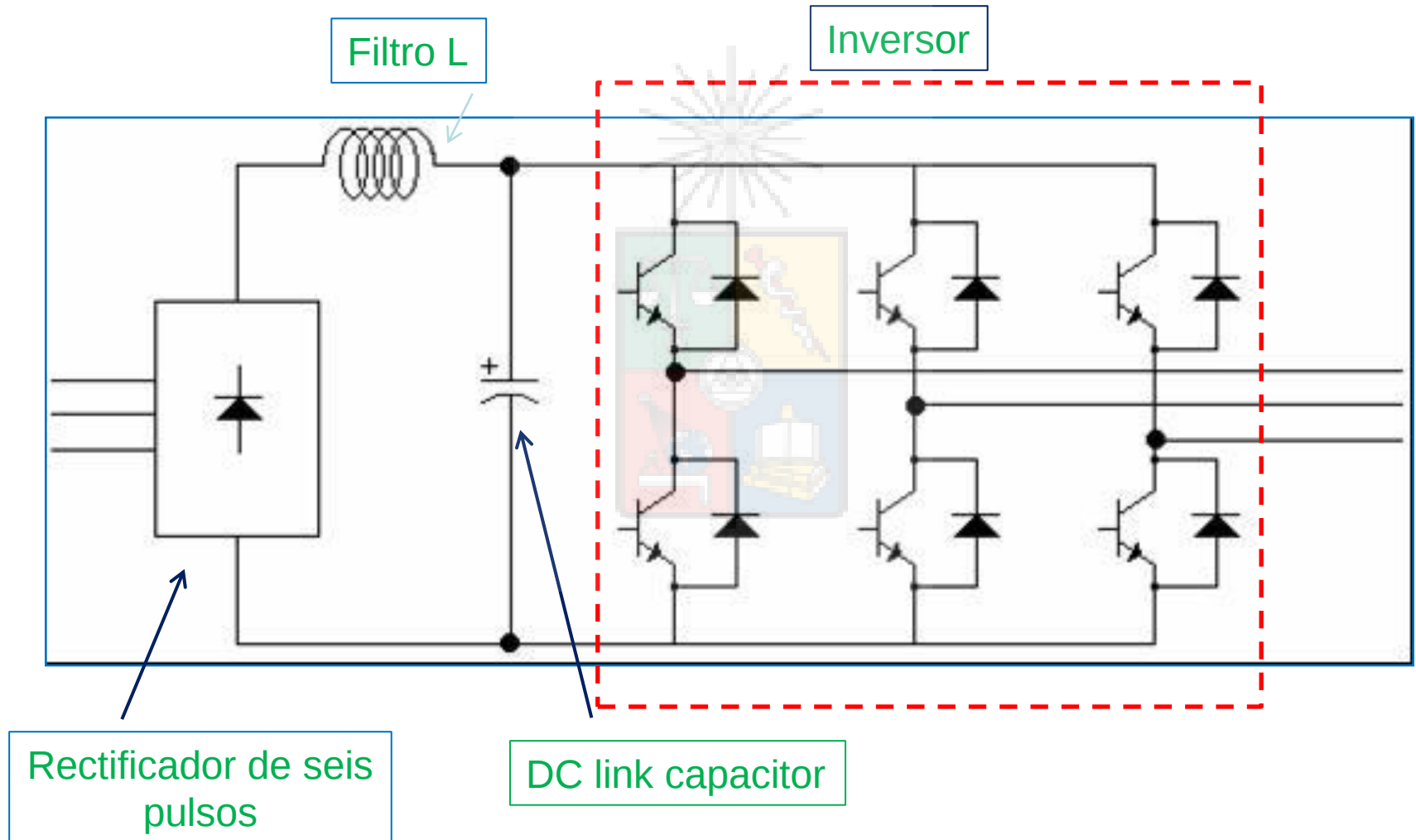


Modulación PWM

Roberto Cárdenas Dobson

Profesor Titular
DIE
Universidad de Chile

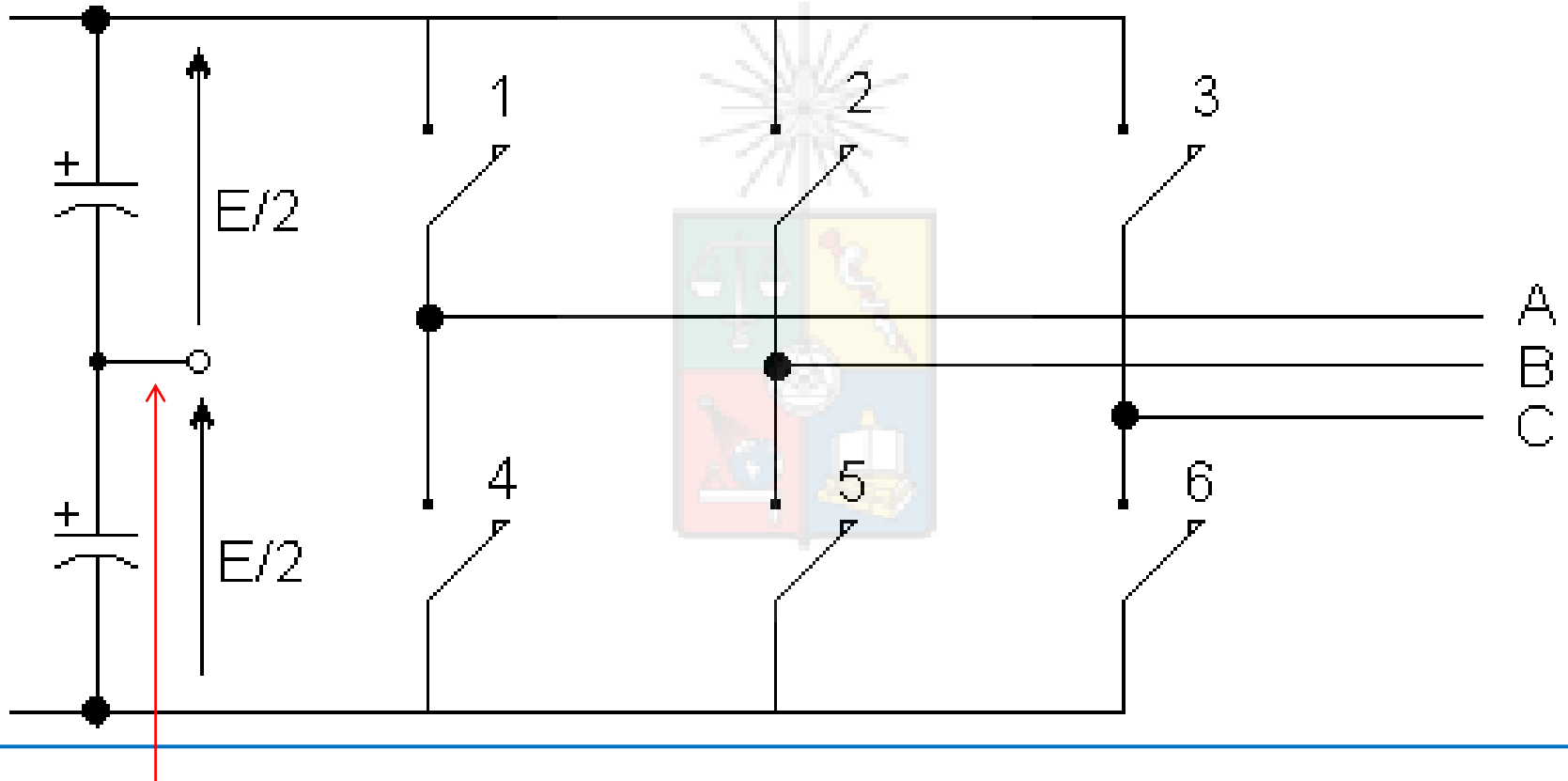
Esquema Típico de un Variador de Frecuencia



Componentes Típicos del Variador de Frecuencia

- La anterior diapositiva muestra el esquema típico de un conversor DC/AC trifásico, denominado inversor o variador de frecuencia, se compone de:
 - Un rectificador trifásico de seis pulsos o de onda completa
 - Una inductancia para limitar las corriente de carga del condensador del enlace DC durante el encendido, y que en régimen cumple la función de filtrado.
 - En conversores de baja potencia en lugar de una inductancia se conecta una resistencia de carga del condensador, la cual se cortocircuita mediante los contactos de un relé que se activa cuando la tensión en el enlace DC alcanza un cierto valor (un 80-90% del valor nominal).
 - Un condensador electrolítico.
 - El inversor propiamente tal compuesto de seis interruptores y diodos en antiparalelo.

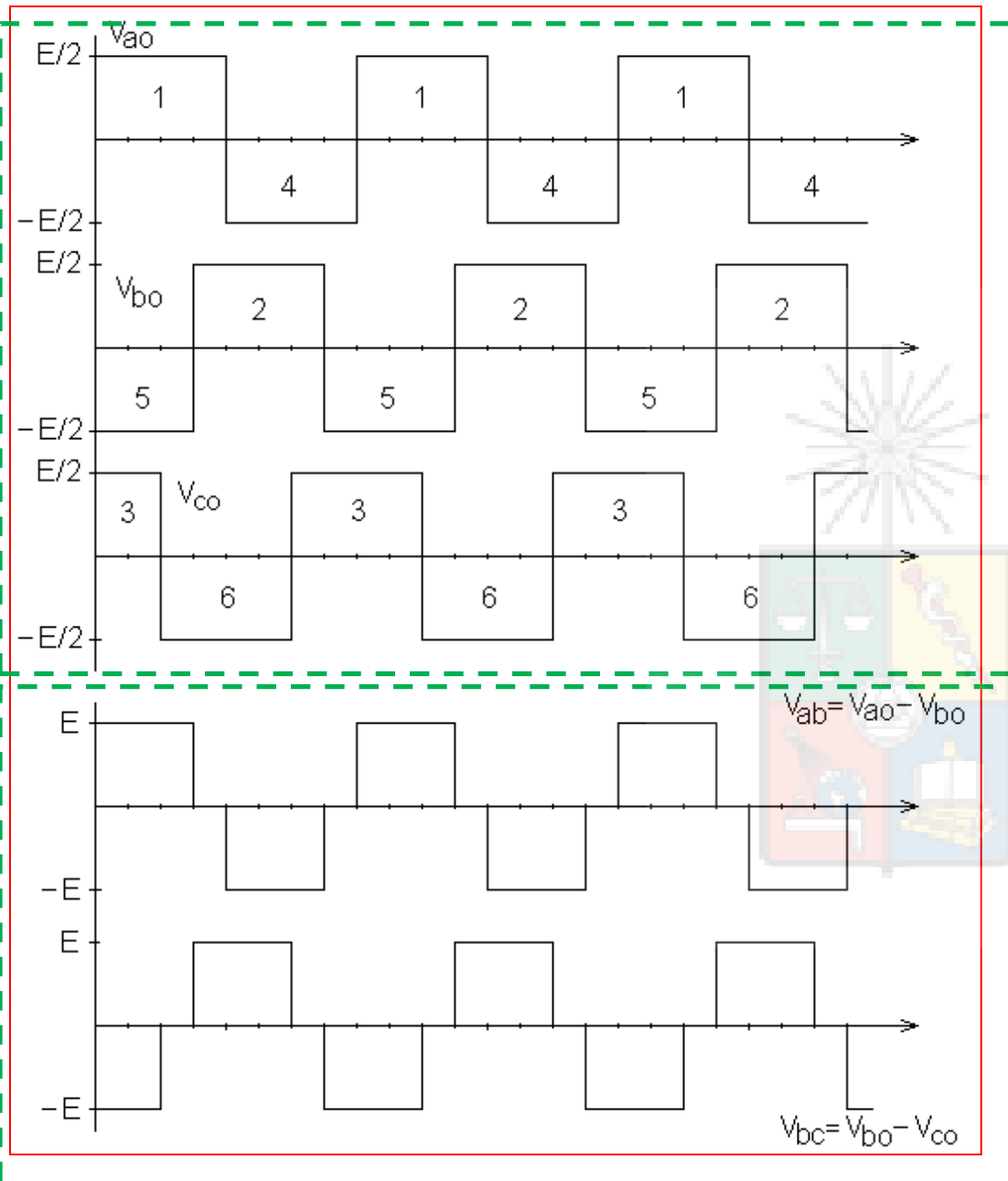
Modulación por Ancho de Pulso



Neutro
ficticio



Desaparece su influencia al considerar tensiones fase-fase



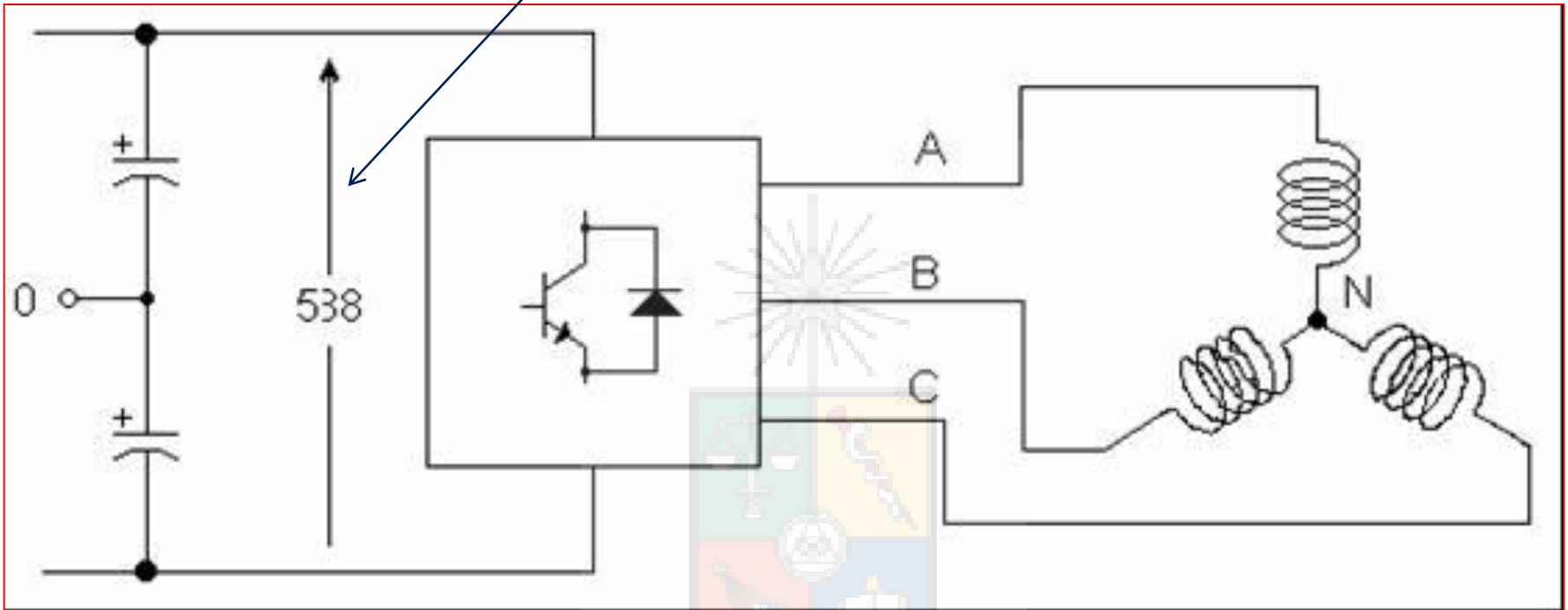
Tensiones fase-neutro ficticio

Modulación tipo onda
cuasi-cuadrada

(En la actualidad se usa en muy
pocas aplicaciones)

