 1 HP) y que son justamente éstos los que más desperdicio de energía causan, se debe implementar un sistema que reduzca esta pérdida. El control del Factor de Potencia es aplicable a muchos tipos de motores en uso, puesto que la mayoría son los llamados motores de inducción. Como éstos son los que se usan en las industrias en aplicaciones tales como ventiladores de máquinas, herramientas, bombas, compresores, etc., el resultado es un gran ahorro de energía.

El control del Factor de Potencia se aplica tanto a motores trifásicos como monofásicos y en muchas aplicaciones que utilicen motores nuevos, puesto que no requieren modificaciones

en el motor mismo.

Los motores de inducción son robustos, confiables de mantenimiento libre y de bajo costo, sin embargo, cuando trabajan a una carga menor que la nominal pierden mucha energía.

Podemos decir que, mientras más económico resulta la construcción de un motor, éste consume más potencia.

La causa inicial, para las pérdidas, era el sistema de aislamiento. Esto se ha evitado con la construcción de motores con láminas de hierro más delgadas, más cobre y menos entrehierro.

Un entendimiento de las características de los motores de inducción es necesario para comprender la operación del Controlador del Factor de Potencia.

Un motor de inducción conectado directamente a través de una fuente de voltaje AC, debe generar suficiente flujo magnético - para producir una fuerza contraelectromotriz opuesta al voltaje aplicado. Los motores pequeños tienden especialmente a tener un entrehierro que requiera de un número relativamente grande - de amperios - vueltas para producir la magnitud de flujo necesario. Es posible demostrar que el torque producido por

un motor de inducción es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado ($T \propto V^2$).

Cierto que cuando un motor gira con suavidad, un voltaje pequeño es requerido desde el punto de vista del torque producido. A pesar de que el voltaje aplicado es gobernado por la fuente un gran flujo de corriente inductiva (requerido para producir fuerza contraelectromotriz) no es necesario para producir torque. Estas corrientes causan pérdidas al circuito magnético (Corrientes de histéresis y de Eddy) y pérdidas en el cobre mucho más grandes que aquéllas requeridas para vencer la fricción.

Este desperdicio de potencia es traducido como calor en el motor. La potencia de entrada al motor es igual al producto del voltaje aplicado por la corriente y el coseno del ángulo de fase entre el voltaje y la corriente ($P = VI \cos \theta$).

El Coseno θ es definido como el Factor de Potencia del Motor y es la cantidad a permanecer constante con el uso del controlador. Puesto que la corriente se mantiene alta en los motores sin carga, el desfase entre el voltaje y la corriente aumenta.

Tipicamente, el desfase de un motor varía desde 30° sin car-

ga hasta los 80° a plena carga.

Si no tiene carga, el voltaje aplicado puede ser reducido lo suficiente y el desfase es de 30° con el decrecimiento de la corriente. Esta es la tarea que ejecuta el "controlador del Factor de Potencia". El dispositivo varía el voltaje aplicado como una función de la carga, manteniendo el ángulo de fase en un valor constante y predeterminado.

El controlador censa el voltaje de línea y la corriente y produce un voltaje proporcional al ángulo de fase entre el voltaje y la corriente censada.

El voltaje es sumado con un voltaje de referencia que me indica el ángulo de fase determinado. La diferencia entre estas dos señales es el ERROR DE VOLTAJE, al cual se dispara el triac, encendiendo el control. El Triac es disparado para una porción de cada medio ciclo como un clásico circuito control de fase, tal como se usa en un interruptor DIMMER de luz.

Así, controlando la magnitud del voltaje terminal en el motor ya completamente cargado, las pérdidas asociadas con el voltaje nominal de línea son minimizadas.

Las formas de onda de voltaje que resultan con el controlador se muestran en la figura N^o 1.1. El desfase a ser medido es proporcional al intervalo de tiempo entre el cruce por cero de la señal de voltaje y corriente. Esto se muestra como θ en el Diagrama de tiempo. El voltaje es transformado a una señal cuadrada por amplificadores operacionales para obtener E y su inversa \bar{E} . Similarmente la forma de onda de corriente es transformada a una señal cuadrada para obtener I e \bar{I} . Nótese que la información que da el ancho de θ ocurre cuando E e \bar{I} son simultáneamente positivos y cuando \bar{E} e I son simultáneamente positivos también. Por lo tanto, un voltaje proporcional a θ es obtenido haciendo una operación lógica AND entre E e \bar{I} al igual que con \bar{E} e I . Luego, los dos voltajes resultantes obtenidos se les hace la operación lógica OR dando una señal única que resulta en un tren de pulsos con un ancho proporcional a θ .

El tren de pulsos representa el sistema realimentado de voltaje que es luego sumado como una señal de voltaje de referencia dada por un comando ajustado a un valor de ángulo de fase deseado. El tren de pulsos es filtrado por un amplificador operacional configurado como un FILTRO PASABAJO. Este amplificador operacional también aumenta la diferencia entre la alimentación de voltaje y el comando de voltaje para reducir el error del voltaje del sistema. Este error de -

voltaje es comparado con una señal rampa de voltaje que está sincronizada con la señal de voltaje a 60 Hz.

La intersección entre la señal de error y la rampa enciende a éste valor de voltaje el triac. Un incremento en la carga causa que la señal de error de voltaje disminuye en amplitud intersectando la señal rampa con anticipación en cada medio ciclo, resultando en un anticipado encendido al triac.

Esto aumenta la amplitud de voltaje en el motor. Así el ángulo de fase es comandado y el voltaje aplicado al motor es variado forzando a que el ángulo de fase se mantenga al valor comandado sin tomar en cuenta los cambios en la carga.

La cantidad de energía ahorrada, que resulta de usar el controlador, depende esencialmente de tres factores:

- La calidad de la construcción del motor;
- La magnitud del voltaje aplicado; y,
- El voltaje aplicado a la carga.

Las curvas de la figura N^o 1.2., muestran los ahorros tí

picos obtenidos por el uso del controlador aplicado a un motor monofásico.

El ahorro de energía será mucho mayor en los motores que estén cerca de los centros de distribución, porque en éstos el voltaje nominal es más alto, digamos 125 voltios.



En general, la única aplicación en la cual los motores son operados continuamente es en el uso de ventiladores. A causa de la incertidumbre de la carga en muchas aplicaciones y a causa del pequeño incremento en el precio para el motor del siguiente tamaño, existe una práctica normalizada para cargar motores al 70 % o menos de su capacidad.

En muchas aplicaciones, tales como máquinas herramientas, los motores permanecen ociosos o muy cargados. En éstos casos es imprescindible el uso del controlador.



Los motores que usan el controlador, por lo tanto, se calentarán y vibrarán mucho menos. Esto permite que el motor tenga un tiempo de vida mucho mayor.

Las compañías utilizan a menudo motores con grandes cargas de operación, con ciclos de cargas penalizadas por un pobre fac

tor de potencia. Para evitar esta carga, utilizan capacitores o motores sincrónicos a fin de corregir el factor de potencia.

Estos dispositivos reducen el desperdicio de energía de potencia en el sistema de distribución pero no tienen ningún efecto en la potencia del motor.

El uso del controlador evita el uso de éstos dispositivos y reduce la energía desperdiciada en los motores y en los sistemas de distribución.

Finalmente, el costo efectivo del controlador puede ser minimizado si se lo utiliza con un doble ciclo de arranque ON/OFF, o como un arranque de voltaje limitado para el motor. Debido a que el triac usado en el controlador puede variar y controlar el voltaje aplicado, también puede apagarlo.

En muchos casos el controlador se coloca dentro del arrancador evitando costos mayores.

1.3. MOTORES MONOFASICOS DE CORRIENTE ALTERNA

Tanto en cantidad como en variedad de equipos, los motores mo

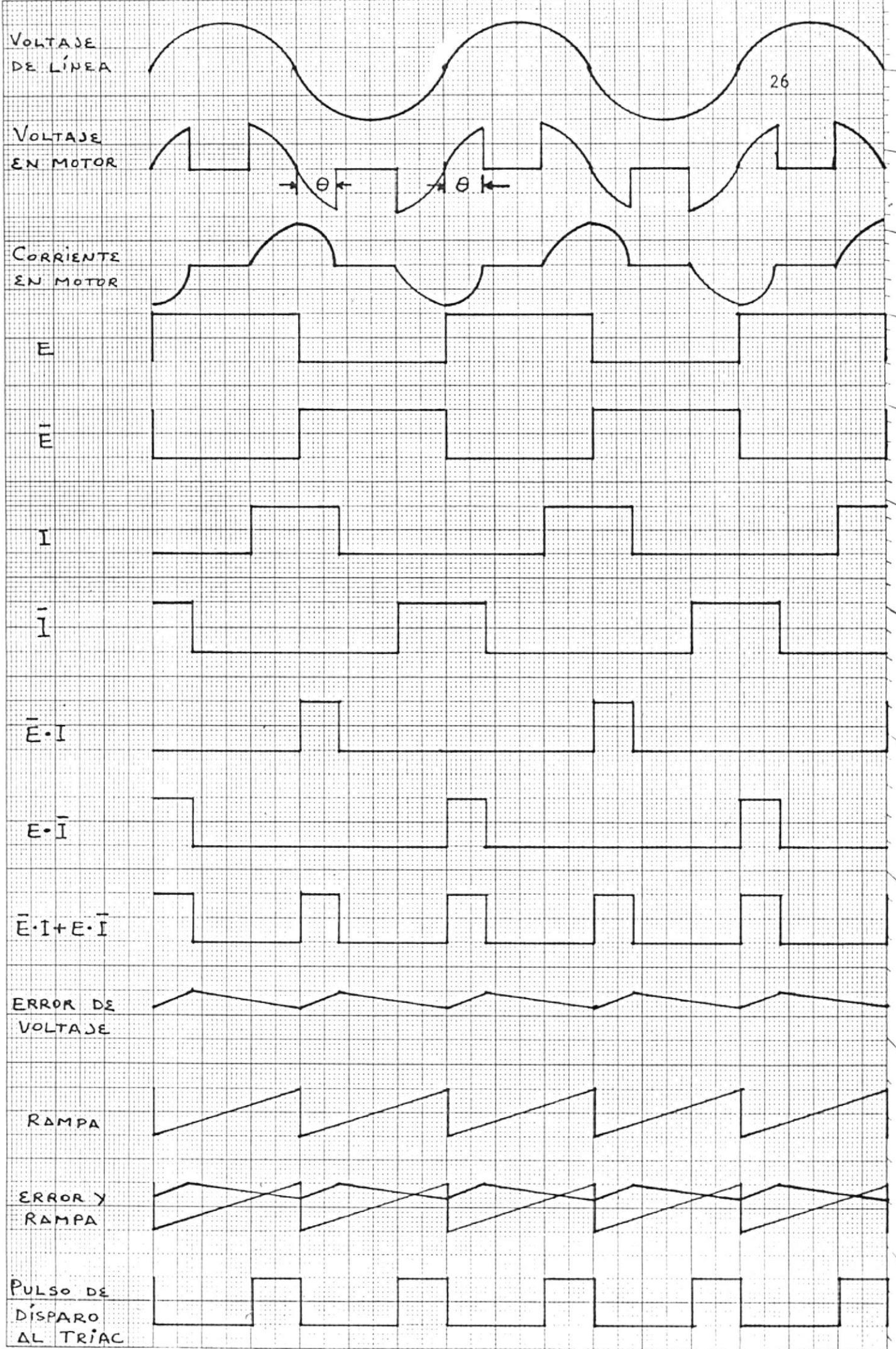


Fig. 11.1. FORMAS DE ONDA DE VOLTAJE.

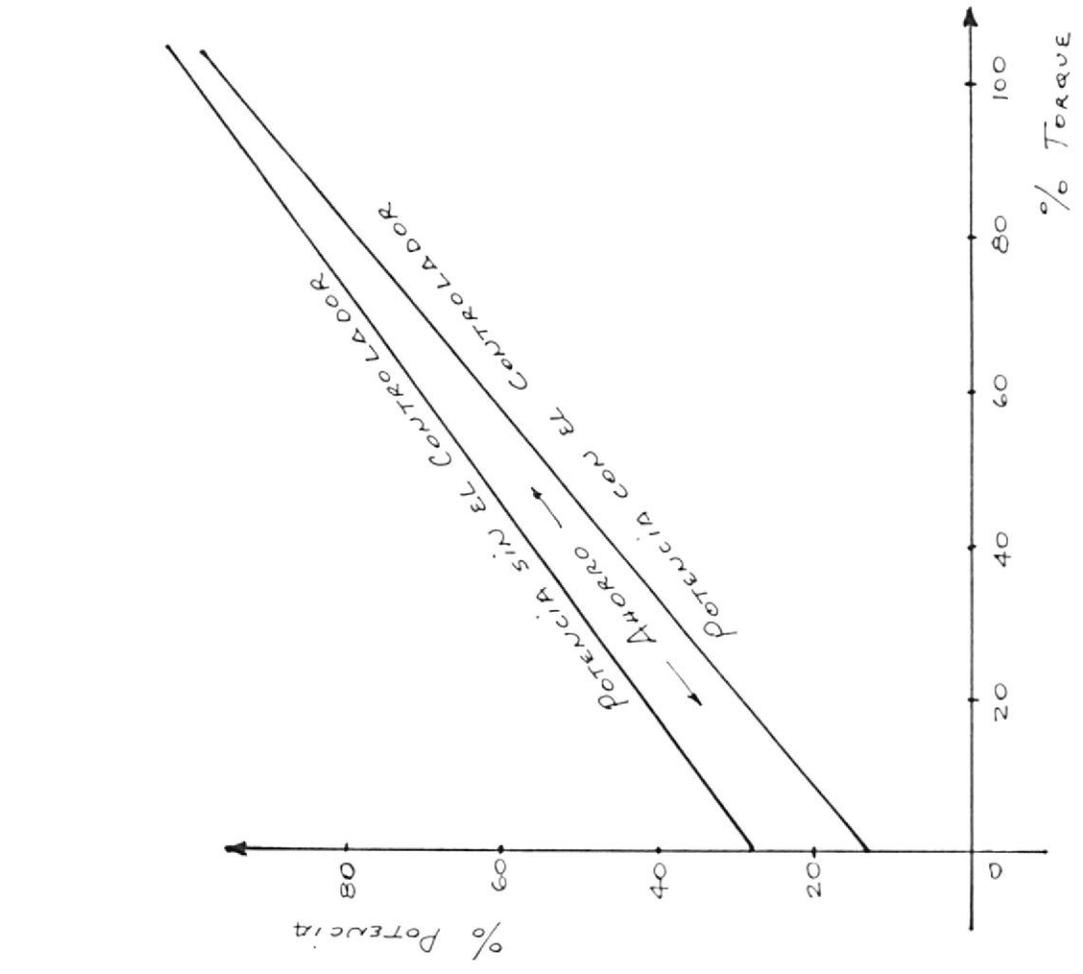


Fig. 1.2. a.

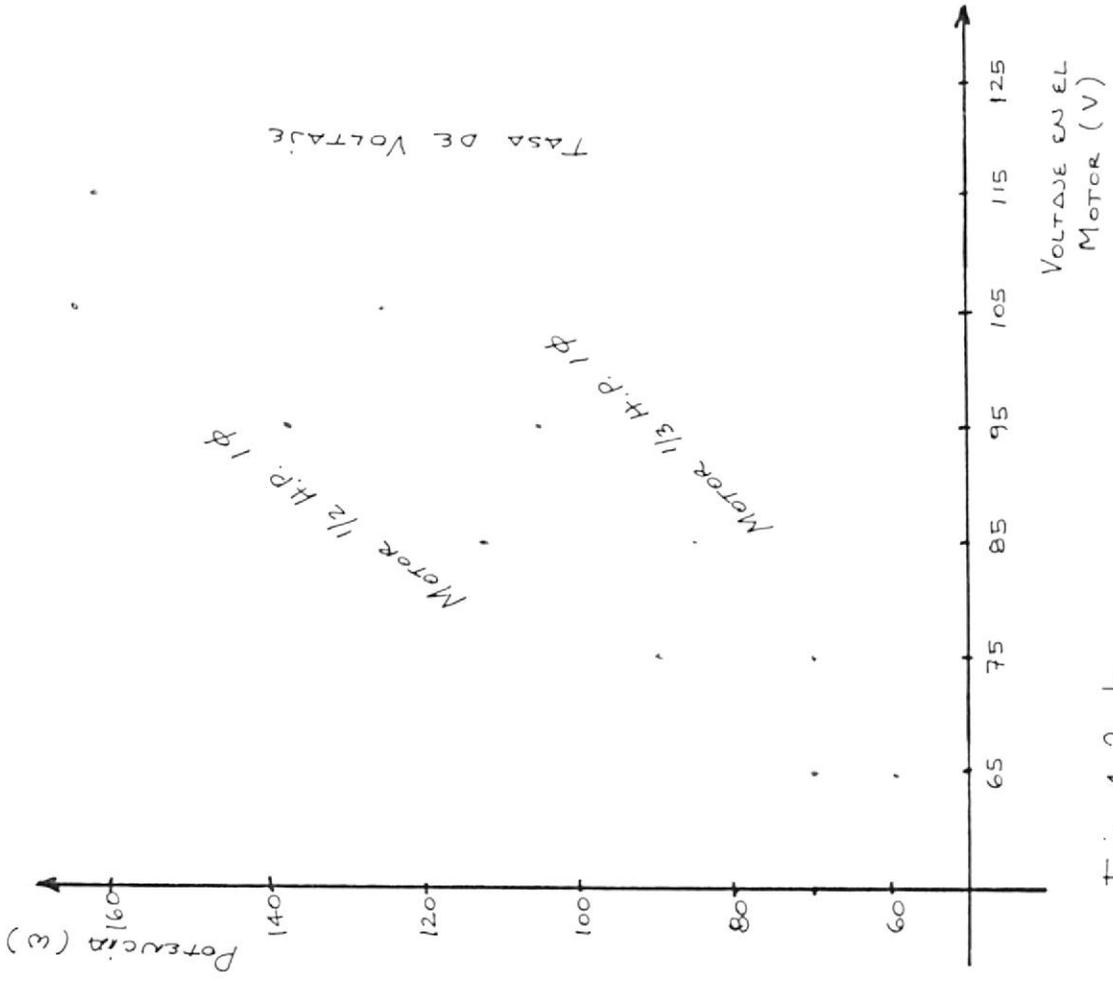


Fig. 1.2. b.

