



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**UNIDAD CULHUACAN**

**TESINA**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRONICA.

POR LA OPCIÓN TITULACIÓN

**SEMINARIO**

**“CONTROL MODERNO APLICADO A MAQUINAS ELECTRICAS ROTATORIAS  
Y A SISTEMAS AUTOMATIZADOS”**

REG.: FNS5122005/06/2006

PRESENTAN: C. DOMINGUEZ ALVAREZ DAVID  
C. ULLOA TEGOMA REBECA  
C. VALENCIA GARCIA DANIEL  
C. ZARAGOZA FERNANDEZ DAVID

TEMA: CONTROL DE UN MOTOR POR MEDIO DE PWM PARA  
PROCESOS DE VELOCIDAD.

OBJETIVO: Lograr por un sistema de control mediante PWM la optimización de un  
proceso, con la menor pérdida de energía para el ahorro de insumos.

CAPITULO 1 INTRODUCCION  
CAPITULO 2 PRINCIPIOS BÁSICOS DE MOTORES DE C.D.  
CAPITULO 3 TIPOS DE MOTORES DE C.D.  
CAPITULO 4 CONTROL DE MOTORES DE C.D.  
CAPITULO 5 MODULACION POR IMPULSOS.  
CAPITULO 6 IMPLEMENTACION DEL PROTOTIPO.  
CONCLUSIONES  
BIBLIOGRAFIA  
GLOSARIO  
APENDICE A

MÉXICO D.F. A 17 DE MARZO DE 2007

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**UNIDAD CULHUACAN**

**TESINA**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRONICA.

POR LA OPCIÓN TITULACIÓN

**SEMINARIO**

“CONTROL MODERNO APLICADO A MAQUINAS ELECTRICAS ROTATORIAS  
Y A SISTEMAS AUTOMATIZADOS”

REG.: FNS5122005/06/2006

PRESENTAN: C. DOMINGUEZ ALVAREZ DAVID  
C. ULLOA TEGOMA REBECA  
C. VALENCIA GARCIA DANIEL  
C. ZARAGOZA FERNANDEZ DAVID

TEMA: CONTROL DE UN MOTOR POR MEDIO DE PWM PARA  
PROCESOS DE VELOCIDAD.

OBJETIVO: Lograr por un sistema de control mediante PWM la optimización de un  
proceso, con la menor pérdida de energía para el ahorro de insumos.

CAPITULO 1 INTRODUCCION  
CAPITULO 2 PRINCIPIOS BÁSICOS DE MOTORES DE C.D.  
CAPITULO 3 TIPOS DE MOTORES DE C.D.  
CAPITULO 4 CONTROL DE MOTORES DE C.D.  
CAPITULO 5 MODULACION POR IMPULSOS.  
CAPITULO 6 IMPLEMENTACION DEL PROTOTIPO.  
CONCLUSIONES  
BIBLIOGRAFIA  
GLOSARIO  
APENDICE A

MÉXICO D.F. A 17 DE MARZO DE 2007

---

ING. EDGAR MAYA PEREZ  
ASESOR

---

M. EN C. GUILLERMO TRINIDAD  
SANCHEZ  
ASESOR

---

M. EN C. LÁZARO EDUARDO  
CASTILLO BARRERA  
COORDINADOR ASESOR

---

M. EN C. HECTOR BECERRIL  
MENDOZA  
JEFE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN  
COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA

# I N D I C E

## **CAPITULO 1.**

1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 ESTADO DEL ARTE	3

## **CAPITULO 2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE MOTORES DE C.D.**

2.1 ELEMENTOS BÁSICOS DE MOTORES DE C.D.	6
2.2 FUNCIONAMIENTO DE LAS PARTES DE UN MOTOR DE C.D.	6
2.2.1 ROTOR Y EL ESTATOR.	7
2.3 ARMADURA Y EL CAMPO DE UN MOTOR DE C.D.	7
2.4 RECTIFICACIÓN MECÁNICA DE LA CONMUTACIÓN DE C.A. A C.D.	9
2.4.1 MEJORA DEL DINAMO: MÁS BOBINAS DE ARMADURA.	10
2.4.2 USANDO EL DINAMO COMO MOTOR.	10
2.5 TEORÍA DE LORENTZ.	11
2.6 COMO SE DESEMPEÑAN LOS MOTORES DE C.D.	13
2.6.1 MODULACIÓN POR PULSOS	13
2.6.2 CONTROL DE MOTORES DE C.D.	14

## **CAPITULO 3. TIPOS DE MOTORES DE C.D.**

3.1 DIFERENTES MOTORES DE C.D.	15
3.2 MOTORES DE C.D. CON DEVANADOS DE CAMPO.	15
3.2.1 MOTOR (CON EXCITACIÓN) EN SERIE.	15
3.2.2 MOTOR EN DERIVACIÓN EN PARALELO.	15
3.2.3 MOTOR DE EXCITACIÓN COMPUESTA.	16
3.2.4 MOTOR DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.	16
3.3 MOTORES DE IMÁN PERMANENTE.	16
3.4 MOTORES DE IMÁN PERMANENTE SIN NÚCLEO.	17
3.4.1 ESTRUCTURA DE COPA.	17
3.4.2 ESTRUCTURA DE DISCO.	18
3.5 MOTORES DE IMÁN PERMANENTE Y SIN ESCOBILLAS.	19
3.6 MOTORES PASO A PASO.	20
3.7 MOTOR DE C.D. SIN ESCOBILLAS.	23
3.8 MOTORES QUE SON MÁS CONFIABLES (CONMUTACIÓN ELECTRÓNICA ò CON ESCOBILLAS).	25

## **CAPITULO 4. CONTROL DE MOTORES DE C.D.**

4.1 CARACTERÍSTICAS DE CONTROL DE MOTORES DE C.D.	26
4.2 CALIBRACIÓN DE LA VELOCIDAD DE UN MOTOR DE C.D.	28
4.2.1 CONTROL DE CAMPO	28
4.2.2 CONTROL DE ARMADURA	29
4.3 CONTROL REVERSIBLE DE VELOCIDAD.	29
4.4 CONTROL TRIFÁSICO DE MOTOR DE C.D.	30
4.5 EJEMPLO DE UN SISTEMA DE MOTOR TRIFÁSICO.	31
4.5.1 CIRCUITO DE DISPARO.	32
4.6 CONTROL MEDIANTE MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO.	33
4.6.1 VENTAJA DE LA MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO.	34
4.6.2 FILTRADO DE LA FORMA DE ONDA MODULADA POR ANCHO DE PULSO.	34
4.7 INVERSOR DE FRECUENCIA VARIABLE.	35

## **CAPITULO 5. MODULACION POR IMPULSOS.**

5.1 COMUNICACIÓN POR IMPULSOS ELÉCTRICOS.	37
5.2 TIPOS DE COMUNICACIÓN POR IMPULSOS.	38
5.3 MODULACIÓN POR IMPULSOS ANALÓGICA.	38
5.3.1 MODULACIÓN POR IMPULSOS EN AMPLITUD.	38
5.3.2 RUIDO.	40
5.3.3 ALIASING.	40
5.3.4 TEOREMA DE MUESTREO.	41
5.3.5 MODULACIÓN POR IMPULSOS DE DURACIÓN.	42
5.3.6 MODULACIÓN POR IMPULSOS DE POSICIÓN.	43
5.3.7 MODULACIÓN POR IMPULSOS DE FRECUENCIA.	43
5.4 MODULACIÓN POR IMPULSOS DIGITAL.	44
5.4.1 MODULACIÓN POR IMPULSOS CODIFICADOS.	44

## **CAPITULO 6. IMPLEMENTACION DEL PROTOTIPO.**

6.1 INTRODUCCION	46
6.1.2 OBJETIVO DEL PROTOTIPO	46
6.1.3 SEÑALES PWM	46
6.2 MATERIAL UTILIZADO	47
6.3 DESCRIPCION DEL PROTOTIPO	47
6.3.1 RECOPIACION DE DATOS Y MEDICIONES	49

<b>CONCLUSIONES</b>	52
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	53
<b>GLOSARIO</b>	54
<b>APENDICE A</b>	58

# CAPITULO 1

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La función de un motor eléctrico es cuando una fuente eléctrica es conectada a él, el motor gira su eje. Decimos que un motor convierte la energía eléctrica en energía mecánica.

Con frecuencia se usa un motor como el dispositivo corrector final de un sistema de control industrial. En una de tales aplicaciones el motor maneja un servomecanismo y logra el posicionamiento de un objeto en el lugar deseado. Otras aplicaciones incluyen la apertura y cierre de válvulas, la variación de la velocidad de una bomba para ajustar la razón de flujo de un líquido, y la variación de la velocidad de un ventilador para ajustar el flujo de aire. Hay muchas otras aplicaciones además de estas.

Los motores tradicionales de cd de rotor devanado y campo devanado son de mayor devanado son de mayor utilidad en aplicaciones cuya potencia requerida sea de moderada a alta en las que la velocidad debe ser ajustable (configuraciones en derivación y compuesta), o en las que la aplicación demanda un arranque y paro frecuentes con cargas de par pesadas (configuración en serie). Para aplicaciones de potencia baja a moderada con requisitos especiales de desempeño, otros tipos de motor de cd a menudo presentan ventajas sobre las maquinas tradicionales de rotor devanado.

En la mayoría de las situaciones industriales de control, los motores se operan directamente de las líneas de suministro de ca o de cd. Es decir, las terminales de los devanados del motor se conectan directamente a las líneas que suministran la corriente eléctrica. En estas especiales, el comportamiento operativo del motor es determinado por la naturaleza de la carga mecánica conectada al eje del motor. En términos sencillos, si la carga es fácil de manejar, el motor tendera a entregar un par relativamente pequeño, y girara a una velocidad alta. Si la carga es difícil de manejar, el motor tendera a entregar mucho par, y girara a una velocidad menor. El punto es que el comportamiento operativo del motor es establecido por su carga (para una línea de suministro de voltaje fijo), y el operador no tiene control sobre el comportamiento del motor.

En las situaciones industriales modernas, hay muchas aplicaciones que requieren que el operador sea capaz de intervenir en el control de la velocidad del motor. Tal control generalmente se logra mediante tiristores. La combinación del motor, el o los tiristores de control y los componentes electrónicos asociados es conocida como sistema de control de velocidad, o sistema de manejo.

La modulación por impulsos la conoce la humanidad desde hace mucho tiempo. Dos ejemplos de este proceso son las señales de humo y los golpes de tambor modulados.

La modulación por impulsos es un proceso en el que una señal analógica se muestra a intervalos regulares de tiempo. La información que contiene la señal analógica se transmite solo en el momento del muestreo, y pueden existir también impulsos de sincronización y calibración.

En el receptor, la onda original se puede reconstruir a partir de la información contenida en las muestras. Si las muestras originales se toman con bastante frecuencia, la señal analógica se puede reproducir con un error o distorsión mínimos.

El método más extendido para efectuar el control de los dispositivos semiconductores de un circuito inversor de potencia es la conmutación basada en la modulación por ancho de pulso (PWM, *Pulse Wide Modulation*). Esta técnica se basa en la comparación entre dos señales: una señal de referencia, que en el caso que aquí se trata es una señal sinusoidal; y una segunda señal, repetitiva, consistente en una señal triangular. Como resultado de dicha comparación, se obtiene una señal cuadrada de ancho de pulsos variable, función de las dos señales que se cotejan. Dicha señal cuadrada presenta nivel alto si la señal sinusoidal es mayor que la onda triangular (portadora) y nivel bajo, en caso contrario; y es la que se usa como señal de control de los elementos semiconductores del circuito inversor.

Dentro de la conmutación basada en técnicas PWM, se contemplan dos posibilidades de funcionamiento:

- PWM simple: Se realiza la comparación de la señal sinusoidal con la señal triangular.
- PWM doble: Además de la comparación anterior, se realiza otra comparación entre la señal triangular y la señal sinusoidal invertida.

Según esto, la señal de salida, del inversor en puente completo, resultante de la conmutación PWM, independientemente del esquema de funcionamiento, es otra señal cuadrada de ancho de pulsos variable. Como señal cuadrada, está formada por una gran cantidad de armónicos, con lo que se hace necesario el uso de un adecuado filtrado, para eliminar dichos armónicos y obtener una señal sinusoidal de potencia de una única frecuencia (alta tensión, alta corriente) como típica señal de salida de un inversor de potencia que ataca a la carga alterna. De los dos esquemas de funcionamiento descritos, la señal de salida del circuito inversor presenta una menor cantidad de armónicos en el caso de usar PWM doble, facilitando el filtrado y consiguiendo una señal sinusoidal con mucha menor distorsión armónica. Por este motivo, el esquema de funcionamiento implementado en este trabajo es el PWM doble [8].

## **1.2 OBJETIVOS**

El principal objetivo del tema de tesina que escogimos es conocer acerca de la estructura de un motor, sus partes, tipos de motores de cd como el de imán permanente y sin escobillas, el motor paso a paso, así como en el sistema de control de motores, en donde podremos controlar, variar y monitorear las características eléctricas, electrónicas del sistema.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Escogimos este tema de tesina, porque al conocer más acerca de los tipos de motores, estructura, funcionamiento, al utilizar el PWM en motores de cd, contamos con un costo sumamente accesible, ya que somos estudiantes y con una gran facilidad de manejo.

Por sus características inherentes, los motores de c.a. no son tan adecuados para las aplicaciones de velocidad de velocidad como los motores de c.d., pues su velocidad no puede controlarse satisfactoriamente mediante la simple variación de voltaje de alineación. Un motor de corriente alterna de inducción no tiene conmutador ni conexiones eléctricas de tipo fricción de ninguna clase. Por tanto, en mas fácil y menos costosa su fabricación que la de una maquina de c.d. Sin escobillas que se desgasten, un motor de corriente alterna que su costo de mantenimiento es menor.

Como no tiene conmutador, un motor de c.a. no produce chista. Por tanto, es mas seguro. Sin conexiones eléctricas expuestas a la atmósfera, un motor de corriente alterna se conserva mejor en la presencia de gases corrosivos. Un motor de c.a. tiende a ser más pequeño y ligero que un motor de c.d. de potencia comparable.

### **1.4 ESTADO DEL ARTE**

Junk-ik Ha recientemente publico un artículo referente al manejo de un sensor que administra un motor de imán permanente interior de estados iniciales (IPMM) que se ha estudiado la rigidez, fiabilidad y costos. Después de 1980 con el desarrollo de la electrónica de potencia, se crearon dos categorías para el diseño de sensores en la estimación de Posición. Uno se basa en la fuerza electromotriz (EMF), este maneja modelos de voltaje, que utiliza filtros Kalman, que presenta buenos resultados en regiones altas, la amplitud de la EMF es proporcional a la velocidad de rotor que falla en regiones bajas.

El otro método utiliza la salida magnética. En algunos algoritmos se introducen señales de voltaje en un periodo de prueba al estimar la posición rotor. Desde que se detecto la inductancia en señales de voltaje en un periodo corto, se pudo variar los parámetros o medición de ruido.

Actualmente existe un algoritmo basado en señales armónicas de motor que es cero en operación a baja frecuencia. Este método es aplicado a motores de inducción y motores de reluctancia sincronía. Comparando con otro método de introducir señales no introduce rotación en el flujo de señales en la variación de señal en el eje, esto genera menos onda de troqué, vibración y ruido audible, El método usa la salida magnética, pero existe en la estimación de posición magnética del polo en estado inicial. El problema es que existen dos puntos en la posición de estado del polo norte y sur magnético, es importante distinguir la posición entre dos puntos estables porque la velocidad del rotor es cercanamente cero al estado inicial.

Los métodos para identificación del eje d están basados en fase entre voltaje y corriente. La fase es básicamente determinada por la velocidad del rotor, si la velocidad del rotor es cero, no existe información acerca de la posición del rotor. La velocidad de onda se señales de prueba principalmente afecta estos métodos. [1]



F. Fiorillo and A. Novikov en su artículo desarrollan la función del centro magnético utilizado en máquinas eléctricas y circuitos electrónicos tienen que ser probados con materiales específicos en condiciones estándares de medición. Sabemos que el flujo magnético tiene distorsión ubicua en máquinas eléctricas.

El flujo de formas de onda trapezoidal y frecuencias variables caracteriza el trabajo del comportamiento del barrido de motores imán permanente. Componentes inductivos en muchos dispositivos electrónicos (transformadores, invertidores, convertidores DC/DC) son utilizados por formas cuadradas de voltaje y operación de altas frecuencias. El problema sin embargo pretenda alcanzar nuestra capacidad de medición más allá de lo que se prescribe seguir con los métodos estándares con una pequeña restricción en el tipo de inducción de formas de onda y rango de frecuencias de prueba.

Al desarrollar pérdidas y un lazo B-H midiendo la curvatura arbitraria de la inducción de formas de onda en el rango de frecuencia 1Hz-100KHz. Este sistema ha sido aplicado a las investigaciones en cristales y láminas amorfas (tiras simples, toroide, estructuras Epstein).

Un teorema simple y general enfatiza las pérdidas que dependen de la frecuencia magnética y el grado de distorsión que puede ser previsto a través de un conocimiento previo de las cantidades estándares: pérdidas de histéresis y pérdida total sinusoidal inducida dada en la frecuencia de prueba (ejemplo 50hz). [2]

D. Lin, T. Batan, E.F. Funchs y W.M. Grady en recientes fechas han desarrollado un artículo en el cual comentan sobre los convertidores de potencia estáticos (SPC) introducen corrientes armónicas dentro del sistema de potencia que causa una degradación en la calidad de potencia vía distorsión de voltaje. Las cargas no lineales generan únicamente picos pero también en orden armónico solo si no existe un balance sin el SPC.

Van Der Merwe et al presenta un método usando dos fases casi balanceadas al medir el sistema del voltaje de salida de la impedancia en motores de inducción de fase simple. El método más exacto muestra que todos los parámetros encontrados en base a dos fases casi balanceadas por excitación de fuente de voltaje.

El modelo emplea la pequeña señal de superposición principalmente por sistemas no lineales. El principio general de superposición no aplica para sistemas no lineales pero si los sistemas no lineales son excitados por una señal pequeña parcial, una señal mínima de superposición es basada en las series de Taylor de expansión que pueden ser aplicadas usando diferentes parámetros de una señal pequeña y señal DC.

En máquinas de fase simple operan bajo la influencia de voltajes armónicos, campos magnéticos de rotación en diferentes direcciones, diferentes velocidades al rotar con velocidades sincrónicas de entrada. Si el campo magnético gira con velocidad sincrónica fundamental la entrada se toma como referencia, el campo fundamental de entrada puede ser asumido al ser de tipo DC y el campo armónico como campo fundamental son otras alternativas. Considerando que sus amplitudes son mínimas, uno puede usar el principio de superposición en sistemas no lineales para el cálculo del estado de la constante de rendimiento de la máquina. [3]

Leszek Kawecki Tadeusz Niewwierowicz ha propuesto en uno de sus artículos uno de los métodos más efectivos y cómodos de controlar el arranque y velocidad de motores de inducción es el control en frecuencia que consiste en el cambio simultaneo de la frecuencia y de la amplitud del voltaje que alimenta el motor. Dependiendo de las leyes según las cuales se realizan las variaciones de ambas señales de control (amplitud y frecuencia del voltaje de alimentación) se pueden obtener diferentes cualidades de control.

Para resolver dicho problema de optimización hay que aceptar un modelo matemático del motor y un método matemático de solución.