Tensiones fase a fase

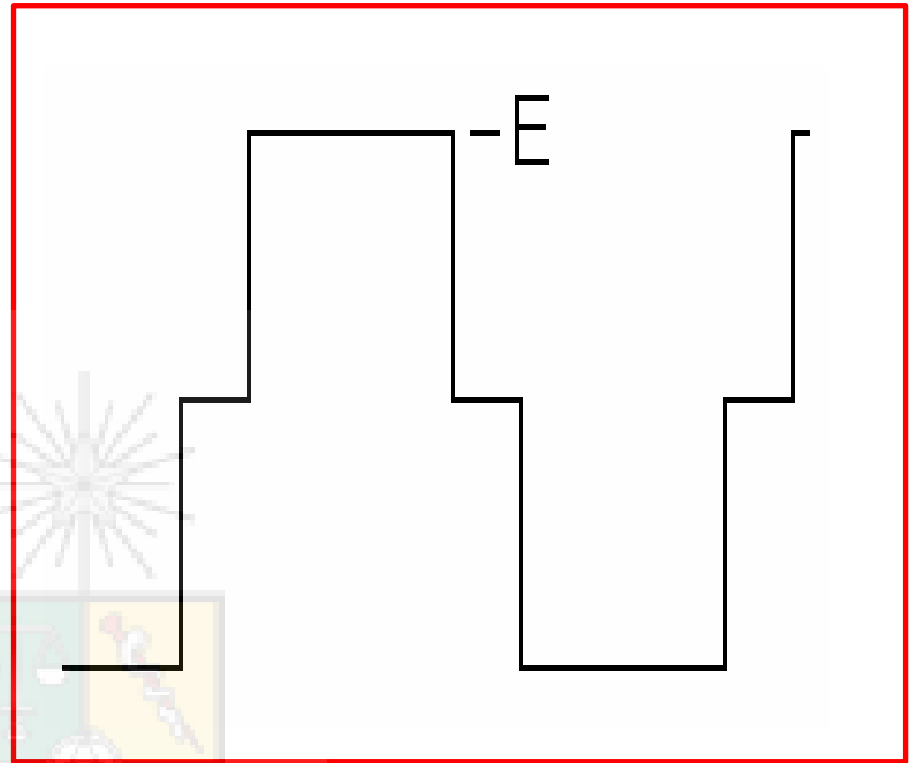
Recuerde, habitualmente se asume que el condensador se carga a E_m , en nuestro caso 380×1.4142 (raíz de dos).



Debido a la forma de onda de los voltajes V_{ao} , V_{bo} , y V_{co} las tensiones V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} son lo que se denomina onda cuasi cuadrada. En esta onda cuasi cuadrada la tensión fundamental es:

$$R.M.S = \frac{\sqrt{6}}{\pi} E$$

≈ 0.7797

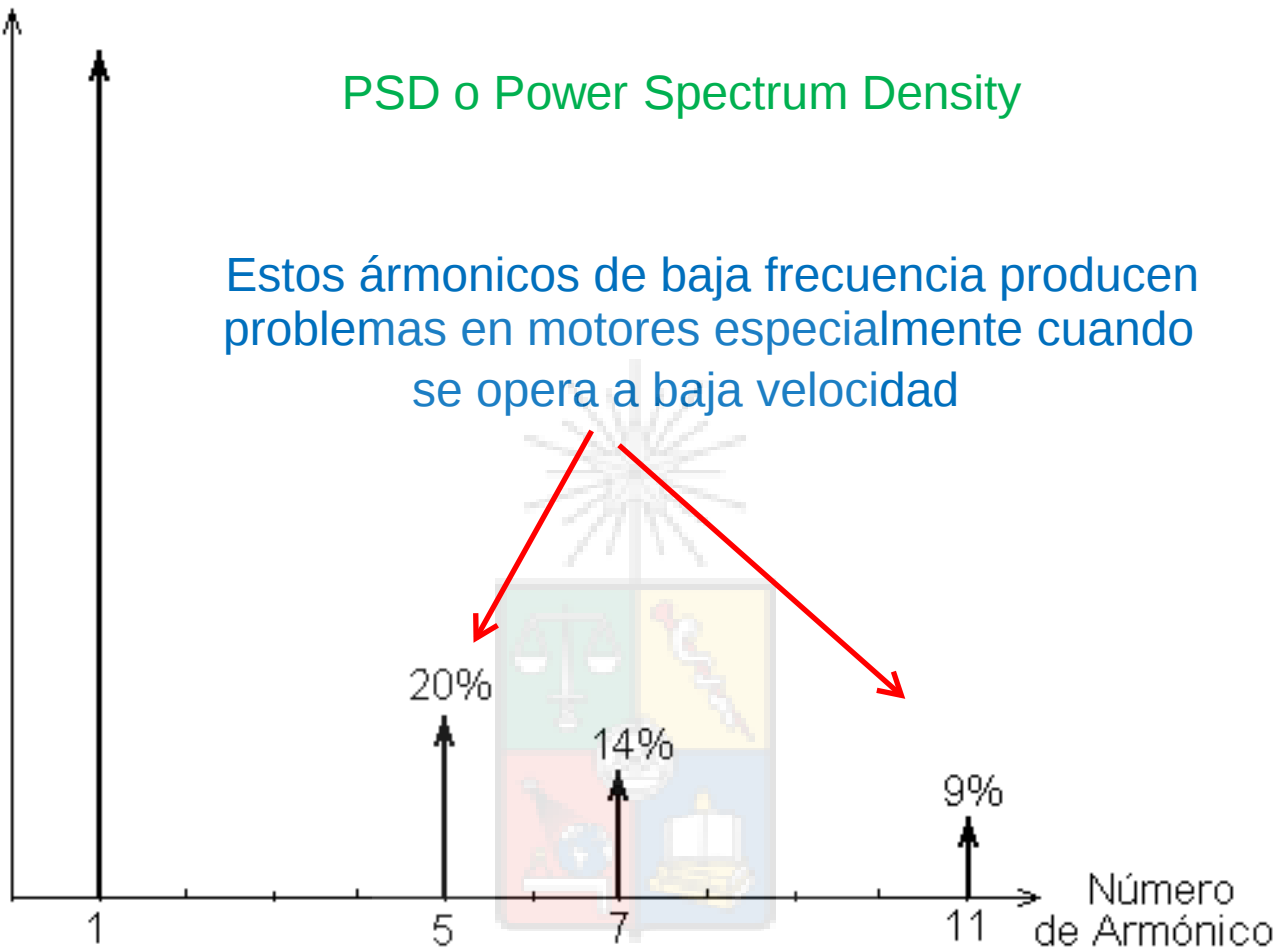


Tensión línea a línea

Si la tensión de línea a la entrada del rectificado es 380V, entonces la tensión en el enlace DC será aproximadamente de 537(V) y por lo tanto la tensión máxima fundamental del voltaje de línea del motor será 419V (para esta onda cuasi-cuadrada).

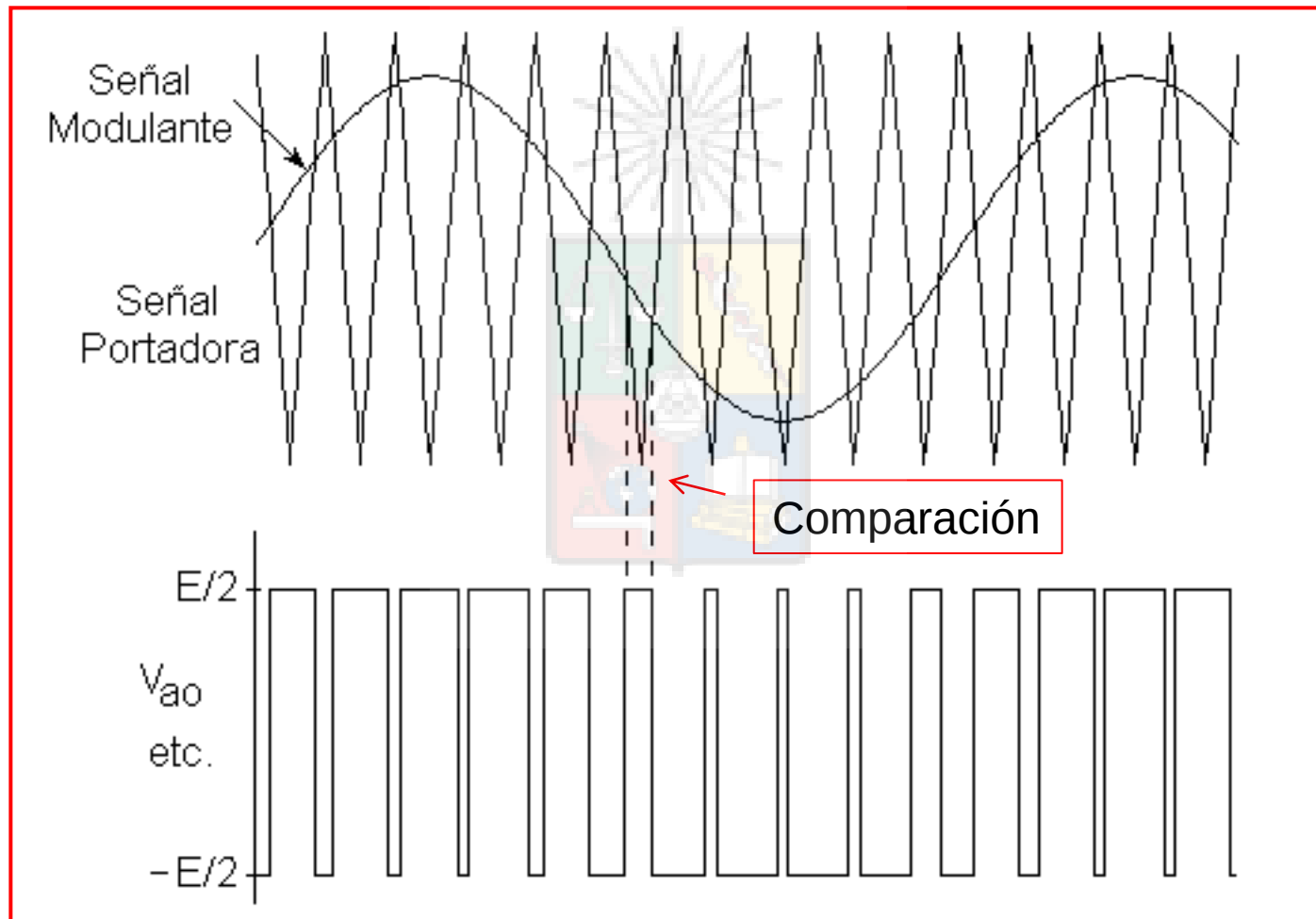
PSD o Power Spectrum Density

Estos ármónicos de baja frecuencia producen problemas en motores especialmente cuando se opera a baja velocidad



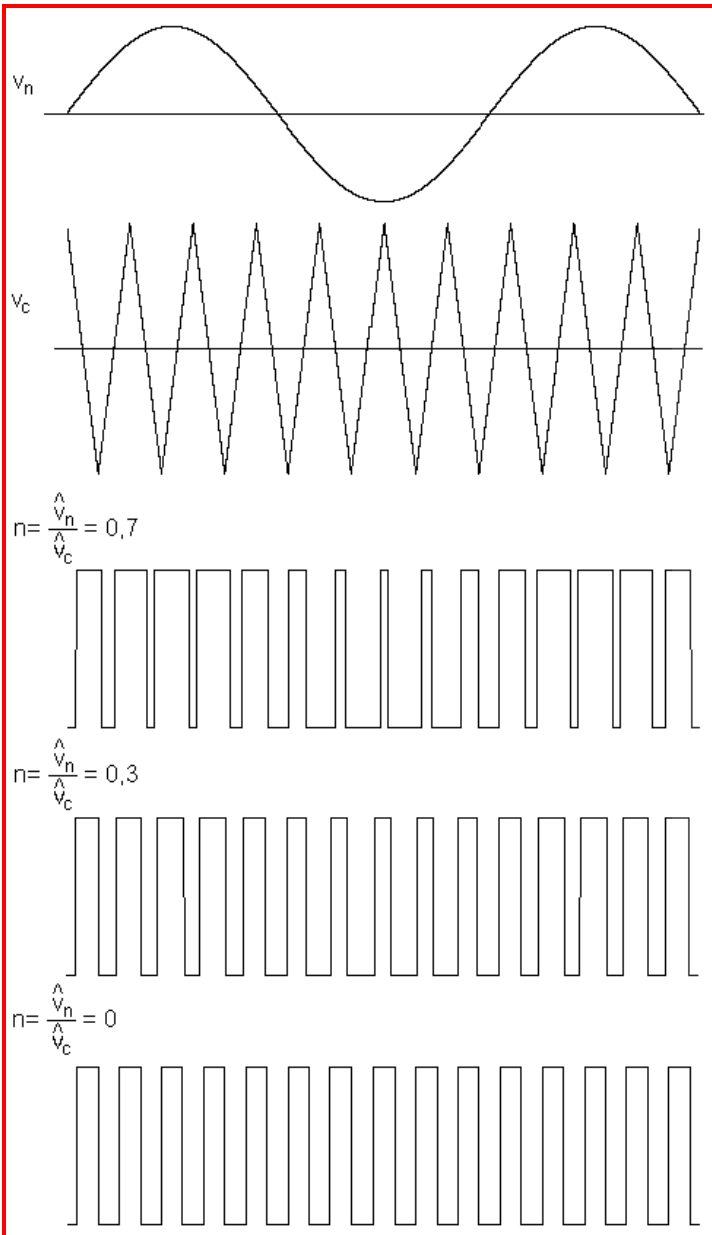
El principal problema es la amplitud de los armónico de bajo orden. Aproximadamente el 35% de la potencia de entrada al motor se debe a los armónicos, lo cual produce problemas especialmente a bajas velocidades.