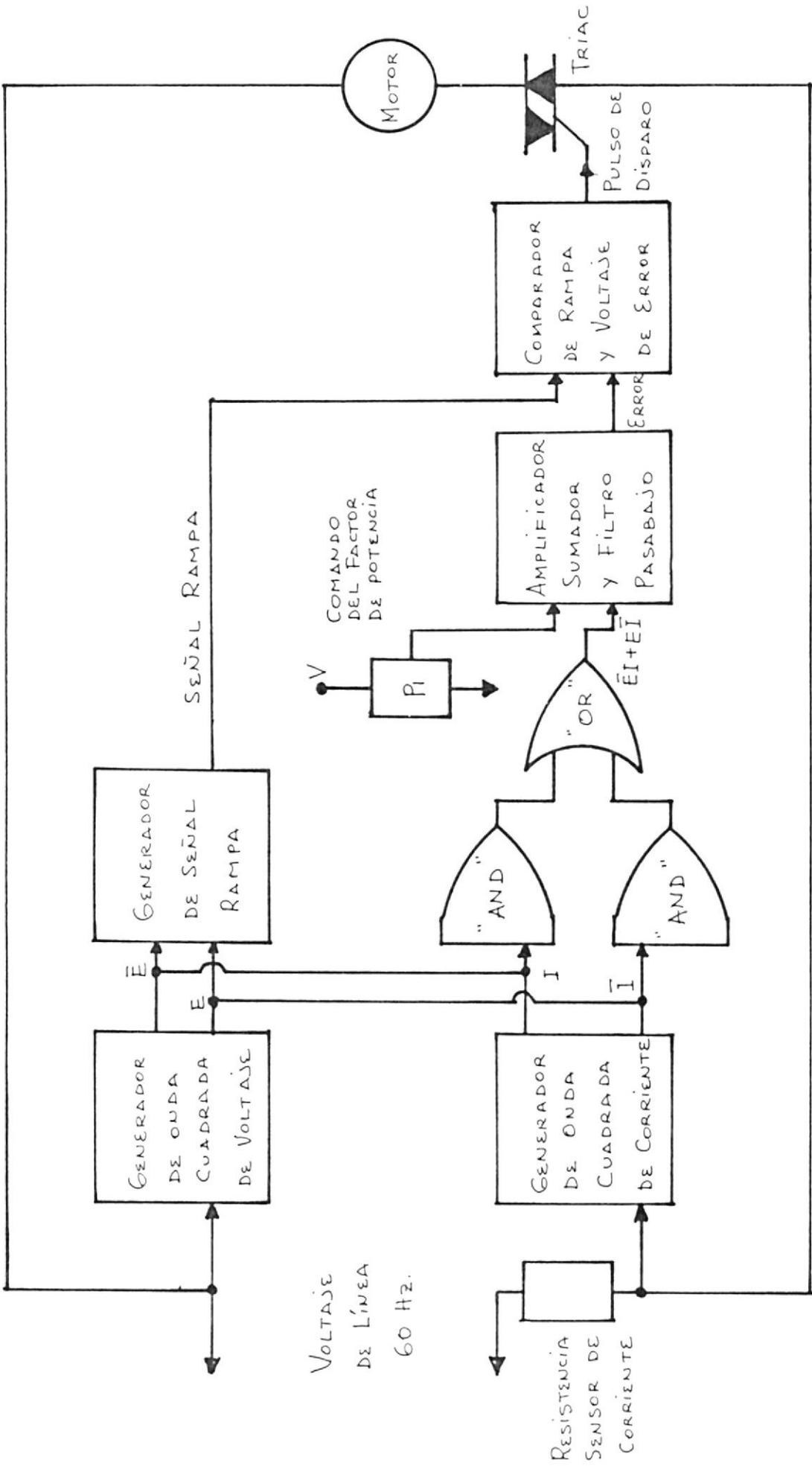


Fig. 1.3. DIAGRAMA DE BLOQUES.

monofásicos son mucho más numerosos que los polifásicos. En el hogar existen aplicaciones como máquinas lavadoras, refrigeradoras, bombas de circulación de calor, relojes, aparatos de cocina, herramientas de mano, tocadiscos, etc., son todos movidos por motores monofásicos de corriente alterna .

Los motores monofásicos pueden agruparse en tres categorías:

- Inducción
- Síncronos; y,
- Conmutación.

1.4. CONSTRUCCION Y PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES DE INDUCCION

En la figura N°- 1.4., en la parte a, se ilustra la construcción de un estator monofásico de dos polos. Los polos se distribuyen muy a semejanza de un motor polifásico.

Se muestra la dirección de referencia positiva de las corrientes, las que crean un flujo cuya dirección positiva es hacia arriba sobre el eje vertical.

Con corrientes alternas en el devanado, la intensidad del flu

jo será de $\phi_m \text{ Sen}\omega t$. A diferencia del devanado polifásico, éste devanado no produce un flujo rotatorio. El flujo siempre se encuentra sobre el eje vertical, dirigido hacia arriba durante la mitad positiva del ciclo y hacia abajo durante la mitad negativa.

En la figura N° 1.4., en su parte b, el estator se representa mediante el símbolo convencional para una bobina. Dentro del estator se encuentra un rotor de jaula de ardilla. Con el rotor en reposo y el estator excitado, el flujo inducirá voltajes en el rotor y según la ley de LENZ, la dirección del flujo establecido por las corrientes resultantes se oponen al flujo del estator. Este flujo de rotor también cae sobre el eje vertical, en consecuencia no hay ángulo de producción de torque y el rotor no girará.

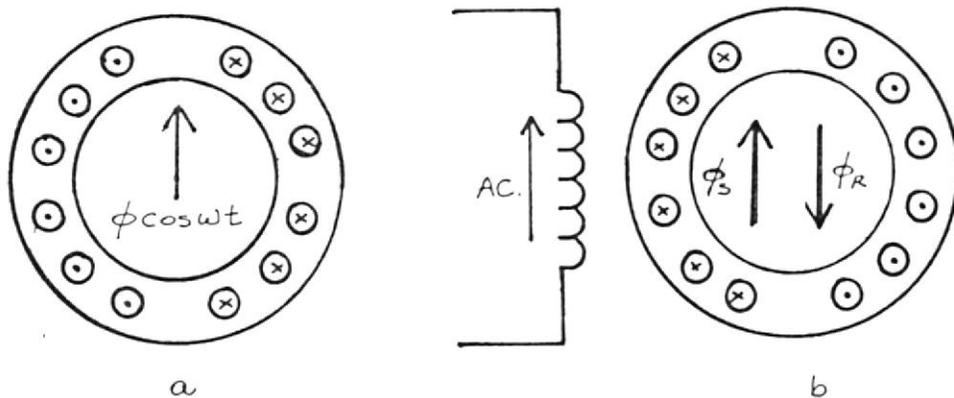


Figura N°1.4. (a) CONSTRUCCION DE UN ESTATOR MONOFASICO;
 (b) ESTATOR REPRESENTADO MEDIANTE EL SIMBOLO CONVENCIONAL PARA UNA BOBINA.

Si el flujo del estator fuera constante en dirección e intensidad mientras el rotor gira, se generarían voltajes en las barras de la jaula de ardilla justamente como se generarían - en los conductores de una armadura de corriente continua.

También se generan voltajes con el rotor girando en el flujo senoidal, pero varios factores complican la relación voltaje-flujo y éstos son:

1. Debido a que el flujo es variable con el tiempo, el voltaje inducido en un conductor no es el voltaje de amplitud constante que se induce en un generador de corriente continua.
2. En el generador de corriente continua el eje de cuadratura - perpendicular al vector flujo, separa los voltajes de conductores de polaridad opuesta; esto es, todos aquellos que están a un lado del eje tienen la misma polaridad - mientras que todos aquellos que están al lado opues- to tendrán polaridades opuestas. Este principio es válido con el rotor de Jaula de Ardilla girando en un campo senoidal.
3. Aunque la localización del eje de cuadratura permanezca fija, las polaridades de los voltajes inducidos en ambos lados cambian debido a la inversión del flujo.

Con la excepción de la conmutación, existe retraso inductivo y la magnitud de la corriente es constante, pero en las barras cortocircuitadas de la jaula de ardilla, las corrientes no son continuas si no variables con el tiempo. La induc-tancia es un factor y las corrientes se retrasan con respec-to a los voltajes inducidos en 90° .

La teoría de campo cruzado del motor de inducción requiere - un análisis detallado de las relaciones de flujo y corriente, su conclusión es que cuando rota existe un flujo de rotar sobre el eje de cuadratura el cual reacciona con el flujo del estator para producir torque en la dirección que mantiene la rotación. El ángulo de torque es fijo de 90° , pero con los flujos variables con el tiempo, el torque instantáneo no es constante.

Una segunda teoría, la del flujo giratorio doble, permite - la aplicación de los principios del motor de inducción polifásicos a la máquina monofásica.

1.4.1. El motor Universal

El motor universal es un motor devanado en serie para funcionar aproximadamente a la misma

velocidad y salida, con corriente continua o con co rriente alterna monofásica de frecuencia no mayor de 60 Hz y con un voltaje RMS aproximadamente - igual al voltaje de corriente continua.

Del estudio del motor de corriente continua, se sabe que la inversión de las direcciones tanto del flujo como de las corrientes de armaduras no cambia la di rección del torque.

La dirección del flujo depende de la dirección de la corriente a través de la bobina. Puesto que la bo bina de un motor serie se excita mediante la corriente de la armadura tanto el flujo como la co rriente se contraponen simultáneamente.

El torque instantáneo es siempre en la dirección de rotación, pero el torque de corriente alterna tendrá la pulsación de doble frecuencia común a la potencia monofásica.

Las características de torque - velocidad difieren al go entre las de corriente alterna y las de corriente continua. Con corriente continua, la fuerza contra electromotriz es menor que el voltaje aplicado en

una cantidad J_a ($R_{ec} + R_{ce}$), pero con corriente alterna se presenta una caída adicional en las reactancias inductivas, lo cual resulta en un contravoltaje generado inferior y en una velocidad más baja para el mismo torque.

El voltaje RMS de corriente alterna, tiene un valor pico de $2V$, la saturación a voltaje más elevados ocasiona un flujo efectivo inferior al que se obtiene con corriente continua.

En una máquina de corriente continua, los núcleos del estator y de los polos se fabrican generalmente de fundiciones sólidas y como el flujo es constante para operación con corriente alterna las pérdidas en el núcleo serían grandes si no se utilizaran láminas. Debido a la reacción de la armadura se utilizan devanados compensadores.

1.4.2. Motor de fase partida

En la figura N° 1.5., se ilustra un motor de fase partida. El estator posee dos devanados: principal y auxiliar. Este último se energiza solamente durante el período de arranque, cuando el motor alcanza una velocidad igual al 75 - 80 % un interruptor centrí-

fugo se abre desconectando el devanado auxiliar. Puesto que el devanado principal se energiza continuamente en funcionamiento, se enrolla con alambre de calibre pesado, más aun el torque de funcionamiento es proporcional al flujo, el cual a su vez es proporcional al número de vueltas; por lo tanto el devanado principal tiene un número relativamente grande de vueltas. El ángulo de impedancia del principal es mayor que el del auxiliar y la corriente en éste último es adelantada con respecto a la del principal. El desfase es típicamente del orden del 25 %.

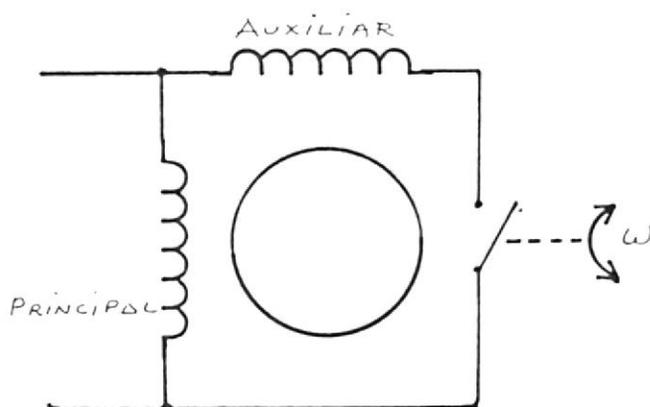


FIGURA N° 1.5. - MOTOR DE FASE PARTIDA

Un motor de arranque por resistencia es uno en el cual se utiliza resistencia externa adicional en serie con el auxiliar para aumentar más el desfasaje.

Las corrientes de arranque son relativamente grandes, 4 a 7 veces la corriente nominal, pero no lo suficiente como para perturbar el sistema de suministro como lo hacen las corrientes de arranque de los motores polifásicos grandes y por tanto los motores se arrancan directamente de la línea.

Cuando se utiliza un interruptor centrífugo para abrir el circuito auxiliar, éste se localiza dentro de la estructura, puesto que sería inaccesible para efectos de mantenimiento en los casos de motores sellados herméticamente.

Este tipo de motor utiliza un interruptor electromagnético con una bobina sensora en serie con el devanado principal para controlar contactos normalmente abiertos en el auxiliar.

La alta corriente de arranque hace que los contactos se cierren pero a medida que aumenta la velocidad del

rotor y la corriente decrece, los contactos se abren de nuevo a una velocidad prefijada. La dirección de rotación de un motor de fase partida se puede obtener cambiando las conexiones de línea al devanado auxiliar.

Los devanados auxiliares no se construyen para soportar operaciones prolongadas. Si el interruptor no se abre cuando el motor alcanza su velocidad, la acumulación resultante de calor puede ocasionar que se quemen ambos devanados.

Este motor tiene un condensador del orden de 75 a 350uF, en serie con el devanado auxiliar. El torque de arranque es proporcional al producto $I_{mr} \cdot I_a \text{ Sen } \alpha$, en donde α es la separación angular entre las corrientes.

Desde el punto de vista del torque solamente, parecería que una separación de 90° es óptima. Sin embargo - cuando se consideran el tamaño del condensador, la magnitud de la corriente de arranque y la economía, resulta más atractiva una menor separación. Si el ángulo es de 80° , por ejemplo, el torque se reduce sólo en 1.5 % si los otros valores permanecen iguales.

Ya que tanto los motores de fase partida como los de

arranque por condensador funcionan con el devanado auxiliar, sus características de funcionamiento son las mismas. Sin embargo, una comparación indica un mejor flujo en el circuito de arranque por condensador y en combinación con el mayor ángulo produce torques de arranques considerablemente mayores.

Los torques de arrastre, aceleración y caída, varían con las especificaciones de velocidad y caballaje, un parámetro adicional de torque, el de conmutación, es el mínimo desarrollado a medida que el motor acelera a través de la velocidad de operación del interruptor. El torque de caída es el máximo torque desarrollado con sólo el devanado de marcha energizado.

1.4.3. Motor de condensador permanente

En este caso, el motor funciona con ambos devanados. Cuando funciona con un solo devanado las pulsaciones de potencia al doble de la frecuencia aplicada ocasionan un motor relativamente ruidoso. Con dos devanados desfasados 90° , la potencia es pareja y el motor es silencioso. Simultáneamente, el factor de potencia y la eficiencia

del motor aumentan.

Con devanados idénticos un sencillo montaje de conmutación permite la marcha en ambas direcciones.

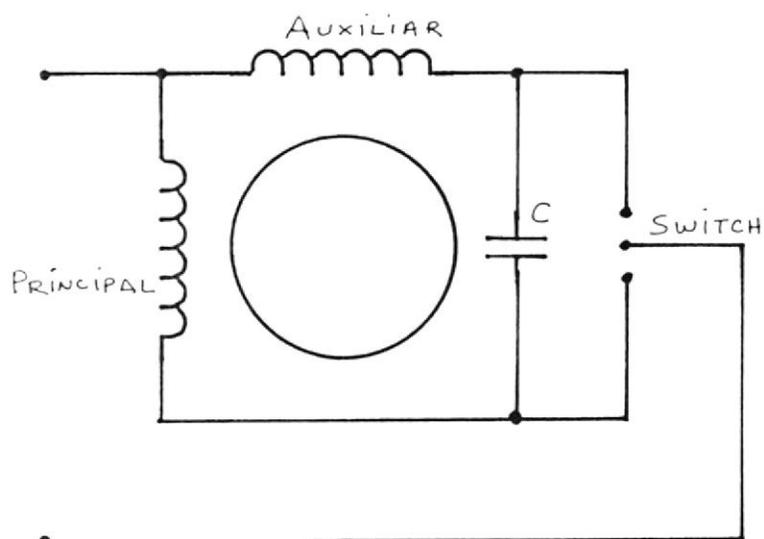


FIGURA N^o 1.6.-

La velocidad de un motor de condensador permanente puede controlarse ajustando el voltaje. Las variaciones de velocidad en motores con devanados auxiliares están restringidas, puesto que, para proteger al auxiliar, la velocidad debe mantenerse por encima del punto al cual el interruptor centrífugo se abre.

1.4.4. Motor de condensador de dos valores

Para conservar las características de marcha, pero mejorar el torque de arranque, es posible conectar un segundo condensador en paralelo con un condensador permanente durante el período de arranque como se muestra en la figura N° 1.7.

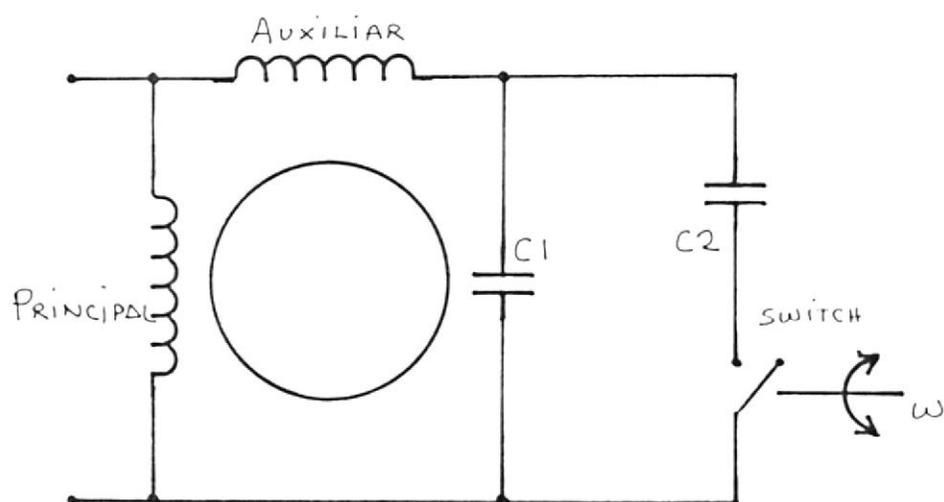


FIGURA N° 1.7.-

La capacitancia durante el período de arranque puede ser 10 o más veces la capacitancia de marcha. El condensador de arranque se especifica para trabajo limitado.

1.5. CALCULOS Y ANALISIS DEL CIRCUITO

Para alimentar a los circuitos necesitamos de una fuente de poder dada por la figura N° 1.8.