Despreciando dichos transitorios se puede resolver el problema de optimización en tiempo en forma general y en el sistema cerrado, se puede encontrar la descripción matemática del controlador óptimo en tiempo que sirva para cualquier motor de inducción. [4]

G.El-Saady, A.M.Sharaf, A.Makky, M.K.El-Sherbiny, G.Mohamed han descrito últimamente las características del uso de controladores para el Motor de inducción es robusto, rentable, de bajo mantenimiento y un sistema barato en comparación a sus presentaciones. Al utilizar un diseño de variación de voltaje se utilizan varios switches para controlar las conversiones de ciclos, un simple interruptor se diseña para hacer el cambio de sentido para el rotor.

En la industria es mucho más atractivo utilizar el motor de inducción trifásico jaula de ardilla por ser menos costoso y bastante robusto. [5]

Michael J. Melfi ha publicado en ultimas fechas un articulo sobre la configuración y uso de los polos en un motor de inducción, cuando se maneje un motor de inducción es común buscar el numero de polos con el que cuenta el motor, esto es apropiado en caso de que el motor corra sobre la línea por lo que se espera trabaje a un ritmo constante.

Una operación que demande alrededor de 300 o 3600 RPM deberá contar con mínimo un motor de 2 polos con un by pass a 50 u 60 Hz, sin embargo si el bypass se desperdicia se puede usar un motor de 4 polos a una frecuencia de 100 o 120 Hz. Una de las características mas sobresalientes de poder trabajar ajustando la frecuencia de la fuente de AC en el motor es que existen un numero infinito de posibles velocidades base. [6]

## **CAPITULO 2**

### **PRINCIPIOS BÁSICOS DE MOTORES DE C. D.**

#### **2.1 ELEMENTOS BÁSICOS DE MOTORES DE C.D.**

El principio básico de un motor de cd: contiene una espiral de alambre que gira de manera libre en medio de un imán permanente. Cuando por el devanado pasa una corriente, las fuerzas resultantes ejercidos en sus lados y en ángulo recto al campo provocan fuerzas que actúan a cada lado produciendo una rotación. Sin embargo, para que esté continué; cuando el devanado pasa por la posición vertical se debe invertir la dirección de la corriente.

En un motor de cd convencional, los devanados de alambre se montan en las ranuras de un cilindro de material magnético conocido como armadura. La armadura está montada en cojinetes y puede girar. Ésta se monta en el campo magnético producido por los polos de campo que pueden ser, en pequeños motores; por ejemplo, imanes permanentes o electroimanes, cuyo magnetismo se obtiene mediante una corriente que circula por los devanados de campo. El principio básico del funcionamiento de un motor de cd de cuatro polos, cuyo campo magnético se produce por devanados que transportan corriente.

Los extremos de los devanados de la armadura se conectan con los segmentos adyacentes de un anillo segmentado conocido como conmutador y el contacto eléctrico con los segmentos se logra mediante contactos de carbón conocidos como escobillas. Conforme la armadura gira, el conmutador invierte la corriente de cada uno de los devanados al desplazarse por los polos de campo. Esto es necesario a fin de que las fuerzas que actúan en el devanado sigan actuando en la misma dirección y la rotación continúe. La dirección de rotación del motor de cd se convierte al invertir la corriente de armadura o la corriente de campo.

#### **2.2 FUNCIONAMIENTO DE LAS PARTES DE UN MOTOR DE C.D.**

Un motor de cd recibe potencia eléctrica de cd y produce una rotación mecánica de su eje. La misma máquina es perfectamente capaz de invertir ese proceso de conversión de energía, recibiendo una rotación mecánica de una máquina externa y produciendo una potencia eléctrica de cd. Cuando la máquina trabaja en este sentido, recibiendo una entrada mecánica y produciendo una salida eléctrica, se llama generador. En otras palabras, un motor de cd y un generador de cd son la misma máquina, pero operada de maneras opuestas.

Dos direcciones de conversión de energía para la misma máquina de cd. La primera operando como motor, la máquina recibe energía eléctrica de una fuente eléctrica. La corriente convencional entra al motor por su terminal positiva y sale por su terminal negativa. Entra energía de rotación a su carga mecánica.

La segunda operando como generador; la máquina recibe energía rotatoria mecánica de un motor. Entrega energía eléctrica a su carga eléctrica, en este caso una lámpara. La corriente convencional sale de la máquina por su terminal positiva y vuelve a entrar por su terminal negativa.

Ya que una máquina de cd de rotor devanado desconectada no necesariamente es un motor, ni necesariamente es un generador, necesitamos una palabra para referirnos a la máquina genérica misma esta es dinamo.

Se llama dinamo de rotor devanado porque tiene una bobina electromagnética, un devanado multi-vuelta en su parte giratoria. No tiene un imán permanente en su parte giratoria.

### **2.2.1 EL ROTOR Y EL ESTATOR.**

Para lograr que un generador funcione, debe forzarse el giro de la parte interior, el rotor. La parte exterior, el estator, permanece estacionario. El rotor es un cilindro montado en un eje, con el eje soportado por cojinetes en ambos extremos.

Los términos rotor y estator son términos mecánicos; no son términos eléctrico/magnético.

### **2.3 ARMADURA Y EL CAMPO DE UN MOTOR DE C.D.**

Un generador crea un voltaje porque uno de sus devanados, llamado devanado de armadura, experimenta un cambio de flujo magnético. El flujo magnético, simbolizado ( $\Phi$ ), es producido por el otro devanado del generador, llamado devanado de campo. Se denomina de esta manera porque es un electroimán que crea un campo magnético de densidad de flujo B cuando se hace pasar un flujo de corriente a través de él.

Un generador tiene su devanado de armadura localizado en el rotor. Esto ha producido una confusión desafortunada algunas personas tienen la idea de que el ensamble del rotor y su devanado asociado pueden llamarse siempre armadura, y que la estructura de estator y su devanado asociado pueden llamarse siempre campo. Esto no es correcto.

El devanado de armadura está en el rotor y que el devanado de campo está en el estator que exhibe el diseño de una máquina de dos polos; es decir, el devanado de campo crea un polo magnético norte y otro sur, para un total de dos polos.

Para un generador de cd, el campo es colocado en el estator. La armadura es colocada en el rotor.

La vista de corte transversal de una máquina de dos polos, en la que las direcciones de enrollado del devanado de campo y del flujo ( $\Phi$ ). Los conductores (alambres) del devanado de la armadura han sido omitidos: las ranuras del rotor están vacías.

La vista de corte transversal de una máquina de cuatro polos. En ella la distribución de flujo dentro del núcleo del rotor y a través del entrehierro (air gap) entre la superficie del rotor y las caras de los polos. Un polo saliente (uno que sobresale de la estructura total) casi siempre se ensancha hacia su cara.

Para que el flujo del campo magnético se distribuya de manera más uniforme alrededor de la superficie del rotor. (Por supuesto, si el campo estuviera montado en el rotor, podríamos decir que el flujo se distribuye de manera más uniforme a través de la superficie del estator).

Para que el devanado no pueda soltarse del polo. Si un devanado del electroimán fuera enrollado alrededor de ese núcleo del polo sin ensanchar.

Laminaciones: El material usado para el cilindro del rotor y los polos magnéticos es acero. El acero es combinado en aleación y termo tratado para darle una alta permeabilidad magnética, a fin de que una cantidad dada de “esfuerzo ( $H$ )” magnetizador ejercido por los devanados de campo produzca una mayor densidad de flujo magnético, simbolizado  $B$ .

El problema con el acero es que también es un buen conductor eléctrico. Esto lo hace susceptible a las corrientes de Foucault, que son corrientes en remolino inducidas en el cuerpo de acero por un flujo magnético cambiante. Las corrientes de Foucault pueden ser un problema serio porque producen calentamiento  $I^2R$ . Por tanto, representan un desperdicio de energía (en realidad de potencia), y contribuyen al calentamiento de la máquina que conduce a esfuerzos y daños relacionados con la temperatura.

Para combatir el problema de las corrientes de Foucault, los fabricantes construyen el rotor y los polos de campo con laminaciones delgadas de acero, separadas por capas aislantes de plástico muy delgado. De esa manera, los remolinos no pueden tener un diámetro mayor que el grosor de las láminas. Esta técnica de construcción reduce drásticamente su pérdida de potencia  $I^2R$  asociada.

Entrehierro: La distancia entre la superficie del rotor y las caras de los polos de campo. A menor entrehierro, mayor es el campo magnético, siendo iguales todas las demás cosas. Esto aumenta la eficiencia de la máquina, dando más salida de energía eléctrica por cada unidad de energía mecánica de entrada.

Hoy día, las máquinas industriales de mayor calidad tienen entrehierros de unos 1.5 mm (aproximadamente 0.06 pulgadas, o 1/16 de pulgada). Las máquinas de menor calidad pueden tener entrehierros en el rango de 5mm ¼ de pulgada).

## 2.4 RECTIFICACIÓN MECÁNICA DE LA CONMUTACIÓN DE C.A. A C.D.

El dinamo de cd es cuando tenemos un generador de ca y buscamos que sea un generador de cd. La característica final necesaria para convertir de ca a cd es el conmutador mecánico: el anillo colector.

El conmutador más sencillo posible tiene en un solo anillo colector cortado en dos piezas, o segmentos. Los segmentos del conmutador están aislados del eje y entre sí. El segmento que está en la parte superior en este instante está soldado al lado de la bobina de punta negra. El segmento que está en la parte inferior en este instante tiene el lado de la bobina de punta blanca soldado a ésta. Las escobillas que rozan contra los segmentos del conmutador son estacionarias. Los segmentos del conmutador giran con el eje del rotor pues están conectados mecánicamente a él.

El devanado de la armadura está a  $90^0$  de su posición inicial. El flujo magnético que pasa a través de la bobina es cero, pues el plano de la bobina está exactamente paralelo a la dirección de las líneas de flujo, horizontalmente. Con  $\Phi = 0$ ,  $\Delta\Phi/\Delta t$  está a su valor máximo posible, el valor pico de la onda senoidal.

Durante los siguientes  $90^0$  de rotación, el lado con la punta negra permanecerá negativo. Durante esa rotación de  $90^0$ , los dos segmentos permanecerán en contacto con las escobillas que vemos hacer contacto con ellos en este momento. La escobilla inferior permanecerá en contacto con el segmento de punta blanca, y la escobilla superior permanecerá en contacto con el segmento de punta negra.

Pero en el instante de los  $180^0$ , las escobillas cambian de segmento. Poco después de que el devanado de la armadura pasa su posición de  $180^0$ , el segmento del conmutador de punta blanca sale de su contacto con la escobilla inferior y entra en contacto con la escobilla superior.

Desde la misma manera ocurre con el segmento de punta negra. Dejará su contacto con la escobilla estacionaria superior y entrará en contacto con la escobilla inferior.

Por supuesto, es en el momento exacto de los  $180^0$  cuando las terminales del devanado cambian de polaridad eléctrica. En ese instante, la terminal de punta blanca cambia de positivo a negativo eléctricamente, y la negra cambia de negativo a positivo.

Así, la conmutación mecánica de los segmentos con las escobillas coincide exactamente con el cambio eléctrico de polaridad del segmento. Por tanto, la escobilla inferior siempre es positiva, y la escobilla superior siempre es negativa. Cuando vemos la carga externa, su lado derecho siempre es positivo, ya que está conectado fuertemente a su escobilla inferior. El lado izquierdo siempre es negativo. La onda senoidal de ca generada internamente ha sido rectificada a onda completa en la carga externa.

### **2.4.1 MEJORA DEL DINAMO: MAS BOBINAS DE ARMADURA.**

Una segunda bobina de armadura en el rotor, deslaza de la primera en  $90^{\circ}$ . El conmutador ha sido cortado en cuatro segmentos, en lugar de sólo dos.

No es difícil ver que este arreglo permite que una de las bobinas maneje la carga durante la cercanía de la zona pico de cada semiciclo, y que la otra bobina tome el control durante la cercanía de la zona pico de sus semiciclos. De esta manera, ninguna de las bobinas maneja la carga durante las porciones de bajo voltaje de sus pulsaciones de ciclo.

La colocación de una segunda bobina en el rotor hace más llana la forma de onda de salida, con un voltaje promedio más alto.

La ventaja de las bobinas de armadura adicionales debe ser clara: con sólo una pequeña cantidad de inversión adicional en la fabricación de la máquina, su régimen de salida mejora de manera impresionante.

También, en un devanado de armadura de un dinamo moderno, las bobinas de la armadura no operan independientemente entre ellas. Todas están interconectadas en arreglos en serie/paralelo para que cada bobina individual pueda hacer una contribución parcial a la salida global de la máquina en cada instante.

### **2.4.2 USANDO EL DINAMO COMO MOTOR.**

Para cambiar de operación como generador a operación como motor, retiramos la carga eléctrica e introducimos una fuente de cd, en el eje conectamos el dispositivo de carga mecánica en lugar de una fuerza motriz primaria.

$V_A$  simboliza el voltaje de alimentación aplicado a la armadura,  $\tau$  es nuestro símbolo de par, que es una acción de giro mecánico que vence a la oposición al movimiento.

Hay dos puntos de vista diferentes para explicar la producción de par en los motores. El primero es el punto de vista de atracción de polos que es cuando una corriente es forzada a través su propio campo magnético, independiente del campo magnético inicial producido por el devanado de campo. Un lado de la bobina de armadura se vuelve el norte magnético, y el otro lado se vuelve el sur magnético. El lado norte de la armadura es atraído al polo sur del campo estacionario: el lado sur de la armadura es atraído al polo norte del campo estacionario. Estas fuerzas de atracción hacen que el ensamble de armadura y rotor gira hacia una alineación magnética con el norte de la armadura moviéndose tan cerca como sea posible al sur del campo estacionario, y viceversa.

Apliquemos esta visión de la atracción de los polos magnéticos al motor de cd la corriente convencional entra al motor por la escobilla inferior, fluyendo en la bobina de la armadura por la terminal de punta blanca de la bobina, fluyendo del lado derecho hacia la parte posterior del devanado, pasando en la parte de atrás, fluyendo del lado izquierdo hacia el frente del devanado, saliendo de la bobina por la terminal de punta blanca de la bobina, saliendo de la máquina por la escobilla superior, y regresando a la terminal negativa de  $V_A$ .

Aplicando la regla de la mano derecha a las direcciones de corriente del conductor indica que el lado superior de la bobina de la armadura es norte, y el lado inferior es sur. Por tanto, el lado superior es atraído al polo sur principal del lado derecho, y la parte inferior es atraída al polo norte principal en el lado izquierdo del estator. Entonces, el ensamble del rotor gira en dirección de las manecillas del reloj, tratando de atraer los polos desiguales.

Tras girar  $90^0$  de la posición, la armadura está en la posición de  $180^0$ . Ahí conmuta sus conexiones de escobilla a segmento. Una corta distancia después de los  $180^0$ , la escobilla inferior positiva estará en contacto con el segmento de punta negra, estando el conductor de punta negra del devanado ligeramente a la derecha de la media línea vertical del dinamo. Y la escobilla superior negativa estará en contacto con el segmento de punta blanca, estando el conductor del devanado de punta blanca ligeramente a la izquierda de la línea media. El devanado de la armadura carga corriente, alejándola de nosotros por el conductor superior (con punta negra), dentro de la página hacia la parte posterior del devanado. La corriente pasa en la parte de atrás y fluye hacia nosotros en el conductor de la parte inferior (de punta blanca), fuera de la página hacia el frente del devanado. Aplicando la regla de la mano derecha a estas direcciones de corriente observamos que el devanado de la armadura es magnéticamente norte en su lado izquierdo y sur en su lado derecho. Los polos magnéticos se repelen, por lo que el ensamble de rotor y armadura ahora es obligado a continuar moviéndose en la dirección de las manecillas del reloj. El norte estacionario está repeliendo el norte de la armadura, y el sur estacionario está repeliendo el sur de la armadura.

Por tanto, la armadura siempre produce par en dirección de las manecillas del reloj en el eje del rotor, por lo que el eje continué girando.

## **2.5 TEORÍA DE LORENTZ.**

La segunda manera de explicar la producción de par tiene un sabor a físico más serio; por tanto a muchas personas no les gusta. Sin embargo, representa la realidad y explica todos los detalles de la producción de par instante a instante. La relación de Lorente puede postularse:

*La fuerza mecánica en un alambre conductor de corriente dentro de un campo magnético está dado por la ecuación  $F = I \times l \times B$  en el cual  $l$  es la longitud del alambre,  $I$  es su corriente y  $B$  es la intensidad del campo magnético (densidad de flujo). Si se usan unidades básicas SI para  $I$ ,  $l$  y  $B$  (metros, amperes y teslas), la fuerza se expresa en Newtons.*



La teoría de Lorentz o relación también especifica la dirección de la fuerza mecánica, dado que conocemos la dirección de la corriente y del flujo. Aquí hay una manera de especificar la dirección de la fuerza:

*Suponiendo que  $I$  y  $B$  forman un ángulo recto entre ellos, imagine la flecha direccional de la corriente teniendo un pivote en su cola. Con los dedos de su mano derecha, empuje la punta de la flecha de corriente  $I$  para alinearla con la flecha de flujo  $B$ . La flecha  $I$  está siendo girada en su pivote de cola; la flecha  $B$  (o  $\Phi$ ) sólo permanece en su posición. A medida que ejecuta este empuje, la posición natural de su pulgar derecho apunta en la dirección de la fuerza mecánica  $F$ .*

Una manera equivalente de expresar la dirección de la fuerza resultante de las direcciones conocidas de  $I$  y  $B$  es la siguiente: mantenga su mano derecha de modo que sus dedos pulgar, índice y medio estén a ángulos rectos entre ellos.

Permita que su dedo índice apunte en la dirección de la corriente  $I$ , y que su dedo medio apunte en la dirección del flujo magnético  $B$  (o  $\Phi$ ). La posición del pulgar entonces indica la dirección de la fuerza mecánica  $F$ .

Aspecto de dirección de la relación de Lorentz. El empuje en la flecha  $I$  con sus dedos, desplazándola a través de un ángulo de  $90^0$  hacia  $B$  (o  $\Phi$ ). Su dedo indica la dirección de la fuerza mecánica  $F$ . Al mantener la mano de manera que el dedo índice represente la corriente  $I$  y el dedo medio represente el campo magnético  $B$  (o  $\Phi$ ). Su pulgar entonces representa la fuerza mecánica  $F$ .

El avance de los conductores de la armadura giratoria del instante de  $90^0$ , durante tres cuartos de un giro, hasta los  $360^0$ . Las fuerzas mecánicas siempre producen un par de dirección de las manecillas del reloj.

Una vista de frente (de corte transversal) del motor al instante de  $90^0$ , el conductor del lado derecho conduce corriente convencional hacia dentro. La corriente fluye a través de la bobina de armadura y sale por el conductor izquierdo. La corriente alcanza el segmento superior del conmutador, la escobilla superior, y en algún momento regresa a la terminal negativa de la fuente externa de cd,  $V_A$ .

Aplicando la relación de Lorentz al conductor del lado derecho, obtenemos una dirección de fuerza descendente. Esto tiende a girar el ensamble del rotor en dirección de las manecillas del reloj.

El rotor en la posición de  $120^0$ , no tiene una conmutación del segmento de los contactos de escobilla a conmutador, por lo que no hay razón para que las corrientes hayan invertido su dirección en los lados de la bobina. Por tanto, la relación de Lorentz aún da una fuerza descendente a la derecha y ascendente a la izquierda. Las fuerzas mismas son igual de intensas que en el instante de  $90^0$ , pues las magnitudes de  $I$  y  $B$  no son diferentes, pero el par  $\tau$  creado en el instante de  $120^0$  es menor que el par pico. Esto es porque la línea de aplicación de la fuerza le da un brazo de palanca reducido en relación con el centro del eje. El par es igual al producto de la fuerza por el brazo de momento.