Modulación por ancho de pulso

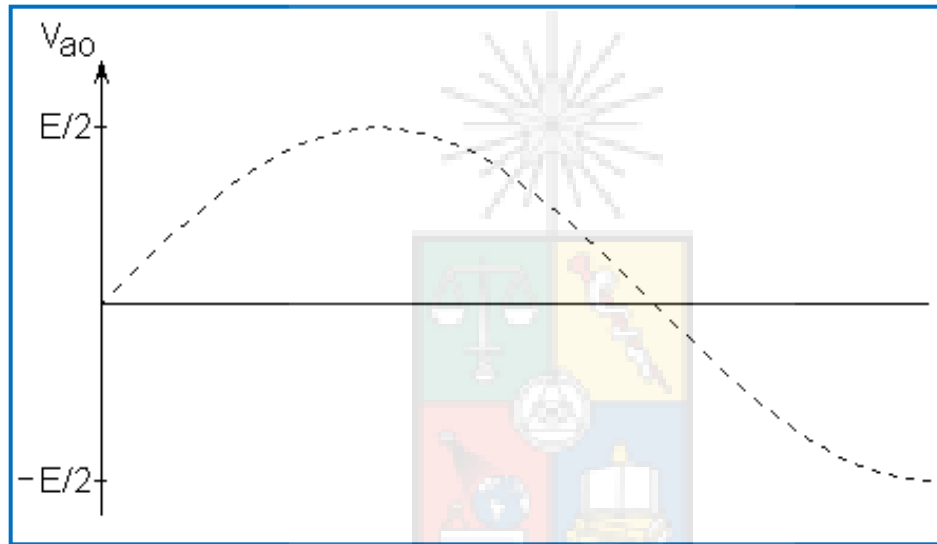


Se define m como el índice de modulación:

$$m = \frac{\text{Amplitud de la señal a modular}}{\text{Amplitud de la portadora}}$$



Si $E=537(\text{V})$, entonces $V_{\text{línea}} = 329(\text{V})$. Para obtener más voltaje en los terminales del inversor, se debe operar con $m>1$. Esto se denomina sobremodulación.



$$\hat{V}_{ao} = \frac{E}{2}$$

;

$$V_{ab} \text{ (max)} = \frac{\sqrt{3}E}{2\sqrt{2}} = 0.61E$$

¿Cómo se llega al valor de 329V?

- El condensador del dc-link se carga a $E = \sqrt{2} \times 380V = 537.4$ por lo tanto $E/2$ es $\approx 269V$
- Si el valor peak de la tensión fase neutro es 269V, el valor rms corresponde a $V \approx 190V$.
- Con este valor la tensión línea a línea máxima que puede sintetizar el inversor corresponde a $\approx 329V$.

¿Qué problemas produce este voltaje de salida máximo de 328-329 volts?

- Al inversor ingresa un voltaje de 380V rms línea a línea y a su salida produce un voltaje de 328-329V rms máximo.
- Por lo tanto los motores de inducción comerciales que están diseñado para 380V, 50Hz, son alimentados con una tensión que es menor en aproximadamente 14%.
- Esto significa que a velocidad nominal (cerca de 1500rpm para 4 polos) el motor entregará menor torque (o par).

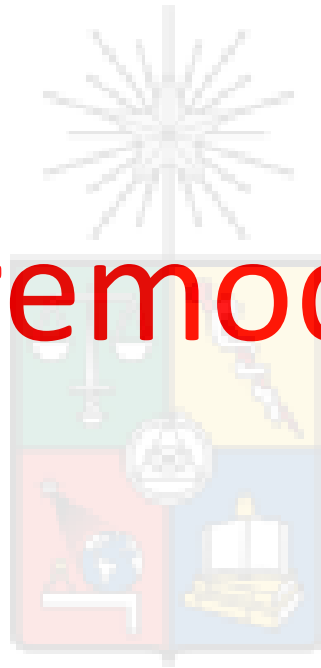
Otros Efectos

- El valor máximo de 328V-329V rms para la fundamental es teórico. Existen otros efectos que reducen ese voltaje máximo. Por ejemplo:
- ***Pulse dropping***, el tiempo de encendido/apagado es muy corto, menor a un mínimo. Por lo tanto ese pulso se elimina.
- **Tiempos muertos**. Se insertan tiempos muertos para evitar cortocircuitos entre el interruptor de arriba y el de abajo.
- **Caídas de tensión** en los semiconductores, reduciendo el voltaje efectivo del dc-link que puede ser aplicado en la salida.

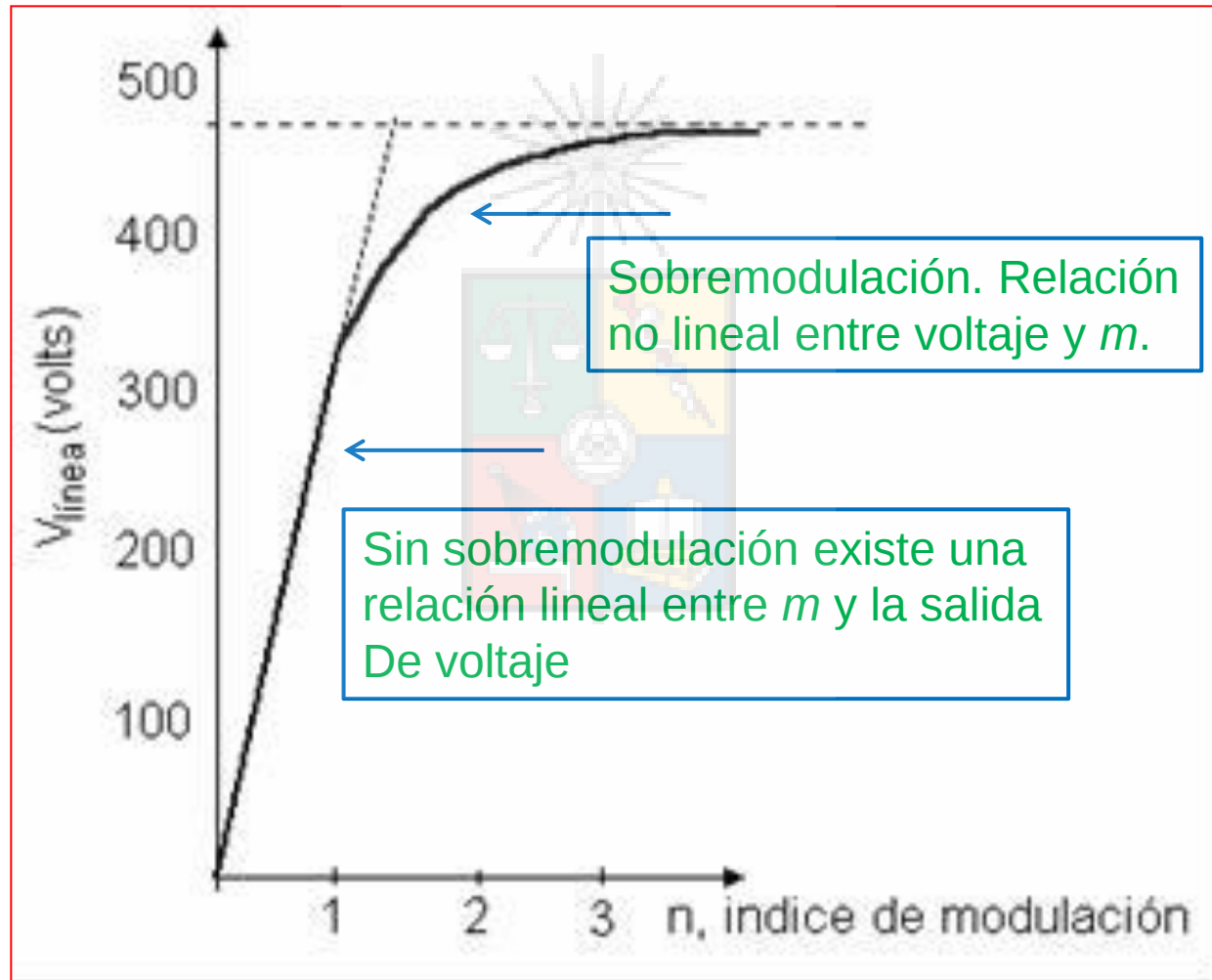
¿Cómo aumentar el voltaje de salida?

- Una (**mala**) solución para aumentar el voltaje de salida es sobremodular, es decir trabajar con un índice de modulación alto. Se puede aumentar el voltaje rms bastante mas alla de la fundamental pero con altos componentes armónicos de baja frecuencia (5to, 7mo, 11vo, etc.).
- La otra solución es inyectar terceros armónicos. En **teoría** esto permite alcanzar una ganancia aprox. unitaria en el variador (ingresa 380V y sale 380V).

Sobremodulación

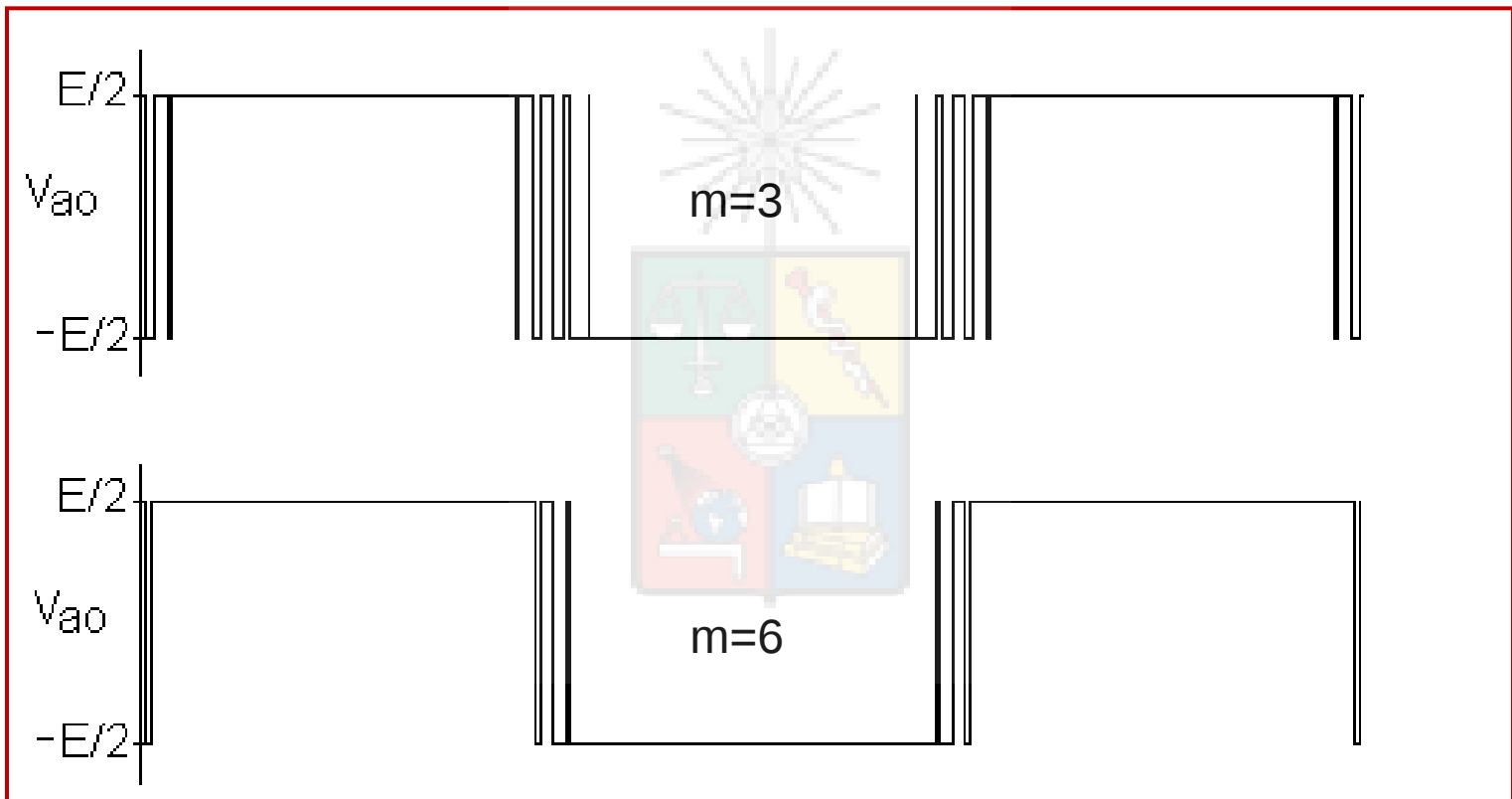


Modulación por ancho de Pulso



Este dibujo no está a escala

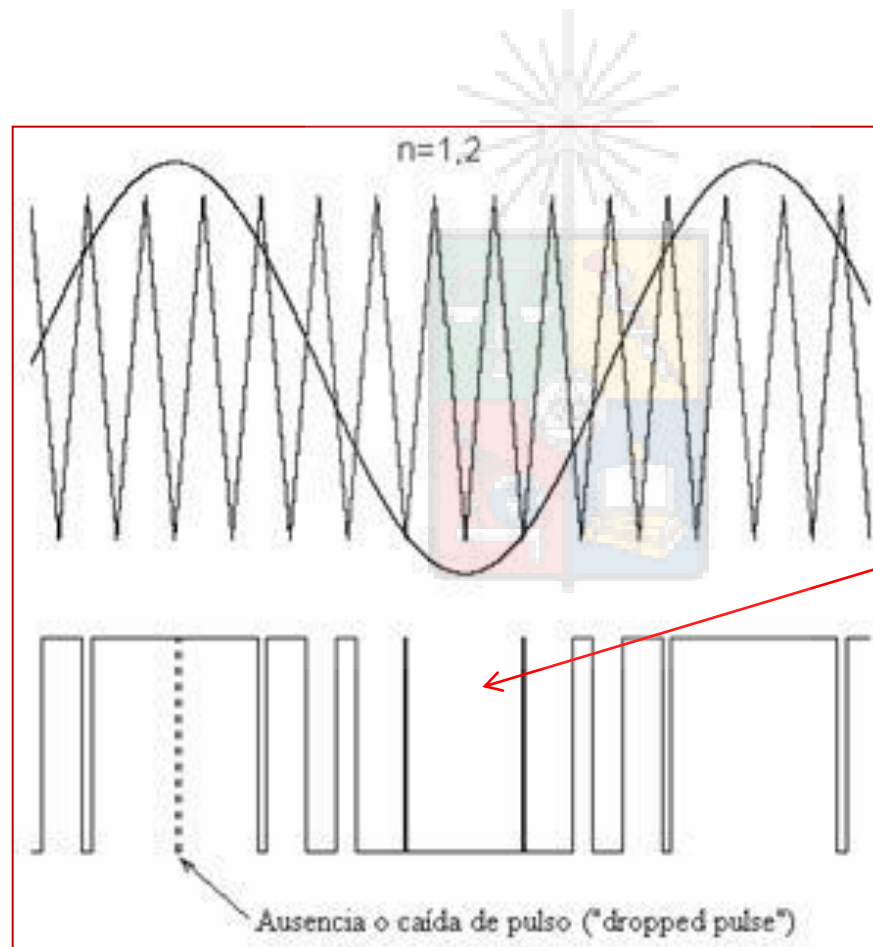
A medida que la sobremodulación aumenta la señal se aproxima a una onda cuadrada. Esto significa que aumenta el contenido armónico.



