

CAPITULO 4. Inversores para control de velocidad de motores de inducción mediante relación v/f.

4.1 Introducción.

La frecuencia de salida de un inversor estático está determinada por la velocidad de conmutación on-off de los dispositivos semiconductores que lo conforman, por lo que se tiene una salida de frecuencia ajustable intrínseca a esta característica. Sin embargo, normalmente la salida del inversor resulta en una onda no senoidal de voltaje y corriente que puede afectar severamente el funcionamiento del motor. El filtrado de los armónicos no es factible cuando la frecuencia de salida varía en un rango amplio y la generación de ondas de ac con bajo contenido armónico es importante [1].

El inversor debe recibir la entrada de dc desde una batería pero en la mayoría de las aplicaciones industriales se encuentra alimentado por un rectificador, ya sea de diodos o de tiristores [1].

Los inversores pueden clasificarse según estén alimentados por una fuente de voltaje (VSI) o de corriente (CSI). Los primeros están alimentados por una fuente de dc de baja impedancia como puede ser una batería o un rectificador, en el que a la salida tendrá un filtro LC. El filtro capacitivo en paralelo con las terminales del inversor mantiene un voltaje de dc constante. Por lo tanto, este inversor es una fuente de voltaje de frecuencia ajustable en donde la salida de voltaje es esencialmente independiente de la corriente de carga [1].

Por otro lado, el inversor de corriente está alimentado por una corriente controlada desde una fuente de dc de alta impedancia. Típicamente un rectificador de tiristores

controlados por fase alimenta este inversor con una corriente regulada a través de un inductor en serie; por lo tanto, la corriente de carga es controlada y el voltaje de salida del inversor es dependiente de la impedancia de la carga [1].

A continuación se incluirán los puentes inversores monofásico y trifásico modulados por PWM, siendo éstos del tipo fuente de voltaje, ya que son los que nos serán de utilidad para obtener la relación voltaje/frecuencia variable para controlar la velocidad de un motor de inducción [1].

4.2 Puente inversor monofásico modulado por PWM.

Un puente inversor monofásico (figura 4.1) entrega como salida de voltaje una onda cuadrada de amplitud V_d mediante la conmutación de los transistores en pares diagonales; sin embargo, si se introduce un desplazamiento de fase de 120° entre la conmutación de cada rama como se muestra en la figura 4.2, el voltaje de salida V_{AB} (igual a $V_{A0}-V_{B0}$) es una onda casi cuadrada con intervalos de cero voltaje de 120° de duración en cada medio ciclo [1].

Estos intervalos corresponden a las veces en que las terminales A y B están conectadas simultáneamente al suministro de dc y la corriente de carga circula a través del transistor y el diodo de marcha libre [1].

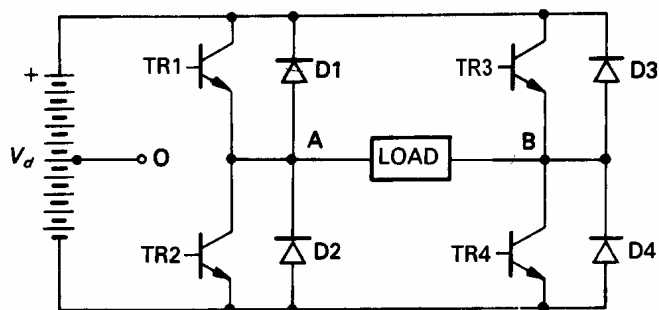


Figura 4.1 Puente inversor monofásico [1].