En la posición de  $180^0$  las escobillas están en el proceso de conmutar los segmentos del conmutador, pero aun cuando pudiéramos establecer las direcciones de la corriente, podríamos concluir que el par neto creado es cero. Esto es porque la línea de aplicación de la fuerza (cualquiera de ellas, la superior o la inferior) pasa exactamente a través del eje de rotación. Es decir, tiene un brazo de palanca cero y, por lo tanto, produce un par cero. El ensamble del rotor debe marchar por inercia (coast) a través de esta posición.

Cuando las escobillas cambian de segmento. La escobilla positiva inferior ahora está haciendo contacto con el segmento. La escobilla negativa superior está en contacto con el otro segmento.

Por tanto, las direcciones de corriente en los dos lados de la bobina se han invertido, con la corriente del conductor por el lado izquierdo de la línea media vertical. La corriente en el conductor fluye hacia dentro por el lado derecho de la línea media vertical. Debido a la conmutación ingeniosamente sincronizada, cualquier conductor que éste a la izquierda de la línea media conduce corriente fuera hacia nosotros, y cualquier conductor que éste a la derecha de la línea media conduce corriente dentro, alejándola de nosotros.

El campo magnético nunca cambia, por lo que el efecto de esta consistencia de la corriente es que todas las fuerzas mecánicas del lado izquierdo son hacia arriba y todas las fuerzas mecánicas del lado derecho son hacia abajo. El par siempre es en dirección de las manecillas del reloj, o cero. Nunca es en dirección contraria a las manecillas del reloj.

El ensamble del rotor en la posición de  $330^0$ , aplicando la relación de Lorentz para asegurar que  $\tau$  aún es en el sentido de las manecillas del reloj.

Cuando el rotor se muestra de nuevo en su posición inicial de  $0^0$ . El  $\tau$  instantáneo es cero, y el rotor momentáneamente marcha por inercia hasta que el puenteo del segmento (segment-bridging) es interrumpido y las escobillas regresan al contacto normal del segmento.

## **2.6 COMO SE DESEMPEÑAN LOS MOTORES DE C.D.**

Un motor de cd de configuración estándar, en el que el devanado de campo está conectado en paralelo con el devanado de la armadura.

El motor de derivación en la relación entre las tres corrientes, corriente total de alimentación  $I_T$  corriente de campo de derivación  $I_F$  y corriente de armadura  $I_A$ . La ley de corrientes de Kirchhoff se aplica, por supuesto.

### **2.6.1 MODULACION POR PULSOS.**

Un problema frecuente en la transmisión de señales de cd de bajo nivel generadas por sensores es que la ganancia del amplificador operacional usado para amplificar estas señales puede experimentar un desplazamiento o deriva, al igual que la salida. Este problema se puede corregir con una señal que sea una secuencia de impulsos en vez de una señal continua en el tiempo.

Una manera de realizar lo anterior es dividiendo la señal de cd. La salida del divisor es una cadena de impulsos cuyas alturas tienen relación con el nivel de cd de la señal de entrada. A este procedimiento se le denomina *modulación por amplitud de impulsos*. Concluida la amplificación y demás acondicionamiento de la señal, la señal modulada se remodula para obtener una salida de cd. En la modulación por amplitud de impulsos, la altura de los impulsos está relacionada con la magnitud del voltaje de cd.

Una alternativa a lo anterior es la *modulación por ancho de pulso* (PMW), donde el ancho, es decir, la duración del pulso y no su amplitud es de lo que depende la magnitud del voltaje.

La modulación por ancho de pulso con frecuencia se utiliza en los sistemas de control para controlar el valor promedio de un voltaje de cd. En este caso, un voltaje analógico constante se divide en pulsos variando el ancho de éstos, de manera que el valor promedio del voltaje pueda modificarse. El término *ciclo de trabajo* se refiere a la fracción de cada ciclo en el cual el voltaje es alto. En el caso de una señal PWM, el valor de ésta es alto durante la mitad de cada ciclo y, por lo tanto, el ciclo de trabajo es  $\frac{1}{2}$  o del 50%. Si esto sucede sólo durante una cuarta parte de cada ciclo, el ciclo de trabajo es de  $\frac{1}{4}$  o del 25%.

De ahí que lo más es utilizar la técnica llamada *modulación por ancho de pulso* (PWM), la cual utiliza una fuente de voltaje de cd constante y secciona su voltaje para que varíe su valor promedio. Al obtener la PWM utilizando un circuito de transistor básico, el transistor se activa y desactiva mediante una señal que se aplica a su base. El diodo tiene por objeto servir de trayectoria a la corriente que surge cuando el transistor se desconecta, debido a que el motor se comporta como generador. Este circuito sólo se usa para operar el motor en una dirección. Para utilizar el motor en dirección directa e inversa se utiliza un circuito con cuatro transistores, conocido como circuito H. Este circuito se puede modificar mediante compuertas lógicas, de manera que una entrada controle la conmutación y la otra, la dirección de rotación.

## **2.6.2 CONTROL DE MOTORES DE CD.**

La velocidad que alcanza un motor de imán permanente depende de la magnitud de la corriente que pasa por el devanado de la armadura. En un motor con devanado de campo, la velocidad se modifica variando la corriente de la armadura, o la de campo; en general, es la primera la que se modifica. Por lo tanto, para controlar la velocidad se puede utilizar el control del voltaje que se aplica a la armadura. Sin embargo, dado que el empleo de fuentes se logra mediante un circuito electrónico.

En una fuente de corriente alterna, se utiliza el circuito de tiristor para controlar el voltaje promedio que se aplica a la armadura. Sin embargo, lo más común es que uno se ocupe de señales de control provenientes de microprocesadores.

## **CAPITULO 3**

### **TIPOS DE MOTORES DE C.D.**

#### **3.1 DIFERENTES MOTORES DE C.D.**

Los motores pueden dividirse en dos clases generales: de cd y de ca. En la clase de los de cd podemos dividirlos en las subclases mostradas en la figura 1. En la clase de ca, podemos dividirlos en las subclases mostradas en la figura 2.

De las subclases de ca, los motores de inducción son los más importantes para control industrial. Los motores síncronos ciertamente se utilizan en la industria, pero generalmente son grandes máquinas trifásicas usadas para propósitos de operación en estado estable no de control, por ejemplo, para operar compresores de aire. Los tipos síncronos, pequeños, de una fase, es deducir los motores de reluctancia y los motores de histéresis, son usados principalmente en equipos de audio y en relojes cronómetros. Los motores universales sólo se ven ocasionalmente en los sistemas de control; su uso principal ocurre en las herramientas manuales de velocidad variable. Enfocaremos nuestra atención en la subclase de inducción, concentrándonos en los tipos polifásico y monofásico de jaula de ardilla.

#### **3.2 MOTORES DE C.D. CON DEVANADOS DE CAMPO**

Los motores de cd con devanados de campo se dividen en: motores en serie, en paralelo, compuestos y de excitación independiente, dependiendo de la manera como se encuentran conectados los devanados de campo y los devanados de la armadura.

##### **3.2.1 MOTOR (CON EXCITACIÓN) EN SERIE.**

En el motor en serie, los devanados de la armadura y de los campos están en serie. Este motor produce el par de rotación de arranque de mayor intensidad y alcanzar la mayor velocidad sin carga. Con cargas ligeras existe el riesgo de que el motor alcance velocidades muy altas. La inversión de la polaridad de la alimentación eléctrica de los devanados no tiene efecto en la dirección de rotación del motor; éste sigue girando en la misma dirección dado que tanto las corrientes de campo como de armadura quedaron invertidas.

##### **3.2.2 MOTOR EN DERIVACIÓN (EN PARALELO).**

En éste, los devanados de armadura y de campo están en paralelo; genera el par de rotación de menor intensidad, en el arranque tiene una velocidad sin carga mucho menor y permite una buena regulación de la velocidad. Debido a esta velocidad casi constante, independiente de la carga, estos motores se utilizan mucho. Para invertir la dirección de giro, hay que invertir la armadura o el campo. Por ello en este caso es preferible utilizar los devanados de excitación independiente.

### **3.2.3 MOTOR DE EXCITACIÓN COMPUESTA.**

Este motor tiene dos devanados de campo, uno en serie con la armadura y otro en paralelo. En estos motores se intenta conjuntar lo mejor del motor (excitado) en serie y del motor en paralelo, es decir; un par de rotación de inicio de valor elevado y una buena regulación de la velocidad.

### **3.2.4 MOTOR DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.**

En este motor el control de las corrientes de armadura y de campo es independiente y se le puede considerar como un caso especial del motor en paralelo.

### **3.3 MOTORES DE IMÁN PERMANENTE.**

Un motor de cd convencional de imán permanente es, igual que un motor de cd de rotor devanado configurado en derivación. El ensamble del rotor es idéntico, con un núcleo laminado de hierro, devanados de armadura colocados en ranuras del rotor, un conmutador, un montaje de escobillas, y todo lo demás es igual.

La única diferencia es que el campo magnético es establecido por imanes permanentes en lugar de electroimanes.

En su forma más sencilla, el motor contiene imanes permanentes que están magnetizados radialmente, el flujo magnético emerge de la cara del polo norte a la izquierda. El flujo pasa a través del entrehierro (air gap), a través del núcleo convencional del rotor, y vuelve a entrar por la cara del polo sur a la derecha. La superficie externa del imán del lado derecho es norte: la superficie externa del imán del lado izquierdo es sur. La trayectoria de flujo magnético se completa a través del armazón de acero del motor, igual que lo haría en una máquina de campo devanado.

También hay disponibles diseños de cuatro y seis polos. Cuando se aumenta el número de polos de campo, el devanado de la armadura debe rediseñarse para que las bobinas individuales de la armadura tengan el mismo espaciado mecánico que los polos adyacentes. Por ejemplo, la estructura de campo de cuatro polos con  $90^{\circ}$  mecánicos entre los polos adyacentes, requerirá que las bobinas de armadura tengan sus lados colocados en ranuras del rotor que también estén a espaciados de  $90^{\circ}$  mecánicos (aproximadamente). Por lo general también hay cuatro escobillas de conmutación. Estos hechos en relación con la armadura de un motor multipolo son ciertos tanto para las máquinas de cd de campo devanado como para las máquinas de imán permanente.

Con algunos materiales exóticos de imán permanente, es más fácil establecer el campo magnético en la dirección circular antes que en la dirección radial. En ese caso, los polos están hechos de acero laminado de alta permeabilidad, y sirven para completar la trayectoria del flujo magnético, por lo que puede ser muy delgado. Esto permite a los diseñadores reducir el tamaño y el peso de tales motores.

La Magnetización no radial de los imanes permanentes es la magnetización de los dos imanes permanentes en dirección concéntrica (circular) y la magnetización de los cuatro imanes en dirección recta, a lo ancho.

### **3.4 MOTORES DE IMÁN PERMANENTE SIN NÚCLEO.**

Para reducir la inercia del rotor y permitir una aceleración y un frenado muy rápidos, los diseñadores han desarrollado dos estructuras ingeniosas que no contienen hierro (acero) en el rotor. Tales motores son llamados motores sin núcleo, también conocidos como motores de rotor sin hierro.

#### **3.4.1 ESTRUCTURA DE COPA.**

El motor sin núcleo de estructura de copa tiene una estructura hueca en forma de copa que está unida al eje solamente por el lado derecho, justo antes del conmutador. El cuerpo delgado de la copa cabe entre los imanes permanentes radiales en el armazón y el núcleo magnético perforado estacionario conectada la campana terminal izquierda. El extremo izquierdo se desliza a través de la perforación del núcleo y se soporta por medio de un cojinete en la campana terminal izquierda.

La estructura en forma de copa es fabricada con fibra de vidrio o algún material ligero parecido, con alambres de cobre pegados a sus superficies exterior e interior. Una bobina de una sola vuelta tiene sus lados espaciados a  $90^{\circ}$  mecánicos, la misma distancia que los polos magnéticos permanentes adyacentes. Es un rotor estándar de cilindro sólido con una armadura normal, las bobinas tienen segmentos de alambre de cruce que pasan a través de la superficie del extremo del cilindro, pero en el diseño de motor no hay un extremo del cilindro con el cual se pueda trabajar. Por tanto, la sección de la extrema izquierda de la superficie del cilindro está dedicada a darles espacio a los alambres para efectuar la separación de  $90^{\circ}$  mecánicos. Así que, el alambre más cercano a nosotros podría llevar corriente de armadura de derecha a izquierda en el exterior de la estructura. La relación de Lorentz entre la  $I$  que corre hacia la izquierda y el flujo  $\Phi$  norte produce una fuerza  $F$  descendente. Esto tiende a girar la copa envolvente en sentido de las manecillas del reloj, vistas desde el lado izquierdo.

Este conductor de corriente en particular se dobla hacia arriba en la parte superior de la copa. En la parte superior cruza la pared de la copa envolvente hacia el interior. Su corriente entonces continúa hacia abajo por la parte interior de la estructura envolvente. Entonces su corriente continúa hacia abajo por la parte interior de la estructura envolvente. Entonces su corriente continúa hacia abajo por el interior de la estructura en la dirección de izquierda a derecha. La parte superior es una región de flujo sur, por lo que la relación de Lorentz indica una fuerza hacia fuera. Esta fuerza tiende a girar el ensamble de la estructura envolvente también en dirección de las manecillas del reloj, por lo que tenemos un diseño de motor operativo.

Debido a que el ensamble del rotor no contiene hierro, el rotor no tiene una tendencia de detención, que es la tendencia a preferir permanecer en lugares de giro particulares en relación con la estructura del campo. Los motores normales de rotor devanado tiene esa tendencia, que produce el efecto de cogging  $RT$  cuando giran lentamente. En el estado de cogging  $RT$ , el motor pasa de manera brusca a una posición de giro, y luego intenta detenerse ahí por un momento hasta que su par hace que avance a su siguiente posición de giro preferida.

La ausencia de hierro en el rotor elimina las pérdidas de  $I^2 R$  por corrientes de Foucault y también las pérdidas de potencia por histéresis magnética. Al eliminar estas pérdidas en el rotor, los motores sin núcleo tienen altas eficiencias.

La estructura envolvente en forma de copa también se conoce por los nombres de estructura de lata (can structure) y estructura de caracol (shell structure).

### 3.4.2 ESTRUCTURA DE DISCO.

La estructura de disco es bastante diferente a cualquier otra estructura de motor en que el flujo interno del campo magnético no es radial. En su lugar, el flujo apunta paralelamente al eje de la máquina (llamada dirección axial). Las líneas de flujo pasan de una cara de polo norte de un lado del disco delgado a una cara de polo sur a una pequeña distancia, del otro lado del disco delgado. El imán permanente sujeto a la placa terminal derecha emite un flujo norte. Ese flujo pasa a través del disco delgado, y luego entra en un imán permanente sur sujeto a la placa terminal izquierda.

Con un espaciado de  $60^\circ$ , otro par de imanes permanentes norte/sur envía un flujo a través del disco en la dirección opuesta, de izquierda a derecha. Esto se repite en incrementos de  $60^\circ$  alrededor de toda la máquina. Las trayectorias de flujo magnético se completan a través de la estructura de acero del motor.

El disco ligero tiene pistas de cobre adheridas, al igual que una tarjeta de circuito impreso. Las pistas están dispuestas para formar espiras de armadura de una sola vuelta. Las partes activas de producción de par de una espira son los segmentos de pista de cobre en el área media del disco, dentro del espacio ocupado por los campos magnéticos. Las dos pistas de cobre de la zona media en los lados opuestos están separados entre ellos  $60^\circ$ , al igual que los imanes permanentes. Esta separación se logra mediante los segmentos de pista de las zonas exterior e interior del disco. Estos segmentos de pista en forma de arco conducen a una localidad de cruce del disco que está a  $30^\circ$  del segmento del conductor activo. Sus segmentos correspondientes en forma de arco del lado opuesto proporcionan una separación adicional de  $30^\circ$ , por lo que la separación total es de  $60^\circ$ .

Por ejemplo, el segmento de pista de cobre activo que la corriente en ese segmento de pista fluye en la dirección radial hacia fuera. El segmento de pista de cobre activo de esa espira en el lado posterior del disco debe fluir radialmente hacia adentro. Por supuesto, el conductor de corriente hacia adentro está en el flujo de izquierda a derecha creado por el par de imanes permanentes que está a  $60^\circ$ .

Aplique la relación de Lorentz al segmento activo superior (del lado frontal), que conduce una corriente hacia adentro, hacia el eje. Esa dirección de corriente, combinada con la dirección de las manecillas del reloj al disco del rotor. Por tanto, los lados opuestos de la vuelta se ayudan entre ellos en la creación de par, por lo que tenemos un diseño de motor operativo.

Entonces aplique la relación Lorentz al segmento activo posterior de la espira, que conduce corriente hacia adentro, hacia el eje. Esa dirección de corriente, combinada con la dirección de flujo de izquierda a derecha, produce una fuerza que también contribuye un par en dirección de las manecillas del reloj al disco del rotor.

Por tanto, los lados opuestos de la vuelta se ayudan entre ellos en la creación de par, por lo que tenemos un diseño de motor operativo.

La estructura de rotor de disco tiene aun menor inercia de giro que la estructura de copa, debido a su baja masa e inercia, la estructura sin núcleo tipo disco tiene la aceleración más rápida de cualquier diseño de motor. Algunos modelos son capaces de razones de aceleración extraordinarias, yendo de 0 a 5000 r/min en menos de 100 mseg.

Naturalmente, los motores sin núcleo no pueden competir con los motores de rotor devanado en los rangos de alto par. Sus imanes permanentes no pueden producir intensidades de campo magnético comparables con los electroimanes multivuelta, y sus espiras de una sola vuelta no tienen la ventaja de multiplicación de fuerza de las bobinas de armadura multivoltas.

### **3.5 MOTORES DE CD DE IMÁN PERMANENTE Y SIN ESCOBILLAS.**

Un problema de los motores de cd es que requieren un colector y escobillas para invertir en forma periódica la corriente que pasa por cada uno de los devanados de la armadura. Las escobillas establecen contacto deslizante con el colector; las chispas que saltan entre ambos van desgastando las escobillas. Por ello, éstas deben ser reemplazadas de manera periódica y volver a recubrir el colector. Para evitar estos problemas se diseñaron los motores sin escobillas.

En esencia, estos motores constan de una secuencia de devanados de estator y un rotor de imán permanente. Un conductor por el que pasa corriente eléctrica y se encuentra en medio de un campo magnético experimenta una fuerza; asimismo, como consecuencia de la tercera ley del movimiento de Newton, el imán también experimenta una fuerza opuesta de igual magnitud. En el motor de cd convencional, el imán está fijo y los conductores por los que pasa la corriente presentan movimiento. En el motor de cd de imán permanente y sin escobillas sucede lo contrario: los conductores por los que pasa corriente están fijos y es el imán el que se mueve. El rotor es un imán permanente de ferrita o cerámica, la corriente que llega a los devanados del estator se conmuta en forma electrónica mediante transistores en secuencia alrededor de los devanados; la conmutación se controla con la posición del rotor, de manera que siempre haya fuerzas actuando en el imán y provoquen su rotación en la misma dirección. Los sensores de Hall por lo general se emplean para detectar la posición del rotor e iniciar la conmutación de los transistores, los sensores se colocan alrededor del estator.