Pulse Dropping



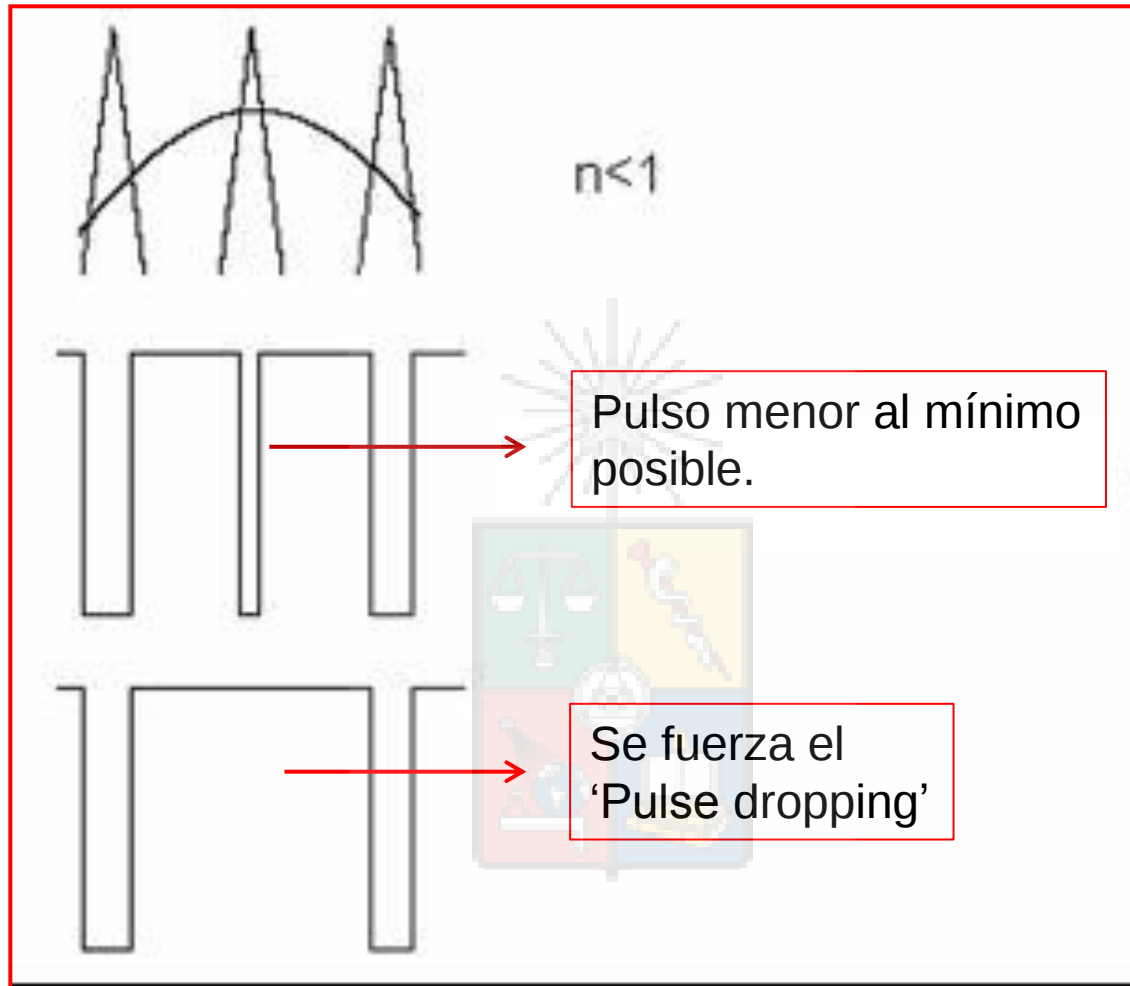
En sobremodulación algunos pulsos desaparecen de la señal PWM, lo cual se denomina habitualmente 'pulse dropping'



pulso
eliminado

El efecto de pulse dropping también ocurre para índices de modulación menor que 1. A medida que $m \rightarrow 1$, algunos pulsos se tornan muy angostos.

Los interruptores del inversor tienen un requerimiento respecto del mínimo ancho de pulso, dado que se requiere un tiempo para el apagado del dispositivo. Por lo tanto, cuando el ancho de los pulsos es menor que el ancho de pulso mínimo permisible para los semiconductores de potencia, dicho pulso se debe ignorar. Esto es equivalente a provocar 'pulse dropping'.



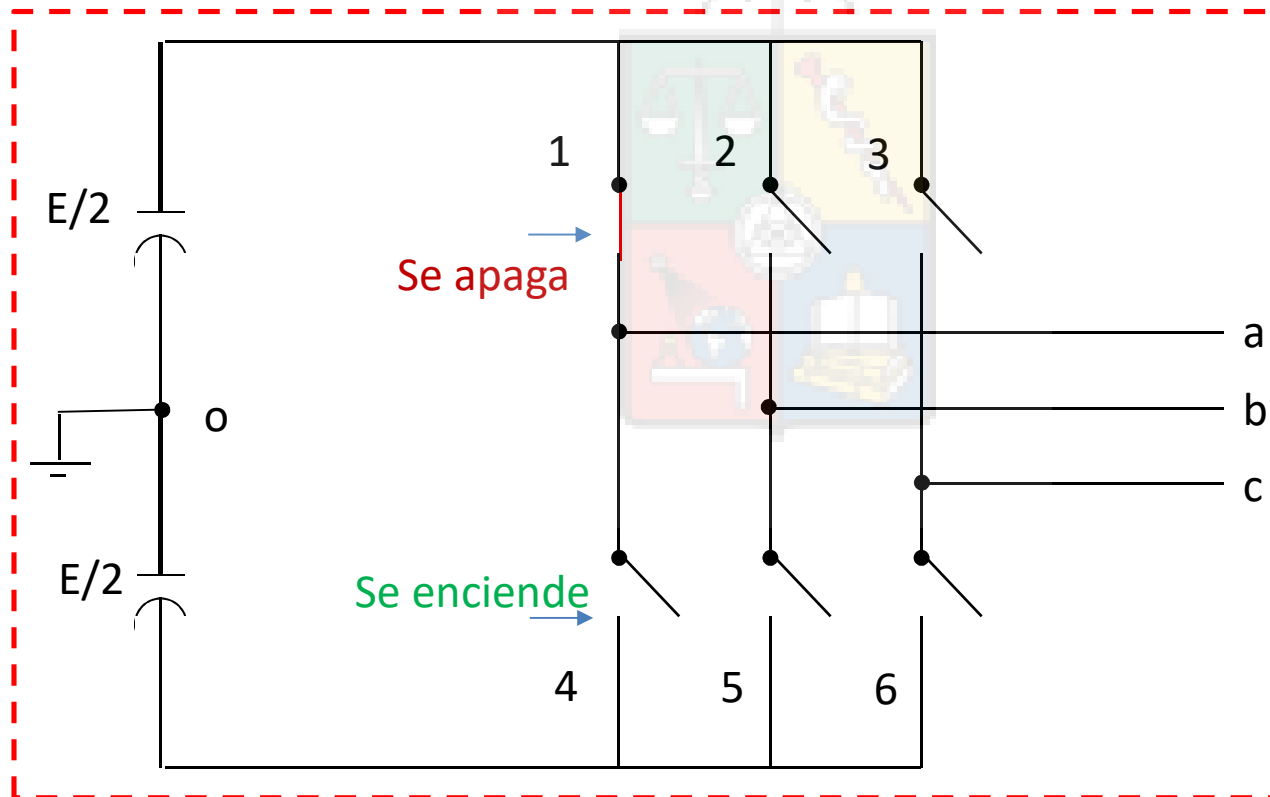
‘Pulse dropping’ está asociado a la aparición de armónicos de baja frecuencia

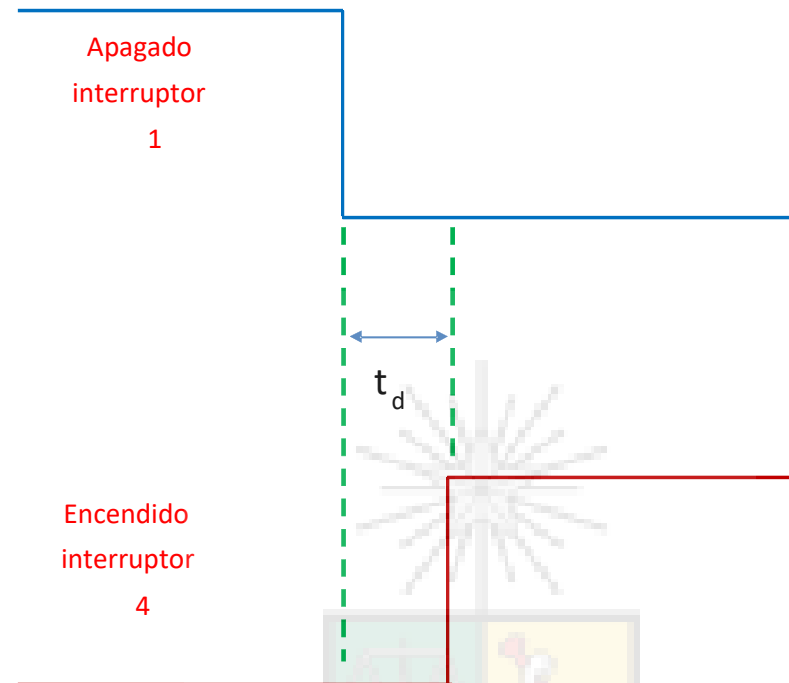
Tiempos Muertos o Dead Time



Tiempos Muertos o *Dead-Time*

- Si se encuentra el interruptor 1 cerrado y se debe apagar para encender el 4 existe el riesgo de un cortocircuito.



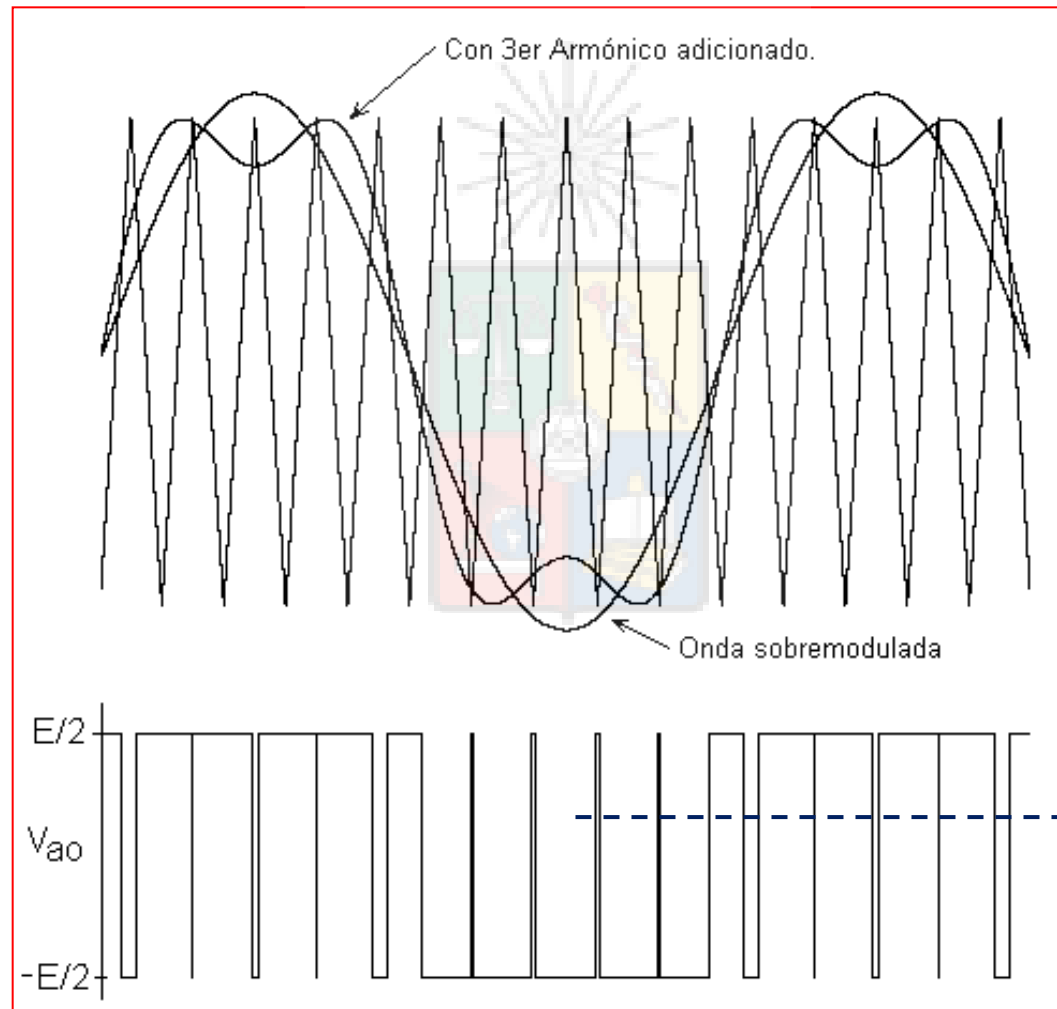


Para evitar el cortocircuito se inserta un *dead time*. Al menos para este conversor (*2-level voltage source converter*) se debe insertar un tiempo muerto para cada IGBT que se enciende (no el que se apaga, el cual debe apagarse lo más rápido posible).

La magnitud de este tiempo depende de la tecnología del dispositivo. Para transistores bipolares nosotros utilizábamos desde $10\mu\text{s}$ a $14\mu\text{s}$. Para IGBTs lo normal es un valor entre $2\mu\text{s}$ a $4\mu\text{s}$. En general se debería seguir las especificaciones de la hoja de datos para ajustar ese valor.

El tiempo muerto produce una distorsión en el PWM y es uno de los efectos no lineales que se asocia a la aparición de armónicos de baja frecuencia aunque no exista sobremodulación.