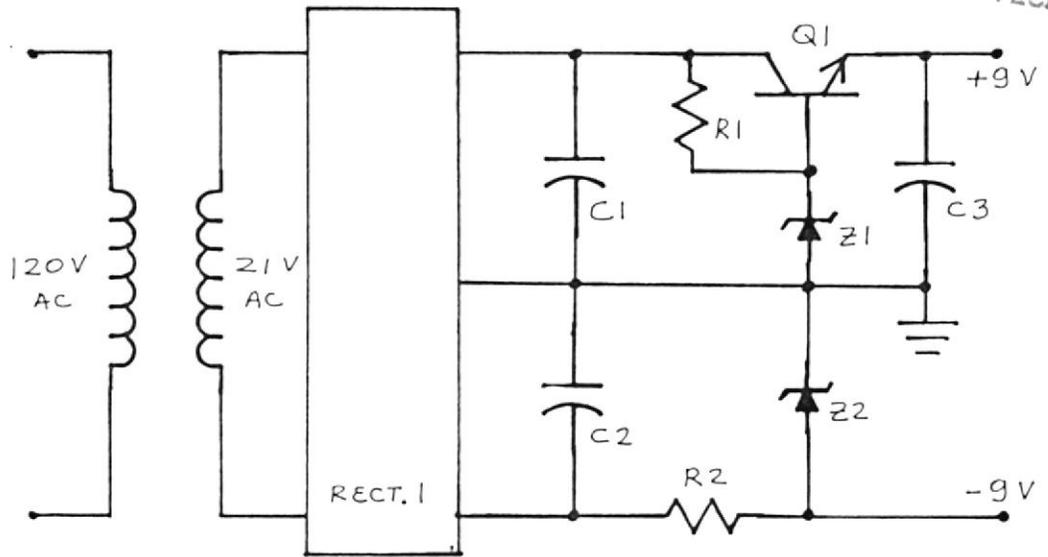


FIGURA N° 1.8.- FUENTE DE PODER

Q₁ = 2N2222A TRANSISTOR
 RECT1 = 600 V 1A PUENTE RECTIFICADOR
 C₁=C₂= 470 μF/25V CAPACITORES ELECTROLITICOS
 C₃= 470/16V CAPACITORES ELECTROLITICOS
 R₁= 1K_Ω 1/2 RESISTENCIA
 R₂= 560_Ω 1/2 RESISTENCIA
 Z₁= Z₂ = 1N757 DIODOS ZENER

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2} N_p}{2} = \frac{\sqrt{2} \cdot 21}{2} = 14.85 \text{ voltios}$$

GENERADOR DE ONDA CUADRADA DE VOLTAJE

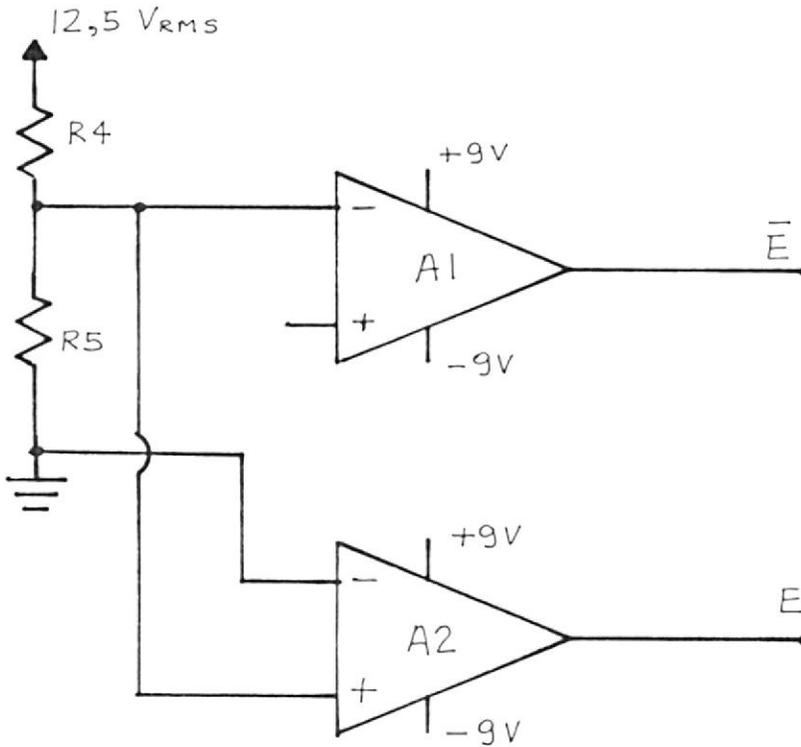


FIGURA N° 1.9.- GENERADOR DE ONDA CUADRADA DE VOLTAJE

El generador de onda cuadrada consiste del circuito integrado en configuración de comparador por cruce cero, el cual toma la señal senoidal del secundario a la frecuencia de 60 Hz y la convierte en onda cuadrada a la misma frecuencia.

$A_1 = A_2 = \text{LM741}$ AMPLIFICADORES OPERACIONALES

$R_5 = 10\text{K}\Omega$ 1/2 w RESISTENCIA

$R_2 = 100\Omega$ 1/2 w RESISTENCIA

GENERADOR DE ONDA CUADRADA DE CORRIENTE

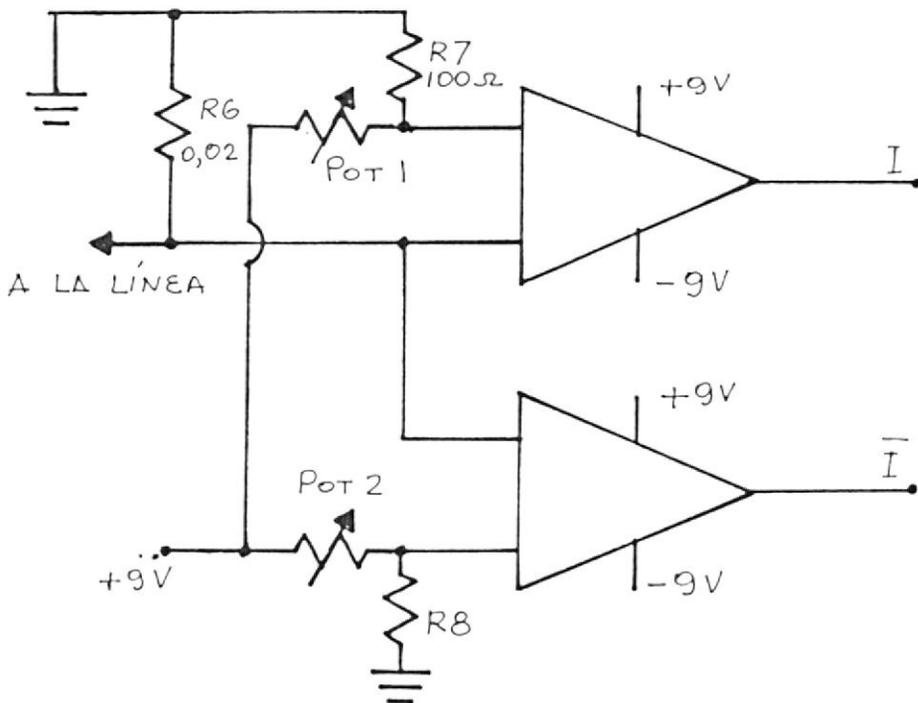


FIGURA N° 1.10.- GENERADOR DE ONDA CUADRADA DE CORRIENTE

Se toma una señal de voltaje de la línea, el cual es proporcional a la corriente que circula en la línea, generando a la salida del operacional una señal cuadrada con una

frecuencia igual a la de línea.

GENERADOR DE RAMPA

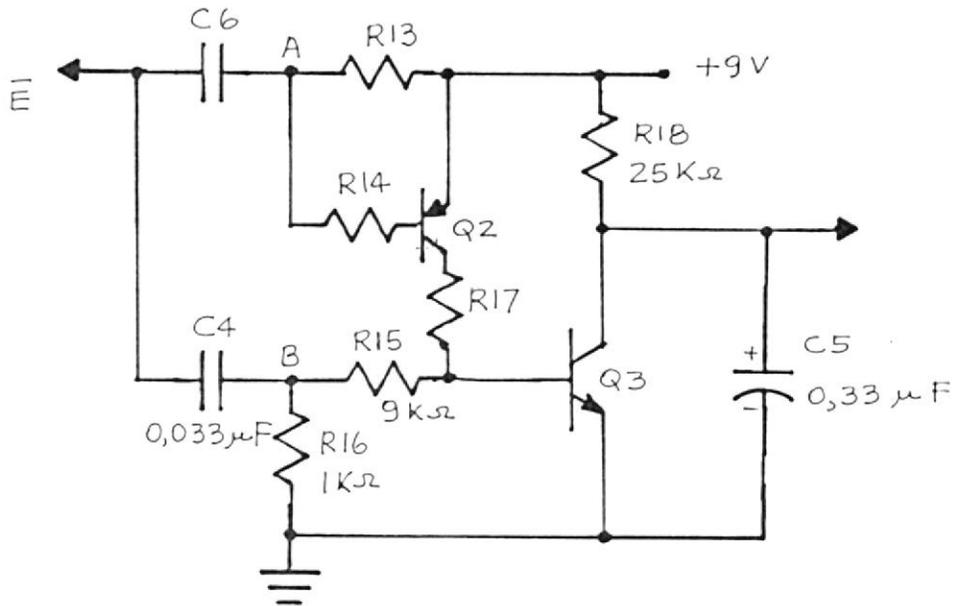


FIGURA N° 1.11.- GENERADOR DE RAMPA

Q2 = ECG159 hfe = 180

Q3 = ECG123A hfe = 200

I_{ce} max de Q2 = 500 mA

I_{ce} max de Q3 = 1A

La salida del generador de onda cuadrada \bar{E} , alimenta al

generador rampa, el cual a través de los capacitores C6 y C4 conducen al generador. El capacitor C5 se carga a través de la resistencia R18 de 25K cuya constante de tiempo es de 8,3 ms. igual a la mitad de tiempo de un ciclo de la línea.

Al entrar la señal de onda cuadrada E en su ciclo positivo (medio ciclo) tendremos por fracciones de tiempo un voltaje pico de 18V en los puntos A y B, el transistor Q2 se encuentra en corte, mientras que Q3 se satura descargando violentamente el capacitor C5. Los puntos A y B tienden a tener inmediatamente el mismo voltaje de alimentación de +9V, manteniéndose Q2 en corte mientras que Q3 entra en corte, cargándose luego el capacitor C5 hasta +9V. En el instante en que la señal E va a -9V en su otro medio ciclo, los puntos A y B pasan a tener 0V, en ese instante el transistor Q2 se satura obligando a descargar el capacitor repitiéndose el proceso sucesivamente. En el momento en que la corriente que pasa por RM es alta el transistor Q2 se satura.

CIRCUITO LOGICO

La función de los diodos es recortar la parte negativa de la salida de los generadores de ondas cuadradas de

corriente y voltaje. El circuito integrado usado es el CMOS CD4011.

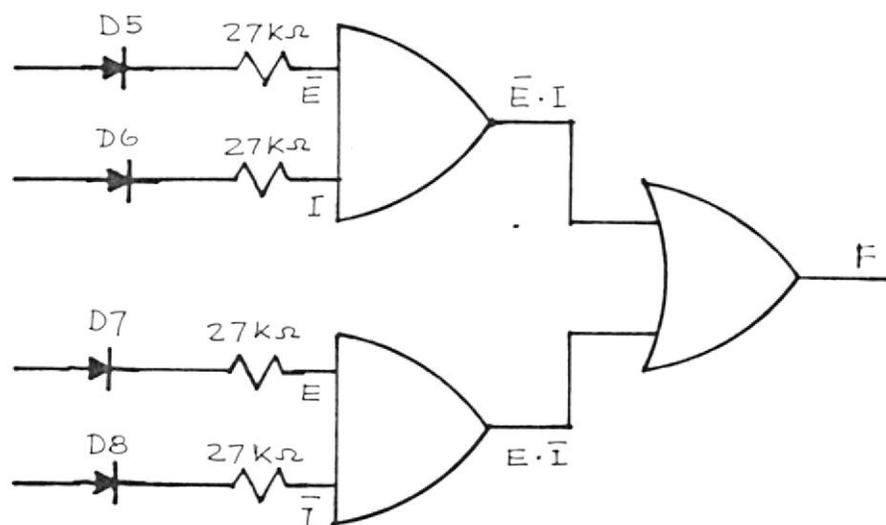
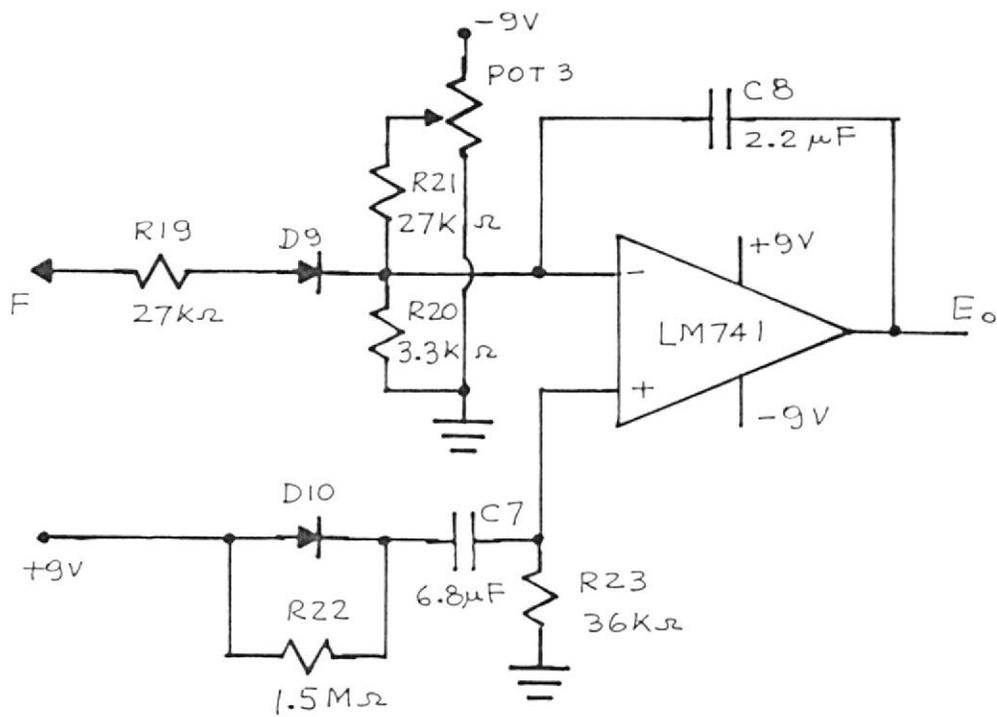


FIGURA N^o 1.12. CIRCUITO LOGICO

CIRCUITO SUMADOR E INTEGRADOR Y FILTROS PASABAJO

La salida del circuito lógico alimenta al sumador - integrador, en el cual el tren de pulsos es sumado a un nivel DC fijado por el potenciómetro de comando, luego integrado para tener una señal de error.

La señal de error puede ser variada en ancho y amplitud,



BIBLIOTECA

FIGURA N° 1.13.- CIRCUITO SUMADOR E INTEGRADOR Y FILTROS PASABAJO.-

cuando R_{20} asume varios valores. De esta manera estamos variando el nivel de voltaje del pulso a la salida del circuito lógico.

Otra manera de variar la pendiente a la salida del integrador A_1 es variando la capacitancia del capacitor C_8 , haciendo más notable los cambios que ocurren en la se

ñal error y consecuentemente el desfaseamiento del factor de potencia.

CIRCUITO DE DISPARO

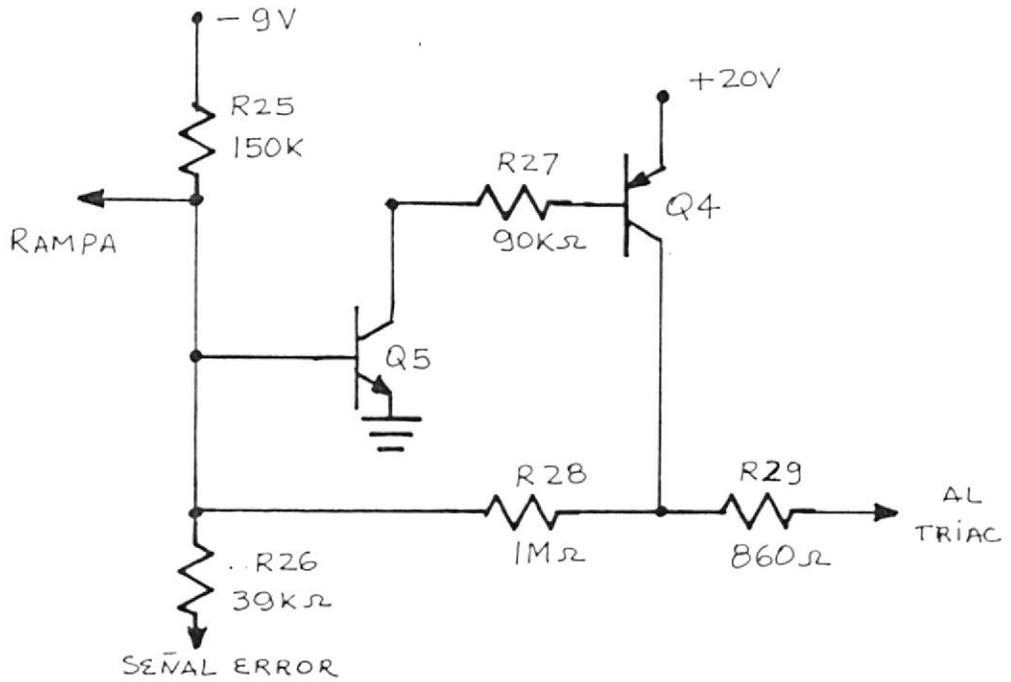


FIGURA N° 1.14.- CIRCUITO DE DISPARO

Como podemos ver en la base Q₅ se mezclan las señales de error y la rampa y un nivel DC de -9V. El propósito es sobrepasar el nivel de -9V y volverlo positivo durante los instantes en que el triac debe ser disparado y consecuentemente entrar en un nivel de conducción.

Produciendo la saturación de Q₅, obligado por la señal -

de error más la rampa que sobrepasa en la base el nivel - de -9V, generando una corriente suficiente en la base de Q4 para llevarlo a su estado de saturación. Consecuentemente aplicando un voltaje de +20V a través de la resistencia R29 de 860 OHMIOS se genera la corriente de disparo para la puerta (gate) del triac.

La resistencia R28 de realimentación sirve para hacer más rápido el disparo y estable el circuito a la vez.