Los circuitos de conmutación por transistor que se pueden usar en el motor para conmutar los devanados en secuencia se necesitan señales para activar los transistores de acuerdo con la secuencia requerida. Para ello se utilizan las salidas de los tres sensores del circuito decodificador y así se obtienen las corrientes de base adecuadas. Por lo tanto, cuando el rotor está en posición vertical, es decir, a  $0^\circ$ , el sensor c produce una salida, mientras a y b no producen ninguna. Esta salida sirve para activar los transistores A+ Y B-. Cuando el rotor está en la posición de  $60^\circ$  los sensores b y c producen señales y los transistores A+ y C- están activadas. La tabla 3.1 contiene la secuencia de conmutación completa. La totalidad del circuito que controla este tipo de motores se obtiene en un solo circuito integrado.



**TABLA 3.1.** Muestra la secuencia de conmutación completa.

Posición del rotor	Señales	del	Sensor	Transistores	activados
	A	b	c		
0°	0	0	1	A+	B-
60°	0	1	1	A+	C-
120°	0	1	0	B+	C-
180°	1	1	0	B+	A-
240°	1	0	0	C+	A-
360°	1	0	1	C+	B-

Los motores de cd de imán permanente y sin escobillas se utilizan cada vez más cuando a la par se necesita un alto rendimiento, gran confiabilidad y poco mantenimiento. Gracias a que no tienen escobillas, estos motores no producen ruido y permiten alcanzar altas velocidades.

### 3.6 MOTORES PASO A PASO.

El motor paso a paso y los motores de cd sin escobillas constituyen en conjunto la clase de motores llamada motores de conmutación electrónica. El motor paso a paso es más apropiado para mover el eje una cantidad de giro exacta. Los motores de cd sin escobillas son más apropiados para la rotación continua de velocidad ajustable.

Los motores paso a paso son fundamentalmente diferentes de los demás motores de cd: no tienen escobillas ni conmutador mecánico. La acción de conmutación necesaria para la función de motor de cd es lograda por transistores externos. Es más, el rotor no tiene devanado de armadura. Simplemente es una colección de imanes permanentes salientes.

Con cuatro polos de estator y seis polos de rotor, este motor paso a paso tiene un ángulo de paso natural de 30°. El rotor en la posición de 0° (flecha de posición imaginaria apuntando hacia arriba, a la posición de las 12 en punto).

Los cuatro devanados de los polos del estator y sus transistores controladores se etiquetan *A*, *B*, *C* y *D*. Cuando un solo devanado es energizado, está enrollado de tal manera que su polo se vuelve norte magnético. Su flujo emerge de la cara del polo, pasa a través del rotor, entonces completa su trayectoria entrando en la cara del polo directamente opuesto a él. Por ejemplo, si el transistor *A* energiza el polo *A*, el flujo creado por ese polo completa su trayectoria a través del polo *C* y a través del armazón del motor. Por tanto, *C* automáticamente se vuelve un polo sur, aun cuando su devanado no lleva corriente. Los polos permanentes del rotor están etiquetados del 1 a 6, siendo sur los polos 1,3 y 5. Los polos alternos, números 2,4 y 6 son norte.

El principio de operación de un motor paso a paso de imán permanente es el siguiente: el polo del estator energizado que se vuelve norte magnético activo atrae el polo sur más cercano del rotor para alinearlos con él. Esta acción de producción de par es ayudada por el polo sur pasivo del estator (del lado opuesto del estator), atrayendo el rotor norte opuesto para alinearlos con él.

Si el transistor A es encendido, el polo A del estator que está en la posición de las 12 en punto es el norte activo. En el instante mostrado, ya ha atraído al polo sur I del rotor para alinearlo con él. También, el polo C del estator que apunta hacia las 6 es el sur pasivo. Ha atraído el polo norte 4 del rotor para alinearlo con él.

(El hecho de que los polos magnéticos opuestos se atraigan entre ellos es una manera alterna de explicar la acción del motor. De hecho, sin embargo, si observáramos la orientación atómica interna del núcleo del imán permanente, aún encontraríamos trabajando la relación de Lorentz, Aún es la “corriente”, en la forma de electrones que giran alrededor del núcleo atómico, interactuando con el campo magnético, lo que crea en última instancia la fuerza de atracción).

Definamos la posición del rotor como la posición de  $0^0$ . Hemos mostrado una flecha imaginaria de posición en el eje que apunta hacia arriba, a las 12 en punto. A medida que gira el eje del rotor, podemos describir su nueva posición dando la dirección en la que apunta la flecha imaginaria.

El circuito de control apaga ahora el transistor A y enciende simultáneamente el transistor B. El polo B del estator se convierte en el norte activo; el polo D del estator se vuelve el sur pasivo. Los polos A y C se vuelven neutrales, se desmagnetizan. El polo B del estator atrae el polo norte 2 del rotor. El rotor se mueve en dirección de las manecillas del reloj  $30^0$ , por lo que los polos del rotor se alinean con los polos del estator. Decimos que el motor toma un paso de  $30^0$ . La flecha imaginaria de posición ahora apunta hacia la 1 en punto.

Una vez que se ha dado el paso de  $30^0$ , el controlador puede apagar el transistor B si la carga mecánica no causa el movimiento del rotor más allá de la posición destino, que es la 1 en punto. Si la carga tiende a causar este problema, el transistor B debe permanecer encendido para permitir que el motor paso a paso mantenga su posición.

En seguida, el circuito de control apaga el transistor B y simultáneamente enciende el transistor C. Esto hace que el polo C del estator se vuelva el norte y el polo A se vuelva el sur pasivo. El polo sur 3 está apenas a  $30^0$  de distancia en este momento, por lo que se mueve para alinearse con él. El motor ha tomado otro paso de  $30^0$  en dirección de las manecillas del reloj, como se indica en la tabla 3.2. La flecha imaginaria de posición apunta a las 2 en punto, a  $60^0$  de su posición inicial. Y así en adelante, con el controlador disparando los transistores en la secuencia repetida ABCD. Deberá seguir los pasos del motor durante una rotación de  $360^0$ .

**Tabla 3.2.** *Secuencia de conmutación de los transistores para tomar pasos completos en la dirección de las manecillas del reloj.*

Posición del Eje (Grados)	Transistor Encendido
0	A
30	B
60	C
90	D
120	A
150	B
180	C
210	D
240	A
270	B
300	C
330	D
360	A

La inversión de un motor paso a paso para que su giro sea en dirección contraria a las manecillas del reloj es sencilla, sólo disponga que el circuito de control encienda los transistores de conmutación en la secuencia inversa, DCBA.

Comenzando por la posición de  $0^0$ , la posición de restablecimiento de encendido (RE) [power-on reset (POR)] que ha encendido a, el controlador primero conmuta al transistor *D*. Esto hace que el polo sur 3 del rotor se mueva  $30^0$  en dirección contraria a las manecillas del reloj para alinearse con el polo norte D del estator, alineando el polo norte 6 del rotor con el polo sur B pasivo del estator. Siga la rotación en dirección contraria a las manecillas del reloj del motor paso a paso haciendo referencia a la tabla 3.3

**Tabla 3.3.** *Secuencia de conmutación de transistores para lograr que el motor tome pasos completos en la dirección contraria a las manecillas del reloj.*

Posición del Eje (Grados)	Transistor Encendido
0	A
-30	B
-60	C
-90	D
-120	A
-150	B
-180	C
-210	D

### 3.7 MOTORES DE CD SIN ESCOBILLAS.

El motor de cd sin escobillas es el otro miembro de la familia de los motores de cd de conmutación electrónica. En realidad, un mejor nombre para el motor de cd sin escobillas sería “motor de cd sin escobillas disparado por posición”, ya que cualquier motor es sin escobillas y también de cd.

La característica distintiva del motor de cd sin escobillas es su mecanismo de detección posición, que es realimentado al controlador de secuencia para decirle cuándo conmutar al siguiente paso de la secuencia. Por tanto, como regla general, el motor de cd sin escobillas no efectúa paso a la siguiente posición y luego espera en esa posición la secuencia del controlador para conmutar los transistores de los devanados. Aunque puede operar de esa manera, es más adecuado para una rotación continua. A medida que sus polos de rotor se acercan a la alineación con circuitos polos de estator en particular, ese acercamiento mismo es usado para disparar la energización de los siguientes polos del estator de la secuencia. Por tanto, un polo de rotor sólo pasa por el polo del estator al que se está acercando, atraído por el siguiente polo o combinación de polos de periferia del estator.

Un motor cd sin escobillas para un rotor de imán permanente de dos polos y polos de estator no salientes. En la sección transversal de un motor de cd sin escobillas. Los detectores de efecto Hall están desplazados axialmente en dirección de la campana terminal del motor.

Siga el alambrado entre los devanados de polo del estator y sus transistores de control, para que el encendido del transistor superior *pnp* de un devanado energice ese devanado como no magnético, mientras que el encendido del transistor *npn* inferior de ese devanado energiza el devanado como sur magnético (el flujo del devanado pasa de adentro hacia afuera). Por ejemplo, el devanado multivuelta A que crea el polo A del estator está en la parte superior del estator. El devanado es colocado en un par único de ranuras del estator en esta vista simplificada. El conductor izquierdo de ese devanado está conectado a la unión del transistor *pnp*  $Q_{AN}$  y del transistor *npn*  $Q_{AS}$ . Si la secuencia del circuito controlador enciende  $Q_{AN}$ , el flujo de corriente es hacia afuera el suministro  $+V_S$ , a través de  $Q_{AN}$ , hacia adentro de la página, alejándose de nosotros por la izquierda del devanado A, hacia fuera del papel, acercándose a nosotros por el lado derecho, y en algún momento a la tierra. La aplicación de la regla de la mano derecha indica que el flujo resultante pasa a través del plano de la bobina de afuera hacia adentro. Por tanto, desde el punto de vista del rotor, el polo A es norte.

Si  $Q_{AS}$  es encendido en lugar de  $Q_{AN}$ , se invierte la dirección de la corriente en el devanado A, haciéndolo un polo sur magnético. Por supuesto, si ambos transistores,  $Q_{AN}$ , y  $Q_{AS}$ , están apagados, el devanado A está desenergizado, y el polo A desaparece. Esa sección del estator se vuelve neutral magnéticamente. La misma relación existe entre cada polo y sus dos transistores de control.

Las secuencias de conmutación en dirección de las manecillas del reloj y en dirección contraria el campo neto de flujo magnético se mueve en pasos de 4 estando desfasados a un ángulo de  $45^\circ$  de la horizontal cada vez que se energicen los cuatro polos.

Hay dos sensores de efecto Hall montados en el interior de la carcasa del motor. Ya que es una sección transversal, da la impresión equivocada de que estos sensores están ubicados entre los polos del rotor y los polos del estator. No lo están. Están más allá del extremo trasero de los imanes del rotor, cerca de la campana terminal del motor, y son actuados por sus propios imanes.

El sensor de efecto Hall etiquetado  $HD_{vert}$  detecta el momento en que los imanes del rotor están entrando en orientación vertical. El detector de efecto Hall a la izquierda de la figura detecta cuando la flecha del rotor esta entrando en alineación vertical. Los detectores de efecto Hall producen una polaridad de voltaje para el flujo norte y la polaridad opuesta para el flujo sur. Por tanto, cuando el polo sur del rotor se está acercando a la posición superior de las 12 en punto (flecha imaginaria de posición apuntando hacia arriba),  $HD_{vert}$  produce una polaridad de  $v_{vert}$ . Cuando el polo norte del rotor se acerca a la parte superior (flecha imaginaria de posición apuntando hacia abajo),  $v_{vert}$  se vuelve de la polaridad opuesta. Cuando la flecha apunta a la izquierda, hacia las 9,  $v_{horiz}$  se vuelve una polaridad; cuando apunta a la derecha,  $v_{horiz}$  se vuelve de la polaridad opuesta.

El controlador de secuencia recibe  $v_{vert}$  y  $v_{horiz}$ . Por tanto, conoce la posición del rotor, recibiendo una señal específica para cada  $90^0$  de giro. Su circuito lógico usa esta información para disparar los transistores a través de la secuencia de conmutación de la tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Secuencia de conmutación magnética de los polos del estator para el motor sin escobillas.

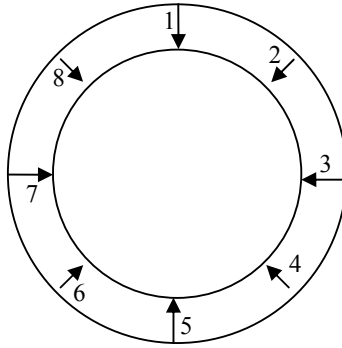
Polos del Estator

Numero de renglón	A	B	C	D
1	N	Apagado	S	Apagado
2	N	S	S	N
3	Apagado	S	Apagado	N
4	S	S	N	N
5	S	Apagado	N	Apagado
6	S	N	N	S
7	Apagado	N	Apagado	S
8	N	N	S	S
1	N	Apagado	S	Apagado

\*N indica la conversión de ese polo a norte encendiendo su transistor  
Subíndice N: S significa sur

Como se indicó antes, la electrónica del controlador de secuencia dispara los transistores de creación de campo con una ligera anticipación. Por ejemplo, si el motor está girando en dirección de las manecillas del reloj porque el controlador está pasando por su secuencia de dirección de las manecillas del reloj, a medida que la flecha imaginaria de posición se acerca a las 9 en punto,  $v_{horiz}$  informa al controlador de ese hecho. Un instante antes de que la flecha llegue a las 9 en punto, el controlador toma un paso del séptimo renglón de la tabla 3.4 al octavo renglón.

Entonces, el flujo neto del estator se vuelve norte en la parte superior izquierda y sur en la inferior derecha. Esta es la posición de flujo 8 de la figura 13. El flujo ejerce una nueva fuerza de atracción en el rotor, atrayendo la flecha imaginaria de posición a las 10:30. Por tanto la flecha del eje no se detiene a las 9 en punto, sino que continúa avanzando, dirigiéndose a las 10:30, y así en adelante.



**Figura 13-** Posición del flujo magnético norte (apuntando hacia el rotor desde el estator) para cada fila de secuencia de la tabla 3.4. Recuerde que, cualquiera que sea la ubicación en el estator del flujo norte, la posición directamente opuesta del estator (a  $180^\circ$ ) recibe un flujo magnético sur (apuntando hacia fuera del rotor, de regreso al estator).

### **3.8 MOTORES QUE SON MÁS CONFIABLES (CONMUTACIÓN ELECTRÓNICA Ó CON ESCOBILLAS).**

Confiabilidad y Costo.-

La ventaja natural de los motores de conmutación electrónica es que necesitan un conmutador mecánico de anillo colector dividido, ni escobillas. Esta es una ventaja enorme, pues el conmutador y las escobillas son la principal causa de problemas en los motores de cd. Estos requieren también un gran esfuerzo inicial de fabricación, lo que los hace más confiables.

## CAPITULO 4

### CONTROL DE MOTORES DE C.D.

#### 4.1 CARACTERISTICAS DE CONTROL DE MOTORES DE C.D.

Los motores de c.d. son importantes en el control industrial porque son más adaptables que los motores de c.a. de campo giratorio a los sistemas de velocidad ajustable.

El devanado de campo del motor una bobina físicamente, el devanado de campo está compuesto de muchas vueltas de alambre delgado (de alta resistencia) enrollado alrededor los polos de campo. Los polos de campo son núcleos ferromagnéticos de metal, que están conectados al estator de la maquina. La alta resistencia del devanado de campo limita la corriente de campo a un valor bastante pequeño, permitiendo que el devanado de campo se conecte directamente a través de las líneas de suministro de c.d. Sin embargo, la corriente de campo relativamente pequeña ( $I_F$  es compensada por la gran cantidad de vueltas del devanado de campo, permitiendo al devanado crear un campo magnético intenso.

Este devanado de campo no se afecta por las condiciones cambiantes de la armadura. Es decir, a medida que varía la corriente de armadura para responder a condiciones de carga variantes, la corriente del devanado de campo permanece esencialmente constante, y la intensidad del campo magnético resultante permanece constante.

La corriente de campo puede encontrarse fácilmente mediante la ley de Ohm como:

$$I_F = V_s / R_F \quad (4-1)$$

donde  $V_s$  es el voltaje de alimentación al devanado de campo y  $R_F$  la resistencia del devanado.

El devanado de armadura se muestra como un círculo contactado por dos pequeños cuadros. Se dibuja de esta manera puesto que el devanado de armadura está construido en el rotor cilíndrico de la máquina, y la corriente circula desde y hacia el devanado de armadura mediante escobillas de carbón en contacto con los segmentos de un conmutador.

El devanado de armadura de un motor de c.d. se constituye de relativamente pocas vueltas de alambre más grueso, por lo que tiene una resistencia de c.d. pequeña. La resistencia del devanado de armadura de un motor de c.d. de tamaño medio o grande generalmente es mejor a  $1\Omega$ .

Al aplicarse potencia por primera vez el devanado de armadura, solo la resistencia óhmica de c.d. del devanado esta disponible para limitar la corriente, por lo que el aumento súbito de corriente es bastante grande. Sin embargo, a medida que empieza a acelerarse el motor, comienza a inducir (generar) una fuerza contraelectromotriz por la acción de generador común. Esta fuerza contraelectromotriz se opone al voltaje de alimentación y limita la corriente de armadura a un valor razonable.

Cuando un motor de c.d. ha alcanzado la velocidad de operación normal, su fuerza contraelectromotriz es aproximadamente del 90% de la magnitud del voltaje de armadura aplicado. La caída de voltaje  $IR$  a través de la resistencia del devanado de armadura representa el otro 10% del voltaje aplicado, ignorando cualquier caída de voltaje a través de las escobillas de carbón.

El tamaño exacto de la fuerza contraelectromotriz generada por el devanado de armadura depende de dos aspectos:

- De la intensidad del campo magnético. Cuando más intenso el campo magnético, mayor tiende a ser la fuerza contraelectromotriz.
- De la velocidad de giro. A mayor velocidad, mayor tiende a ser la fuerza contraelectromotriz.

En la ecuación (4-2) se expresa la dependencia de la fuerza contraelectromotriz de la intensidad de campo y la velocidad de giro.

$$E_c = K_g B S \quad (4-2)$$

En la ecuación (4-2)  $E_c$  significa la fuerza contraelectromotriz creada por el devanado giratorio de la armadura,  $B$  significa la fuerza del campo magnético creado por el devanado de campo, y  $S$  es la velocidad de giro en revoluciones por minuto. La constante de proporcionalidad  $K$  depende de los detalles de construcción de la armadura (el número de vueltas del devanado, la longitud de los conductores, etc.).

La ley de voltaje de Kirchoff para la malla de la armadura se expresa en la ecuación (4-3), la cual simplemente indica que el voltaje aplicado a la armadura es igual a la suma de las caídas de voltaje en la armadura. La suma de las caídas de voltaje en el devanado de armadura es igual a la fuerza contraelectromotriz sumada a la caída de voltaje  $IR$  resistiva, nuevamente ignorando el efecto menor de la caída en las escobillas.

$$V_s = E_c + I A R_A \quad (4-3)$$

En la ecuación (4-3),  $R_A$  es la resistencia del devanado de armadura y, por supuesto,  $I A$  es la corriente de armadura.



## 4.2 CALIBRACION DE LA VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CD.

Existen dos maneras de variar la velocidad de giro de un motor de c.d. en derivación.

1. Ajustar el voltaje (y la corriente) aplicando al devanado de campo. A medida que el voltaje de campo aumenta, el motor reduce su velocidad. Este método se sugiere en la figura 4-1(b).
2. Ajustando el voltaje (y la corriente) aplicando a la armadura. A medida que aumenta el voltaje de armadura, aumenta el voltaje de armadura la velocidad del motor. Este método se sugiere en la figura 4-1(c).