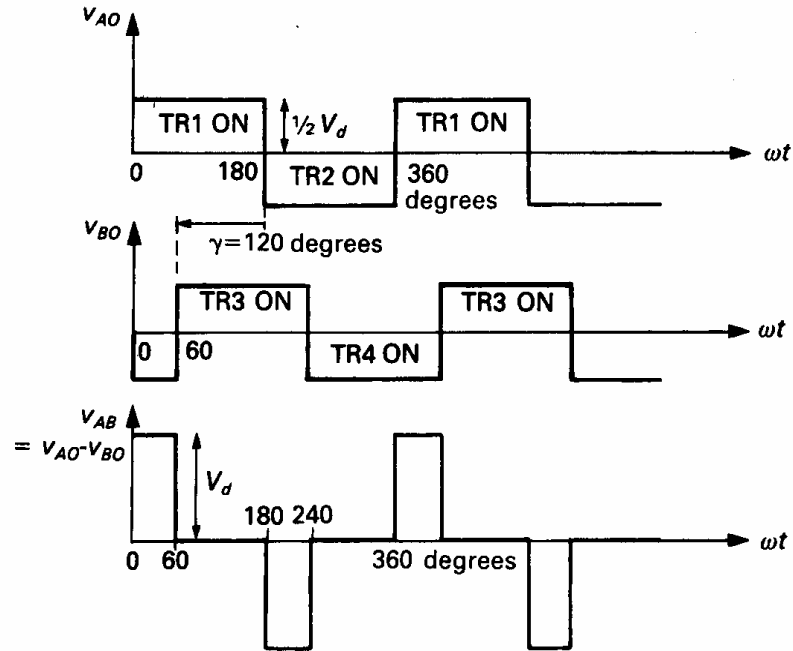


Figura 4.2 Ondas de salida para el puente inversor monofásico [1].

La importancia de esta técnica es que el voltaje fundamental de salida puede variarse desde el valor máximo hasta cero mediante el avance de los ángulos de conducción de TR3 y TR4 desde cero hasta 180° . Este método general de control de voltaje es llamado *Modulación por anchura de pulsos (PWM)* y esta técnica en particular se denomina *modulación de anchura de un pulso por semiperiodo* [1].

En general, el proceso de PWM modifica el contenido armónico del voltaje de salida y puede usarse para minimizar efectos armónicos indeseables en la carga [1].

4.3 PWM cuadrado y puente inversor trifásico.

Una forma alternativa de PWM, conocida como *modulación en anchura de varios pulsos por semiperiodo* o *PWM de onda cuadrada*, implica obtener una serie de pulsos de igual anchura en cada medio ciclo, como se puede ver en la figura 4.3. Esto se lleva a cabo

conmutando la mitad del puente a la frecuencia fundamental requerida y la otra mitad a un múltiplo de la misma. La relación $T_1/(T_1+T_2)$, es denominada el ciclo de trabajo de la onda PWM, y la magnitud del voltaje fundamental de salida se controla al variarse éste. A voltajes reducidos de salida se obtiene un contenido armónico de orden menor mediante esta técnica [1].

Para el efecto, se requieren circuitos de control en el que una onda portadora triangular es comparada con una onda cuadrada de referencia con la frecuencia de salida deseada. Estas ondas se muestran en la figura 4.3 para una rama del inversor y los instantes de conmutación de los transistores se determinan por las intersecciones de las dos ondas.

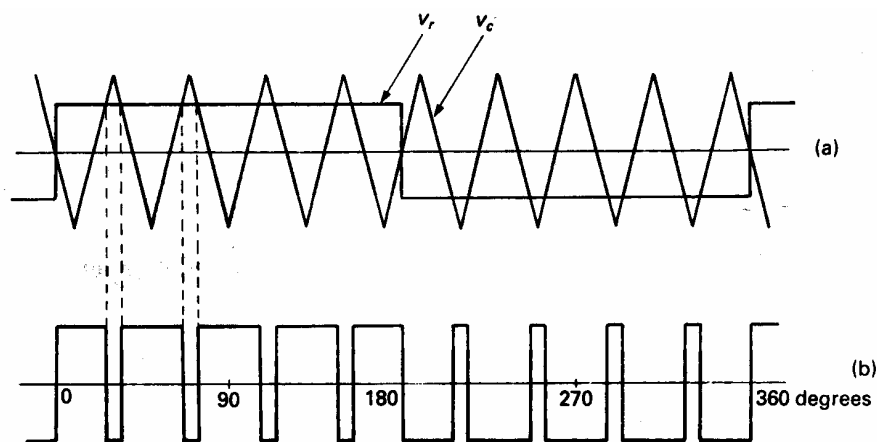


Figura 4.3. Ondas de salida PWM cuadrado del inversor: (a) voltajes de entrada del comparador; (b) salida del comparador y voltaje en las terminales [1].

Cuando el voltaje de referencia v_r (onda cuadrada), excede al voltaje de la portadora v_c , la salida del comparador es “alto” y el transistor de arriba se prende. Cuando v_r es menor que v_c , la salida del comparador es “bajo” y el transistor de abajo se prende. La salida del comparador de voltaje es una señal PWM como se muestra en la figura 4.3b y será también el voltaje polar del inversor. El número de pulsos por cada medio ciclo (p) está determinado

por la relación entre la portadora y la frecuencia de referencia. Para la figura 4.3b, p tiene un valor de nueve [1].