SELECCION DEL TRIAC

Potencia del motor	=	1HP = 746 w
Voltaje de operación	=	220 VAC
Corriente a plena carga	=	5,2 A
Corriente +10% de tolerancia	=	5,72 A
Potencia de disipación Pd	=	6,5 w
Resistencia térmica aparente	=	$R_{\theta j} = 1,1^{\circ} \text{ c/w}$

La temperatura de operación está dada por:

$$T_j = P_d \cdot (R_{\theta j} + 6^{\circ} \text{ c/w}) + 40^{\circ} \text{ C}$$

$$T_j = 6,5 (1,1 + 6) + 40 = 86,15^{\circ} \text{ C}$$

La corriente de operación de disparo está dada por:

$$I_{gt} = \frac{V_t - V_{gt}}{R_s} = 20\text{mA}$$

De donde:

$$R_s = \frac{18 - 1}{20 \text{ mA}} = 850$$

La potencia en la resistencia R_s es igual a:

$$P = I^2 R_s = (20 \text{ mA})^2 \cdot 850 = 0,34 \text{ w}$$

Entonces, R_s puede tomar el valor comercial de 860 OHMIOS y de 0,5 w.

El voltaje en el motor está dado por:

$$V_p = 220 \times \sqrt{2} = 310,2 \text{ volts.}$$

Luego, el triac debe tener un valor de 600 voltios.

Comercialmente, el triac es el ECG5677 cuyos valores son:

$$V_p = 600 \text{ voltios}$$

$$I_{gt(\max)} = 80 \text{ mA}$$

$$V_{gt} = 1.0 \text{ voltios}$$

$$V_{gt\max} = 2,5 \text{ voltios}$$

$$V_f = 4,4 \text{ voltios}$$

$$I_{\text{surge}} = 100 \text{ mA}$$

$$I_{\text{hold}} = 75 \text{ mA}$$

$$T_j = -65^\circ \text{ C a } 100^\circ \text{ C}$$



1.6. LISTA DE MATERIALES Y COMPONENTES

El circuito consta de los siguientes elementos:

- 1 transformador de tap central 120 v/25V
- 1 puente rectificador 400 V, 1 A
- 2 diodos 1N4004
- 2 capacitores de 470 uF/25V, electrolíticos
- 2 diodos Zener 1N757
- 3 transistores ECG 123A (2N2222A)
- 1 capacitor de 2,2 uF/25V electrolítico
- 3 capacitores de 0,033 uF
- 1 capacitor de 6,8 uF/10V electrolítico .

- 1 capacitor de 2,2 uF/25 ELECTROLÍTICO
- 2 resistencia de 1K, 1/2 w
- 1 resistencia de 560, 1/2 w
- 3 resistencia de 27K, 1/2 w
- 1 resistencia de 10 K, 1/2 w
- 1 resistencia de 0,02 ohmios, 5W
- 2 resistencias de 100 ohmios, 1/2 w
- 1 resistencia de 5,6 K, 1/2 w
- 1 resistencia de 1,5 K, 1/2 w
- 1 resistencia de 4,7 K, 1/2 w
- 1 resistencia de 25 K, 1/2 w
- 1 resistencia de 9K, 1/2 w
- 1 resistencia de 3,3 K, 1/2 w
- 1 resistencia de 1,5 M, 1/2 w
- 1 resistencia de 150 K, 1/2 w
- 1 resistencia de 68K, 1/2 w
- 1 resistencia de 39 K , 1/2 w
- 1 resistencia de 50 , 1/2 w
- 1 resistencia de 1M, 1/2 w
- 1 resistencia de 860, 1/2 w
- 3 potenciómetro 100 K.
- 2 transistores ECG159 (2N2907A)
- 2 circuitos integrados LM741
- 1 circuito integrado CMOS ECG4011

1.7. CONCLUSIONES

El controlador de factor de potencia para su análisis de be contar con equipos que hagan mediciones reales y los motores en los que se aplica deben tener los datos de sus características completos.

Para su uso se debe contar con los siguientes requisitos:

1. Motores con cargas constantes, pero que estén por debajo de su valor nominal.
2. Máquinas en las cuales la carga varía desde su valor nominal a sin carga.

Como podemos notar, el controlador en ningún momento se justificará cuando el motor está cargado al 100 % de su valor nominal. Nuestro problema radica en encontrar aplicaciones de este tipo como podemos sugerir:

- Bandas transportadoras
- Sierras motoeléctricas
- Ascensores
- Bombas de presión

Y en general todo tipo de motor que tenga carga variable.

1.8. APLICACION PRACTICA

En el caso de una refrigeradora, encontramos que el compresor se encuentra con una carga debajo de la nominal . Aplicado el controlador, recorta la onda de entrada de voltaje a un nivel menor, optimizando el flujo de energía hacia el motor del compresor.

En esta experiencia vemos que abriendo la puerta del congelador, el foco del mismo hace variar el factor de potencia. Sin embargo, con la puerta abierta y el foco apagado, observamos una disminución en la corriente. Esto se debe a que la parte del control, desconecta en una parte el sistema total, consumiendo menor corriente. A pesar de que el motor se apaga se establece que el voltaje total para ciertos consumos internos de tipo resistivo en la refrigeradora, como un pequeño ventilador, no sobrepasa el nivel de referencia para prender el controlador. Estas pruebas en un aparato real nos muestran el funcionamiento del controlador que no tienen - problemas durante los días de prueba en que la disipación de calor del triac no tuvo inconvenientes. Se presenta con problemas al principio debido a la resistencia de retroalimentación que debe ser adecuada a la corriente que va a pasar a través de ella y además

debe calibrarse con relación a la referencia DC de corriente para que pueda ser sensada y además podamos obtener una onda cuadrada a la salida.

A continuación podremos observar las figuras N^os. 1.15. , 1.16., y 1.17.



CARACTERISTICAS DEL MOTOR CON CARGA CON EL CONTROLADOR

V	Voltios	104	108	110	115	118	120	122	128
Z	Amps.	1.45	1.56	1.68	1.81	1.87	1.92	1.92	1.92
W	Vatios	70	81	93	105	114	116	122	138
F.P.		0.43	0.45	0.51	0.53	0.54	0.55	0.57	0.58
Theta	° C	64.53	63.26	59.34	57.99	57.32	56.63	55.25	54.25
Alfa	° C	99,81	96.73	88	85	81	78.63	75.65	75.65

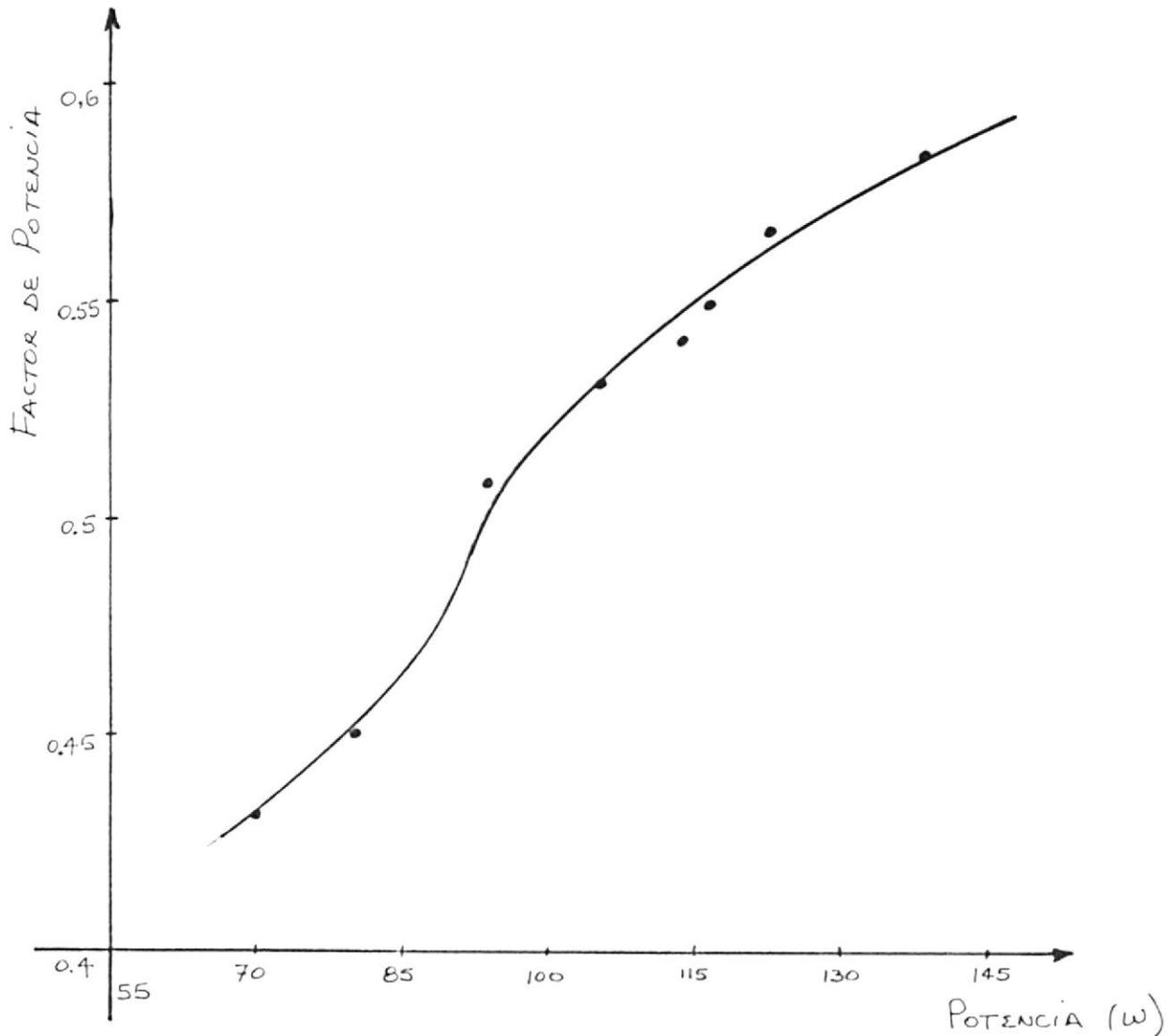


FIGURA N° 1.15.-

CARACTERÍSTICA DEL MOTOR CON CARGA SIN EL CONTROLADOR

V	I	W	F.P.	THETA (θ)
Volt.	Amp.	Vatios		$^{\circ}$ C
115	2.2	230	0.33	70.73
115	2.2	290	0.43	64.53
115	2.2	320	0.48	61.81
115	2.2	350	0.51	59.34
115	2.2	380	0.55	56.63
115	2.2	410	0.61	52.41
115	2.3	470	0.68	47.16
115	2.4	550	0.70	45.57
115	2.4	620	0.72	43.95
115	2.6	670	0.75	41.41
115	2.8	710	0.76	40.54
115	3	740	0.77	39.65

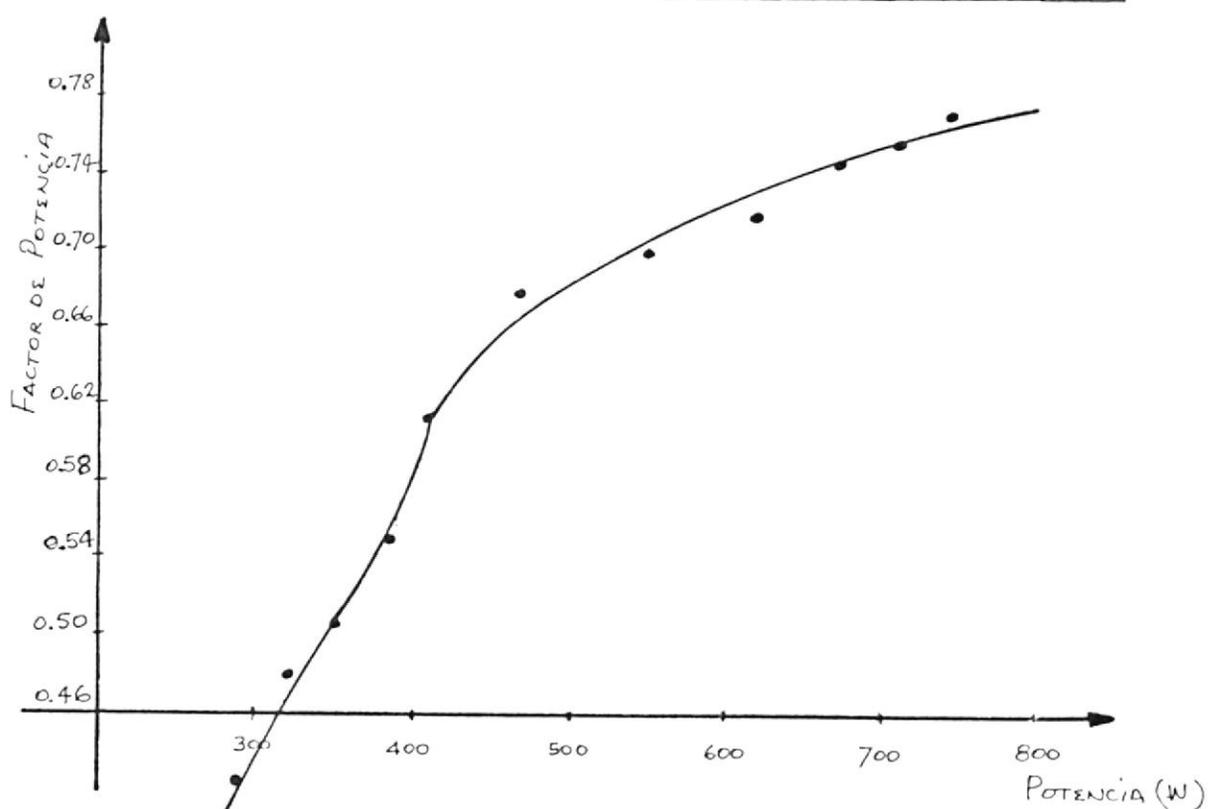


FIGURA N^o 1.16.- CARACTERÍSTICA CON CARGA SIN CONTROL.

RENDIMIENTO DEL CONTROLADOR PARA DIFERENTES VALORES DEL FACTOR DE POTENCIA

F.P.	W(vatios)	%CARGA	%AHORRO	FP	%ALUMINIO	FP	%AHORRO	FP
0.36	230	31.5	49	0.7	43	0.6	22	0.4
0.44	290	41.2	37	0.7	27	0.6	13	0.4
0.49	310	42.3	36	0.7	22	0.6	6	0.4
0.52	325	45.6	29	0.7	16	0.6	2	0.4
0.56	350	47	20	0.7	14	0.6	0	0.4
0.63	380	51.3	18	0.7	10	0.6	0	0.4
0.68	410	63.8	10	0.7	8	0.6	0	0.4
0.72	450	74.5	5	0.7	2	0.6	0	0.4
0.74	500	76.7	0	0.7	0	0.6	0	0.4
0.76	590	81.4	0	0.7	0	0.6	0	0.4
0.78	650	93.2	0	0.7	0	0.6	0	0.4

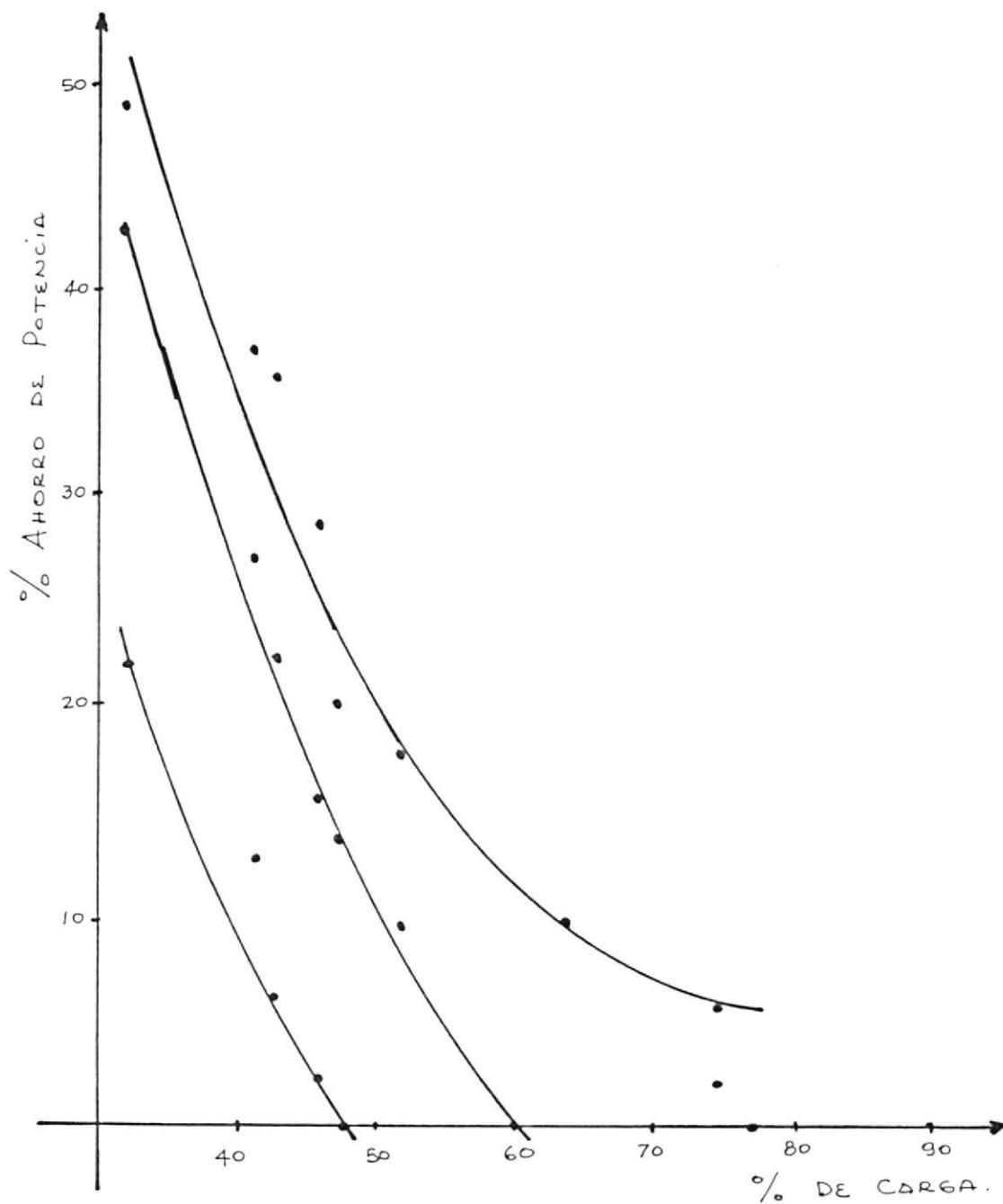


FIG. 1.17. RENDIMIENTO DEL CONTROLADOR.