### 4.2.1 CONTROL DE CAMPO.

En el primer método es el ajuste de voltaje de campo. A medida que aumenta el voltaje de campo, reduciendo  $R_v$ , en la figura (b), por ejemplo, aumenta la corriente de campo. Esto produce un campo magnético más intenso, que induce una mayor fuerza contraelectromotriz en el devanado de armadura. La mayor fuerza contraelectromotriz tiende a oponerse al voltaje de c.d. aplicado, y reduce por tanto la corriente de armadura,  $I_A$ . Por tanto, una corriente de campo aumentada provoca que el motor disminuya su velocidad hasta que la fuerza contraelectromotriz inducida haya regresado a su velocidad normal (aproximadamente).

En la otra dirección, si se reduce la corriente de campo, el campo magnético disminuye. Esto causa una reducción de la fuerza contraelectromotriz creada por el devanado giratorio de la armadura. Aumenta la corriente de armadura, obligando al motor a girar con mayor rapidez, hasta que la fuerza contraelectromotriz de nuevo sea aproximadamente igual a lo que era antes. La reducción de intensidad del campo magnético es “compensada” por un aumento de la velocidad de la armadura.

Este método de control de velocidad tiene ciertas características buenas. Puede lograrse por medio de un pequeño y económico reóstato, ya que la corriente en el devanado de campo es bastante baja debido a la gran RF, debido al bajo valor de IF, el reóstato  $R_v$  no disipa mucha energía. Por lo tanto, este método es eficiente energéticamente.

El anterior método tiene una desventaja principal en el control de la velocidad desde el devanado de campo: para aumentar la velocidad, debe reducirse IF, y debilitarse el campo magnético, reduciendo por tanto la capacidad de producción de par de motor. La capacidad de creación de par de un magnético. Si se reduce IF, el campo magnético se debilita, y la capacidad de producción de par del motor disminuye. Desafortunadamente es justo ahora cuando el motor necesita toda la capacidad de producción de par que pueda conseguir, ya que probablemente requiera de mayor par para mover la carga a una velocidad mayor.

Para hacer que el motor gire con mayor rapidez, lo que requiere que proporcione mayor par, usted debe hacer algo que tiende a robar al motor su capacidad de producción de par.

#### **4.2.2 CONTROL DE ARMADURA.**

Desde el punto de vista de producción de par, el segundo método de control es el llamado de armadura y es mucho mejor. A medida que el voltaje y la corriente de armadura aumenta, el motor comienza a girar con mayor rapidez, lo que normalmente requiere de más par. La razón del aumento de velocidad es que el voltaje aumentado de armadura requiere de un incremento de la fuerza contraelectromotriz para limitar el aumento de corriente de armadura a una cantidad razonable. La única manera en la que puede aumentar la fuerza contraelectromotriz es que el devanado de armadura gire con mayor rapidez, ya que la intensidad del campo magnético es fija. En este caso, los ingredientes están todos presentes para una producción mayor de par, ya que la intensidad del campo magnético se mantiene constante e  $I_A$  aumenta.

El problema con el método de control de armadura es que  $R_v$ , el reóstato, debe manejar la corriente de la armadura, que es relativamente grande. El reóstato debe ser físicamente grande y costoso, gastara una cantidad considerable de energía. De los dos métodos, el método de control de campo el preferido generalmente.

#### **4.3 CONTROL REVERSIBLE DE VELOCIDAD.**

Algunas aplicaciones industriales de control de velocidad requieren que el giro de un motor sea reversible.

El motor debe ser capaz de girar tanto en dirección de las manecillas del reloj como en dirección contraria, además de tener velocidad ajustable. La inversión de la dirección de giro puede lograrse de dos maneras:

1. Invertiendo la dirección de la corriente de armadura, dejando igual la corriente de campo.
2. Invertiendo la dirección de la corriente de campo, manteniendo igual la corriente de armadura.

En los circuitos se muestra la manera de invertir la dirección de la corriente en un sistema de control de media onda. La manera de invertir la corriente de armadura en un sistema de control de onda completa. El método más directo de inversión de la corriente de armadura o de campo es por medio de dos contactores arrancadores en una dirección, mientras que el otro contactor, directo causa el flujo directo causa el flujo de corriente a través de la armadura en una dirección, mientras que el otro contactor, el contactor de reversa, causa el flujo de corriente en la dirección opuesta.

El contactor es energizado presionando el botón de ARRANQUE DIRECTO. Mientras el contactor REV esté desactivado en ese momento, el contactor directo se energizará y se sellará alrededor del botón de ARRANQUE DIRECTO, y el contactor permanecerá energizado hasta que se apriete el botón de PARO.

Cuando los contactos DIR están cerrados, la corriente fluye a través de la armadura de abajo hacia arriba, causando el giro en cierta dirección (la dirección de las manecillas del reloj).

Cuando los contactos REV están cerrados, la corriente de armadura fluye de arriba hacia abajo, causando por tanto el giro en la dirección contraria a las manecillas del reloj. La velocidad de giro es controlada por el ángulo de retardo de disparo de los SCR.

Puede conseguirse un control reversible de onda completa sin el uso de conmutadores (contactores, botones de presión, etc.), la dirección de giro es determinada por el circuito de disparo que se habilita. Si se habilita el circuito de disparo directo, los dos SCR superiores se dispararán en semiciclos alternos de la línea de c.a., y pasarán corriente a través de la armadura de derecha a izquierda. Si se habilita el circuito de disparo en reversa, los dos SCR inferiores se dispararán en semiciclos alternos de la línea de c.a., y pasarán corriente a través de la armadura de izquierda a derecha. El método de habilitación de un circuito de disparo mientras se deshabilita el otro no se ha mostrado.

#### **4.4 CONTROL TRIFASICO DE MOTORES DE CD.**

Cuando los motores de c.d. mayores de unos 10hp, un sistema de manejo trifásico es superior a un sistema de una fase. Esto es porque un sistema trifásico proporciona más pulsaciones de voltaje de armadura por ciclo de la línea de c.a., y por tanto da mayor flujo de corriente de armadura promedio.

Aunque este sistema da sólo control de media onda, es capaz de mantener el flujo continuo de corriente a través de la armadura. Puede hacer esto porque, cuando cualquiera de las fases se vuelve negativa, cuando menos una de las otras fases está destinada a ser positiva. Si cierta fase está operando la armadura, en el instante que invierte su polaridad, una de las otras dos fases está lista para tomar el control. Es posible mantener el flujo continuo de corriente de armadura.

Si no hay un cuarto alambre neutro disponible, puede lograrse el control trifásico de media onda agregando tres diodos rectificadores, como se muestra en la figura 4-4(b). durante el tiempo en que el voltaje de línea AB está manejando la armadura, la trayectoria de flujo es a través de la línea A, a través de la armadura y a través de DB a la línea B. cuando la línea de voltaje BC está manejando la armadura, la corriente de armadura pasa a través de SCRB y Dc.

En el instante en que el voltaje de línea CA está manejando la armadura, la corriente pasa a través de SCRC, a través de la armadura, y de regreso a la línea A a través del diodo Dk.

#### 4.5 EJEMPLO DE UN SISTEMA DE MANEJO TRIFÁSICO.

Un sistema completo de manejo trifásico maneja una potencia de 230 V, trifásico, entra por la parte superior izquierda de esa figura. Se instalan directores a través de cada una de las tres fases para proteger los circuitos de manejo de estado sólido de las descargas transitorias de voltaje que puedan aparecer en las líneas de potencia. Un tirector actúa como dos diodos zener conectados espalda. Si aparece cualquier descarga momentánea de voltaje que exceda el voltaje de transición conductiva del tirector, el tirector actúa como un diodo zener en cuanto que permitirá la aparición de solo cierta cantidad a través de sus terminales. Si intenta aparecer un voltaje elevado, el tirector se vuelve un cortocircuito para cualquier cantidad de voltaje por encima de su régimen. En este ejemplo, con 230 Vrms entre las líneas de potencia de c.a., el voltaje pico es de unos 324 V. Los tiretores se escogerían para tener un régimen de voltaje de disposición algo mayor al voltaje pico de la línea. En este caso, probablemente tendrían un régimen de unos 400 V.

Los circuitos de disparo A, B y C son idénticos por lo que sólo se dibuja el circuito de disparo A. El transformador de pulso T3 en el circuito de disparo está conectado a la compuerta y al cátodo de SCR correspondiente. Este sistema de manejo tendrá muy buena regulación de carga debido a la realimentación de fuerza contraelectromotriz a Q1.

Los 230 V de c.a. que aparecen entre las líneas de potencia B y C (VBC) son rectificadas en media onda por el diodo D1 y aplicados al devanado de campo del motor. El diodo D2, llamado diodo de rueda libre, permite la continuación del flujo de la corriente de campo durante el semiciclo negativo del voltaje VBC. Cuando VBC entra en el semiciclo negativo, el devanado de campo induce un voltaje que es positivo a la derecha y negativo a la izquierda. Este voltaje inducido polariza en directa D2, causando el flujo de corriente a través del ciclo comprendido por el devanado de campo y D2, en la misma dirección que antes.

El relevador RFF es un relevador de falla de campo. Su tarea es revisar constantemente la corriente en el devanado de campo. Dado que debe detectar corriente, en lugar de voltaje, su bobina está compuesta de apenas una vuelta de alambre relativamente pesado. Mientras haya un flujo de corriente de campo, RFF permanecerá energizado. Si la corriente de campo es interrumpida por cualquier razón, RFF se desactiva, provoca en toda la potencia sea removida del devanado de armadura, como se describe abajo. Esto es necesario porque un motor de cd puede destruirse si su armadura permanece energizada cuando no hay un campo magnético presente. El devanado de armadura es incapaz de generar suficiente fuerza contraelectromotriz para limitar la corriente de armadura a un valor seguro. Bajo esta condición, la corriente de armadura subiría pronto a un nivel de destrucción, sobrecalentamiento y arruinando entonces los conductores y/o el aislamiento de la armadura. Aunque cuando el devanado de armadura puede soportar el esfuerzo eléctrico, la velocidad del motor aumentará drásticamente, en un intento vano por inducir suficiente fuerza contraelectromotriz. Este aumento drástico de la velocidad de giro puede causar de destrucción mecánica debido al sobrecalentamiento de los cojinetes o por los devanados de armadura sacados de sus ranuras por la fuerza centrífuga.

#### 4.5.1 CIRCUITO DE DISPARO.

En la parte superior izquierda del circuito de disparo, el transformador T2 reduce VAB a 20 V de c.a. El voltaje de salida de T2 es rectificado por el diodo D3 para proporcionar un suministro de 28 V pico para el circuito de disparo. Para entender la operación del resto del circuito de disparo, suponga por un momento que el contacto NC de M ha estado abierto por rato, y que C2, está totalmente cargado. Regresamos después para ver lo que hacen estos componentes.

Supongamos que el potenciómetro de ajuste de velocidad ha sido ajustado para proporcionar 2000 r/min. a cierto par de carga. Reconozca que el voltaje de fuerza contraelectromotriz desarrollado por la armadura tiende a polarizar en inversa la unión emisor-base de Q1, a través de R1 y R8. La tendencia de polarización en inversa debido a este circuito es sobrepuesta por la combinación de R4, R2 y el potenciómetro de ajuste de velocidad, la mantiene encendido y en conducción a Q1. Si aumenta el par de carga en el eje del motor, el motor reduce su velocidad un poco, y disminuye la fuerza contraelectromotriz.

Esto reduce la tendencia a polarización es inversa a través de R1 y R8. Por tanto, la corriente de base de Q1 aumenta un poco y el transistor es capaz de recargar CE con mayor rapidez. Gracias a esto, el UJT se dispara antes, y el SCR también. Esto aumenta el voltaje promedio que aplica el SCR a la armadura, tendiendo a corregir la velocidad del motor.

Regresemos ahora a considerar el circuito comprendido por C2, R3 y el contacto NC de M. El propósito de este circuito es considerar el motor lentamente a la velocidad de operación al arrancarlo. Esto se logra limitando la corriente de armadura durante un cierto tiempo tras la energización del arrancador. Antes de ser energizado el arrancador, el contacto NC de M está cerrado y mantiene descargado al capacitor C2. Por lo tanto hay un cortocircuito a través de la trayectoria que consiste en R4 y la unión base-emisor de Q1, se mantiene apagado en este momento.

Cuando el contacto NC de M se abre al energizarse el arrancador del motor, C2 comienza a cargarse a través del resistor R2, y del potenciómetro de ajuste de velocidad. A medida que se carga C2, comienza a actuar más y más como un circuito abierto. Al ocurrir esto, la corriente de base de Q1 lentamente se acumula hasta el valor de estado estable determinado por el ajuste del potenciómetro. Hasta que se alcance este valor de estado estable, el disparo del UJT y del SCR se tardara más allá del instante normal de disparo. La corriente de armadura es retardada temporalmente durante un rato la energización del arrancador. El motor se acelera con lentitud a su velocidad de ajuste, y se evita la gran descarga inicial de corriente de armadura.

#### 4.6 CONTROL MEDIANTE MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO.

Los motores grandes de c.d. son controlados mejor por tiristores de alta potencia, pero los motores de c.d. de imán permanente pequeños y medianos, y algunos motores de c.d. sin escobillas, son controlados más exitosamente por transistores de conmutación conectados en serie, manejados mediante modulación por ancho de pulso. Luego podremos analizar técnicamente específicas de modulación por ancho de pulso para el control de motores de c.d.

Estas son las tres partes esenciales de cualquier sistema de modulación por ancho de pulso:

1. Un generador de rampa, operando generalmente a una frecuencia constante.
2. Un comparador, para detectar el momento en que el voltaje de la rampa ha excedido el voltaje de la señal de control.
3. Un dispositivo electrónico que conmute la potencia de carga en el momento en que el comparador detecte el punto crítico de la forma de onda de rampa.

El comparador consiste en un amplificador operacional, y el interruptor electrónico es un transistor bipolar que opera en configuración en emisor común. A continuación se describe su funcionamiento.

En el momento que la rampa comienza a ascender, el voltaje de control positivo excede a  $v_{ramp}$ . El comparador con amplificador operacional produce una saturación positiva. Esto satura el transistor, enciende el interruptor de potencia. A través de la carga aparece el voltaje de suministro completo  $V_s$ . El  $v_{ramp}$  aumenta hacia su valor pico de 10 V. El momento en que  $v_{ramp}$  excede a  $v_{contr}$ , el comparador con amplificador operacional conmutada a saturación conmutada negativa. Esto ocurre a 3 V. Cuando la salida del comparador se vuelve negativa, polariza en inversa el diodo D1 y la unión B-E del transistor. El transistor inmediatamente conmuta a apagador, y la carga se desenergiza. Permite desenergizado por el resto del ciclo de la rampa, de 3 a 10 mseg.

Este proceso se repite para cada ciclo del oscilador de rampa, produciendo una forma de onda de carga general con un ciclo de trabajo de 30%. El voltaje de carga promedio esta dado por

$$VLD (prom) = 0.30 * V_s.$$

Existe un voltaje de control mayor. Ahora la rampa debe subir hasta 6 V para poder disparar el comprobador y apagar el transistor de potencia. El ciclo de trabajo de la carga aumenta a 60%, y su voltaje promedio a

$$VLD (prom) = 0.60 * V_s.$$

Variando el voltaje de control, hemos variado, o modula, el ancho de pulso a la carga. Esto varía el voltaje y la potencia promedio de la carga, que es el concepto de modulación por ancho de pulso.

#### **4.6.1 VENTAJA DE LA MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO.**

La modulación por ancho de pulso conmutada por transistores tiene una ventaja fundamental sobre la operación de la carga mediante transistores lineales. Es la misma ventaja que se obtiene de la conmutación por tiristores: mayor eficiencia. Como un SCR, un transistor modulado por ancho del pulso está completamente encendido, saturado, o completamente apagado, desconectado. Cuando está encendido su corriente es grande, pero su voltaje de Terminal es cercano a cero, por lo que su consumo interno de potencia es casi de cero. Cuando está apagado, su caída de voltaje de Terminal es grande pero su corriente es esencialmente de cero. Su consumo de corriente es aún de cero. Con el dispositivo de control que consume una potencia cercana a cero, toda la potencia extraída del suministro de potencia de c.d es entregado a la carga. Ninguna es desperdiciada por el sistema de control mismo. Esto es bastante distinto que un amplificador lineal, en el que la potencia de carga es controlada alejando al amplificador de una condición de polarización en c.d. Un transistor lineal consume la línea de potencia, y luego desperdicia, una cantidad de potencia dada por.

$$P \text{ (pola c.d)} = V_{CE} \text{ (pola)} * I_C \text{ (pola)}$$

#### **4.6.2 FILTRADO DE LA FORMA DE ONDA MODULADA POR ANCHO DE PULSO.**

En algunas aplicaciones, las formas de ondas rectangulares son aceptables. En otras aplicaciones debemos aplanar la forma de onda. Idealmente, se pueden aplanar a un voltaje de c.d. igual al valor promedio de la forma de onda.

En un filtro LC pasa bajos, el inductor en serie con la carga tiende a mantener una corriente estable a través de la carga. El capacitor en paralelo tiende a mantener un voltaje estable a través de la carga. El diodo de la rueda libre o de contracorriente, D, proporciona una trayectoria completa de corriente para la combinación inductor-carga cuando se apaga el transistor, y el inductor crea un voltaje  $v_L$ , positivo abajo. El diodo D tiene polarización en inversa cuando el transistor se enciende.

Un circuito de filtrado puede aproximarse de onda ideal de c.d. Entre más se invierta en la construcción del circuito del filtro, más se acercará al c.d llana ideal.

En el Filtrado de la forma de onda de carga, la inductancia C va en paralelo con la carga. El diodo D proporciona una trayectoria para el componente inductor de la corriente de la carga cuando el transistor se apaga. Para un ancho de pulso igual a 60% del periodo, el valor promedio de  $v_{LD}$  es  $v_{LD} = 0.6 * 50 = 30 \text{ V}$ .

#### 4.7 INVERSOR DE FRECUENCIA VARIABLE.

Por sus características inherentes, los motores de c.a. no son tan adecuados para las aplicaciones de velocidad de velocidad como los motores de c.d., pues su velocidad no puede controlarse satisfactoriamente mediante la simple variación de voltaje de alineación. La reducción del voltaje de alineación para un motor de inducción de 60 Hz trifásico ciertamente reducirá su velocidad, pero también empeorará drásticamente la capacidad de regulación de velocidad del motor. Un motor de inducción de c.a. operando a un voltaje reducido de inducción de c.a. solo puede lograrse variando la frecuencia de alineación mientras se varía simultáneamente el voltaje de alimentación. Si la fuente de protección es la línea comercial de c.a. de 60Hz la variación de frecuencia es una tarea mucho más difícil que la variación del voltaje. Sin embargo, a veces estamos dispuestos a tomarnos el trabajo de construir un circuito de operación de frecuencia variable para controlar la velocidad de un motor de c.a. y aprovechar así la ventaja de ciertas características intrínsecas superiores de los motores de c.a. Estas superioridades de los motores de inducción de c.a. sobre los motores de c.d. son:

- Un motor de corriente alterna de inducción no tiene conmutador ni conexiones eléctricas de tipo fricción de ninguna clase. Por tanto, es más fácil y menos costosa su fabricación que la de una máquina de c.d. Sin escobillas que se desgasten, un motor de corriente alterna que su costo de mantenimiento es menor.
- Como no tiene conmutador, un motor de c.a. no produce chispa. Por tanto, es más seguro.
- Sin conexiones eléctricas expuestas a la atmósfera, un motor de corriente alterna se conserva mejor en la presencia de gases corrosivos.
- Un motor de c.a. tiende a ser más pequeño y ligero que un motor de c.d. de potencia comparable.