Inyección de Tercer Armónico



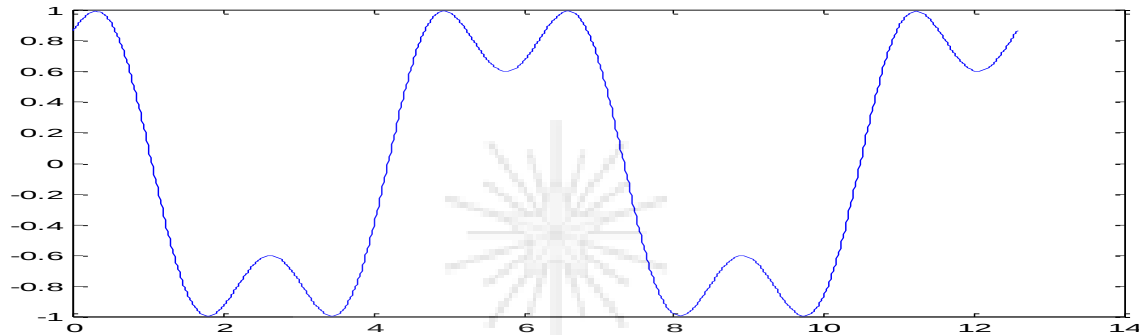
No existe 'Pulse dropping'

*Inyección de Secuencia Cero para mejorar
el índice de modulación*

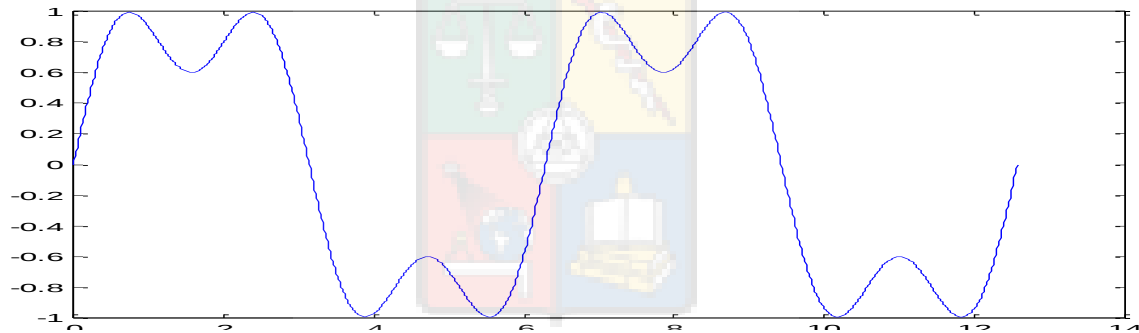


Inyección de Secuencia cero

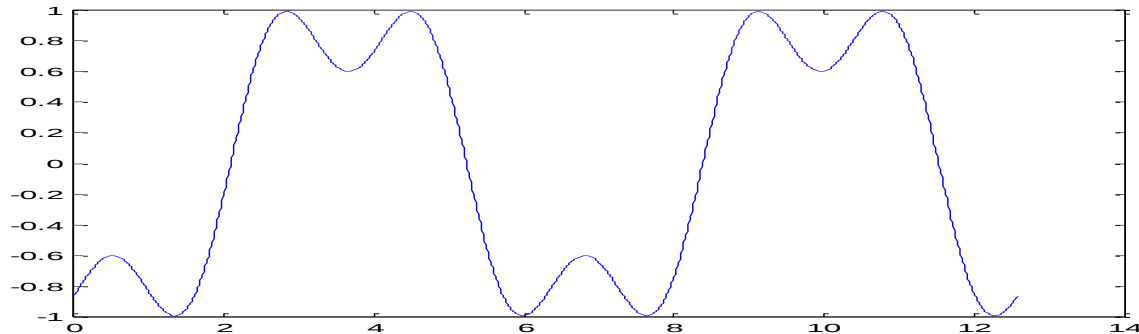
V_{ao}



V_{bo}

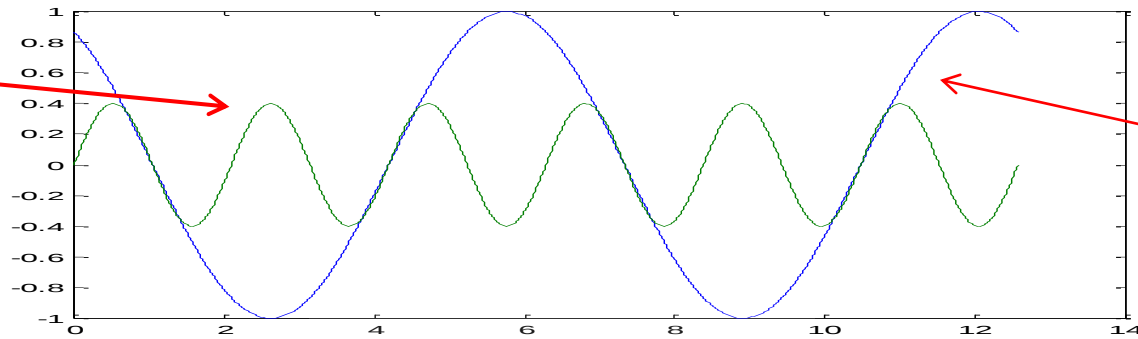


V_{co}

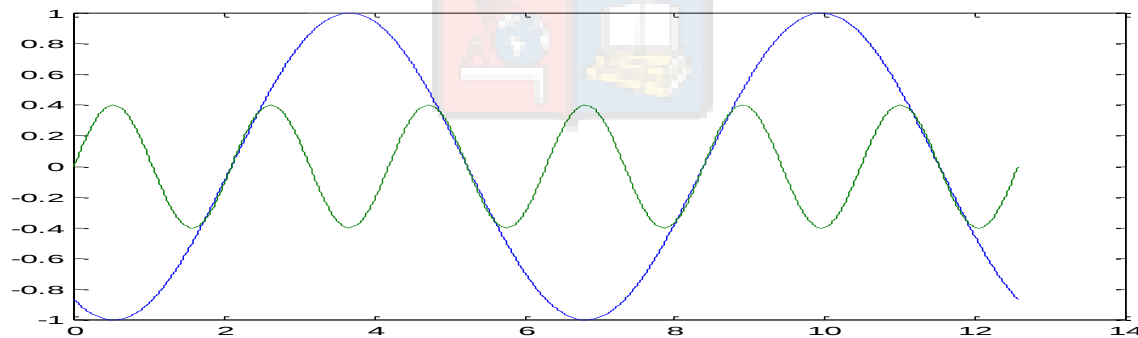
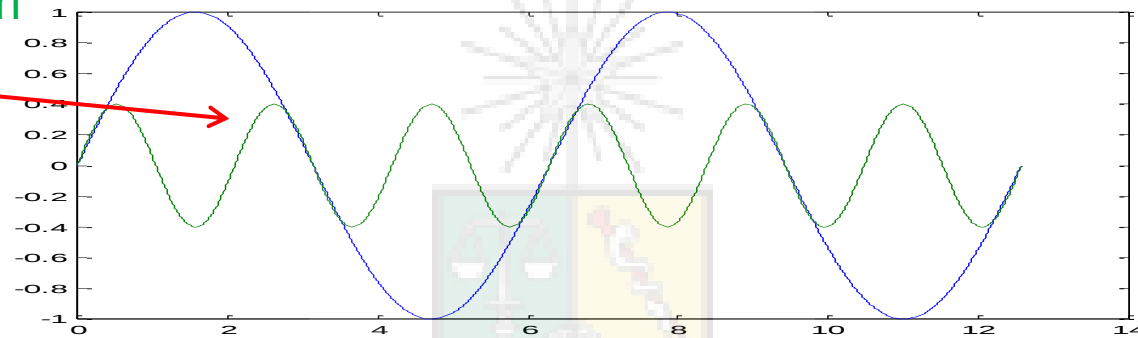


Tercer armónico

Fundamental



Tercer armónico
fase b en fase con
el de la fase a.



**Nótese que las componentes de tercer armónico se encuentran en fase
Por lo tanto desaparecen de las tensiones línea a línea**

Método Min-Max



Método Min-Max

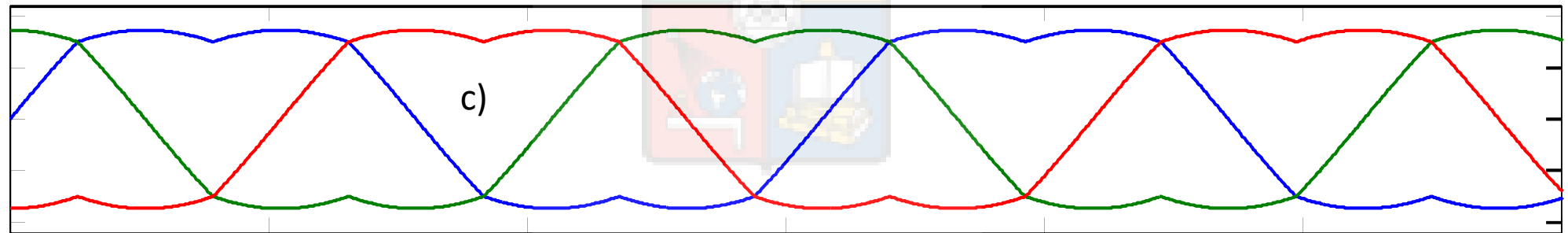
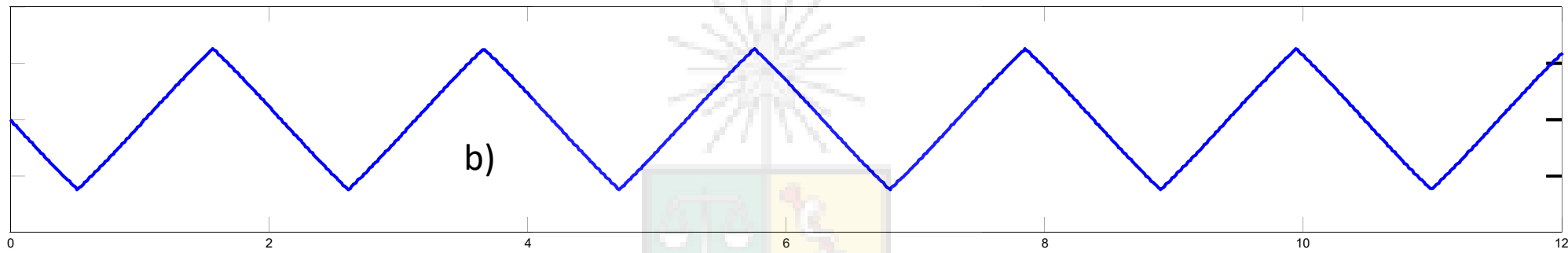
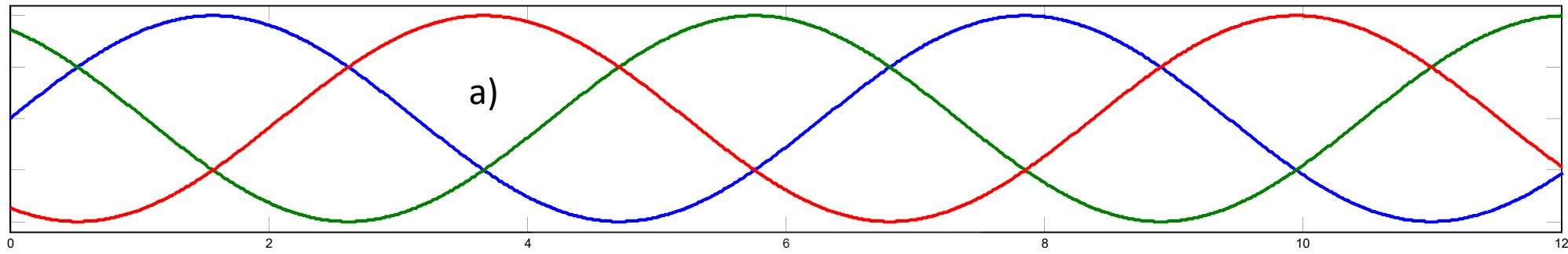
$$v'_{ao} = v_{ao} - v_o$$

$$v'_{bo} = v_{bo} - v_o$$

$$v'_{co} = v_{co} - v_o$$

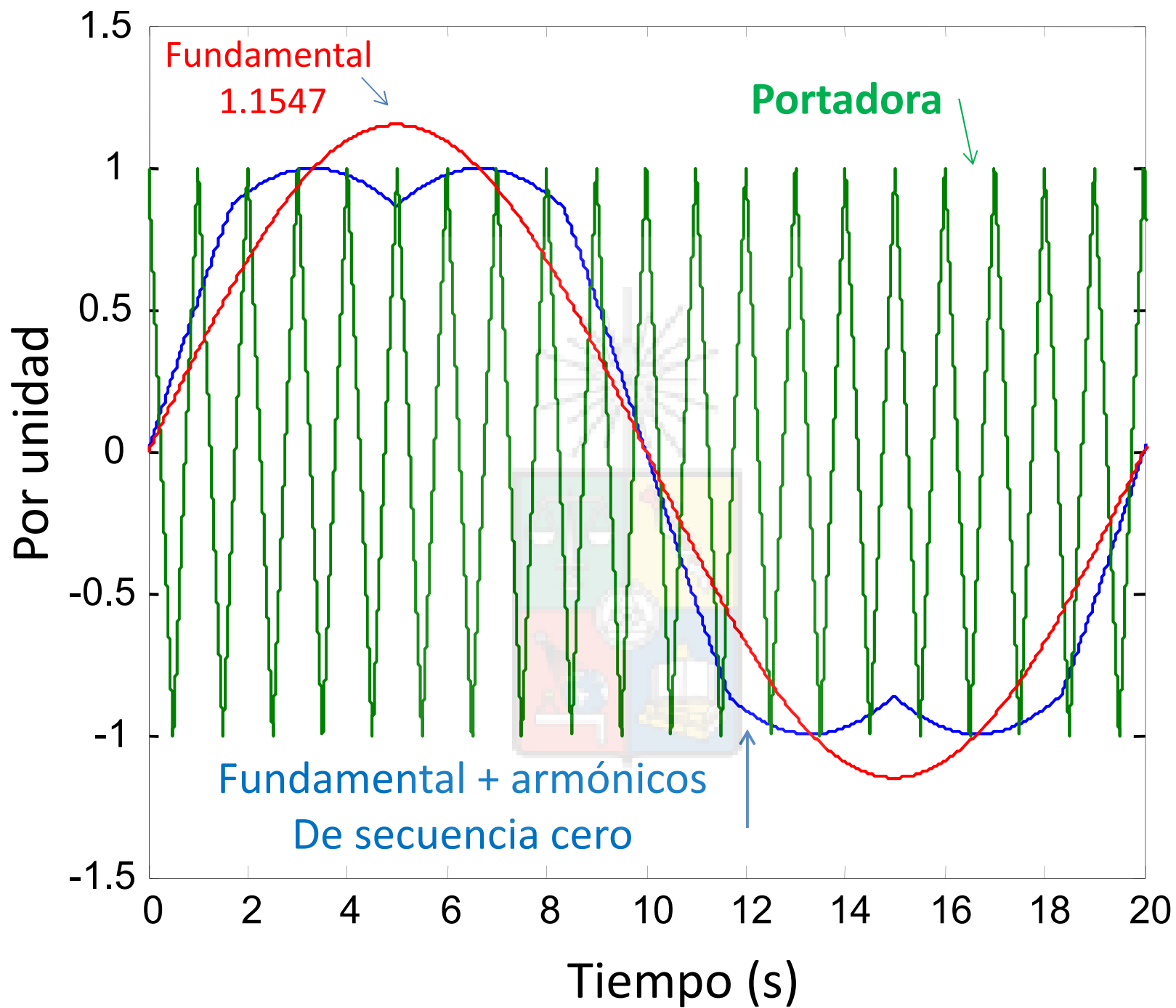
$$v_o = \frac{\max(v_{ao}+v_{bo}+v_{co})+\min(v_{ao}+v_{bo}+v_{co})}{2}$$