CAPITULO II

AGREGANDO POCOS COMPONENTES AL CIRCUITO INTEGRADO HV-1000

2.1. CARACTERISTICAS

- Opera directamente con 120/240 voltios C.A. (HV1000/HV1000A).
- Trabaja tanto en 50 Hz como en 60 Hz.
- La etapa de salida DISPARA DIRECTAMENTE EL TRIAC.
- El tipo del TRIAC ESTA DADO EN FUNCION DEL TAMAÑO DEL MOTOR.
- En motores con carga ligera o variable se produce ahorro de energía que va desde un 10 % hasta un 50 %.
- Como anticipador de carga percibe cargas de choque y responde instantáneamente con plena potencia, evitando que el motor se detenga.
- Soporta sobrevoltajes de línea de hasta 3500 voltios.

- Produce que el motor funcione más frío y silencioso, alargando la vida útil del motor.
- Puede ser instalado en el interior del motor.
- Necesita sólo de 3 resistencias, 3 capacitores, un potenciómetro, un diodo y de un tiristor para armar un controlador completo.

2.2. DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO

Los circuitos de control para ahorro de energía, que utilizan los integrados HV-1000 y HV-1000A, aplicados en motores de inducción están diseñados para reducir el consumo de energía de motores de inducción de una sola fase.

El circuito controlador sensa la carga en el motor y luego , controla un triac para aplicar voltaje reducido a carga ligeras y voltaje nominal para cargas nominales.

El circuito integrado sensa el voltaje, por el pin #12, a través de una resistencia externa.

Estos circuitos integrados, por su estructura plástica, de



BIBLIOTECA

16 pins resultan ideales para montarlos dentro de los motores.

2.3. ESPECIFICACIONES

VALORES MAXIMOS NOMINALES

VOLTAJE DE ENTRADA (RESISTENCIA DE ENTRADA 5K Ω)	3500 V RMS
VOLTAJE DE ENTRADA (SIN RESISTENCIA DE ENTRADA)	<u>+400V</u> RMS
DISIPACION DE POTENCIA	500 mW
CORRIENTE DE SALIDA (PULSO DE 10usegs.)	500 mA
TEMPERATURA DE OPERACION	0°C a + 75° C
TEMPERATURA DE ALMACENAMIENTO	-40° C a +100° C
TEMPERATURA DE RUPTURA	300° C.

TABLA DE CARACTERISTICAS ELECTRICAS

PARAMETRO	DEFINICION	VALORES	
		MINIMO	TIPICO
Anticipador de carga (60Hz)	valor de θ_c	16° C	23° C
Factor de potencia a plena carga	valor de θ_c cuando $\theta_c = \theta_t$	39° C	43° C
Factor de potencia sin carga	valor de θ_c cuando $\theta_t = 146° C$		32° C
Voltaje máximo de entrada	voltaje de ruptura	400V	500V
Consumo de corriente	corriente RMS de entrada al chip.		2mA
Voltaje máximo de de salida.	voltaje de ruptura	600V	800 V

2.4. APLICACIONES

- Herramientas eléctricas
- Máquinas industriales de coser
- Bombas de calor
- Prensas
- Correa transportadora
- Grupos motor - generador
- En general cualquier aplicación en la cual para cierto tiempo el motor maneje menor carga que la nominal.

2.5. USO DEL CIRCUITO INTEGRADO EN LOS MOTORES DE INDUCCION

Los motores de inducción funcionan a velocidades que dependen principalmente de la frecuencia de la fuente, antes que de el voltaje.

Como los motores responden a las variaciones de la carga con

un cambio en el factor de potencia, éstos siempre suministran una corriente casi constante.

Veámos el caso de un motor con carga ligera, éste desperdicia su energía al calentar sus bobinados con corriente inductiva . Aplicado el HV1000, medirá la carga usando el ángulo de fase de la corriente y luego ahorra potencia al aplicar al motor sólo el voltaje suficiente para manejar la carga. El voltaje lo ajusta el control de fase del triac manejado por el chip. Este voltaje es de un valor inferior al voltaje nominal.

El circuito controlador dispara el triac que se encuentra en serie con el motor. Esto varía el valor RMS a través del motor. La forma de onda de voltaje a través del motor se muestra en la figura N° 2.1.

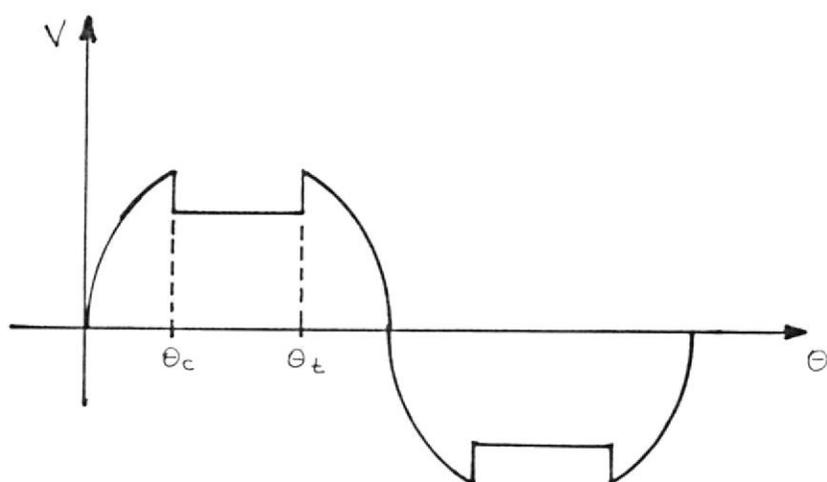


FIGURA N°2.1.- FORMA DE ONDA DE VOLTAJE A TRAVES DEL MOTOR

θ_c = cruce de corriente por cero

θ_t = punto de disparo de triac.

A un motor se lo puede caracterizar por la relación entre los dos parámetros θ_c y θ_t , que se muestran en la figura N° 2.2., para un motor típico.

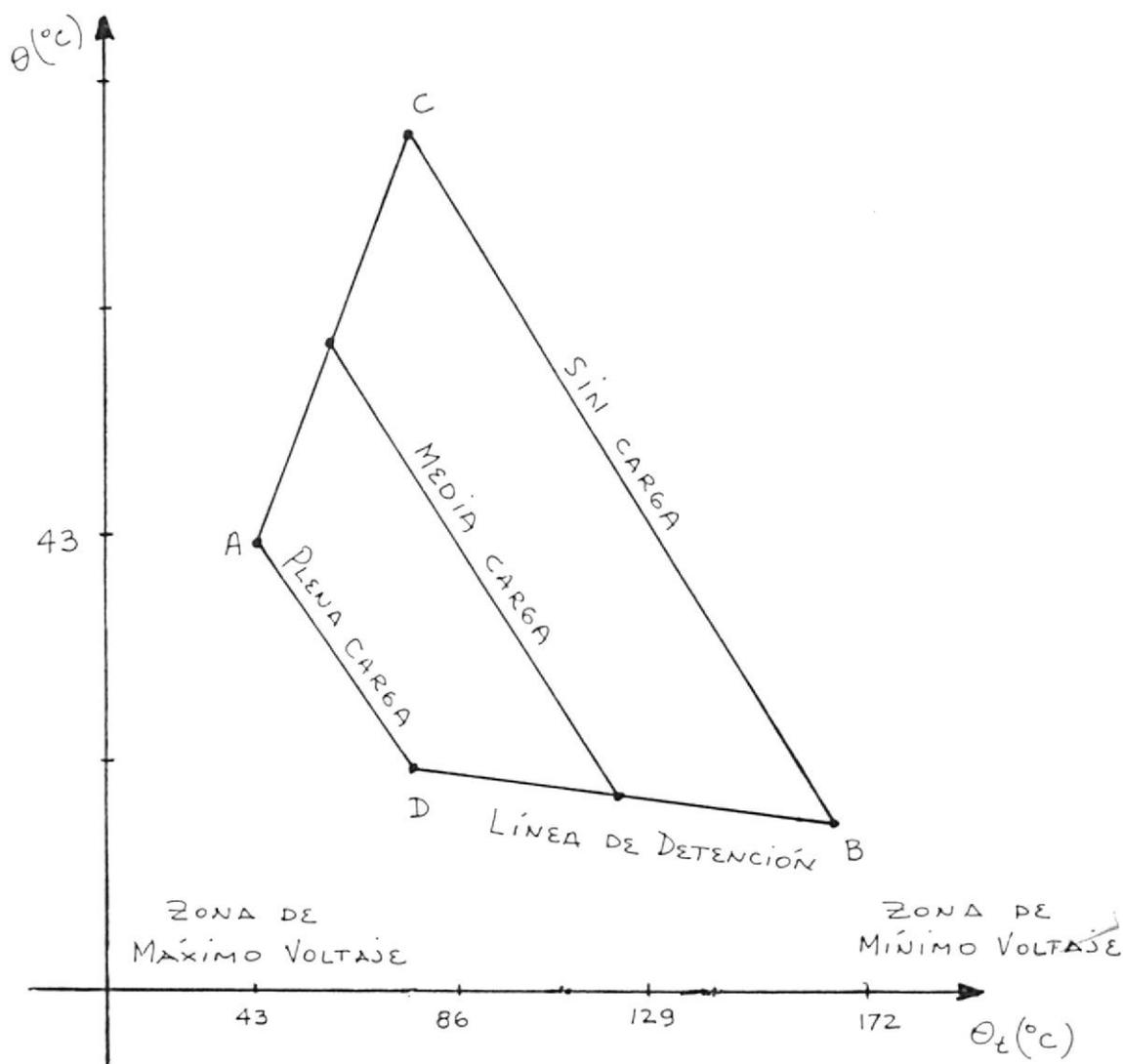


FIGURA N° 2.2.- RELACION ENTRE DOS PARAMETROS θ_c Y θ_t

En el punto A, el motor presenta voltaje nominal con carga nominal, condiciones para lo cual se lo diseñó.

En el punto B, el motor se encuentra funcionando con carga ligera a voltaje reducido y cercano a un punto crítico.

La función del controlador es lograr que el motor opere a lo largo de la línea de carga AB, antes que a lo largo de la línea AC que lo hace normalmente.

La figura N° 2.3., nos muestra un ejemplo del ahorro de potencia que resulta de incorporar el chip al motor

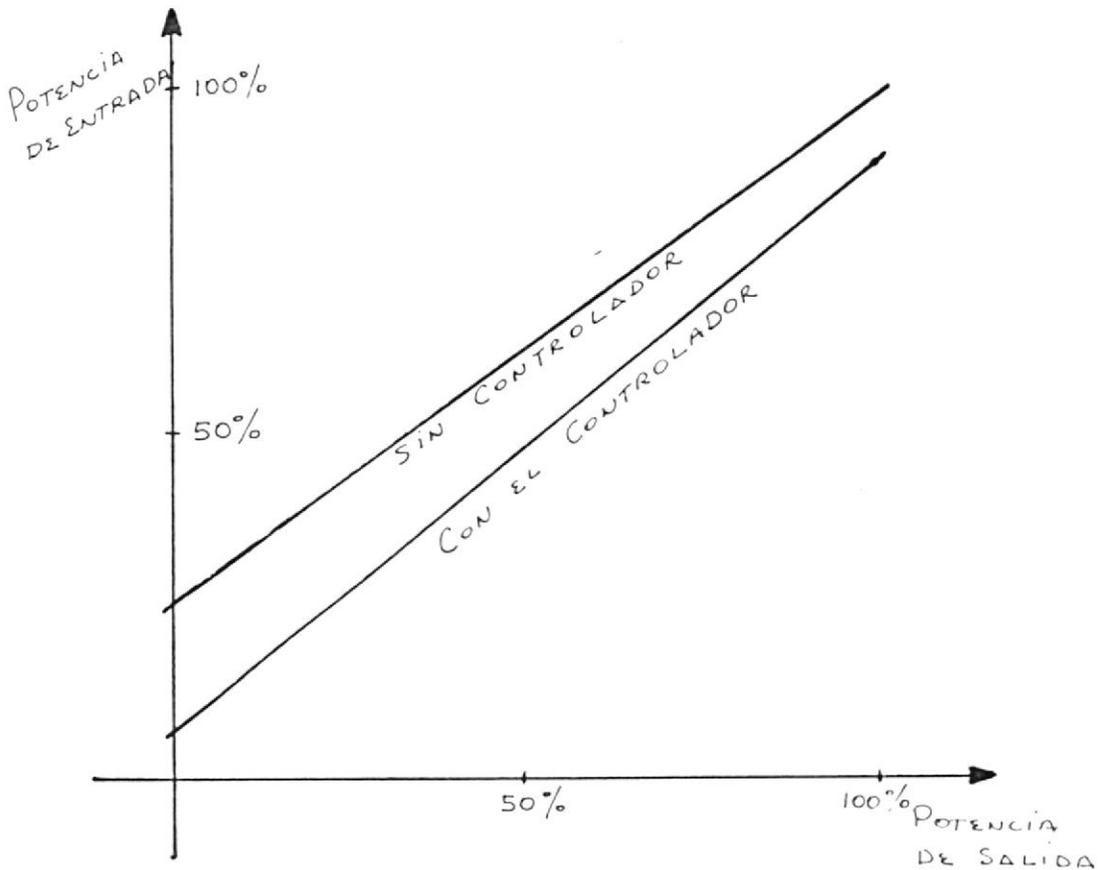


FIGURA N° 2.3.- AHORRO DE POTENCIA EN FUNCION DE LA CARGA

En la práctica podemos decir que:

- Todo el procesamiento analógico es conducido con el circuito funcionando con corriente alterna sea a 50 Hz ó 60 Hz. No se usa en ningún momento corriente directa.
- Esta integrado al motor usando aislamiento dieléctrico.

El proceso analógico que lleva a cabo la función del control - se explica conceptualmente en la figura N° 2.4.

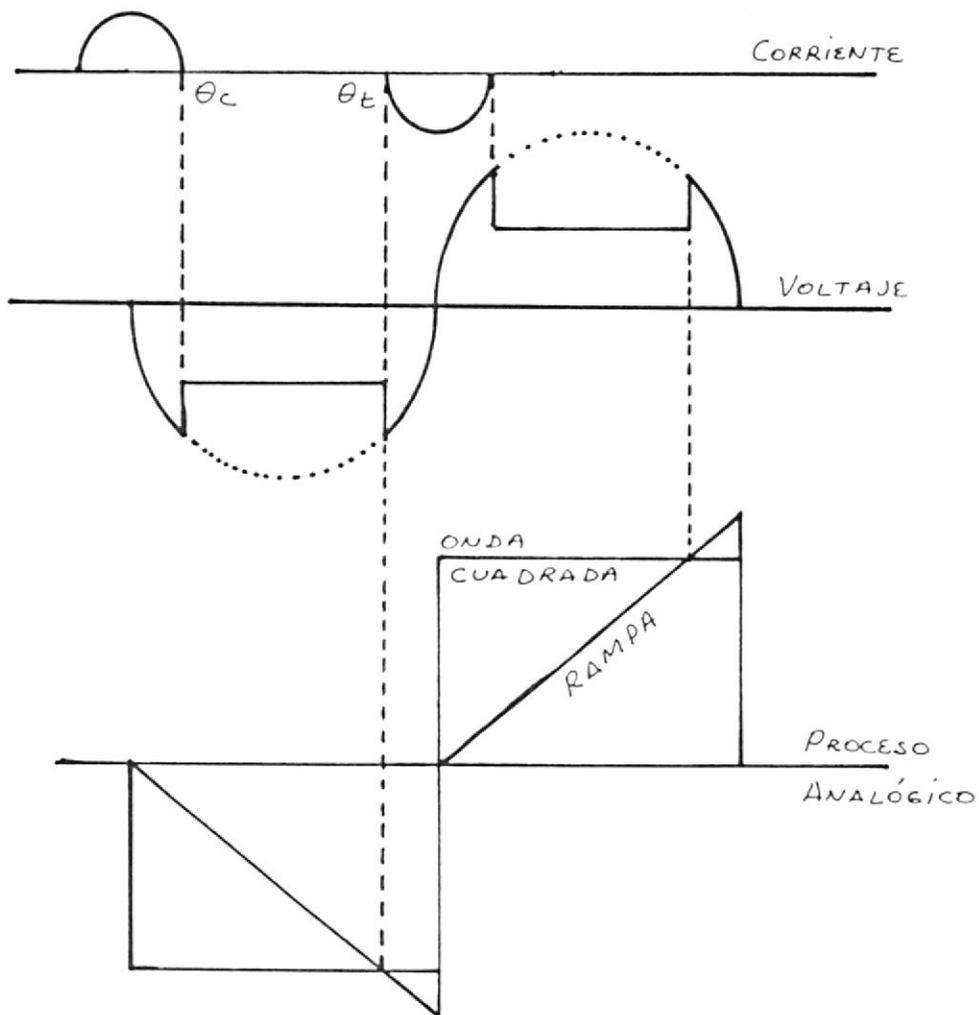


FIGURA N°2.4.- RELACION DE LAS ONDAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE CON LA FUNCION DE PROCESAMIENTO ANALOGICO.-

Para cualquier condición de carga el controlador trata de obligar a la fase de corriente θ_c hacia un valor de fase previamente programado.

El convertidor fase-voltaje mide la diferencia entre la fase establecida y θ_c , para incrementar un voltaje de forma escalón en un porcentaje proporcional a la diferencia retardando el punto de disparo θ_t , donde una rampa de referencia interseca el escalón.

El retardo en el disparo produce que el voltaje aplicado al motor sea menor, disminuyendo la corriente del bobinado del motor de manera que θ_c es conducido a la fase previamente programada, por la modulación de θ_t .

La fase previamente programada es por si misma una función de θ_t , es la que produce la característica inclinada del controlador en la figura N° 2.2.- Esto se lleva a cabo por vía realimentación desde la etapa de salida hasta el convertidor de fase-voltaje.

Otra particularidad adicional del convertidor fase-voltaje es el "anticipador de carga". Si θ_c es típicamente más que 0.42 msecs. menor a la fase previamente programada para la operación en 60Hz, significa que el motor ha recibido súbitamente una

carga más pesada por lo que el voltaje nominal es aplicado inmediatamente al motor.

Esto le permite al motor responder en el instante a una funcción escalón de carga. Si la carga se la cambia violentamente, el controlador corta el voltaje aplicado al motor en un período de tiempo fijado por la constante de tiempo de un condensador externo.

2.6. RESULTADOS Y PRUEBAS ESPECIFICAS PARA DETERMINAR LA APLICABILIDAD DEL CIRCUITO HV-1000

El mejoramiento de la eficiencia de un motor monofásico de inducción puede ser llevado a cabo de dos maneras:

- Para los motores que manejan una carga constante igual a la de su capacidad nominal, el mejor método es utilizar un capacitor con un bobinado auxiliar.