Hay dos métodos básicos para reproducir una fuente trifásica de frecuencia variable de alta potencia, para el ajuste de velocidad de un motor industrial de inducción de c.a. Los dos métodos son:

1. Convertir un suministro de c.d. en un trifásico, disparando un banco de SCR en cierta frecuencia y a cierta razón. Un circuito que hace esto se llama inversor.
2. Convertir un suministro de c.a. de 60Hz, tres fases, en un suministro de c.a. trifásico de menor frecuencia, nuevamente disparando bancos de SCR en cierta secuencia y a cierta velocidad. Un circuito que hace esto se llama ciclo convertidor

Las formas de onda de corriente de voltaje de los devanados de estator (las tres ondas superiores), a la secuencia de la conmutación de los SCR en la secuencia adecuada hace que el suministro de c.d. se conmute a través de los devanados de estator A, B y C del motor de tal manera que se produzca un campo giratorio, duplicado entonces la acción de una fuente de c.a. trifásico.



La secuencia de conmutación de los SCR de la figura 4-10(b), y a los diagramas de vector de campo magnético, debido a su colocación física, el devanado A del estator produce un componente de campo magnético orientado desde la posición mecánica de  $60^\circ$ , cuando hay un flujo de corriente a través en la dirección definida positiva. Si hay un flujo de corriente a través del devanado A en la dirección, su componente de campo magnético se reorienta en  $180$  grados mecánicos, proviniendo de la posición de  $140^\circ$ .

El inversor trifásico puede manejar un motor conectado en estrella, la conversión de numeración de los SCR a sido escogido de manera que la secuencia de disparo en el orden ascendente (o descendente, si el motor es reversible).

Ocurre igual con los devanados de estator B y C. una corriente positiva a través de B produce un componente de campo desde los  $180^\circ$ , y una corriente negativa de B produce un componente desde  $0^\circ$ . Para el devanado C, una corriente positiva da un componente de campo desde los  $300^\circ$ , y una corriente negativa da un componente de campo desde los  $120^\circ$ , ya que  $300^\circ - 180^\circ = 120^\circ$ .

La operación cíclica del circuito en puente de los SCR esta dividida en seis intervalos de igual duración. Definamos nuestro primer intervalo de tiempo para que sea en seis intervalos en el momento que el circuito eléctrico de disparo haga que los SCR seis y cinco se enciendan, y todos los otros estén apagados.

Con los SCR seis y cinco encendido, hay una trayectoria de flujo de corriente como sigue: de la terminal positiva del suministro de c.d., a través SCR seis a través del devanado A del estator en la dirección positiva, a través del devanado B del extractor de la dirección negativa a través del SCR cinco y por la línea del suministro de c.d. a la terminal negativa de la fuente de c.d. No hay corriente en el devanado C del estator en este momento, pues SCR cuatro y uno están apagados.

Las formas de onda idealizadas obtenidas del inversor trifásico cuando SCR se disparan en orden ascendente. Para una carga de motor real, las formas de onda de corriente serian alisadas, debido a la inductancia de la bobina. Las condiciones durante cada uno de los seis intervalos de tiempo que comprenden un ciclo completo de salida del inversor, componentes de los campos magnéticos y del campo magnético neto durante cada uno de los seis intervalos de tiempo. Se puede ver que el campo magnético hace un giro de  $360^\circ$  por cada ciclo de salida del inversor (motor de dos polos).

Las tres formas de onda superiores presentan las corrientes de devanado del estator. Durante el primer intervalo de tiempo, la corriente (y el voltaje) del devanado A es positiva, la corriente del devanado B es negativa, y la corriente del devanado C es cero. Estas corrientes de devanado producen componentes de campo magnético neto F resultante de estos componentes está orientado desde la posición mecánica de  $30^\circ$  en el estator.

Al final del primer intervalo de tiempo, el circuito de disparo dispara el SCR uno y obliga al SCR cinco a apagarse. La nueva combinación de SCR encendidos es la 4-1. A través del segundo intervalo de tiempo, las corrientes de los devanados del motor son positivas a través de la fase A, negativas a través de la fase C y cero en la fase B. siga la trayectoria de flujo de corriente.

Los componentes de campo magnético viene de  $60^\circ$  debido a la corriente positiva de A, y de  $120^\circ$  debido a la corriente negativa de C. Estos componentes se combinan para producir un campo magnético neto desde la posición mecánica de  $90^\circ$  en el estator. Entonces la conmutación de los SCR a medida que procedemos del primero al segundo intervalo de tiempo ha procedido un giro de  $60^\circ$  del campo neto del estator (de la posición de  $30^\circ$  a la posición de  $90^\circ$ ).

## CAPITULO 5

### MODULACIÓN POR IMPULSOS

#### 5.1 COMUNICACIÓN POR IMPULSOS ELECTRICOS.

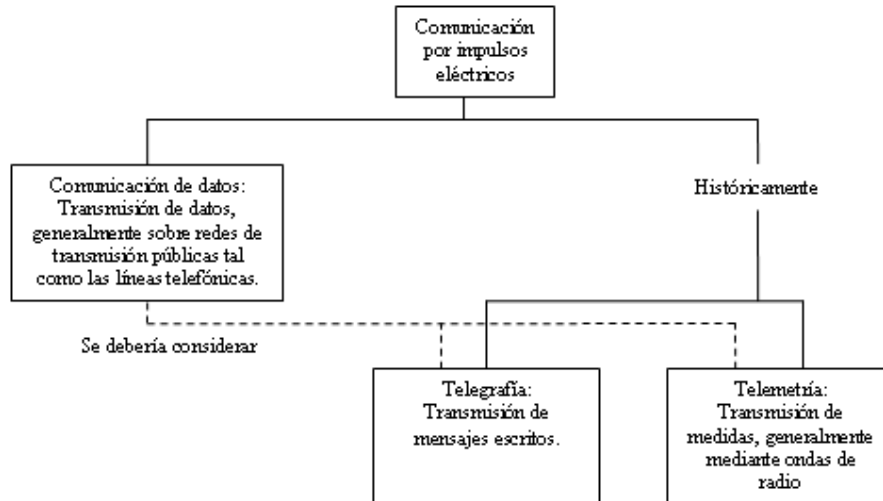
La comunicación por impulsos eléctricos tiene su origen en 1837, cuando Samuel Morse invento el telégrafo. La telegrafía es el proceso de enviar mensajes escritos de un punto a otro en forma codificada. Unos pocos años después, en 1845, un general ruso, K. I. Konstantinov, y el Dr. Poulie construyeron un sistema telemétrico. Un sistema telemétrico realiza medidas sobre objetos distantes. El sistema original registraba y analizaba el vuelo de una bola de cañón. Este sistema informaba automáticamente de la trayectoria de la bola de cañón a medida que pasaba a través de unas pantallas, y registraba los impulsos eléctricos y un impulso de temporización sobre un cilindro de registro que giraba manualmente, cargado con papel milimetrado. Este sistema fue uno de los primeros registros escritos que implicaban telemetría.

Más recientemente con el desarrollo de la televisión y el radar, se ha extendido el uso de un tipo adicional de comunicación por impulsos, la comunicación de datos. La comunicación de datos es el proceso de transmitir impulsos, que son la salida de alguna fuente de datos, de un punto a otro. Ejemplos de comunicaciones de datos son las transmisiones entre ordenadores, la recogida automática de datos, o los sistemas de alarma o telemetría. Otros usos comerciales son los servicios de información financiera/crediticia, de viajes y reservas, y el control de inventario para almacenes.

También el facsimil se considera una forma de comunicación de datos. El facsimil es el proceso por el que un material gráfico fijo, tal como imágenes, dibujos o material escrito, se explora mediante un escáner y se convierte en impulsos eléctricos que se transmiten. Después, en la recepción, estos impulsos se usan para generar una imagen (facsimil) de la original. Este proceso puede considerarse similar a la transmisión de una única imagen de televisión, pero en el facsimil la imagen se registra sobre papel. El facsimil lo han utilizado los servicios de noticias para transmitir fotos de periódicos, y los barcos para recibir mapas y gráficas del tiempo actualizados.

En los últimos años, el volumen de comunicación por impulsos ha aumentado en gran cantidad. Hay al menos tres factores que han contribuido a este incremento de la comunicación por impulsos: (1) mucha de la información que se transmite ha sido originada directamente en forma de impulsos, tal como datos de ordenador, o hasta cierto punto, elementos de imagen; (2) el proceso de transmisión está más libre de errores, por ejemplo en la transmisión de imágenes procedentes de sondas espaciales, y (3) la llegada de la integración a gran escala ha simplificado muchísimo la circuitería electrónica necesaria. Además, la integración a gran escala ha permitido el uso de sistemas de codificación complejos, que aprovechan al máximo las capacidades del canal.

La telegrafía y la telemetría pueden considerarse subconjuntos de la comunicación de datos pero, históricamente, se han separado véase figura (5.1).



### 5.1 Subconjuntos de la comunicación por impulsos eléctricos

La telegrafía se ha considerado una rama separada debido a que es una transmisión de mensajes, los cuales no se consideran datos. La telemetría se ha considerado una rama separada porque su más importante uso empleaba modulación por impulsos y radio telemetría y no usaban las redes de transmisión pública, tales como la línea telefónica, para su transmisión. Sin embargo, desde la invención de la comunicación de datos, estas distinciones son menos claras.

## 5.2 TIPOS DE MODULACION POR IMPULSOS.

La modulación por impulsos se puede dividir en dos categorías principales: analógica y digital. En la modulación por impulsos analógica, una cierta característica del impulso, tal como su altura o ancho, puede variar de forma infinita, proporcionalmente a la amplitud de la forma de onda original. En la modulación por impulsos digital, se transmite un código; el código indica el nivel directo más próximo a la amplitud de la muestra.

Todos los sistemas de modulación muestrean la onda de información que se va a telemedir, pero todos ellos tienen diferentes métodos para indicar la amplitud muestreada.

## 5.3 MODULACION POR IMPULSOS ANALOGICA.

Existen cuatro tipos de modulación de impulsos analógica: la modulación de impulsos en amplitud, modulación de impulsos en duración, modulación de impulsos en posición y modulación de impulsos en frecuencia.

### 5.3.1 MODULACION POR IMPULSOS EN AMPLITUD.

En la figura 5.2 se ilustra la modulación por impulsos en amplitud (pulse-amplitude modulation, PAM). La PAM es un proceso en el que la señal se muestrea a intervalos regulares, y cada muestra es proporcional a la amplitud de la señal en el instante de muestreo (figura 5.2a). Como se ve en esta figura, existen dos tipos de PAM.

La PAM de doble polaridad puede tener excursiones de impulsos por encima y por debajo del nivel de referencia (figura 5.2b).

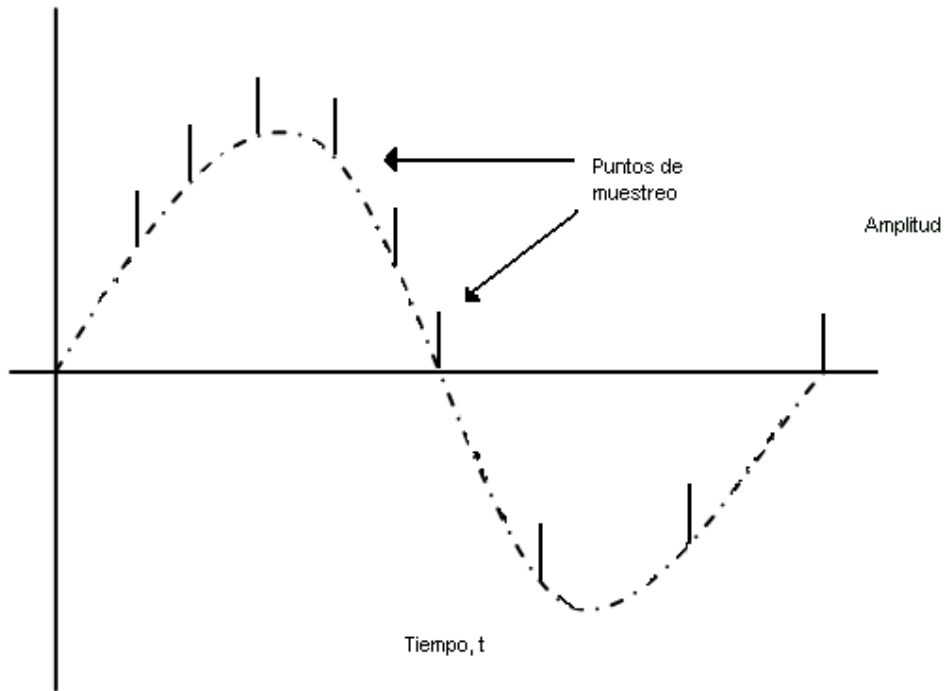


Figura 5.2a Modulación por impulsos de amplitud (PAM) forma de onda original

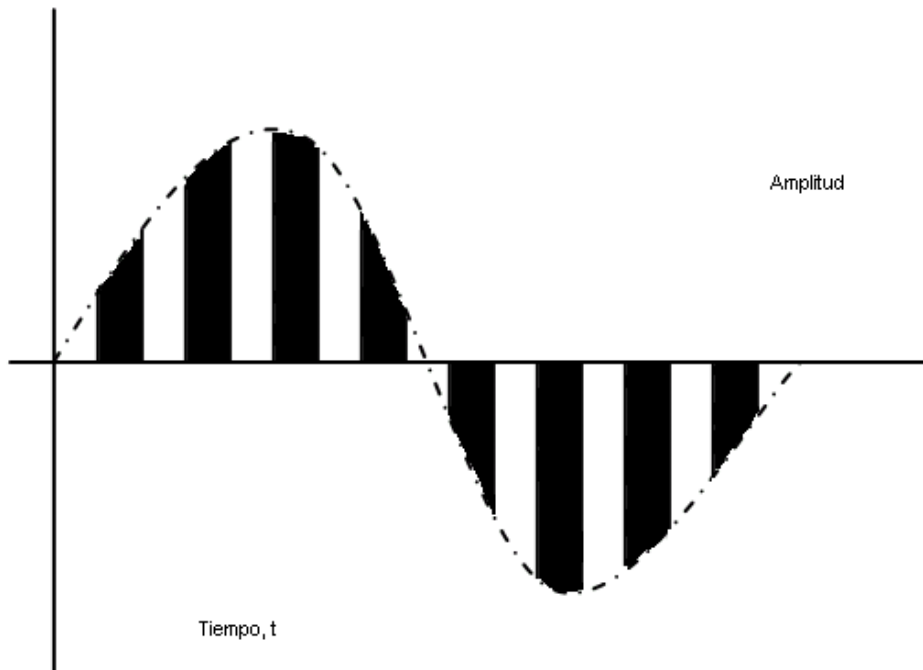


Figura 5.2b Modulación por impulsos en amplitud (PAM) polaridad doble

### 5.3.2 RUIDO.

Como la amplitud del impulso contiene la información, es muy importante que la amplitud sea la verdadera representación del nivel original. Sin embargo, durante la transmisión de la señal se puede añadir ruido al impulso, dando lugar a errores de reconstrucción. Los errores de reconstrucción son errores que hacen que la onda reconstruida difiera de la onda original. Estos errores pueden deberse al ruido, o pueden ser causados por otros fenómenos.

El ruido añadido depende de muchos factores, tales como la intensidad de la señal, la distancia a la que la señal se debe transmitir, y el medio por el que la señal tiene que pasar. Como a la PAM le afecta mucho el ruido, no se usa tan a menudo como otras formas de modulación por impulsos.

### 5.3.3 ALIASING.

Otro problema que puede existir con cualquier tipo de muestra sujeta a tele medida es el aliasing. El aliasing es la reconstrucción de una señal completamente diferente de la señal original. La señal diferente es el resultado de utilizar una frecuencia de muestreo inferior a la frecuencia de variación de la señal muestreada. Por ejemplo, si la señal que se muestrea se varía a una frecuencia de 10Hz, la señal se puede muestrear diez veces durante un periodo (frecuencia de muestro 100Hz). Esta frecuencia de muestreo no dará lugar a un aliasing severo. Sin embargo, si la frecuencia de muestro se reduce a 9Hz, o menos que una vez en cada periodo de la señal, se produciría aliasing. La figura 5.4 y 5.5 ilustran estas ideas.

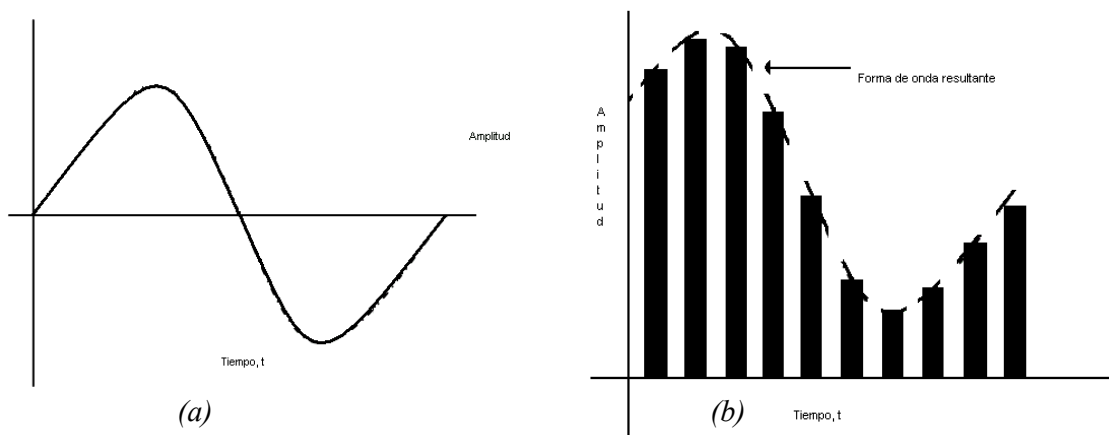


Figura 5.4 Frecuencia de muestreo resultante en el aliasing mínimo:  
(a) Forma de onda original (10 Hz);  
(b) Impulsos utilizados para reconstruir la forma de onda original

En la figura 5.4, la frecuencia de muestreo es diez veces la frecuencia de la onda que se muestrea. Como se muestra, la onda resultante o recuperada es aproximadamente igual a la señal original. En la figura 5.5, la frecuencia de la onda original es la misma que la de la figura 5.4, pero la frecuencia de muestreo se ha reducido más de diez veces con respecto a la frecuencia de muestreo de la figura 5.4.

La onda resultante o recuperada de la figura 5.5 no se parece en nada a la onda original. Por consiguiente, se ha producido un aliasing considerable.