En un inversor trifásico (figura 4.4) cada medio ciclo tiene un comparador separado, el cual es alimentado por la misma portadora triangular. Sin embargo, las tres ondas cuadradas de referencia tienen un desplazamiento de 120° , formando un sistema balanceado de tres fases. Si la relación con la portadora es un múltiplo de tres, la onda triangular tiene una relación de fase idéntica con cada una de las tres señales cuadradas moduladas, lo que se refleja en cada voltaje polar. La figura 4.5 muestra las ondas cuadradas de referencia para las fases A, B, y C, y la portadora triangular común a ellas, para una relación de seis. Los voltajes de polo V_{A0} , V_{B0} y V_{C0} también se muestran [1].

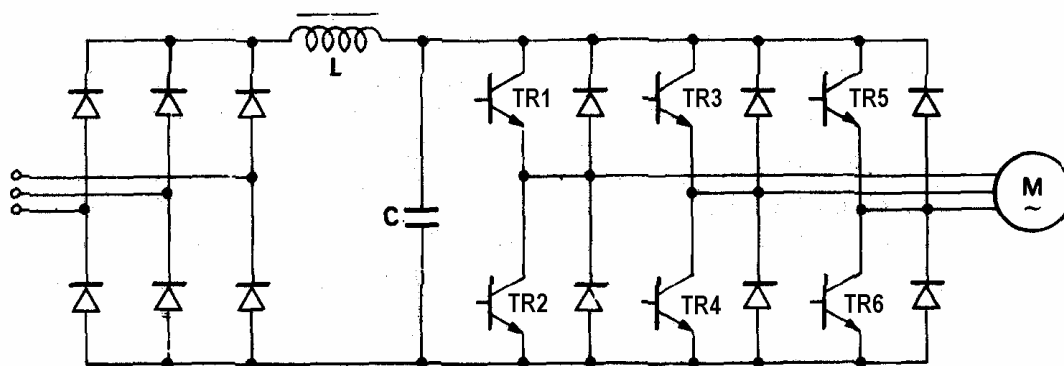


Figura 4.4. Puente inversor trifásico [1].

Como es usual, el voltaje de línea $V_{AB}=V_{A0}-V_{B0}$, dando una serie de pulsos de igual anchura uniformemente separados, de amplitud V_d en cada medio ciclo, con un pulso de media anchura a los extremos.

El índice de modulación M está definido como la relación existente entre la amplitud de la onda de referencia (V_r) y la amplitud de la portadora (V_c). En la figura 4.5,

M es igual a 0.6. Al observar estas ondas, se puede ver que el valor de M determina el ancho de cada pulso en el voltaje de polo, por lo que controla el voltaje del inversor.

Generalmente, la amplitud de la portadora es fija; y es la onda de referencia la que controla el índice de modulación y el voltaje de salida. Cuando M es cero, los voltajes de polo de la figura 4.5 son ondas cuadradas simétricas sin modular, y el voltaje instantáneo V_{AB} , es siempre cero [1].