Esto hace que la estructura interna del campo del motor se asemeje a la de un motor de tres fases, la cual es una disposición más eficiente.

Sin embargo, de ser usado el capacitor en el motor con cargas menores a la nominal, el consumo de potencia será mayor que el de un motor sin el capacitor.

- Otro tipo es el controlador electrónico para ahorro de energía, el que produce mejoras significativas en eficiencia para motores con carga ligera. De ahí que ésta sea la mejor elección para motores que trabajan gran parte de su tiempo ligeramente cargados.

Debemos decir que los capacitores son útiles para refrigeradoras, acondicionadores de aire y ventiladores eléctricos.

Mientras que los controladores para ahorro de energía son útiles para herramientas eléctricas en general, máquinas de coser o lavadoras industriales, etc. O sea que, el controlador electrónico no se aplica en casos en que la carga manejada por el motor sea igual a la de su valor nominal porque la potencia disipada en el triac aumenta.

En los casos en que los diseños de los motores están sobredimensionados, el control de energía de ahorro trabaja mucho mejor puesto que ajustado el factor de potencia se reduce considerablemente el consumo de potencia.

Una vez colocado, el controlador continuará dando al motor voltaje para manejar a la carga a disposición, aún si el voltaje se deja llevar a un valor más alto.

En otras palabras, el controlador de ahorro de energía actúa

también, como un regulador de voltaje de línea. Esto es, especialmente benéfico en áreas donde el voltaje de línea fluctúa, ya que un voltaje de línea puede hacer que un motor de inducción consuma una cantidad excesiva de potencia.

El ahorrador de energía para el motor de inducción realiza su función tomando en consideración de que un motor de inducción funciona casi siempre a velocidad constante sin importar el voltaje aplicado y que su velocidad es determinada por la frecuencia de la fuente de corriente alterna.

Cuando el motor se encuentra ligeramente cargado el voltaje aplicado al motor puede ser reducido para que consuma menos corriente y por lo tanto potencia, mientras que suficiente voltaje se mantiene para manejar cualquier carga que se encuentre presente.

Todo lo que el HV-1000 debe hacer es sensar la carga del motor por medio del factor de potencia y luego reducir el voltaje en una cantidad determinada.

Algunos casos especiales en donde el motor se encuentra sometido a cargas ligeras, se dan en sierras radiales, molinos de banco o taladros de presión.

Mientras estén trabajando, ejemplo cortando algo, la potencia

tencia no es tan alta. No así en el caso en que estén prendidas y sin ejecutar ninguna acción, la potencia que consume puede ser reducida al usar el HV-1000 para aplicar un voltaje reducido.

Circunstancias menos obvias son las máquinas lavadoras, industriales y las máquinas de escribir de oficina.

La clave de estas aplicaciones es la de que cada caso, el motor en cuestión debe ser capaz de proporcionar brevemente torques muy altos, dando así lugar a que para la mayor parte del resto del tiempo, el motor se encuentre relativamente con carga ligera. Se debe tener claro que para realizar ahorros de energía, el motor deberá estar ligeramente cargado en comparación con su real capacidad.

Por ejemplo, la mayoría de los diseños de bombas usados en irrigación por aspersión, bombas para piscina son desde la hidráulica relativamente ineficientes y cargan el motor al mismo grado sin importar el volumen de agua a ser bombeada. Además, el motor suministrado es probable que venga muy bien emparejado a su más cercana constante de carga de forma que para reducir el voltaje con el HV-1000 haría que se consuma más y no menos potencia.

En algunas ocasiones los fabricantes, por ejemplo de lijadoras de correa o de bombas de sumidero, habrán diseñado el equipo con la idea de que su uso fuese muy intermitente. En este caso, cuando el motor está trabajando, éste podría estar proporcionando a la salida el doble de su potencia nominal.

Claramente se observa que no se conseguirán ahorros de energía cuando esta máquina sea cargada.

En el caso de la bomba de sumidero, no se obtendrán ahorros en ningún caso puesto que el motor se apaga cuando no bombea.

En el caso de la lijadora de correa, en alguna ocasión, se observó que el motor funcionaba siempre a plena carga cuando la máquina no se hallaba ejecutando algún trabajo. Nuevamente, no se consiguió ahorro de energía alguno al reducir el voltaje. Esto no se deberá tomar como implicación de que el HV-1000 no pueda ser usado en cualquier lijadora.

Una aplicación que es menos obvia son el ciclo de reversa del acondicionador de aire o de una bomba de calor.

Frecuentemente ocurre que el motor en estas máquinas está mucho menos cargado durante el ciclo de calor que durante el ciclo de enfriamiento.

En este caso, las aplicaciones del HV-1000 pueden resultar exitosas.

Otra útil aplicación puede darse con el compresor industrial de embrague, donde el motor funciona continuamente y el compresor se lo embraga intermitentemente.

De la discusión y ejemplos precedentes, podemos concluir que para aplicar el HV-1000 debemos tener presente y resueltas siempre tres preguntas:

- ¿Es el motor en cuestión un motor monofásico de inducción?
- ¿Experimenta el motor en cuestión cargas variables fuertemente con una parte de su tiempo permaneciendo con carga ligera?
- ¿Trabaja el motor lo suficiente para pagar el costo del HV-1000?

Veamos algunos casos especiales:

Existen aspiradoras y taladros portátiles que tienen los llamados motores universales, versión para los cuales el HV-1000 es totalmente inaplicable.

El principio del HV-1000 podría ser aplicable a motores in dustriales de tres fases, pero éstos controladores son típi- camente complejos y caros.

Los mejores candidatos son los motores de inducción monofási- cos .120 ó 240 V CA, de más de 1/4 HP.

El HV-1000 puede ser aplicado a motores con capacitores de arranque, motores con capacitores de arranque - marcha o mo tores con capacitores de dos valores.

Normalmente no es aconsejable usarlo con motores de fase par tida, ya que estos son usualmente aplicados con equipos que manejan una carga constante.

Algunos ventiladores tienen una carga constante, por lo tan to, no se puede esperar de ellos ahorro de energía. De otro lado, máquinas industriales de coser tienen este tipo de carga fuertemente variable lo que hace inclusive que se le incorporen volantes para tratar de suavizar las variaciones. Esta es una área excelente para la aplicación del HV-1000.

En algunas ocasiones se obtienen resultados sorprendentes , por ejemplo, considérese una máquina de escribir la cual - consume 60 vatios cuando es conectada. Si esta máquina fun-

ciona 8 horas al día, cinco días a la semana, durante un año, el motor se encuentra conectado unas 2.080 horas por año. Haciendo uso del HV-1000 se podría conseguir que la potencia consumida se reduzca solamente a 30 vatios/día. Un ahorro en total de 62,4 kilovatios hora por año.

2.7. RAZONES POR LA QUE EL HV-1000 ACTUA Y COMO LO HACE

En ésta sección describiremos la capacidad funcional del HV-1000 y lo que significa.

Comencemos por observar las características de un motor controlado por triac.

Cuando el triac de un circuito HV-1000 es colocado en serie y se lo dispara en el mismo punto cada medio ciclo, el retardo de tiempo entre el cruce de la corriente y voltaje por cero se mantenía constante. El problema con éste método de control era que para responder al motor de modo estable, la señal de fase debía ser promediada por algunos ciclos, de otro modo el tirón más suave, una vibración o un ruido eléctrico produciría una respuesta indeseable grande del motor.

Esto a su vez presentaba otro problema (que una carga que esté

variando no era atendida debidamente), por ejemplo, al alimentar la madera en una sierra circular, el motor no respondía - inmediatamente, dando largas al asunto antes de que el controlador hubiere elevado el voltaje, en respuesta a la carga.

Por esta razón, es necesario que el HV-1000 tenga un anticipador de carga o un interruptor de emergencia. Cuando se percibe un incremento súbito de carga el HV-1000 produce instantáneamente voltaje nominal.

Para determinar la mejor característica para el HV-1000 debe quedar claro que es necesario de que cuando el motor se halle con carga nominal, el triac debe ser disparado por el paso de corriente por cero. En otras palabras el triac deberá estar disparado continuamente, de tal forma que el motor tenga aplicado voltaje nominal. Esto define además el punto deseado en el ciclo para el cruce de la corriente por cero.

El diagrama de la parte superior de la figura N^o 2.3., muestra la onda de voltaje como una función de tiempo a través de los terminales del motor controlado por el triac. θ_c es el cruce de la corriente por cero y θ_t es el punto de disparo del triac. A plena carga éstos valores deben concluir. Si controlamos un motor de forma tal θ_c se lo mantenga constante,

cuando se observe que el motor pase del estado de plena carga a sin carga, se observaría que θ_t se habrá desplazado a la derecha, resultando en una reducción del voltaje aplicado al motor.

Cuando no encuentra carga, θ_t se retarda al máximo valor consistente para mantener θ_c constante.

Si es que por efectos de un control forzado del sistema, θ_t es ahora movido hacia la derecha, θ_c se moverá hacia la izquierda, pero la mayoría de los motores continuarán funcionando.

En otras palabras, este experimento demuestra que el mantener θ_c constante no es el algoritmo óptimo para lograr los mejores ahorros, más ahorros de potencia se pueden obtener mediante un algoritmo el cual mueva θ_c por unos cuantos microsegundos hacia la izquierda mientras disminuye la carga en el motor.

Para poder presentar cuantitativamente este algoritmo más óptimo, nos será de mucha ayuda la mitad inferior de la figura N° 2.3. Se ha trazado θ_c Vs θ_t y los trazos resultantes pueden ser usados para caracterizar tanto el motor como el controlador.

Para caracterizar el motor, considérese primero la circunstancia donde el voltaje nominal es aplicado al motor. En este caso $\theta_c = \theta_t$ y la condición de voltaje nominal puede ser representada por la línea AC a lo largo de todos los puntos - en los cuales $\theta_c = \theta_t$. El punto de operación se moverá de arriba hacia abajo de AC cuando la carga del motor sea variada. Ahora supóngase que para un valor dado de θ_t la carga - en el motor es incrementada, decreciendo θ_c hasta el punto de que el motor se pare. Grabamos este valor de θ_c en el - cual esto ocurrió, produce la línea DB, el lugar geométrico de los valores de θ_c en los cuales el motor se para.

Ahora es aparente que para un punto dado en AC, esto es para una cierta carga, θ_t puede ser incrementada a carga constante y el motor se desacelera.

En respuesta θ_c se reducirá y el punto de operación del motor marcará una línea como CB, hasta que el motor finalmente se detenga. De esta forma, se ha trazado la familia de curvas CB, AD, ETC. Estas curvas representan las características de un motor controlado por triac.

2.8. APLICACION PRACTICA DEL CIRCUITO INTEGRADO HV-1000

En la figura N° 2.5., se muestra el circuito de aplicación

para el HV-1000. Esta es la aplicación circuital más simple posible, y manejará un gran porcentaje de los motores fraccionarios de inducción. En nuestro caso hemos usado un grupo motor - generador para efectos de incrementos de carga.

El triac a usar es el ECG5635 y es capaz de manejar la condición de rotor bloqueado en el motor, para nuestro caso son 15 Amps., todo el tiempo que ésta condición exista. Esto es cuando mucho como tres veces la corriente normal del motor.

A el triac se le coloca un disipador térmico de 10 vatios de disipación de potencia, que no es difícil de hallar.

El propósito del circuito es el de minimizar la interferencia de radiofrecuencias, prevenir el que las altas frecuencias - sean enviadas por la línea de corriente alterna, y para atenuar el voltaje de inducción de reacción que aparece en el cruce por cero de la corriente del motor, al haber disparado accidentalmente la etapa de salida o el triac.

En algunas circunstancias el capacitor y la resistencia del circuito conocido como "SNUBBER" pueden ser eliminados completamente y de todas formas el sistema funcionará normalmente, generando cierta cantidad de ruido de radiofrecuencia. Los valores del capacitor pueden ser varios. La resistencia

de $5K\Omega$ mostrada es para protección de sobrevoltaje. En el caso de sobrevoltaje la protección interna funciona, descargando momentáneamente el voltaje a través de la resistencia.

Este voltaje puede ser de algunos kilovoltios durante algunos - microsegundos y aunque el poder de disipación es bajo, se necesita una resistencia de 1 vatio (1W) para evitar llevarse a cabo el efecto arco entre los terminales y poder absorber la energía del sobrevoltaje.

El capacitor de 1 μF coloca la constante de tiempo de respuesta para el sistema. Debe estar claro que, este es básicamente el tiempo en el cual el HV-1000 reduce el voltaje después de eliminar una carga pesada.

El anticipador de carga evitará que el motor se detenga cuando de forma imprevista se coloque una carga con el potenciómetro de $1K\Omega$, el HV-1000 producirá potencia completa en respuesta a cargas elevadas imprevistas.

A mayor valor absoluto del potenciómetro, mayor será la sensibilidad del anticipador de carga.

El potenciómetro que nosotros colocamos es de $1K\Omega$.

En la figura N^o 2.6., podemos apreciar el circuito de fuerza que se construyó, con el que se hicieron pruebas.

Para esto se necesitó un vatímetro con su respectiva conexión de bobinas, un interruptor para el arranque del motor.

Del lado de la carga se usó un reóstato variable, al cual se le conectó en serie un fusible y un amperímetro DC a efecto de poder controlar la variación de la carga aplicada. La corriente del motor de inducción se la midió con un amperímetro de gancho, de esta manera se controló el efecto de motor - trabajando a plena carga.

DATOS DE PLACA DEL MOTOR DE INDUCCION

Voltaje de alimentación	120 V AC
Corriente nominal	6 AMPS.
Factor de potencia nominal	0.8
Factor de potencia sin carga	0.55

DATOS DE PLACA DEL GENERADOR

Voltaje de campo	50 V DC
Voltaje de armadura	50 V DC

Se tiene una corriente de arranque de 15 Amps. para nuestro motor de inducción. La corriente nominal del motor es del orden de los 4 amps.

DATOS DEL TRIAC:

$$I_{RMS} \text{ máx.} = 10 \text{ Amps.}$$

$$V_{nom} \text{ máx.} = 1.8 \text{ V}$$

Temp de operación de -40° C a 100° C

$$\text{Potencia} = I_{RMS} \times V_{nom} = 15 \times 1.8 = 27 \text{ W}$$

$$\theta_{jc} = (T_j - T_p)/P = (125 - 25)/27 = 3,7^{\circ} \text{ C/W}$$

La resistencia térmica del disipador con aleta es:

$$\theta_d = 184 \sqrt{2} / 0,707 \text{ V}$$

$$\text{Si } V = 120$$

Tenemos que:

$$\theta_d = 3,07^{\circ} \text{ C/W}$$

Luego, con disipador tenemos que el triac puede disipar

$$\theta_{max} = (T_j - T_c)/(\theta_{jc} + \theta_d) = (125 - 25)/(3,7 + 3,07) = 14,77 \text{ W}$$

Además se usó un osciloscopio para ver la forma de la corriente. Se adaptó un transformador con unas resistencias en serie con el motor. Así el voltaje en la resistencia serie del motor nos daba una imagen de la corriente.