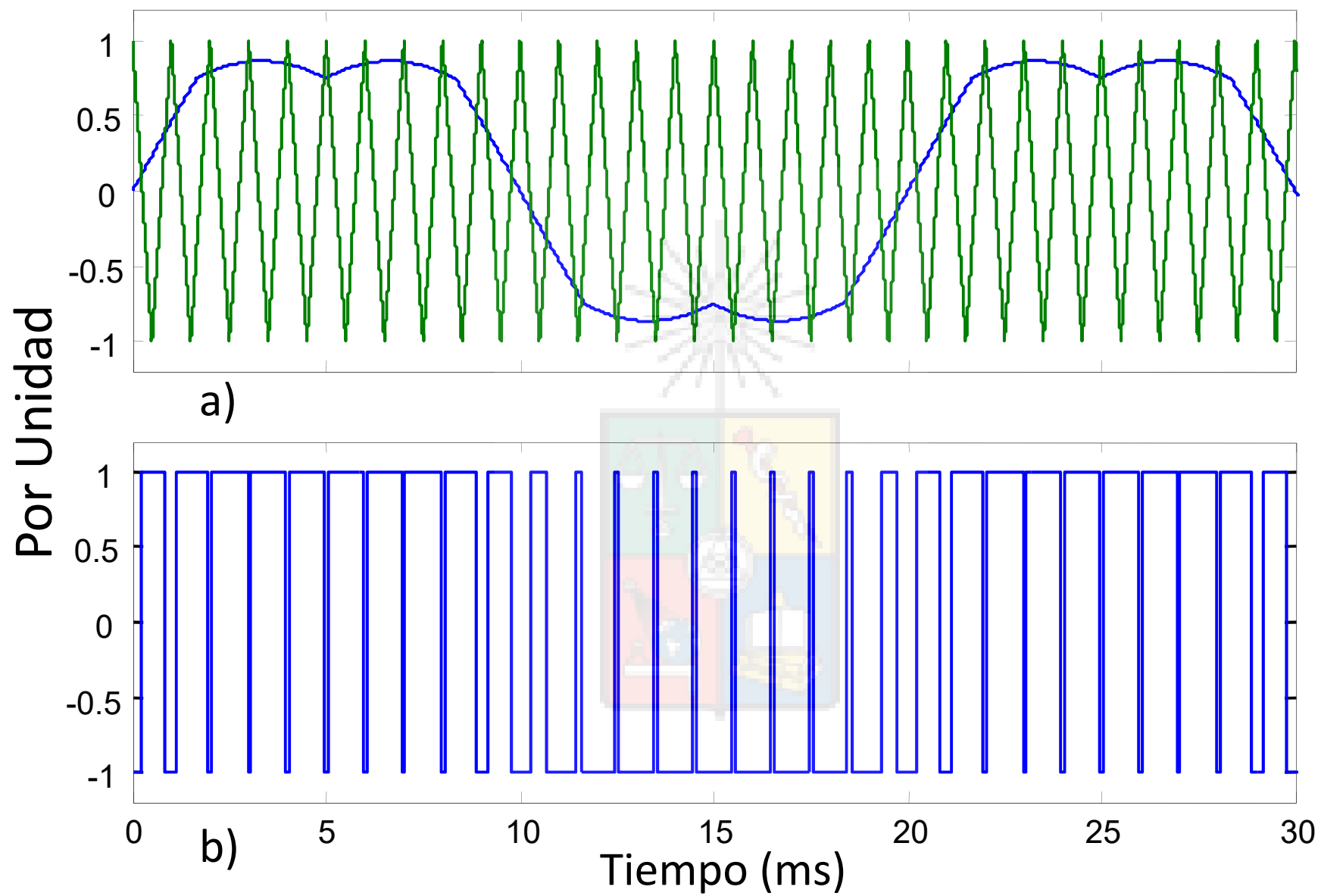
- Las tensiones v_{ao} , v_{bo} , v_{co} corresponden a las tensiones que ingresan al modular. Habitualmente estas tensiones son producidas por controladores .
- Las tensiones fase-neutro ficticio que se modulan son v'_{ao} , v'_{bo} , v'_{co} . La componente de secuencia cero desaparece de las tensiones línea a línea que se entregan a la carga.



Angulo en rad/seg

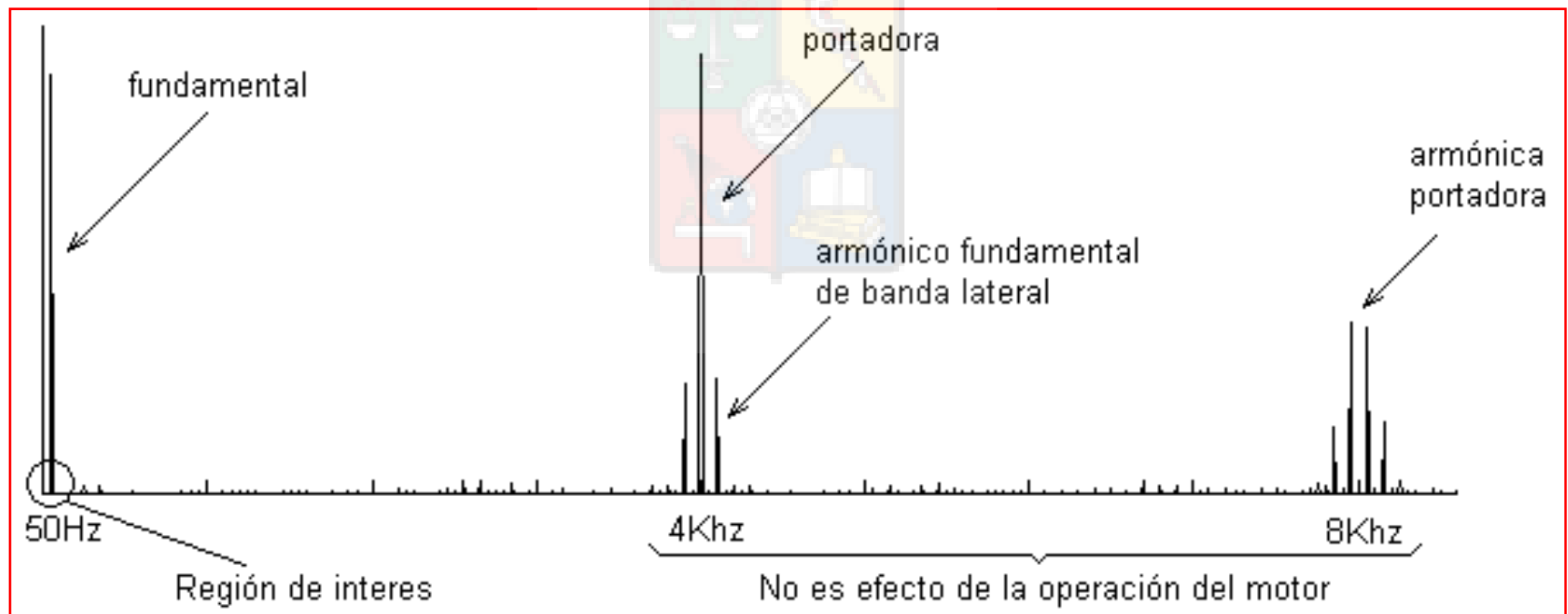
a) Señales balanceadas entregadas por el sistema de control al modulador PWM. b) Tensión V_0 calculada utilizando Min Max. c) Señales a modular incluyendo la secuencia cero V_0 .





PSD Típico de modulación PWM

Además de los armónicos de la fundamental, existen los armónicos de la portadora y bandas laterales de armónicos alrededor de cada armónico de la portadora.

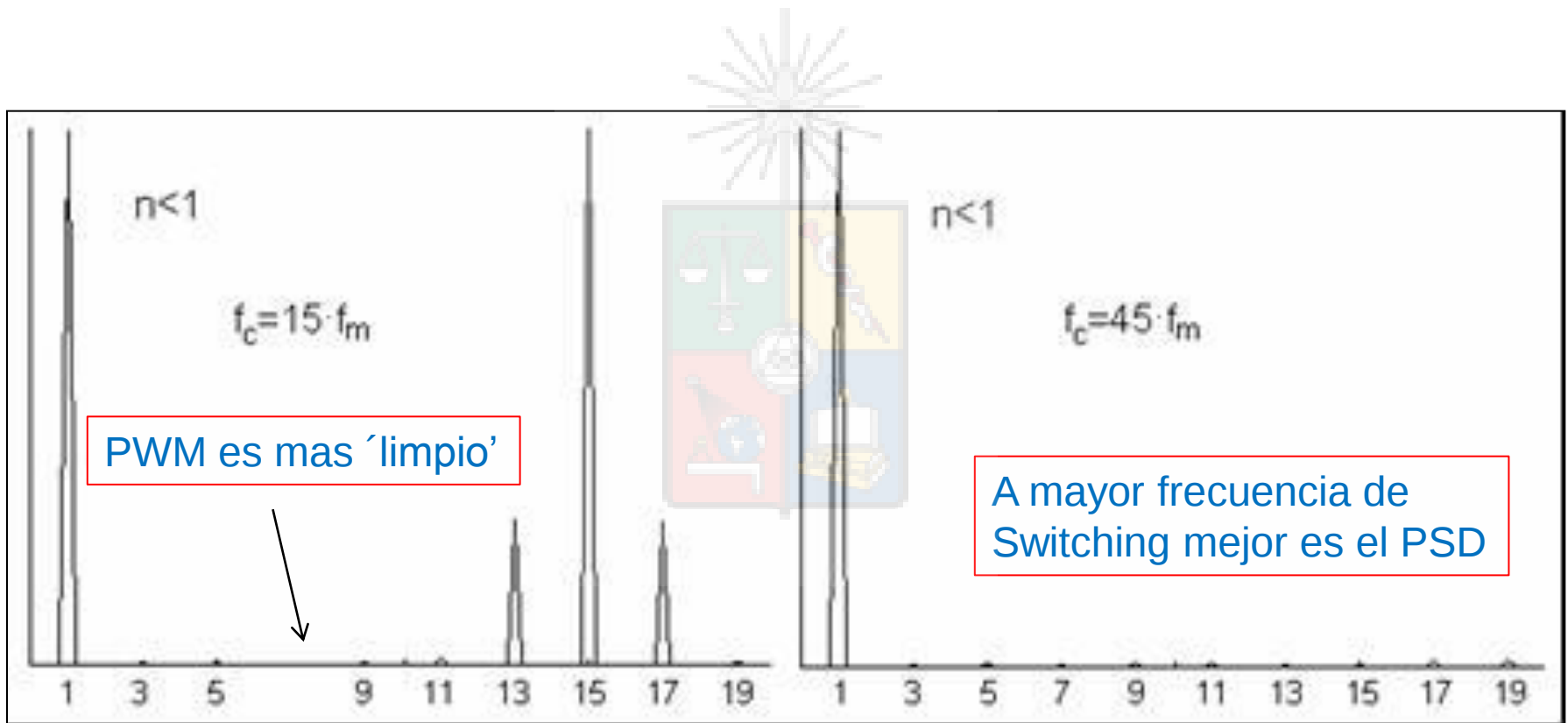


Otras Consideraciones

PWM Sincrónico

- Cuando la razón entre la frecuencia de la portadora y la frecuencia de la señal modulante ($m_f = f_c / f_m$) es un número entero (múltiplo de 3 para el caso trifásico) entonces se tiene un PWM del tipo sincrónico, es decir se tendrá PWM sincrónico para $f_c = 15, 21, 36, 60, \text{ etc, } \times f_m$.