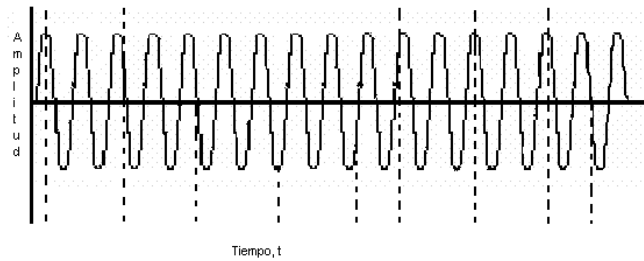


Figura 5.5a Frecuencia de muestreo resultante con un aliasing considerable forma de onda original

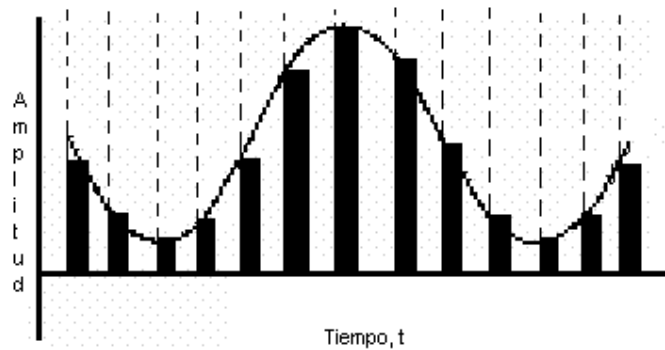


Figura 5.5b Frecuencia de muestreo resultante con un aliasing considerable impulsos utilizados para reconstruir la forma de onda original.

### 5.3.4 TEOREMA DE MUESTREO.

El problema de aliasing con la frecuencia de muestro ha sido estudiada por muchos investigadores, y ha dado lugar a un teorema conocido como teorema de muestreo:

Si la frecuencia de muestreo en cualquier sistema de modulación por impulsos excede el doble de la frecuencia máxima de la señal (o frecuencia de Nyquist), la señal original se puede reconstruir en un receptor con una distorsión que tiende a desaparecer.

Como resultado de este teorema, la mayoría de las frecuencias de muestreo de modulación por impulsos anda es 300-345 Hz, es estándar, cuyo ancho de banda es 300-345 Hz, están estandarizadas a 8000 muestras por segundo. 8000 muestras por segundo es ligeramente mayor que el doble de 3400 Hz y, por consiguiente, el teorema de muestreo se satisface.

Una señal limitada en ancho de banda sin componentes espectrales arriba de  $f_m$  Hz puede ser determinada en forma única por valores de muestras en intervalos uniformes de  $T$  segundos, en donde:

$$Ts = 1 / 2f_m$$

Desarrollado por H. Nyquist, quien afirmaba que “Una señal analógica puede ser reconstruida sin error, de muestras formadas en iguales intervalos de tiempo. La razón de muestreo debe ser igual o mayor al doble de su ancho de banda de la señal analógica”. La teoría del muestreo define que para una señal de ancho de banda limitado, la frecuencia de muestreo  $f_m$ , debe ser mayor que 2 veces su ancho de banda ( $B$ ) medido en hertz ( $Hz$ ).

$$f_m = 2 * B$$

### 5.3.5 MODULACION POR IMPULSOS EN DURACION.

En la figura 5.6 se presenta la modulación por impulsos en duración (pulse-with modulation, PWM, o pulse-duration modulation). En la PWM, la señal se muestrea a intervalos regulares, pero la duración del impulso se hace proporcional a la amplitud de la señal en el instante de muestreo (figura 5.6a). Como se indica en la figura 5.6b, los impulsos son de la misma amplitud, y los flancos iniciales de los impulsos están equiespaciados en el tiempo; sin embargo, los flancos finales de los impulsos no lo están.

Un problema en la PWM es que las variaciones del ancho de impulso no tienen límites prácticos. Obviamente, el ancho del impulso no puede exceder la separación entre impulsos. Si esto ocurriera, se produciría un solapamiento, y la relación de proporcionalidad entre la duración del impulso y la amplitud de la señal no sería cierta. Y puesto que una duración de impulso negativa no tiene sentido, el valor más negativo de la señal a muestrear puede, como mucho, producir una señal de duración igual a cero. En la práctica estos límites son más restringidos. Como regla de diseño, la duración del impulso más ancho no debería exceder el 80% del máximo, y la duración de impulso más reducida no debería ser menor del 20% del máximo. La figura 5.7 ilustra estas limitaciones.

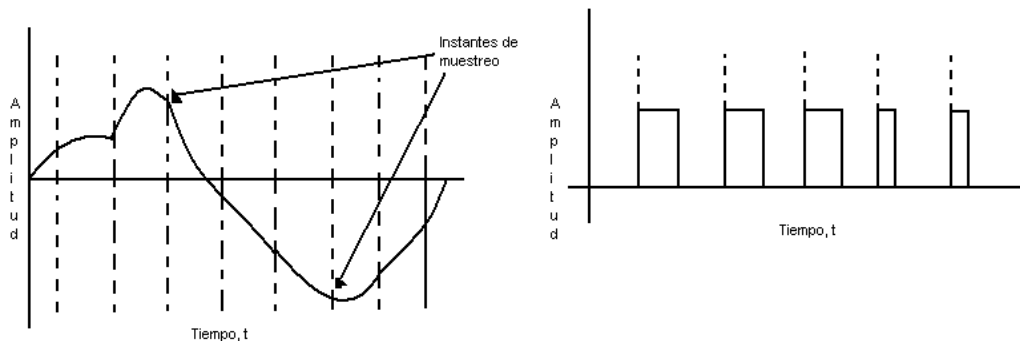


Figura 5.6 Modulación por impulsos en duración (PWM)

El ruido afecta menos a la PWM que al PAM. Sin embargo, no es completamente inmune.

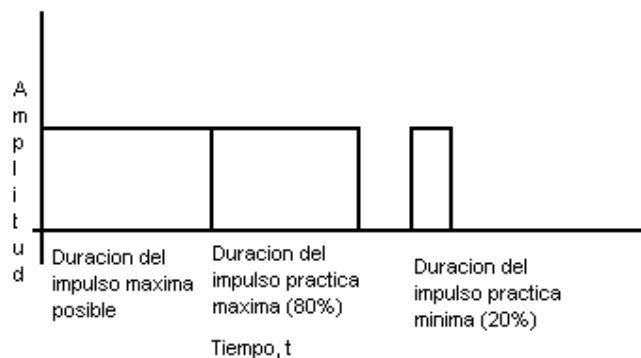


Figura 5.7 Límites prácticos de la duración de los impulsos.

### 5.3.6 MODULACION POR IMPULSOS EN POSICION.

La modulación por impulsos en posición (pulse-position modulation, PPM). En primer lugar, la señal original se modula mediante modulación por impulsos de duración, y luego se diferencia y recorta. Los impulsos resultantes varían su posición alrededor de una línea de referencia, que se establece mediante la posición del impulso correspondiente a la señal cero. Los impulsos PPM están sobre la línea de referencia, retrasados respecto a la referencia o adelantados respecto de ella. El adelanto original por encima o por debajo de la línea de cero. Teniendo en cuenta que el impulso mas a la izquierda esta sobre la línea de referencia; el segundo, tercer y cuarto impulso están retrasados respecto a las líneas de referencia; el quinto y sexto impulsos está adelantados; y el último impulso esta sobre la línea de referencia.

La modulación PPM es tan susceptible al ruido en los impulsos como la modulación PAM, pero no es tan perjudicial como en la modulación PAM. Pero por supuesto, en la modulación PPM afecta a la posición del impulso; no siendo importante su duración.

### 5.3.7 MODULACION POR IMPULSOS EN FRECUENCIA.

La modulación por impulsos en frecuencia (pulse-frequency modulation, PFM) puede parecerse mucho a la modulación PPM. Pero se genera de diferente manera. La modulación PPM tiene un único impulso en cada espacio entre muestras, pero la modulación PFM puede tener más de un impulso en cada espacio entre muestras.

De los cuatro tipos de modulación por impulsos que se han expuesto, la modulación PFM es la que se ve menos afectada por el ruido. La modulación PFM no depende de la duración del impulso ni de su posición, sino más bien del número de impulsos por segundo. Luego los picos de ruido deberían ser muy grandes para llegar a afectar a la frecuencia.



## **5.4 MODULACION POR IMPULSOS DIGITAL.**

La modulación por impulsos digital es el tipo más importante de modulación por impulsos en uso en la actualidad.

### **5.4.1 MODULACION POR IMPULSOS CODIFICADOS.**

La modulación por impulsos codificados (pulse-code modulation, PCM), una forma de modulación por impulsos digital, es muy diferente de la modulación por impulsos analógica. La modulación por impulsos analógica requiere que algunas características del impulso, tales como la amplitud, duración, posición o frecuencia, varíen de acuerdo con la amplitud de la señal original. Por el contrario, la modulación por impulsos codificados transforma la amplitud de la señal original en su equivalente binario. Este equivalente binario representa la amplitud aproximada de la señal muestreada en un determinado instante. La aproximación puede ser muy cercana, pero es una aproximación.

Para ilustrar la modulación PCM, supongamos una señal que puede variar entre 0 y 7v. Este rango de tensión se divide en un número de niveles igualmente espaciados, o cuantos, los cuales pueden ser una representación de los valores enteros de las tensiones.

Cuando se muestra la señal, el dígito que se genera depende del nivel, o cuanto, de la señal en ese instante. Por ejemplo, el instante de muestreo encuentra a la señal en el rango entre  $\frac{1}{2}$  y  $1\frac{1}{2}$  V. Este rango corresponde al número decimal 1 y al número binario 001. El proceso para determinar cuál es el nivel de la señal se llama cuantificación. Este dígito cuantificado se representa en código binario mediante unos y ceros que se envían como impulsos, generalmente en orden inverso para decodificarlos más fácilmente.

Puede ser difícil determinar cuando un grupo de impulsos, llamado palabra, termina y comienza el siguiente grupo o palabra. Por esta razón, generalmente se añade un bit de sincronización o supervisor a cada palabra codificada para separarlas. Este bit se distingue de los demás impulsos de alguna forma, como una duración del impulso más larga o una amplitud mayor, permitiendo una decodificación más sencilla.

Probablemente se ha observado que la señal cuantificada no se parece a la señal original. Esta diferencia se llama ruido de cuantificación. Se llama ruido porque los errores se producen aleatoriamente. El error de cuantificación máximo que se puede producir es igual a la mitad de la amplitud de los niveles es que se divide la señal.

Para reducir este ruido de cuantificación, la solución obvia es incrementar el número de niveles de cuantificación utilizado para codificar la señal original. Por ejemplo, se podrá haber utilizado intervalos de  $\frac{1}{2}$  V en lugar de 1V. Luego, habría que emplear para representar cada nivel cuatro bits (16 niveles de tensión) en lugar de 3 bits (8 niveles de tensión). Al aumentar el número de niveles se producen más impulsos por segundo a la salida del codificador PCM y, por consiguiente se produce un incremento de la frecuencia de la señal que hay que transmitir. La ventaja de aumentar los niveles de cuantificación es que se reduce el ruido de cuantificación; la desventaja es que se requiere un ancho de banda mayor para transmitir la señal. En los sistemas prácticos, se consideran adecuados 128 niveles para la señal vocal.

El número de niveles es igual a  $2^n$ , donde n es el número de bits del sistema. Un sistema de seis bits tendría  $2^6$  niveles, es decir 64. Merece la pena calcular la tensión de cada bit, para lo cual dividimos  $2^n$  entre la tensión a fondo de escala. Por ejemplo, una tensión a fondo de escala de 7 V en un sistema de cuatro bits daría un valor de bit de:

$$\frac{7V}{2^4} = 0.4375V$$

Cada bit valdría 0.4375 V, un valor aproximado a  $\frac{1}{2}$  V. El valor del error de cuantificación sería  $(1/2) (0.4375) V$ , es decir 0.21875 V, puesto que esta es la máxima diferencia que una señal analógica podría tener, sin dejar de estar representada por el mismo código de bits.

## **CAPITULO 6.**

### **IMPLEMENTACION DEL PROTOTIPO.**

#### **6.1 INTRODUCCIÓN.**

Los motores de corriente continua se mueven a una velocidad proporcional a la tensión que se aplica. El fabricante nos informa de la tensión máxima que soporta (por ejemplo 12v), y que lo hace girar a la máxima velocidad. Si aplicamos una tensión menor, el motor se moverá menos rápido.

Una forma de controlar la velocidad utilizando circuitos digitales es emplear la técnica conocida como PWM (Pulse Width Modulación. Modulación por ancho de pulsos).

#### **6.1.2 OBJETIVO DEL PROTOTIPO.**

Diseñar una unidad de PWM que permita controlar la velocidad del motor de corriente continua. Mediante el uso de un integrado 555 como generador de tren de pulsos y un transistor IRF830.

#### **6.1.3 SEÑALES PWM**

Con las señales PWM podemos establecer la tensión media, cambiando la anchura de un pulso.

Bueno, se armara un regulador de velocidad de motores de corriente continua mediante variación de ancho de pulsos.

El concepto es simple, en vez de bajar la tensión del motor, usamos un oscilador, en este caso un NE555, para activar y desactivar un transistor (IRF830). Para controlar el dispositivo, usamos un potenciómetro de 100k que va a variar entre 0 y 100%.

Las ventajas de este sistema, es que no corremos el riesgo de quemar el motor cuando lo usamos a bajas rpm, ya q la corriente no aumenta conforme bajamos la potencia.

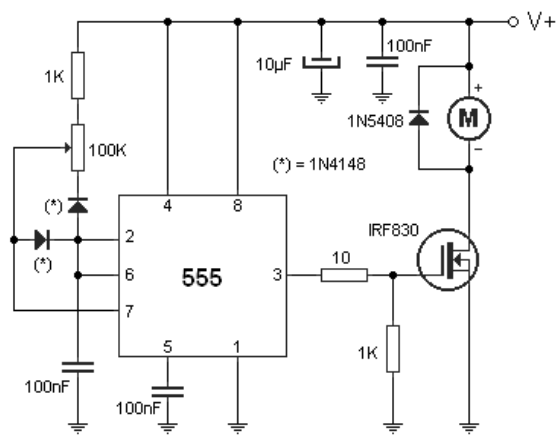
La desventaja, es que dependiendo de la frecuencia y el tamaño del motor, se puede escuchar un zumbido algo molesto, no tanto por lo fuerte sino por lo irregular.

La frecuencia la aumentan reduciendo la capacidad del capacitor del pin número 6 del integrado 555.

Para mayor referencia en cuanto a las características de los elementos utilizados en el prototipo ver APENDICE A.

## 6.2 MATERIAL UTILIZADO.

1. Transistor IRF830
3. Capacitores de 100nF
1. Capacitor Electrolítico de 10uF
2. Diodos 1N4148
1. Diodo 1N5408
2. Resistencias de 1K ohm
1. Resistencia de 10 ohm
1. Potenciómetro de 100K ohm
1. NE555
1. Tarjeta de adquisición de datos
1. PC



## 6.3 DESCRIPCION DEL PROTOTIPO

El circuito se basa en un integrado NE555 el cual genera el tren de impulsos necesario para controlar el transistor, el cual acciona por pulsos el motor de continua. El diodo en paralelo con el motor impide que, cuando se quita la corriente, el transistor se queme. Los componentes entre los terminales 2, 6 y 7 del integrado regulan la frecuencia de oscilación del circuito y, por ende, la velocidad del motor.

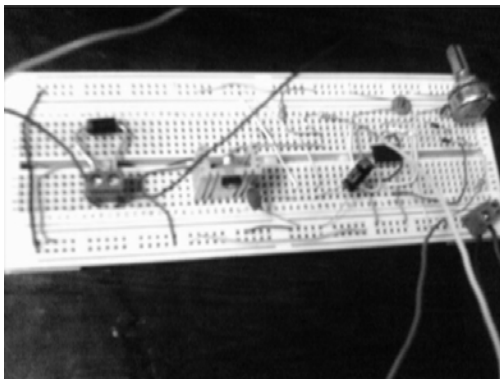


Figura 6.1 Modelo armado de prototipo de modulador PWM

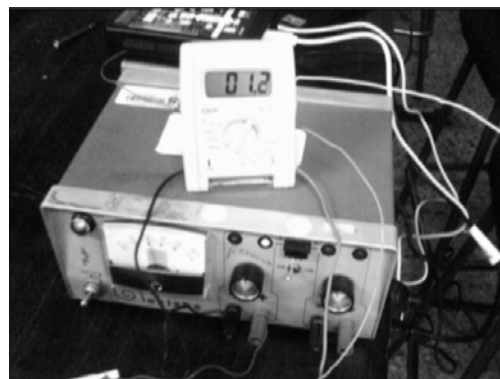


Figura 6.2 Conexión de instrumentos de medición y generador de entrada



*Figura 6.3 Conexión de tarjeta de adquisición de datos a PC y a modelo.*



*Figura 6.4 Visualización de mediciones gracias a la interfaz proporcionada por la tarjeta de adquisición de datos.*

Cambiando las características del pulso ( $t_1 + t_2$ ) de salida del circuito NE555 podemos variar la frecuencia de salida, lo cual nos como resultado un cambio en las rpm del motor, este cambio no solo se ve reflejado en revoluciones, también en la estabilidad de todo el sistema y robustez del mismo, consumiendo mayor corriente en ciertos momentos o entregando menos potencia en ciertas transiciones aun cuando el sistema sigue alimentado.

Durante las pruebas se utilizo una interfaz (tarjeta de adquisición de datos) para comunicar el circuito del prototipo a la PC mediante esta interfaz, figura 6.3 y 6.4 se revisaron de manera más eficaz que si se hiciera de manera analógica.

Se realizaron tres mediciones exitosas durante el proceso de implementación del prototipo, en cada una de ellas se realizaron mediciones de voltaje, frecuencia, periodo y se pudieron determinar las diferentes características de una señal respecto a la siguiente. Los momentos en que se tomaron las lecturas fueron:

Momento 1: Sistema encendido pero sin voltaje como para encender el motor.

Momento 2: Sistema encendido y motor funcionando al 50% de su capacidad.

Momento 3: Sistema encendido y motor funcionando al 100% de su capacidad.