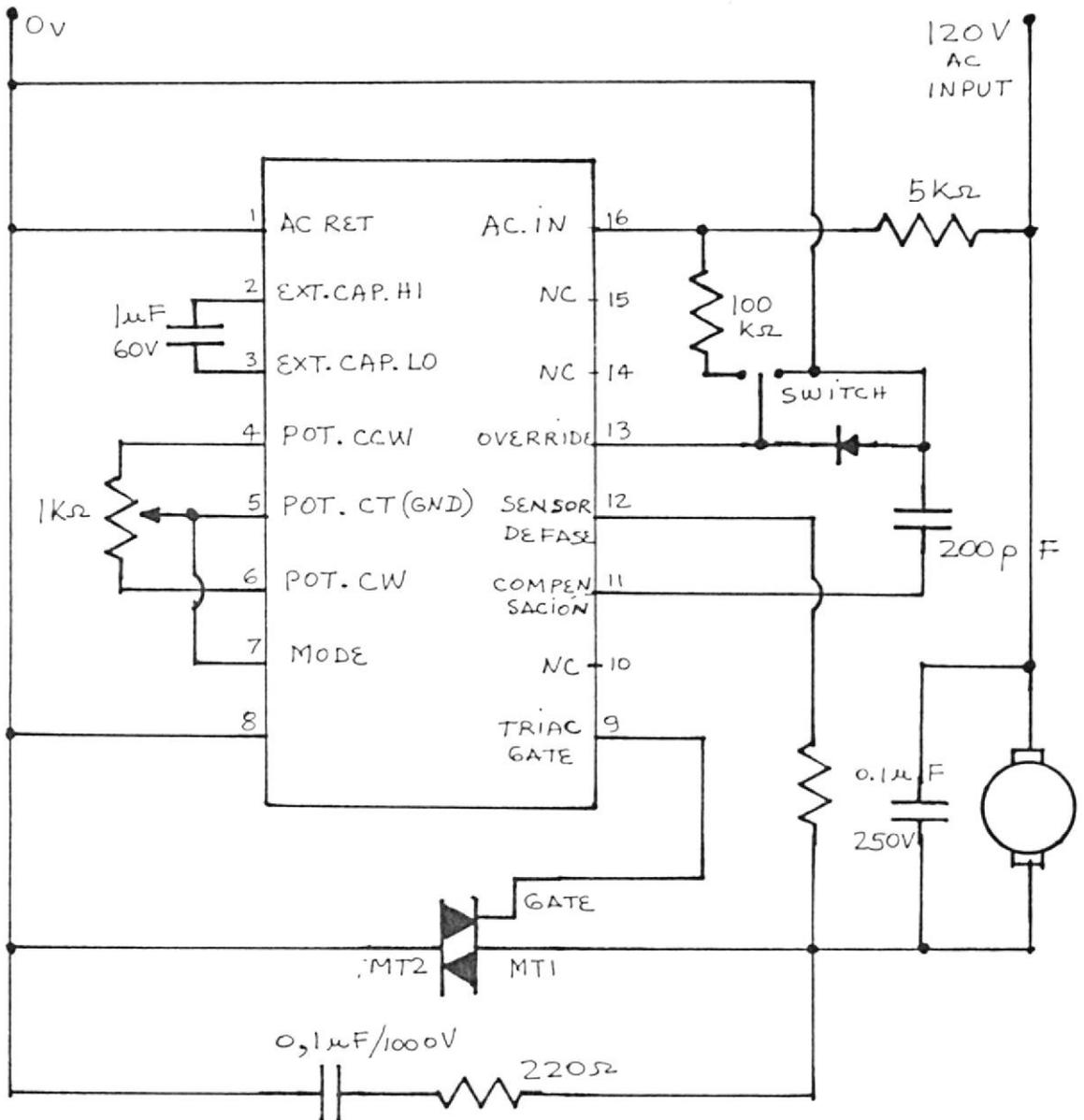


FIGURA N° 2.5. CIRCUITO CONTROLADOR DEL FACTOR DE POTENCIA CON EL HV-1000

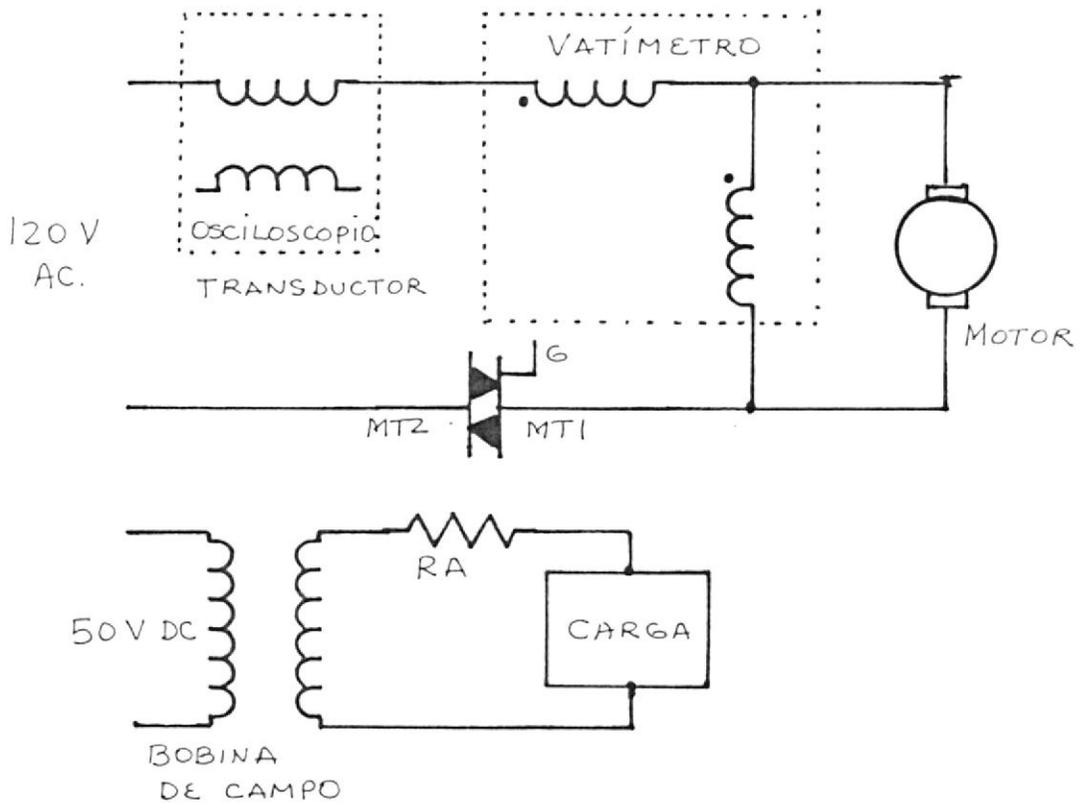


FIGURA N^o 2.6.- CONEXION GRUPO MOTOR - GENERADOR

El diagrama del circuito implementado se lo aprecia en la figura N^o 2.5., si el motor se trata de detener más fácilmente con el HV-1000, que lo que hiciera antes, esto significa que la línea del anticipador esta probablemente muy baja para el motor y necesita elevarse como se describió anteriormente. La sensibilidad del anticipador puede ser incrementada con el uso de un potenciómetro externo. Un valor de 10 K da

una sensibilidad extrema.

La posición angular del potenciómetro debe ser tal que proporcione potencia nominal a carga nominal o que produzca el máximo de potencia en la aplicación que tuviere. Existen algunos motores los cuales proporcionan un ahorro óptimo de energía cuando el voltaje nominal se aplica solamente a una carga dos veces la nominal.

El diodo mostrado entre los terminales 13 y 1 es para prevenir voltajes de polaridad negativa que puedan ser aplicadas para alimentar al circuito integrado.

En esta ilustración el voltaje positivo para disparar en cada ciclo la entrada lógica, se deriva de la potencia AC de la entrada.

También se puede dar el hecho de que el triac falle en convertirse en diodo. En éste caso, la circuitería podría detectar el desbalance y aplicar un voltaje al pin 13, encendiendo el HV-1000 la mayor parte del tiempo.

En nuestro circuito instalamos un interruptor entre el HV-1000 y el motor. En paralelo con el motor colocamos un capacitor.

En la mayoría de los casos los transientes asociados con el

cierre del interruptor dispararan el anticipador de carga , aunque ésto no se pueda asegurar.

Algunas veces puede ocurrir un arranque suave. Una decisión para esta circunstancia fue la de colocar un condensador de potencia para línea a través del motor y del interruptor. Es to cierra el lazo del sistema de control en el HV-1000, aún cuando el interruptor está abierto. Por ejemplo en el caso - de un motor al que se le ha añadido el controlador, el condensador de 0,01 uF se lo coloca a través de los terminales de salida del controlador.

2.8.1. Estudio de las armónicas que producen la acción ahorradora del circuito

Conocemos que los rectificadores introducen armónicos - en los sistemas de potencia, por lo tanto conozcamos la manera que lo hacen.

La presencia de armónicos se observa por cuanto la forma de onda de voltaje aparece distorsionada con relación a la onda senoidal a frecuencia fundamental.

Los equipos rectificadores, para nuestro caso el circuito integrado HV-1000 se lo puede considerar así, pueden



BIBLIOTECA



ser fuentes o generadores de armónicos.

Estas ondas armónicas se propagarán por el camino de menor impedancia, pudiendo darse el caso de resonancia paralelo, causando oscilaciones de corriente verdaderamente elevadas las cuales fluyen a través de impedancias (cargas), dando lugar a la producción de voltajes armónicos, los cuales sumados a la onda fundamental de voltaje, produce formas de onda de voltaje distorsionadas. Son estas distorsiones de voltaje, las que pueden causar corrientes armónicas al fluír hacia otros circuitos, logrando de esta manera interferir con circuitos de regulación de voltaje o circuitos de comunicación. Uno de los métodos de control de generación y propagación de armónicos es el de usar un banco de condensadores que compensan reactancias.

Otra forma de evitar la propagación de los armónicos - que se presenten por acción del circuito integrado es mediante el uso de filtros: El propósito de estos filtros es de eliminar la interacción entre los sistemas de potencia y la carga y así reducir el flujo de las corrientes armónicas.

Seleccionar el equipo de compensación de reactancias

y el diseño de filtros de armónicos (trampas de armónicos) es una labor compleja. El sistema motivo de nuestro análisis, podría ser reducido a un sistema equivalente, llamado sistema eléctrico simplificado. Con el fin de simplificar el análisis se reducen las impedancias del sistema A:

- a) $Z_c =$ es la impedancia común al consumidor normal y el consumidor con equipo rectificador.
- b) $Z_r =$ es la impedancia relacionada al consumidor con equipo rectificador.
- c) $Z_n =$ es la impedancia relacionada al consumidor normal.

No debemos olvidar que Z_c , Z_r y Z_n varían con la frecuencia.

Continuando con el análisis nos encontramos que, para el nodo J, que alimentará la carga del consumidor normal a través de la impedancia Z_n estará dada por:

$$E_j = E - Z_c (I_n + I_r)$$

En donde:

E_j no es senoidal, por cuanto la corriente I_r no lo es tampoco. Esta corriente tiene más bien componentes armónicos que fluyen hacia el resto del sistema y esto produce voltajes armónicos que son peligrosos y además producen la conocida interferencia telefónica.

2.8.2. Fuente de armónicas y su análisis

Los circuitos rectificadores constituyen una fuente común de corrientes armónicas. La distorsión de la forma de onda es un resultado de la conmutación producida por estos dispositivos. La forma de onda puede descomponerse en una onda fundamental senoidal a la cual se le superponen una cantidad de armónicas diferentes.

Las armónicas características asociadas comunmente con este tipo de convertidores son: la quinta, la séptima, la undécima y la décimotercera armónica. Por medio del análisis de Fourier, se puede demostrar que las ondas armónicas son de orden y magnitud:

$$h = Kq \pm 1$$

$$I_h = I_1/h$$

Donde:

h = orden del armónico

k = del análisis de Fourier, es un entero que puede ser 1,2,3.....



BIBLIOTECA

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

Los coeficientes de Fourier se calculan asumiendo que:

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

$$X_c = 0$$

2. El ángulo de retardo es nulo:

$$\alpha = 0$$

La amplitud de las ondas armónicas son una función del -

ángulo de retardo y de la reactancia de conmutación.

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

Como esta función última representa una función par, entonces su desarrollo en serie de Fourier solo tendrá términos en cosenos y posiblemente un término constante que se lo considera como un término coseno. Si llamamos a :

$$X = \omega t$$

Entonces, según la serie de Fourier se tiene que:

$$Q_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(X) dx = \frac{2}{\pi} (\text{Sen}(\pi/2) - \text{Sen}(0)) = \frac{2}{\pi}$$

$$Q_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos^2(X) dx = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} (\cos(2X) + 1) dx = \frac{1}{2}$$

En forma general se tendría:

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

$$Q_n = - \frac{2 \cos(n\pi/2)}{(n^2 - 1)} \quad \text{si } n \text{ es par}$$

Es decir que la tensión aplicada a la carga del circuito integrado estará dada por la expresión:

$$V_c = V_{em} \frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cos \omega t + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3.5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5.7} \cos 6\omega t - \frac{1}{7.9} \cos 8\omega t + \dots \right)$$

Así se obtiene la corriente en la carga.

2.8.3. Efectos de las señales armónicas sobre las máquinas eléctricas

En términos generales cuando un banco de transformadores es energizado, se produce una elevada de corriente de excitación y es debido a los armónicos que se producen - que esta corriente puede ser muchas veces la magnitud de la corriente de plena carga. Para el caso de nuestro análisis las corrientes armónicas pueden causar un excesivo calentamiento de la maquinaria rotativa. Las corrientes armónicas de secuencia de fase positiva y negativa, causan un calentamiento adicional en el rotor de las máquinas eléctricas. Las señales armónicas cuando excitan el sistema mecánico en su frecuencia natural

provocan condición de resonancia.

2.8.4. Correcta selección de filtros para minimizar las señales armónicas

Cuando la cantidad de corriente armónica presente en la carga es pequeña, las armónicas producidas pueden ser ignoradas. Pero en base a la siguiente expresión determinaremos si esto es factible o no. Hablamos entonces de la razón de cortocircuito del sistema con respecto a la carga del convertidor.

La razón de cortocircuito se define como:

$$SCR = \frac{\text{MVA de cortocircuito del sistema}}{M_w \text{ del convertidor}}$$

A mayor razón, digamos 20, la probabilidad de problemas con armónicas es baja.

2.8.5. Tipos varios de filtros usados para atenuar señales armónicas en los sistemas de potencia

Si para la instalación de convertidores se necesitara -

suministro de potencia reactiva, ésta provendrá de los bancos de potencia que es la más económica.

El filtro no es útil para nuestro propósito puesto que actúan como una verdadera trampa para determinadas frecuencias. Los filtros en los sistemas de potencia son utilizados para reducir los armónicos. Podemos tener dos tipos de filtros.

- a. Filtros para el lado de corriente continua.
- b. Filtros para el lado de corriente alterna que son mucho más caros.

Por su lado los filtros para el lado de corriente alterna, los sintonizados, tienen por objeto presentarse como un cortocircuito virtual para las frecuencias que se desea eliminar.

El filtro más sencillo que se adapta a nuestro circuito es el de la red SNUBBER, consistente en un condensador y una resistencia. Si hablamos de filtros sintonizados diremos que se presentan como:

- a. Filtros de resonancia paralelo

b) Filtro trampas de ondas

2.9. EVALUACION ECONOMICA DE LA EFICIENCIA DEL MOTOR CON EL HV-1000

Para el proyecto que estamos desarrollando debemos hacer el análisis del ahorro de potencia y de la eficiencia alcanzada por el motor, aplicado el circuito integrado HV-1000.

Para esto, vamos a desarrollar tres métodos de tal manera que se justifique el ahorro de energía aplicando el HV-1000.

a. Sobreprecio por kilovatios ahorrados.

Este método consiste en que el usuario determine cuánta inversión adicional de capital o sobreprecio se justifica - por kilovatios de reducción en el consumo de potencia usando el HV-1000. Es decir, si se determina una inversión adicional de S/.1.000/KW, el usuario del motor podrá justificar un pago de hasta S/.1.000 por sobreprecio por cada KW ahorrado debido a la reducción en la pérdida de potencia al usar un motor más eficiente con el HV-1000.

La eficiencia del motor es una medida de la pérdua de potencia en la transformación de potencia eléctrica a potencia me

cánica, para detallar lo expuesto del ahorro de potencia con la aplicación del HV-1000 exponemos un ejemplo de la reducción de energía de un motor de 1 HP.

Pérdida de Watts = entrada - salida

$$= \frac{\text{HP} \times 746}{\text{eficiencia}} - (\text{HP} \times 746)$$

$$\text{Motor con } 88,3 \% \text{ de eficiencia} = \frac{1 \times 746}{0,883} - (1 \times 746) = 98,84 \text{ watts.}$$

$$\text{Motor con } 93\% \text{ de eficiencia} = \frac{1 \times 746}{0,93} - (1 \times 746) = 56,15 \text{ watts.}$$

De los datos obtenidos tenemos que al usar un motor con la aplicación del HV1000 con lo que obtenemos una eficiencia de 93% en vez del motor sin el controlador con una eficiencia de 83,3%, el ahorro es de 42,69 Watts, en otras palabras la reducción en las pérdidas de potencia es de 42,69 watts.

Los watts ahorrados pueden calcularse también usando la fórmula siguiente:

$$\text{Watts ahorrados} = \text{HP} \times 746 \left(\frac{1}{\text{Efic. motor standard}} - \frac{1}{\text{Efic. motor sobreprecio}} \right)$$



b. Por restitución simple:

Un método para calcular hasta que valor un usuario puede pagar un sobreprecio de un motor con la aplicación del HV-1000, lo detallamos a continuación con un ejemplo de aplicación:

El usuario debe de especificar lo siguiente:

Horas/año = horas de operación del motor por año	4800
Sucres/Kw = costo de electricidad	15
Años = años máximos aceptables para la restitución.....	3
T = Tasas de impuestos	50
P = Sobreprecio justificado/watts ahorrado..	
P = (Horas/Año) • (Sucres/W) • año • (1-T)	

Para exponer lo dicho hacemos un ejemplo en el cual el usuario tiene un motor con un promedio de trabajo de dos turnos de 8 horas por día, 6 días a la semana, 250 semanas por año, tiene un costo de potencia de S/.15/Kw consi

dera un período de restitución de 3 años y tiene una tasa de impuesto del 50 %.

De los datos tenemos que:

$$P = 4800 \times 15 \times 3 \times (1-0,5)$$

$$P = S/.108.000,00$$

De donde el usuario puede justificar hasta S/.108.000,00 en sobreprecio para un motor.

c. Análisis del valor actual:

Otro método investigado para determinar el sobreprecio justificado por Kw de reducción en la pérdida de potencia implica un análisis formal del valor actual.

Tenemos los siguientes parámetros:

Con incremento del 5% anual de la vida útil del servicio - del motor que es de 10 años, una tasa de retorno de 30 % , horas año de operación igual a 4800 y un costo de Kw/hora -
 $T = 0,5$

$$P = PE + PD$$

$$PE = PVF * S/. * KWh/Año * (1-T)$$

$$PE = 3,71 * 15 * 4800 * (1-0,5) = 133.560 \text{ Kw}$$

$$PD = \frac{3,09 * 133560 * 0,5}{10} = 20.635,02$$

$$P = 133560 + 20.635,02 = 154.195,02 \text{ Kw}$$

La potencia de reducción de la pérdida es igual a los Kw ahorrados.

2.10. METODOS DE PRUEBA DE LA EFICIENCIA CON EL HV-1000

Debido a que los usuarios de motores eléctricos están cada vez más conscientes de la eficiencia como un criterio para seleccionar y aplicar motores, es importante que se entienda con claridad la diferencia entre los métodos de pruebas y sus exactitudes correspondientes. Los problemas de las pruebas - ocurren por que los dispositivos de carga que pueden medir con

exactitud la salida del eje del motor son más escasos a medida que aumenta el caballaje del motor y la magnitud de la potencia eléctrica puede exceder el rango de exactitud del instrumento. Por lo tanto, se han introducidos métodos alternativos para medir la eficiencia del motor en las normas de prueba americanas. La norma para probar motores de inducción en los E.E.U.U. es la IEEE112, que reconoce cinco (5) métodos para determinar la eficiencia del motor, cada uno de los cuáles tiene ciertas ventajas con respecto a exactitud, costos y facilidad de prueba, dependiendo principalmente del tamaño del motor.

2.10.1. Método del freno

Se usa un freno mecánico para cargar el motor y se mide la fuerza de reacción. Está limitado a los motores de caballaje fraccional debido al calor generado en el freno.

2.10.2. Método del dinamómetro

Un dinamómetro carga al motor y se mide la salida mediante una báscula y un indicador de presiones es controlado fácilmente de modo que los puntos de carga pueden ajustarse con exactitud y permanecen esta

bles mientras se hacen lecturas directas de torque y velocidad.

2.10.3. Método de la máquina duplicada

Se acopla entre sí dos máquinas idénticas y se conectan a dos fuentes de potencia, siendo ajustable la frecuencia de una. Usado raramente excepto para máquinas de gran caballaje debido a que toma tiempo prepararlo y hacerlo funcional.

2.10.4. Método de las medidas de entrada

Se mide directamente la potencia de entrada pero la salida del motor se calcula restando las pérdidas calculadas a la entrada. Requiere una prueba separada para medir la pérdida de carga por dispersión.

2.10.5. Método del circuito equivalente

Puede usarse si no hay disponible medio para cargar el motor las constantes del circuito equivalente del motor se determinan de las pruebas del rotor bloqueado y sin cargas y las pérdidas se calculan del circuito equivalente. Se requiere una prueba separada para determinar las pérdidas de cargas por dispersión.

C A P I T U L O I I I

COMPROBACION EXPERIMENTAL DEL AHORRO DE ENERGIA DEL HV1000 IMPLEMENTANDO UN SISTEMA MOTOR - GENERADOR

3.1. CARACTERISTICAS DEL MOTOR CON CARGA VARIABLE SIN CONTROLADOR HV1000

En la siguiente página podemos encontrar las características del motor con carga variable sin controlador HV1000.