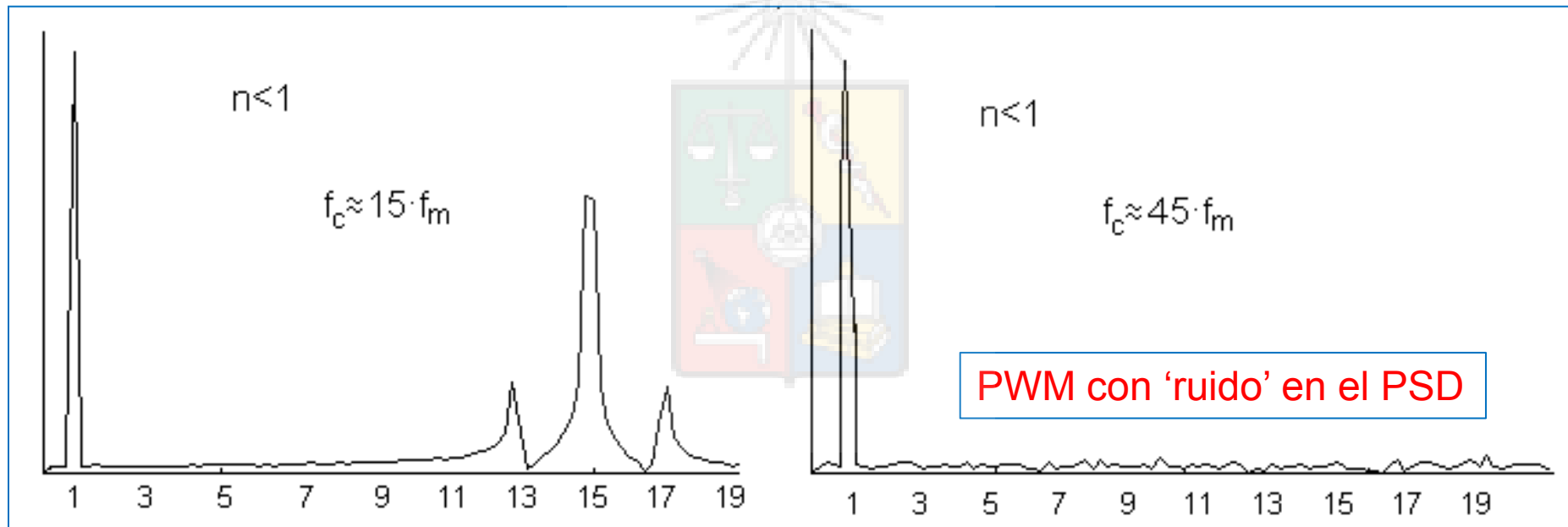
PWM Sincrónico



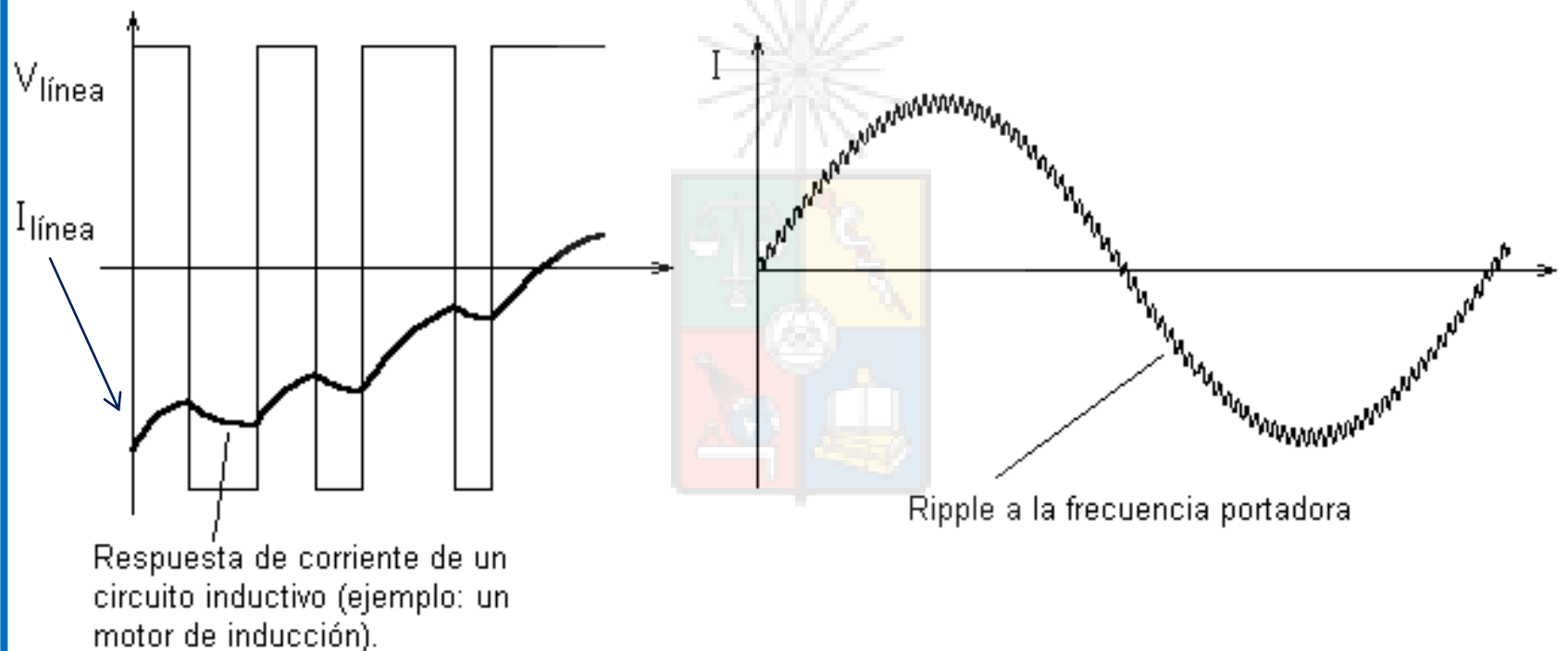
PWM Asincrónico

- En este caso la razón entre la frecuencia de la señal portadora y la frecuencia de la señal modulante no es un número entero múltiplo de tres.
- Por esto parecen armónicos pares en la tensión de línea debido a la asimetría en la forma de onda de la señal PWM.
- También aparecen sub-armónicos, (armónicos cuya frecuencia es menor que la fundamental).
- En general el PWM asincrónico es mas utilizado que el sincrónico en inversores.

PWM Asincrónico



Operación alimentando un Motor



Conclusiones

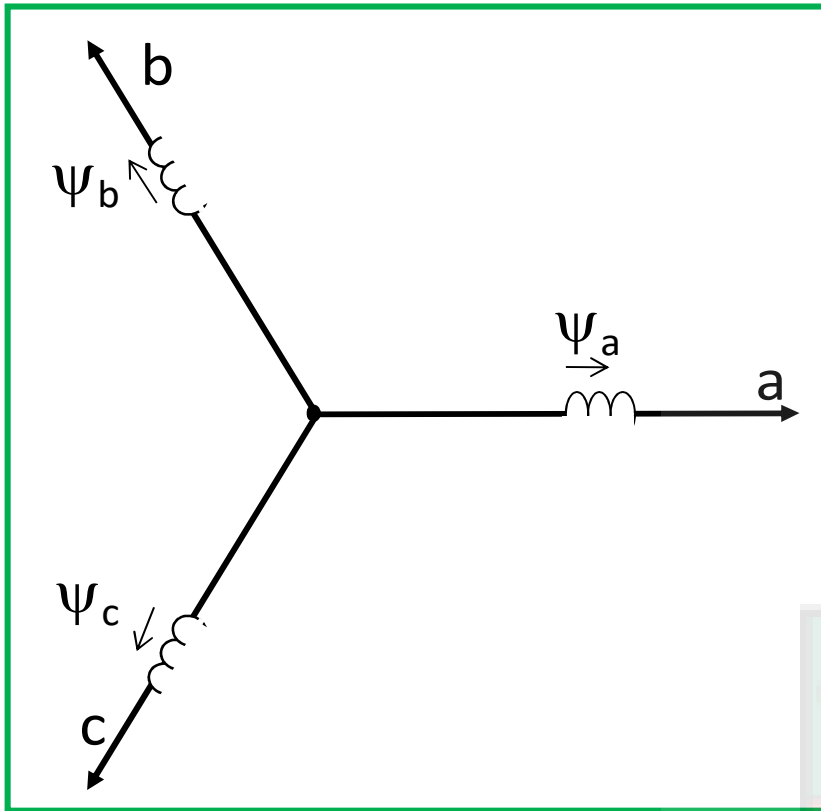
- Con PWM, los interruptores del inversor sintetizan ondas con alto componente sinusoidal para la adecuada operación de, por ejemplo, un motor.
- El contenido armónico de baja frecuencia es bastante menor que para el caso de la señal cuasi-cuadrada.
- El contenido armónico de baja frecuencia se reduce a medida que la razón entre la frecuencia de la portadora y la frecuencia de la señal modulante aumenta.
- PWM puede ser sincrónico o asincrónico.
- La sobre-modulación, que permite obtener un mayor voltaje a la salida es complicada por el efecto de 'pulse dropping'. El índice de modulación se puede aumentar en aproximadamente 15,5% considerando inyección de terceros armónicos.

VECTORES ROTATORIOS Y COMPONENTES DE SECUENCIA.



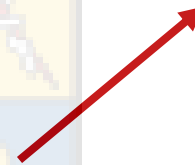
Vectores Rotatorios y SVM

- Uno de los métodos de modulación más utilizado corresponde al denominado Space Vector Modulation (SVM).
- El concepto de modulación vectorial está relacionado al concepto de vectores rotatorios.
- Esto a su vez está muy relacionado con el concepto de flujo rotatorio en una máquina. Por lo tanto vamos a revisar brevemente estos conceptos.



Utilizando coordenadas polares, donde la parte real es el eje de abscisas (X) y el componente imaginario j es el eje de ordenadas (Y), se tiene:

$$\underline{\psi} = \psi_a e^{j0} + \psi_b e^{j2\pi/3} + \psi_c e^{-j2\pi/3}$$



Para entender el concepto de flujo rotatorio, se asume una máquina trifásica con devanados en estrella, con flujos balanceados, es decir el módulo del flujo ψ_m es el mismo en las tres fases y existe un desfase de 120° entre ellos. El flujo total es:

Trabajo Matemático

- $\psi_a = \psi_m \cos(\omega t)$
- $\psi_b = \psi_m \cos(\omega t - 2\pi/3)$
- $\psi_c = \psi_m \cos(\omega t + 2\pi/3)$

Flujos Balanceados

Recuerde

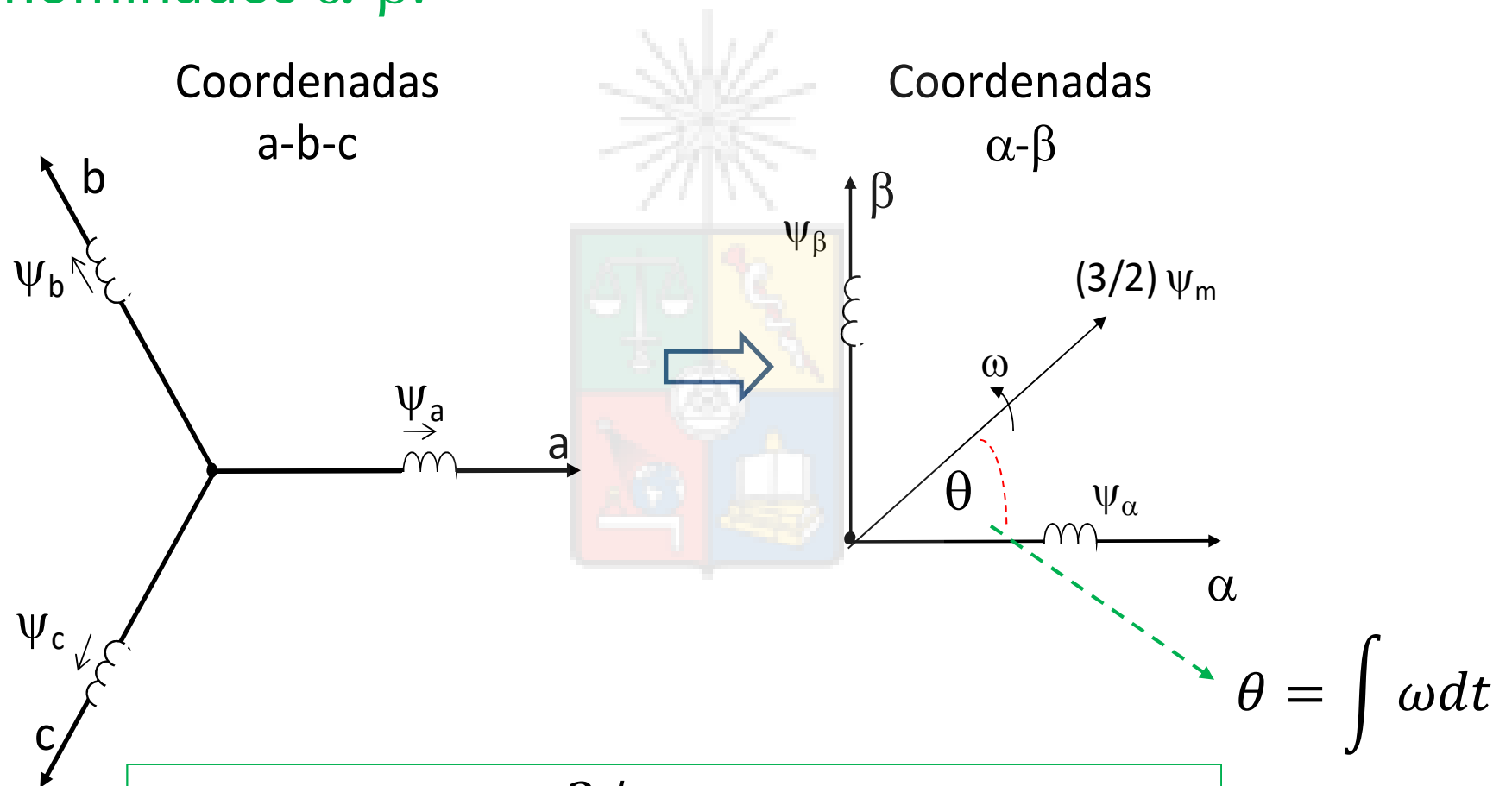
$$\cos(\theta) = \frac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{2}$$

$$\underline{\psi} = \psi_m \cos(\omega t) e^{j0} + \psi_m \cos(\omega t - 2\pi/3) e^{j2\pi/3} + \psi_m \cos(\omega t + 2\pi/3) e^{-j2\pi/3}$$

$$\underline{\psi} = \frac{3}{2} \psi_m e^{j(\omega t)}$$

Vector Rotatorio

- El vector de flujo es un vector rotatorio “girando” a una velocidad ωt y con dos componentes, habitualmente denominados α - β .



$$\underline{\psi} = \psi_{\alpha} + j\psi_{\beta} = \frac{3\psi_m}{2} [\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)]$$

Transformada α - β

- La transformada de a - b - $c \rightarrow \alpha$ - β es posible debido a que el sistema de coordenadas a - b - c tiene tres variables, pero solo dos de ellas son linealmente independientes.
- Si el sistema es balanceado $\psi_a + \psi_b + \psi_c = 0$ y $\psi_b = -(\psi_a + \psi_c)$.
- Por lo tanto, en general se requieren solo dos variables para representar un sistema a - b - c sin neutro.

Transformada α - β

- Utilizando los valores instantáneos, el equivalente alfa-beta pueden obtenerse utilizando la siguiente formulación matricial:

$$\begin{bmatrix} \psi_{\alpha} \\ \psi_{\beta} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}$$

En el análisis anterior utilizamos $k=1$. La transformada α - β conserva el valor del flujo rotatorio.

$$\sqrt{\psi_{\alpha}^2 + \psi_{\beta}^2} = \frac{3}{2} \psi_m$$

Transformada α - β

- $K=2/3$. La transformada conserva el valor del flujo en cada devanado. Por lo tanto se tiene:

$$\sqrt{\psi_{\alpha}^2 + \psi_{\beta}^2} = \psi_m$$

- $K=\sqrt{2/3}$. La transformada es conservativa en potencia o torque. En este caso la potencia activa de un sistema balanceado es:

$$P = v_{\alpha} i_{\alpha} + v_{\beta} i_{\beta}$$

Transformada α - β

- ¿Cuál de todos los valores de K es el correcto?. Estrictamente ninguno, los valores α - β no existen, son una representación matemática que permite facilitar el análisis de un sistema a-b-c sin secuencia cero. La más ampliamente utilizada en la literatura es $K=2/3$.
- Nosotros ya estamos acostumbrados a trabajar con transformadas, como por ejemplo Laplace y Fourier ,que se utilizan para analizar un sistema evitando, por ejemplo, realizar convoluciones. Esta es una más de las transformadas útiles.