### 6.3.1 RECOPIACION DE DATOS Y MEDICIONES

Momento 1

Con un voltaje de salida de  $1.6V$

$$t_1 = 0.694(1K + 1K)(10\mu) = 1.388ms$$

$$t_2 = 0.694(1K)(10\mu) = 0.694ms$$

$$f = \frac{1.44}{10\mu(1K + 2(1K))} = 480Hz$$

$$T = \frac{1}{480Hz} = 2.083s$$

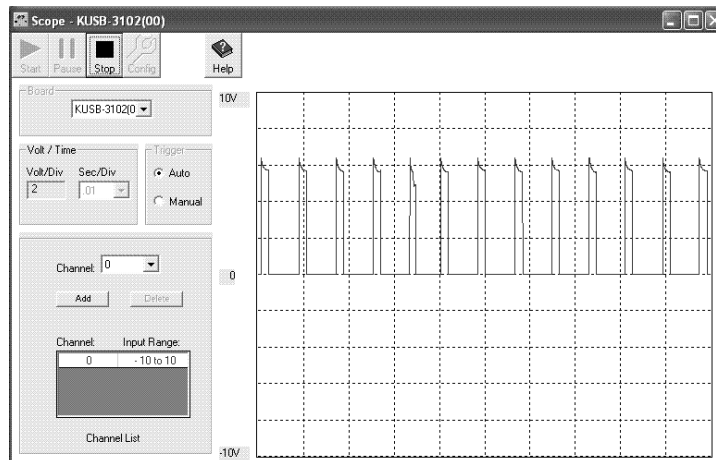


Figura 1. Visualización de voltaje

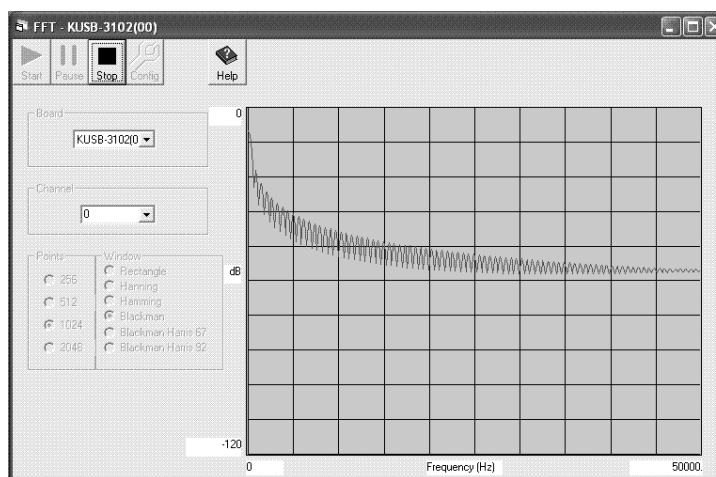


Figura 1a. Serie de Fourier

## Momento 2

Con un voltaje de salida de  $4.3V$

$$t_1 = 0.694(1K + 50K)(10\mu) = 35.394ms$$

$$t_2 = 0.694(1K)(10\mu) = 0.694ms$$

$$f = \frac{1.44}{10\mu(1K + 2(50K))} = 14.257Hz$$

$$T = \frac{1}{14.257Hz} = 70.140s$$

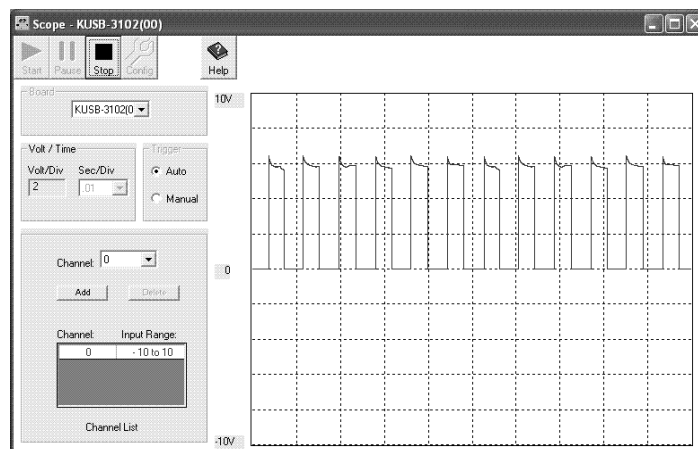


Figura 2. Comparando forma de onda con espectro

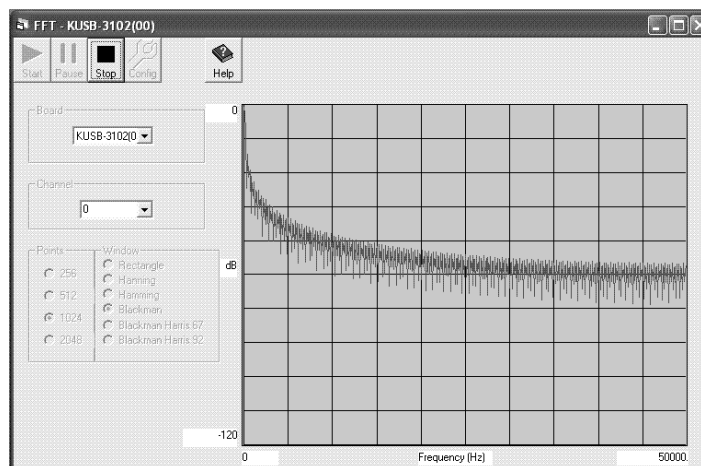


Figura 2a. Serie de Fourier (forma de onda)

### Momento 3

Con un voltaje de salida de  $6.5V$

$$t_1 = 0.694(1K + 100K)(10\mu) = 70.094ms$$

$$t_2 = 0.694(1K)(10\mu) = 0.694ms$$

$$f = \frac{1.44}{10\mu(1K + 2(100K))} = 7.164Hz$$

$$T = \frac{1}{7.164Hz} = 139.586s$$

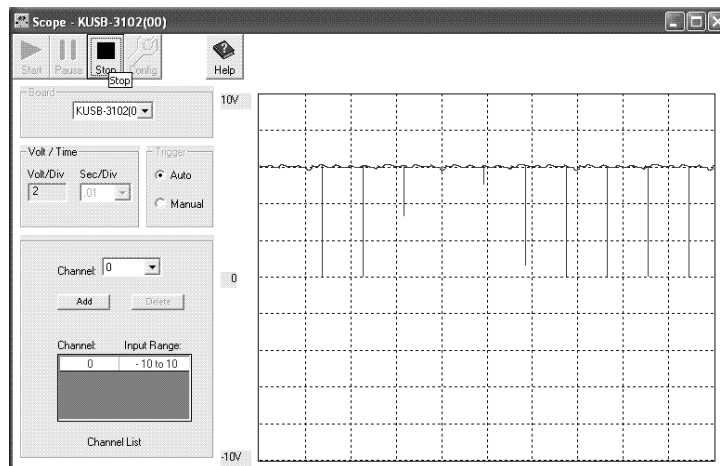


Figura 3. Velocidad máxima

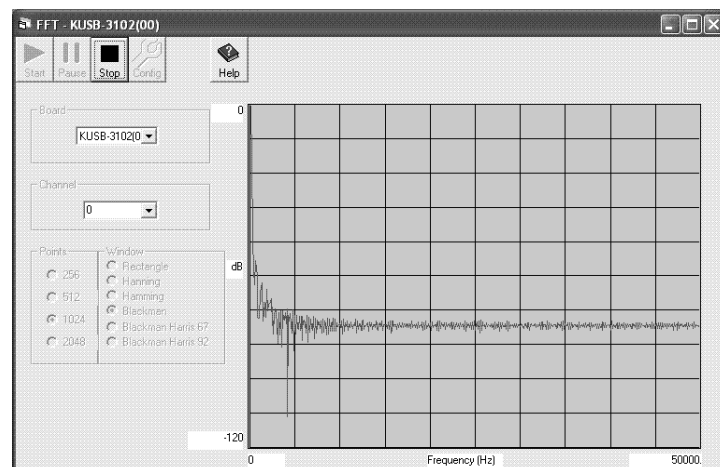


Figura 3a. Análisis de Fourier en el punto más alto



## CONCLUSIONES

De los datos obtenidos podemos concluir que mientras la frecuencia sea menor el sistema presenta más estabilidad y las armónicas obtenidas son cuantizables y presentan menos perturbaciones que a una frecuencia del sistema más alta, el sistema es más robusto en este punto.

En el momento en cuando el sistema empieza a ganar velocidad, su estabilidad se ve mermada conforme el sistema va presentando más potencia, las armónicas son cada vez más erráticas y el sistema presenta un grado de pérdida.

Para el momento en que el motor se encuentra trabajando a su máxima capacidad, el sistema entrega todas sus prestaciones, aunque por como observamos las armónicas presentan picos de gasto de energía mucho mayores y un consumo mas alto de energía.

El gasto de energía para este circuito es alto aunque esta contrareestado por que justo al iniciar el motor a trabajar no se presentan periodos transitorios altos, lo cual elimina el consumo inicial de energía hasta el momento en el cual le exigimos al sistema que entregue mas energía para que nuestro motor trabaje a mas revoluciones.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Junk-Ik Ha, Kozo Ide “*Sensorless Rotor Position Estimacion of an Interior Permanent-Magnet Motor From Inicial States*” IEEE Transactions on Industry Applications Vol-39, No.3, MAY/JUNE 2003.
- [2] F. Fiorillo y A. Novikov “*Power Losses Ander Sinusoidal, Trapezoidal and Distorted Induction Waveform*” Istituto Electrotecnico Nazionale Galileo Ferraris and INFN/CISM, 10125 Torino, Italy, IEEE Transactions of Magnetics, Vol. 26, No. 5, September 1990.
- [3] D. Lin, T.Batan, E.F. Funchs y \*W.M. Grady “*Harmonic Losses of Single-Phase Induction Motors Ander Nonsinusoidal Voltajes*” University of Colorado at Boulder Boulder Colorado 80309, \*University of Texas at Austin Austin, Texas 78712, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, June 1996.
- [4] Leszek Kawecki Tadeusz Niewwierowicz “Control Optimo en Tiempo de Motores de Inducción Tomando Consideración Transitorios Electromagnéticos” Sección de Estudios de Posgrado e Investigación ESIME-IPN.
- [5] G.El-Saady, A.M.Sharaf, A.Makky, M.K.El-Sherbiny, G.Mohamed “A NOVEL TECHNIQUE FOR AC SUPPLY VOLTAGE AND FREQUENCY MODULATION OF INDUCTION MOTOR DRIVERS” Electrical Engineering Assiut University, Egypt, Electrical Engineering Department University of New Brunswick Fredericton, Box 4400 N.B. E3B 5A3 Canada.
- [6] Michael J. Melfi “OPTIMUM POLE CONFIGURATION OF AC INDUCTION MOTORS USED ON ADJUSTABLE FREQUENCY POWER SUPPLIES” Product Development Engineering Reliance Electric Rockwell Automation Cleveland, Ohio 44117, Copyright Material IEEE Paper No. PCIC-95-26.
- [7] Timothy J. Maloney “*Electrónica Industrial Moderna*” Prentice Hall, Tercera Edición, Edo. De México 1997, Pp. 872.
- [8] D.W.Hart, *Electrónica de Potencia*, Prentice Hall International (2004)
- [9] James T. Humphires, Leslie P. Sheets  
ELECTRONICA INDUSTRIAL  
Dispositivos, Equipos y sistemas para procesos y comunicaciones industriales.  
Pag. 279-333 Editorial Paraninfo sa 1996
- [10] Hnatek, E.R. Applications of Linear Integrated Circuits. N.Y.: Wiley, 1975 Journal Minitere Russie Defense 47, seccion 7, 25 (1845)
- [11] Kennedy, G. Electronic Communication Systems. 2a ed. N.Y. Mc Graw-Hill, 1977.
- [12] Miller, G.M. Modern Electronic Communication. 2a ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1983.
- [13] National Semiconductor Corporation. Special Functions Databook. Santa Clara, Calif. 1979. Shannon, C.E. y Weaver, W. The mathematical Theory of Communications. Urbana: Universidad de Illinois Press, 1949.
- [14] Taub, H. y Schilling, D.L. Principles of Communications Systems. N.Y.: McGraw-Hill, 1971.
- [15] Tomasi, W. Fundamentals of Electronic Communications Systems. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1998.

## GLOSARIO

### **Almacenamiento de energía**

Trabajo efectuado para establecer un campo eléctrico en un capacitor, o trabajo efectuado para establecer un campo magnético en un inductor.

### **Amplificador**

Dispositivo diseñado para aumentar el nivel de potencia, voltaje o corriente de señales eléctricas o electromagnéticas.

### **Amplificador de Alta Potencia (HPA)**

Dispositivo que incrementa el nivel de potencia de la señal en la etapa final para ser transmitida al satélite.

### **Amplificador de Bajo Ruido (LNA)**

Dispositivo que tiene como función amplificar la señal recibida del satélite a través de una antena con una contribución mínima de ruido.

### **Amplitud Modulada (AM)**

Técnica de modulación mediante la cual la amplitud de una onda portadora de radio varía de acuerdo a la amplitud de la señal de entrada.

### **Ancho de banda**

Es la diferencia entre dos frecuencias dadas. Rango de frecuencias ocupado por una señal.

### **Armónicos**

Serie de vibraciones subsidiarias que acompañan a una vibración primaria o fundamental de movimiento ondulatorio, especialmente en los instrumentos musicales. Los armónicos aparecen cuando un cuerpo vibra. Por ejemplo, una cuerda estirada o una columna de aire encerrado, vibran simultáneamente como un todo produciendo frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental (2:1, 3:1, 4:1, y así sucesivamente).

### **Atenuación (Attenuation)**

Pérdida de potencia de la señal al pasar por equipos, líneas u otros dispositivos de transmisión. Se mide en decibeles.

### **Banda base**

Banda de baja frecuencia que ocupan las señales antes de modular la señal portadora de transmisión.

### **Balanceada (Balanced)**

Línea de transmisión en la cual las tensiones en ambos conductores son de igual magnitud pero polaridad opuesta respecto a masa.

### **Bit de paridad (Parity bit)**

Bit adicional, no de información, que se agrega a un grupo de bits para asegurar que el número total de bits "1" en el carácter es par o impar.

**Carga balanceada**

Las impedancias en cada fase son iguales.

**Conmutación secuencial**

Acción de dos o más interruptores que se activan en diferentes instantes en un circuito.

**Devanado primario**

En un transformador, devanado conectado a la fuente de energía.

**Devanado secundario**

En un transformador, devanado conectado a la carga.

**Digital**

La salida binaria ("1/0") de una computadora o terminal. En las comunicaciones de datos, una señal alternada y discontinuo (pulsante).

**Distorsión**

En las transmisiones de radio a menudo se introduce una forma de distorsión de amplitud al aumentar la intensidad relativa de las frecuencias más altas de audio. En el receptor aparece un factor equivalente de atenuación de alta frecuencia. El efecto conjunto de estas dos formas de distorsión es una reducción del ruido de fondo o estático en el receptor.

**Dominio de la frecuencia**

Dominio matemático en que el conjunto de posibles valores de una variable se expresa en términos de la frecuencia.

**Eco, señal de**

Distorsión de señal que ocurre cuando la señal transmitida es reflejada hacia la estación de origen.

**Función periódica**

Función definida por la propiedad  $x(t+T) = x(t)$  de forma que se repite cada  $T$  segundos.

**Frecuencia**

Término empleado en física para indicar el número de veces que se repite en un segundo cualquier fenómeno periódico.

**Frecuencia fundamental**

Para una función con periodo  $T$ , la frecuencia  $\omega_0 = 2\pi/T$ .

**Impedancia**

Efecto combinado de la resistencia, inductancia y capacitancia sobre una señal transmitida. La impedancia varía con la frecuencia.

**Impulso**

Función del tiempo que vale cero para  $t < t_0$ , tiene magnitud  $M$  cuando  $t_0 < t < t_1$  y es igual a cero para  $t > t_1$ , pulso de ancho infinitesimal con una rea bajo el punto igual a 1.

**Modulación (Modulation)**

Alteración de una onda portadora en función del valor o de una muestra de la información que se transmite.

**Módem (Modulador-Demodulador)**

Dispositivo usado para convertir señales digitales serie de una DTE transmisora en una señal adecuada para la transmisión por línea telefónica. Reconvierte también la señal transmitida en información digital serie para su aceptación por una DTE receptora transiten y compartan, simultáneamente, una vía común de transmisión.

**Muestreo**

Proceso mediante el cual se representa una señal continua por medio de valores discretos de la misma, llamados muestras, refiere a señales cuyas frecuencias sean mayores de aproximadamente 500 MHz.

**Multiplexor/Mux (Multiplexer)**

Dispositivo que permite que dos o más señales tiempo interactúen dinámicamente, en función de su actividad.

**Multiplexor estadístico (Statistical Multiplexor, STM o STDM)**

Dispositivo que conecta varios canales a una sola línea y les asigna los timeslots.

**PCM (Pulse Code Modulation - Modulación por Codificación de Pulsos)**

Procedimiento para adaptar una señal analógica (como la voz) a una corriente digital de 64 kbps para la transmisión.

**Periodo**

Mínimo intervalo de tiempo invertido por un fenómeno periódico para volver a pasar por la misma posición. Se representa por T y se expresa en segundos.

**Portadora (Carrier)**

Señal continua de frecuencia fija, capaz de ser modulada por otra señal (que contiene la información).

**Portadora modulada**

Señal que variará su amplitud, fase o frecuencia con respecto a una referencia conocida de acuerdo a la técnica de modulación utilizada en la transmisión.

Sistema de comunicación mediante ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio.

**Radio**

Características variables, se utilizan ondas radiofónicas de diferente longitud para distintos fines; por lo general se identifican mediante su frecuencia. Las ondas más cortas poseen una frecuencia (número de ciclos por segundo) más alta; las ondas más largas tienen una frecuencia más baja (menos ciclos por segundo).

**Radio transmisión**

Transmisión de mensajes de comunicación por medio de ondas electromagnéticas radiadas.

**Respuesta transitoria**

Respuesta temporal  $x(t)$  de un circuito a un estímulo o al resultado de la activación de un interruptor.

**Respuesta al escalón**

Respuesta de un circuito a la aplicación súbita de una fuente constante cuando todas las condiciones iniciales del circuito son iguales a cero.

**Respuesta completa**

Suma de las respuestas forzada y transitoria.

**Señal**

Función del tiempo con valor real; forma de onda que conduce la información.

**Señal senoidal**

Forma de onda que varía de acuerdo a una función cosenoidal del tiempo.

**Seguidor de voltaje**

Amplificador con una ganancia unitaria de voltaje, de forma que el voltaje de salida sigue al voltaje de entrada.

**Sistemas de comunicación**

Ensamblaje de sistemas propios de un medio de comunicación el cual tiene una sincronización que nos permite comunicarnos a corta o larga distancia.

$t_1$  Tiempo de excitación del pulso de salida del circuito 555 (1)

$t_2$  Tiempo de reposo del pulso de salida del circuito 555 (0)

**Telecomunicación**

Transmisión de palabras, sonidos, imágenes o datos en forma de impulsos o señales electrónicas o electromagnéticas. Los medios de transmisión incluyen el teléfono (por cable óptico o normal), la radio, la televisión, las microondas y los satélites. En la transmisión de datos, el sector de las telecomunicaciones de crecimiento más rápido, los datos digitalizados se transmiten por cable o por radio.

**Telemetría**

Información del satélite a través de la cual se conoce su salud y su configuración.

**Transformador**

Circuito magnético con dos o más bobinas de múltiples vueltas devanadas en un núcleo común.

**Transformación de fuentes**

Conversión de una fuente a otra manteniendo las mismas características en las terminales. Una fuente de voltaje puede transformarse en una de corriente y viceversa.

## APENDICE A

### CARACTERÍSTICAS DEL 555 Y DEL IRF830

El dispositivo 555 es un circuito integrado muy estable cuya función primordial es la de producir pulsos de temporización con una gran precisión y que, además, puede funcionar como oscilador.

Sus características más destacables son:

Temporización desde microsegundos hasta horas.

Modos de funcionamiento:

Monoestable.

Astable.

Aplicaciones:

Temporizador.

Oscilador.

Divisor de frecuencia.

Modulador de frecuencia.

Generador de señales triangulares.

Pasemos ahora a mostrar las especificaciones generales del 555 ( $V_c = \text{disparo}$ ):

Especificaciones generales del 555				
$V_{cc}$	5-Voltios	10-Voltios	15-Voltios	Notas
Frecuencia máxima (Astable)	500-Khz. A 2-MHz			Varia con el Mfg y el diseño
Nivel de tensión $V_c$ (medio)	3.3-V	6.6-V	10.0-V	Nominal
Error de frecuencia (Astable)	~ 5%	~ 5%	~ 5%	Temperatura 25° C
Error de temporización (Monoestable)	~ 1%	~ 1%	~ 1%	Temperatura 25° C
Máximo valor de $R_a + R_b$	3.4-Meg	6.2-Meg	10-Meg	
Valor mínimo de $R_a$	5-K	5-K	5-K	
Valor mínimo de $R_b$	3-K	3-K	3-K	
Reset VH/VL (pin-4)	0.4/<0.3	0.4/<0.3	0.4/<0.3	
Corriente de salida (pin-3)	~200ma	~200ma	~200ma	

#### Especificaciones generales del IRF380:

CODIGO	CANAL	CORRIENTE ID (A)	TENSION VDS (V)	POTENCIA Pd (W)	RESISTENCIA RDS(on) (ohms)	ENCAPSULADO
IRF830	N	4.5	500	75	1.5	TO-220