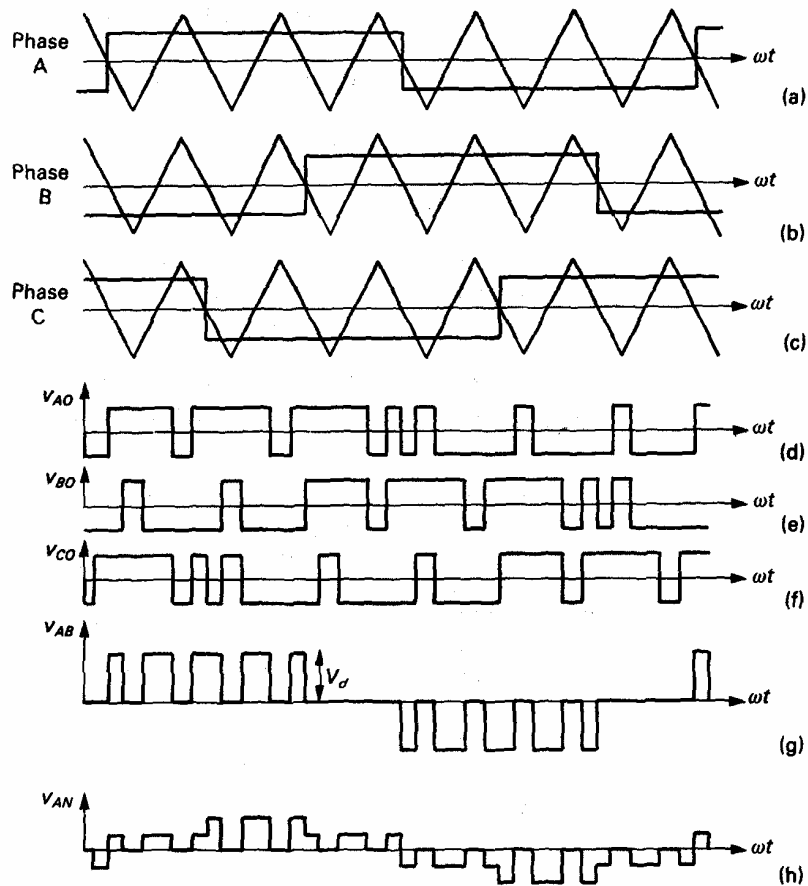


Figura 4.5. Voltajes de salida para un inversor trifásico controlado por PWM cuadrado: (a), (b), (c) voltajes de entrada del comparador; (d), (e), (f) voltajes de polo; (g) voltaje de línea; (h) voltaje línea-neutro [1].

Para valores pequeños de M los pulsos del voltaje de salida son muy delgados, pero al incrementarse M, el ancho de pulso se incrementa proporcionalmente, incrementándose

el área volts-segundos por medio ciclo y la amplitud del voltaje fundamental. Al aproximarse M a la unidad, la salida es como sería sin la técnica PWM [1].

Relación v/f constante.

El ajuste de la frecuencia del inversor se hace simultáneamente variando la frecuencia de las portadoras y las ondas de referencia con su relación de fase. Estas condiciones se satisfacen cuando las dos ondas son generadas por el mismo oscilador común. Al examinar la figura 4.5 se puede ver que la duración de cada pulso en el voltaje de salida es proporcional al índice de modulación, M , y al periodo de la onda de referencia, T . Entonces, la duración del pulso, T_p , es proporcional a MT , o M/f , en donde f es la frecuencia de la onda de referencia. Si la amplitud de la onda de referencia es variada linealmente con la frecuencia, entonces la relación M/f es constante, y la duración del pulso, T_p , es independiente de la frecuencia. En consecuencia, el área volts-segundos por medio ciclo es la misma a todas las frecuencias, lo que implica una operación con relación volts/hertz constante. O desde otro punto de vista, ya que la amplitud del voltaje fundamental es función lineal de M , una relación constante de M/f implica v/f constante [1].

4.4 PWM senoidal.

En la técnica de PWM cuadrado explicada anteriormente, la onda de referencia es una cuadrada trifásica. La frecuencia, amplitud y contenido armónico de esta señal de referencia son reproducidas a la salida del inversor; en consecuencia, los armónicos de orden menor de la onda de referencia aparecen en la onda de salida. Sin embargo, la mayoría de los motores de ac están diseñados para operar con una fuente senoidal, por lo

que la salida del inversor debe ser lo más senoidal posible. Para el efecto, la onda de referencia cuadrada debe ser reemplazada por una senoidal, para lograr una salida PWM en la que el ancho de pulso sea modulado senoidalmente en cada medio ciclo. Esta técnica se denomina PWM senoidal, o PWM subarmónico [1].