En la primera tabla veremos el motor de inducción monofásico.

En la tabla siguiente veremos las características del generador de corriente directa.

En la tercera tabla tenemos las características del motor de inducción monofásica

MOTOR DE INDUCCION MONOFASICO

		S.C.				P				P.C.
V _{inp}	Volts.	123	123	123	123	123	123	123	123	123
I _{inp}	Amps.	4,66	4,8	4,85	4,9	4,95	5	5,15	5,5	5,7
W _{inp}	Watts	400	420	450	480	500	520	550	580	600
f.p.		0,56	0,604	0,52	0,698	0,72	0,75	0,75	0,785	0,82
θ _c	° C	56,2	52,8	50,7	43,7	43,7	41,6	41,6	38,3	34,5

S.C. = sin carga

P.C. = plena carga

R_l a plena carga = 15,4 ohmios

CARACTERISTICAS DEL GENERADOR

GENERADOR DE CORRIENTE DIRECTA

V _g	Volts	8	48,3	48	47,7	47,4	47,2	46,6	45	44
I _g	Amps.	0,6	0,6	0,9	1,0	1,4	1,5	2	3	4
W	Watts		28,9	43,2	47,7	66,7	70,8	93,2	135	176

CARACTERISTICAS DEL MOTOR CON CARGA VARIABLE CON CONTROLADOR HV1000

MOTOR DE INDUCCION MONOFASICO

		S.C.								P.C.
V _{inp}	Volts.	81,2	82	83	85	88	90	92	94	99,3
I _{inp}	Amps.	2,42	2,5	3,15	3,33	3,5	3,8	4,03	4,32	4,74
W _{inp}	Watts.									
f.p.		0,88	0,89	0,91	0,93	0,936	0,95	0,96	0,962	0,965
θ _c	° C	28,1	26,3	24	22	20,5	18,3	16,2	15,8	15,1

CARACTERISTICAS DEL GENERADOR

GENERADOR DE CORRIENTE DIRECTA

V _g	Volts	81,1	48	47	46,9	46,5	45,7	45,3	44,8	44,1
I _g	Amps.	0,4	0,22	0,2	0,5	0,8	1,2	1,5	2	2,5
W	Watts.	3,24	10,5	9,4	23,4	37,2	54,8	67,9	89,6	110

3.2. PARTE EXPERIMENTAL: SU EXPLICACION

El propósito de nuestra experiencia fue verificar los ahorros que se podían obtener haciendo uso del circuito integrado HV1000 de la HARRIS. Este circuito fue aplicado a un motor de 110 voltios, 6 amperios de corriente, acoplado a un generador mediante un matrimonio en su eje.

El generador utilizado era de 50 voltios de corriente directa y era del tipo de excitación separada. Su corriente máxima, según placa era de 10 amperios.

Al hacer uso del HV-1000. éste demostró su eficacia. prácticamente desde el inicio del arranque del motor. Cuando al motor, gracias al generador acoplado a su eje, se le simulaba plena carga, aún así el voltaje aplicado era menor al de la placa (110 V), es decir que también a plena carga se lograba ahorro de potencia.

3.2.1. Selección del motor adecuado

Para dar comienzo a la verificación experimental de las ventajas de usar el HV-1000 para ahorrar energía, necesitamos de un motor. Su elección se ajustó en

lo más a las especificaciones del fabricante.

En primer lugar utilizamos un transformador variable. Con este transformador variable verificamos que el motor en cuestión efectivamente al serle reducido el voltaje, su corriente también lo hacía. Esta potencia, la cual fue medida también con un vatímetro, efectivamente disminuía cuando el voltaje era menor al nominal.

Las condiciones de carga se las simuló al acoplar al eje del motor monofásico de inducción, un generador. La carga del generador era un reóstato de $1\text{ K}\Omega$. Variando la posición del reóstato, obteníamos diferentes valores de carga.

3.2.2. Simulación de la carga

Ya hemos mencionado que al motor se le acopló un generador. A su vez a este generador le conectamos un reóstato que hacía las veces de carga. El valor del potenciómetro era de $1\text{ K}\Omega$. Aunque a primera vista armar éste sistema no presenta ningún problema, sí lo hubo. El problema fue que al tratar de verificar los datos de placa del

generador nos encontramos con que éste no generaba voltaje al hallarse girando su armadura.

La causa de esta anomalía se debía primero a que el generador tenía uno de sus dos carbones del colector, no muy bien asentado. Y segundo que el portácarbónes no se hallaba correctamente ubicado, porque el mismo había sido aflojado.

Los datos de placa del generador son:

Voltaje de campo = 50 VDC

Corriente de armadura = 10 Amps.

3.2.3. Realización del circuito de control

En esta parte no hubo problemas para colocarle al circuito integrado los elementos adicionales que el fabricante pide. Se escogió al TRIAC que tenga 10 Amps. de capacidad. Esto era suficiente para manejar la corriente del motor que durante el arranque era de 15 Amps., pero en estado estable era de 4 ó 5 amps.

3.2.4. Equipo de medición y transductores

Los equipos que se usaron para la experiencia fueron:

OSCILOSCOPIO : Para medir el desfase entre el voltaje y la corriente en el motor, para calcular el factor de potencia. Además, se observó como se recortaba la onda de voltaje cuando el efecto del HV-1000 se dejaba sentir.

AMPERIMETRO DE GANCHO: Para medir la corriente que circulaba por el motor a efecto de no sobrecargarlo - cuando se le aplicaba carga nominal.

AMPERIMETRO D.C.: Fue útil para cuando quisimos hallar el valor de la carga debido al reóstato de 1K.

VOLTIMETRO: Para medir la variación del voltaje aplicado al motor. Menor cuando el motor estaba sin carga (108 voltios AC) y mayor cuando el motor tenía carga nominal (118 VAC).

TRANSDUCTOR DE CORRIENTE: Consiste en un juego de dos resistencias de 0,1 ohmios y un transformador elevador de relación 24/220. Así obteníamos una lec

tura de voltaje en la pantalla del osciloscopio.

VATIMETRO: Para medir el consumo de potencia del motor.

De todos los elementos anteriormente nombrados debemos aclarar que no son los óptimos para nuestras mediciones.

No olvidemos que nuestro circuito produce señales que no son senoidales puras. ésto implica que tendríamos que usar medidores RMS.

3.2.5. Desarrollo de la experiencia

Para el circuito escogemos los elementos adecuados para su funcionamiento.

Porcentajes de ahorros significativos pueden ser obtenidos sobre todo en cuanto el motor tiene carga ligera y eso es plenamente ofrecido cuando se observa el osciloscopio.

MOTOR FUNCIONANDO SIN CARGA Y SIN CONTROLADOR

Lectura inicial	3412 KW/H
Lectura final	3413 KW/H
Tiempo de medición	2 horas
Consumo estimado de motor	1 KW/H x 2 horas = 2KW

MOTOR FUNCIONANDO CON CARGA NOMINAL Y SIN CONTROLADOR

Lectura inicial	3413 KW/H
Lectura final	3415 KW/H
Tiempo de medición	2 horas
Consumo estimado de motor	2KW/Hx 2 horas= 4KW

MOTOR FUNCIONANDO SIN CARGA PERO CON CONTROLADOR

Lectura inicial	3415 KW/H
Lectura final	3415.6 KW/H
Tiempo de medición	2 horas
Consumo estimado de motor	0,6KW/H x 2 horas = 1,2 KW

MOTOR FUNCIONANDO CON CARGA PERO CON CONTROLADOR

Lectura inicial	3415,6 KW/H
-----------------	-------------

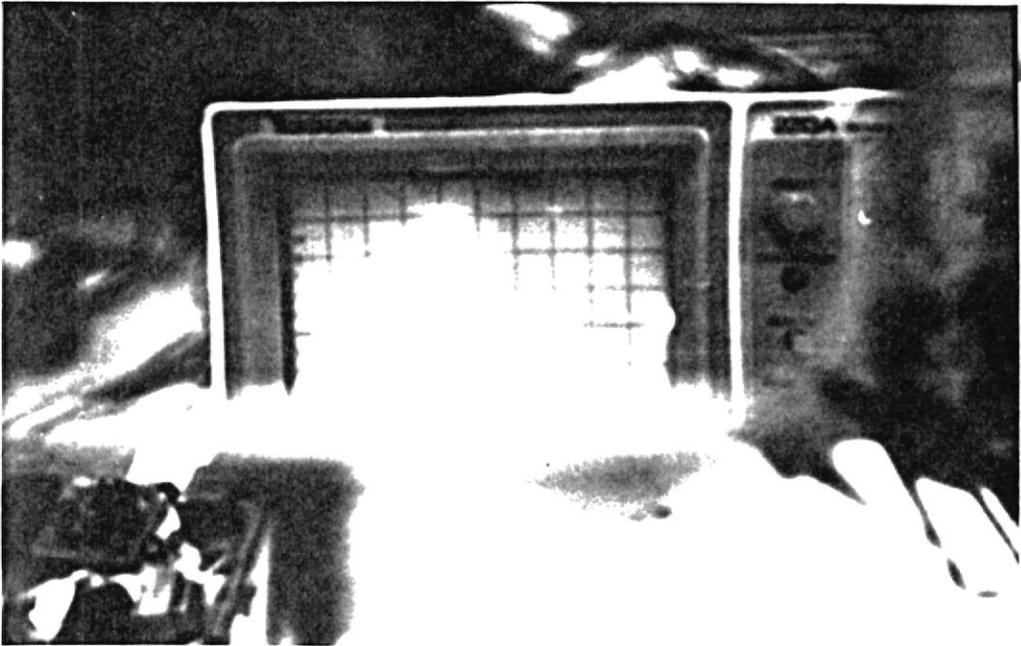
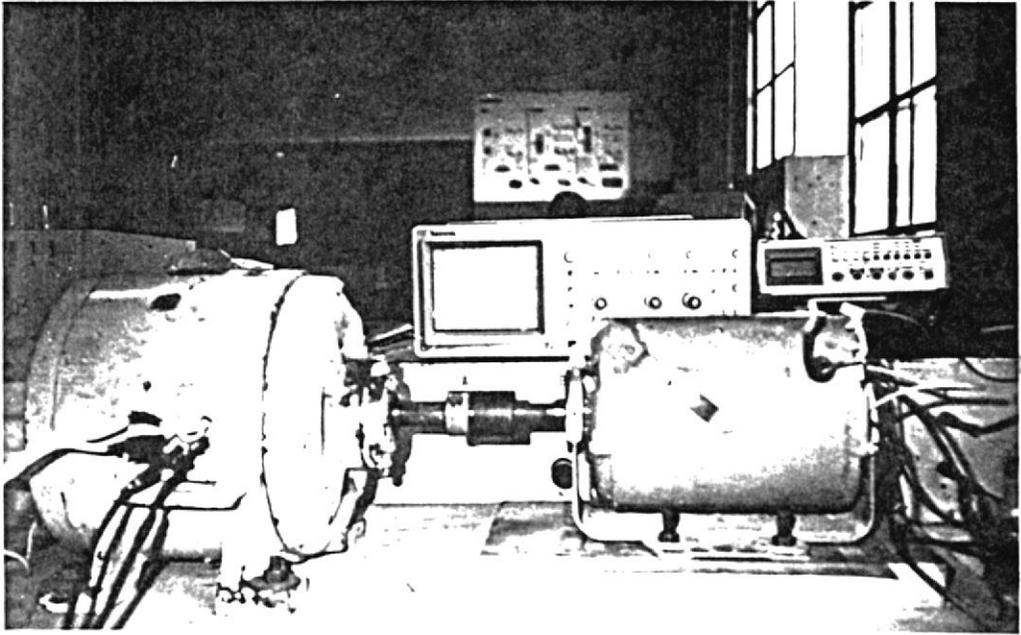
Lectura final	3417,5 KW/H
Tiempo de medición	2 horas
Consumo estimado de motor	1,9 KW/H * 2 horas =3,8 KW

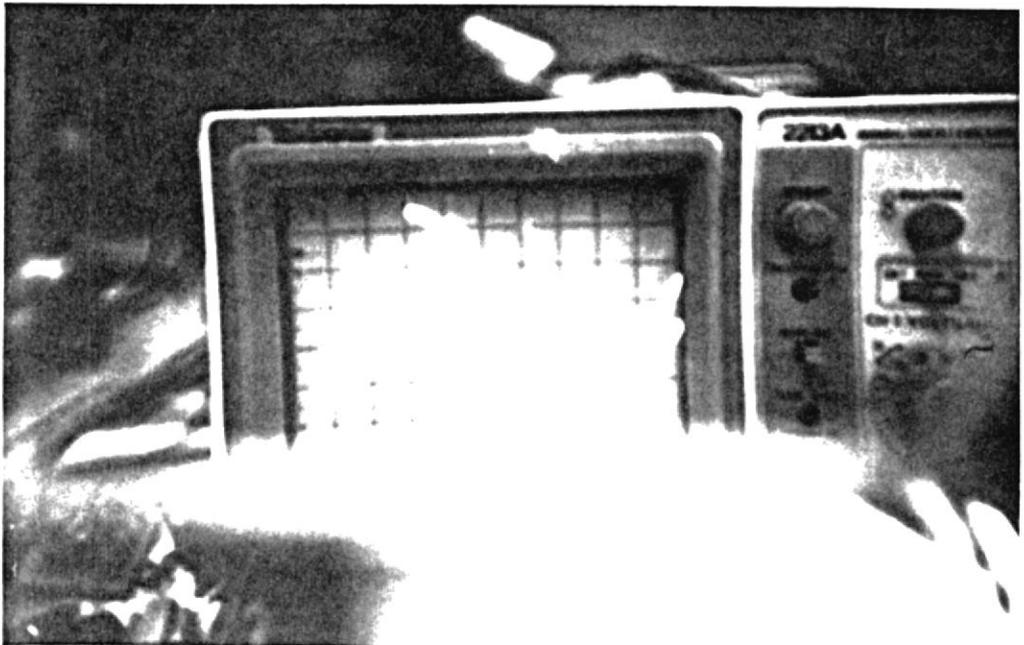
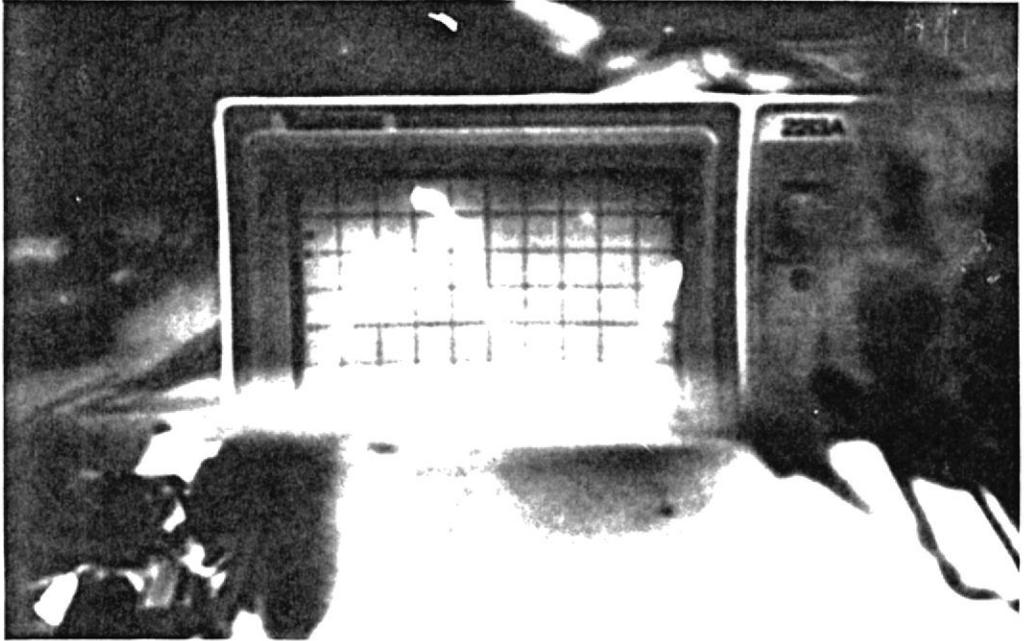
Las lecturas tomadas nos dan una idea de que el ahorro de energía es útil no solo sin carga sino que también a plena carga.

Otros datos apreciados son:

Para cuando no hay carga	$\theta_t = 112,32^\circ \text{ C}$
A plena carga	$\theta_t = 86,4^\circ \text{ C}$

Es decir, para cuando no hay carga el circuito reduce el voltaje aplicado y cuando hay carga aún así tenemos un voltaje menor al nominal.





C A P I T U L O I V

PRESENTACION DEL PROYECTO EN CIRCUITO IMPRESO

Cuando se construya el circuito impreso hay que tener por separado las líneas de control con las líneas de fuerza del TRIAC. Hay que dejar terminales a un lado para conectar al motor. El interruptor no hay que olvidarlo porque sirve para conectar al circuito - que controla la potencia y para sacarlo (dejar directo el voltaje AC).



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se recomienda plenamente el uso del circuito controlador en motores que pasen una gran parte del tiempo sin carga alguna que justifique que el motor reciba su voltaje de alimentación nominal. No se pierden características de velocidad del motor, por cuanto ésta no depende del voltaje aplicado sino de la frecuencia de la línea.

Se han aplicado para este motor variaciones de cargas significativas. La respuesta del controlador no siempre ha sido inmediata, pero si se halla en el orden de los segundos.

Si se quita la carga al motor, éste reacciona casi inmediatamente disminuyendo el voltaje. Si se le aumenta la carga el circuito reacciona elevando el voltaje .

Debemos usar equipos que midan señales RMS por cuanto las señales observadas no son senoidales puras.

De los valores de los elementos que sirven para armar el circuito - SNUBBER sólo se puede variar el condensador que está en paralelo - con el motor. Este sirve para amortiguar cualquier transiente que

se presente por acción de cerrar el interruptor.

Con el diodo (OVERRIDE) se consigue inhibir la lógica de control del circuito y en caso de necesitar, bajo cualquier circunstancia, potencia nominal el motor.

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

1. POWER FACTOR CONTROL SYSTEM FOR AC INDUCTION MOTORS, Frank J. Nola.
2. CONTROL SYSTEM FOR AN INDUCTION MOTOR WITH ENERGY RECOVERY, Frank J. Nola.
3. EVALUATION OF INDUCTION MOTOR PERFORMANCE USING AN ELECTRONIC POWER FACTOR CONTROLLER, George C. Marshall (NASA).
4. MOTOR POWER FACTOR CONTROLLER WITH A REDUCED VOLTAGE STARTER , George C. Marshall (NASA).