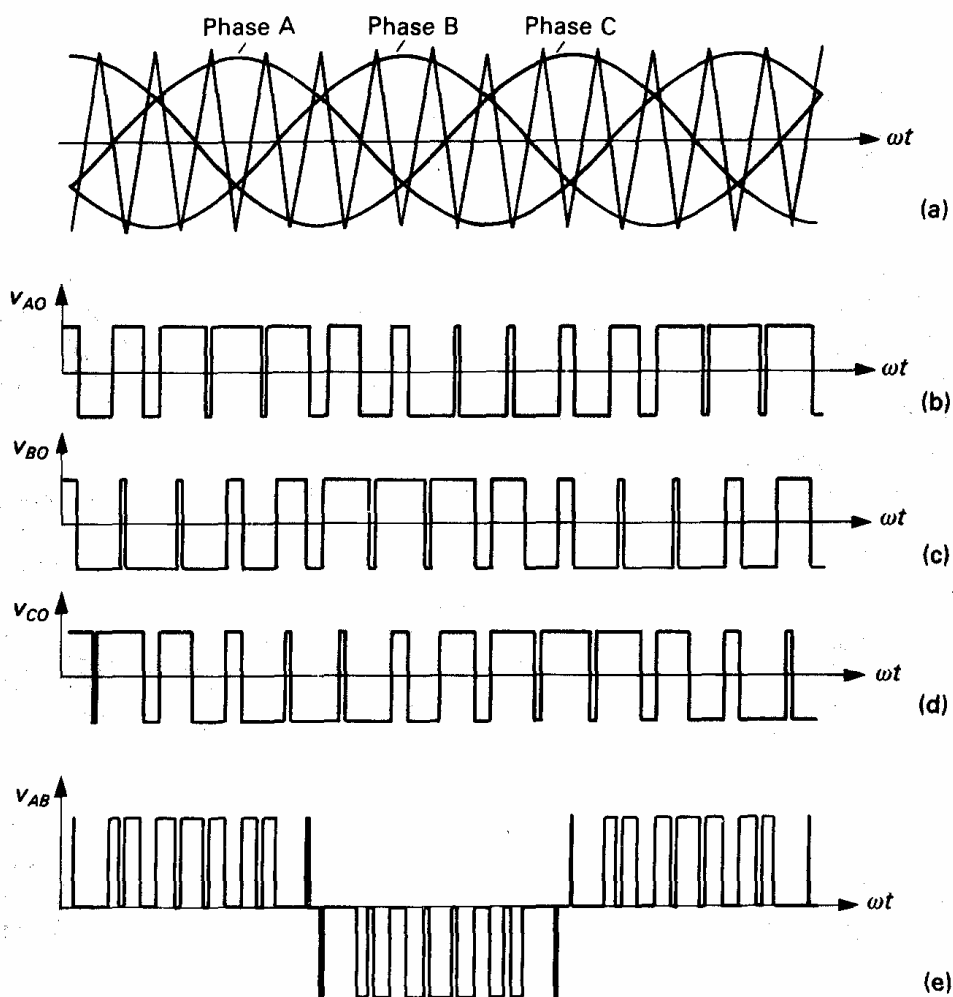


Figura 4.6. Ondas de voltaje para un inversor trifásico controlado por PWM senoidal: (a) voltajes del comparador; (b), (c), (d) voltajes polares; (e) voltaje de línea [1].

Como antes, cada fase del inversor está alimentada por un comparador para las dos ondas, la senoidal de referencia, y la portadora triangular, que es común a todas las fases.

De nuevo, p debe ser múltiplo de tres para asegurar el defasamiento de 120° en los voltajes de salida. La portadora triangular tiene una amplitud fija, y la relación de amplitudes entre la onda senoidal y la triangular de referencia se denomina índice de modulación, M [1].

El control del voltaje de salida se realiza variando la amplitud de la onda senoidal. Esta variación altera los anchos de pulso en el voltaje de salida, pero preserva el patrón de modulación senoidal [1].

En la figura 4.6, p es igual a nueve; y el índice de modulación es casi la unidad. Los correspondientes voltajes polares V_{A0} , V_{B0} , V_{C0} , y el resultante voltaje línea-línea, V_{AB} , se muestran en la figura 4.6b, c, d, y e [1].

La operación mediante frecuencia ajustable de una onda modulada senoidalmente a la salida del inversor para el control de velocidad de un motor de ac, requiere la generación de las tres ondas senoidales trifásicas con amplitud y frecuencia variables. Si el motor opera a velocidades muy bajas, el oscilador de referencia debe tener capacidad de baja frecuencia hasta cero hertz. Con circuitos analógicos tradicionales, es muy difícil generar una onda de referencia senoidal sin encontrar problemas de offset de corriente directa y desviación de parámetros. En consecuencia, muchos de los inversores PWM adoptan el PWM cuadrado; sin embargo, la implementación de PWM senoidal ha sido facilitada por modernas técnicas digitales utilizando memoria programada o circuitos integrados a gran escala [1].

Para relaciones de portadora grandes, el inversor entrega una onda de salida de alta calidad en la que los armónicos dominantes son de orden mayor. Por lo tanto, se obtiene una rotación suave y uniforme incluso a velocidades muy bajas, ya que los armónicos indeseables de orden menor y las perturbaciones de torque, características de una onda cuadrada, son eliminadas [1].

4.5 Control digital de un inversor PWM.

En los últimos años, se ha hecho énfasis en el uso de técnicas digitales para la generación de ondas PWM. La técnica de PWM senoidal emplea una onda senoidal modulante, la cual es comparada con una portadora triangular para determinar los instantes de conmutación del inversor. Esta técnica es conocida como *PWM por muestreo natural*, y ha sido adoptada ampliamente por su fácil implementación analógica. Mediante técnicas digitales, la onda senoidal de referencia puede ser almacenada como una tabla en memoria ROM, y los valores de la onda senoidal son accedidos a una velocidad correspondiente a la frecuencia fundamental requerida. Una onda portadora triangular es generada usando un contador, y las dos ondas se comparan digitalmente. Sin embargo, el muestreo natural es esencialmente una técnica analógica; y esta forma de implementación digital no es muy efectiva: en un inversor PWM controlado por un microprocesador, es difícil calcular los anchos de pulso de la señal por muestreo natural porque no están definidos por alguna expresión analítica [1].

4.5.1 PWM por muestreo regular.

Una forma alternativa similar, de naturaleza digital, se muestra en la figura 4.7. La onda modulante senoidal es ahora muestreada en intervalos regulares correspondiendo a los picos positivos de la portadora. El circuito sample-and-hold mantiene un nivel constante hasta que se realiza la siguiente muestra. Este proceso resulta en una versión escalonada, o modulada en amplitud; de la onda de referencia. Esta onda escalonada, es comparada con la portadora triangular, y los puntos de intersección determinan los instantes de conmutación del inversor [1].

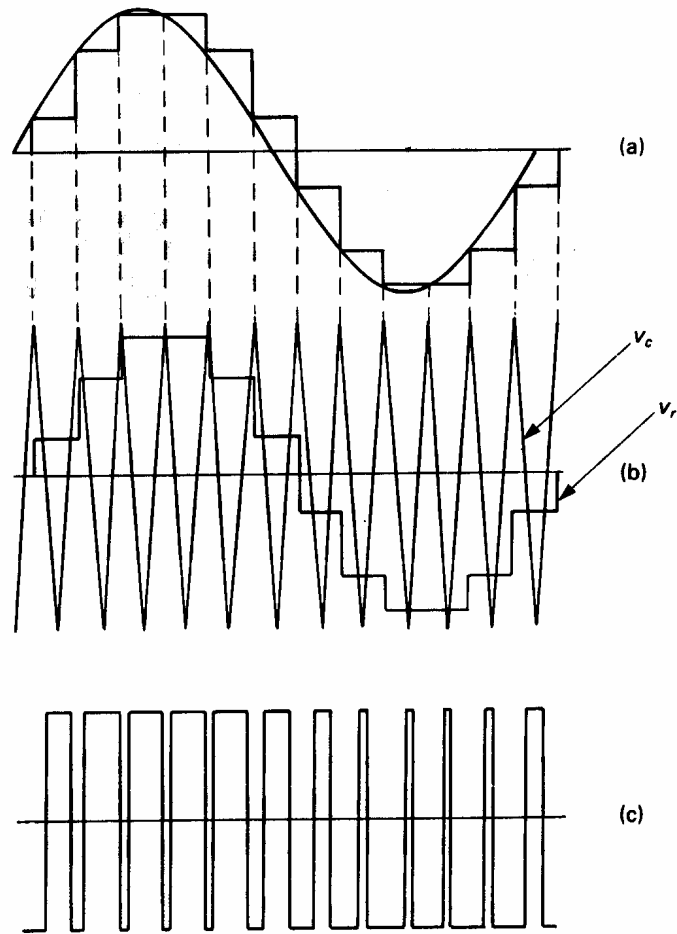


Figura 4.7. PWM por muestreo regular: (a) señal senoidal modulante y versión sample-and-hold; (b) voltajes de entrada del comparador; (c) voltaje de salida del comparador o voltaje de polo [1].

La versión sample-and-hold de la onda modulante tiene una magnitud constante para cada pulso. Por lo tanto, el ancho de pulso es proporcional a la altura del escalón, y el centro de cada pulso ocurre a intervalos uniformemente espaciados. De ahí que se le llame *muestreo regular o uniforme*[1].

En un sistema implementado mediante una memoria ROM, hay una reducción sustancial de memoria requerida, comparado con la técnica de muestreo natural. La figura 4.7 muestra que el número de valores senoidales requeridos para definir un ciclo completo de la versión sample-hold de la onda modulante, es igual a la relación de portadora utilizada; mientras que en un muestreo natural, se requiere de una onda senoidal y de la definición de un ciclo completo en intervalos de 0.5 grados, lo que requiere 720 valores [1].