Transformada α - β

- ¿Qué transformada debemos utilizar?.
- No tiene importancia, siempre que utilicemos la transformada inversa correcta.
- Es decir no deben existir inconsistencia en el paso de $a-b-c \rightarrow \alpha-\beta$ y en el paso de $\alpha-\beta \rightarrow a-b-c$.
- Finalmente, como ingenieros, debemos implementar en el mundo real. Y en el caso de sistemas trifásicos el mundo real es a-b-c.

Transformada α - β

- Nosotros conocemos el concepto de flujo rotatorio.
- Sin embargo la transformada α - β se puede utilizar con otras variables. Por ejemplo voltajes y corrientes. Por ejemplo:

$$\underline{v} = k(v_a e^{j0} + v_b e^{j2\pi/3} + v_c e^{-j2\pi/3}) = v_\alpha + jv_\beta$$

$$\underline{i} = k(i_a e^{j0} + i_b e^{j2\pi/3} + i_c e^{-j2\pi/3}) = i_\alpha + ji_\beta$$

Transformada α - β

- La transformada α - β se puede aplicar a cualquier variable trifásica. En ese caso nos encontraremos con una representación matemática de voltajes rotatorios, flujos rotatorios, corrientes rotatorias, etc. En forma matricial se escribe:

$$\begin{bmatrix} X_{\alpha} \\ X_{\beta} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

Componentes de secuencia negativa y secuencia cero

- El término $\underline{\psi} = \frac{3}{2} \psi_m e^{j(\omega t)}$ es un vector de secuencia positiva (gira en sentido anti-horario). Los sistemas balanceados tienen solo secuencia positiva.
- ¿Qué sucede si alimentamos los “devanados” con una componente desbalanceada?

Componentes de secuencia negativa

$$\psi_a = \psi_m \cos(\omega t)$$

$$\psi_b = (\psi_m + \Delta\psi) \cos(\omega t - 2\pi/3)$$

$$\psi_c = \psi_m \cos(\omega t + 2\pi/3)$$

Desbalance en magnitud

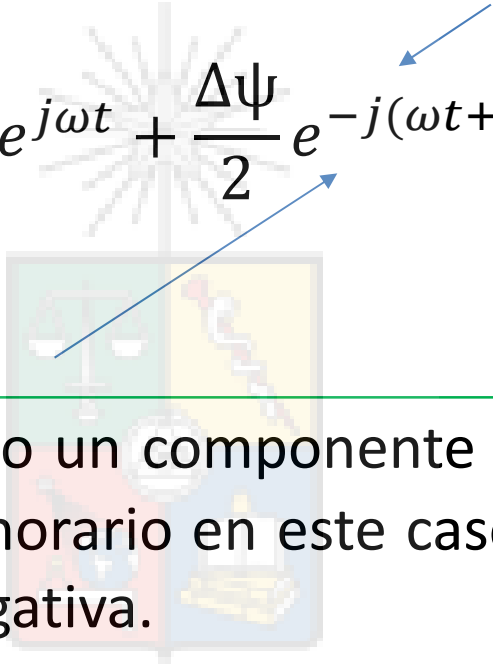
$$\underline{\psi} = k \left(\psi_a e^{j0} + \psi_b e^{j2\pi/3} + \psi_c e^{-j2\pi/3} \right)$$

$$\underline{\psi} = \frac{3}{2} \psi_m e^{j\omega t} + \Delta\psi \cos(\omega t - 2\pi/3) e^{j2\pi/3}$$

$$\underline{\psi} = \frac{3}{2} \psi_m e^{j\omega t} + \Delta\psi \left(\frac{e^{j(\omega t - 2\pi/3)} + e^{-j(\omega t - 2\pi/3)}}{2} \right) e^{j2\pi/3}$$

Componentes de secuencia negativa

Sentido horario

$$\underline{\psi} = \left(\frac{3}{2} \psi_m + \frac{\Delta\psi}{2} \right) e^{j\omega t} + \frac{\Delta\psi}{2} e^{-j(\omega t + 2\pi/3)}$$


El desbalance ha producido un componente que gira hacia el otro lado $e^{-j\omega t + \theta}$. En sentido horario en este caso y por ese motivo se le denomina secuencia negativa.

Cuando el sistema es balanceado, es decir la magnitud de la señales a-b-c es idéntica y el desfase es exactamente 120 grados, solo existe la secuencia positiva.

Componentes de secuencia cero

- En la diapositiva anterior utilizamos nuevamente el flujo, pero este análisis es válido para todas las variables trifásicas.
- **¿Y qué es la secuencia cero?** . La secuencia cero o componente homopolar se produce cuando la suma de las tres variables trifásicas no es cero. Por ejemplo:

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c)$$

Componentes de secuencia cero

- La secuencia cero no puede existir en cualquier sistema y normalmente requiere una topología física adecuada. Por ejemplo si no existe un cable de neutro la corriente de secuencia cero no puede circular, y por lo tanto no existe (es decir $i_a + i_b + i_c = 0$).
- Distinto es el caso de los voltajes donde podemos definir un neutro ficticio, como se realizó anteriormente y aplicar tensiones de secuencia cero en modulación. Estas tensiones desaparecen en la tensión línea a línea.

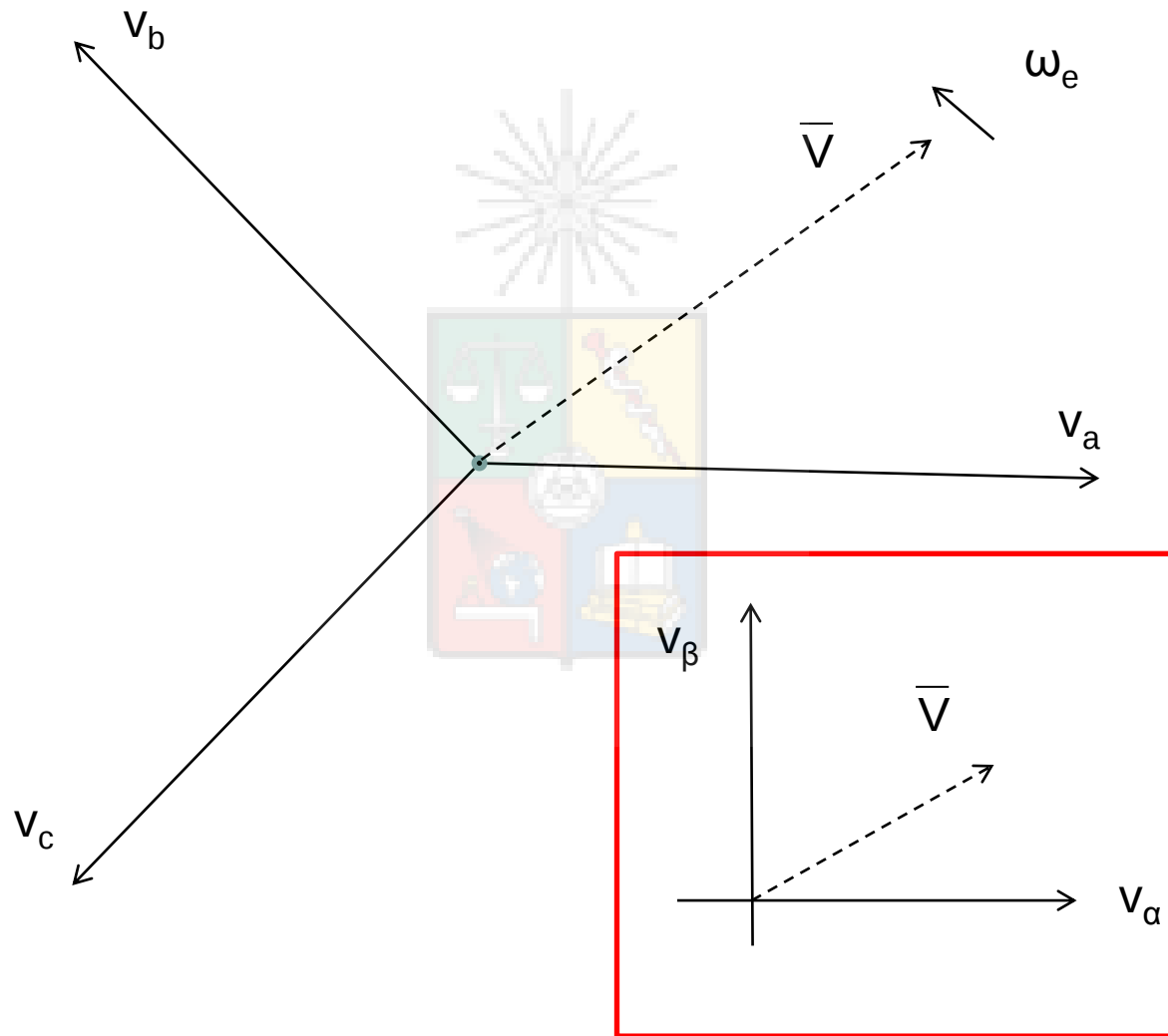
Corrientes desbalanceadas

- No debemos confundirnos y pensar que las corrientes desbalanceadas pueden existir solo cuando existe un neutro en el sistema.
- La corriente de secuencia negativa es también un componente de desbalance.
- En un sistema pueden existir desbalances (es decir la magnitudes o los desfases no son los correctos) y aún así cumplir, por ejemplo, con $i_a + i_b + i_c = 0$.
- En este caso tenemos corriente de secuencia negativa.

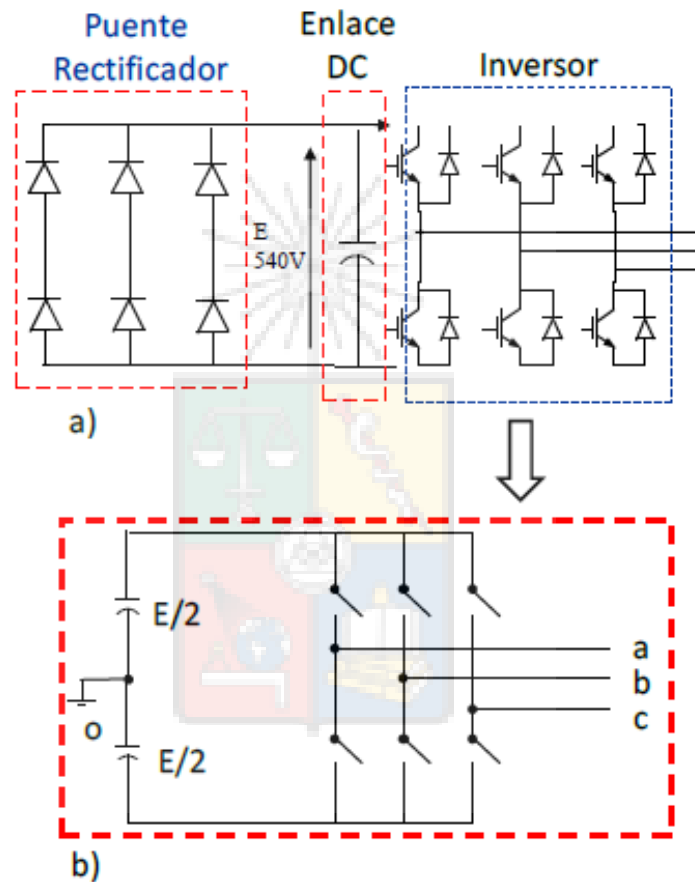
Space Vector Modulation Algorithm

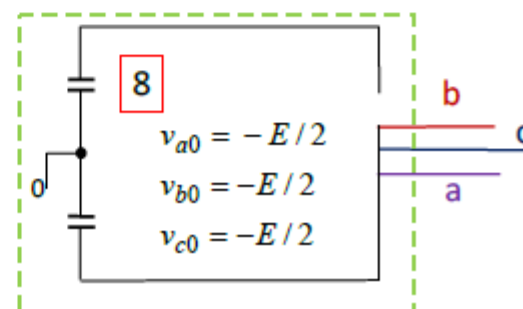
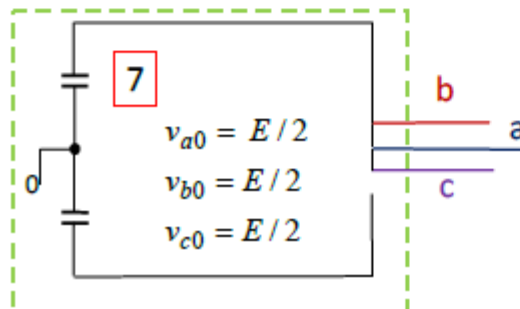
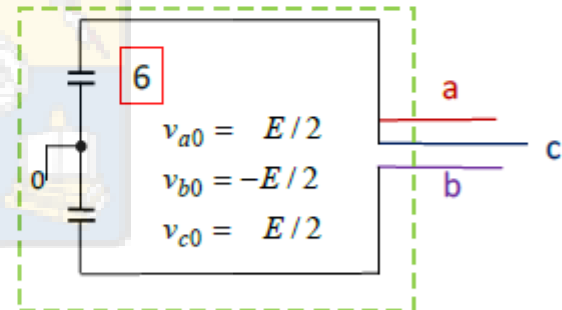
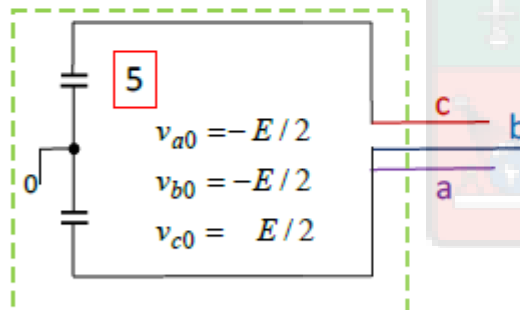
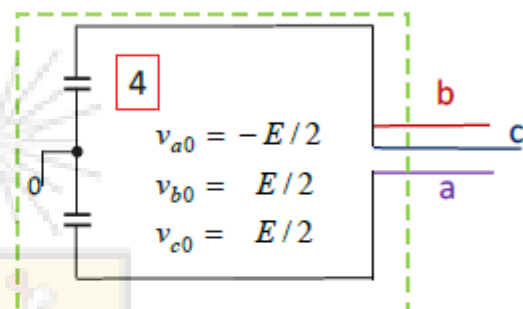
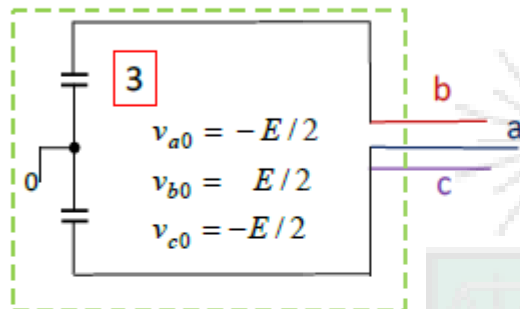
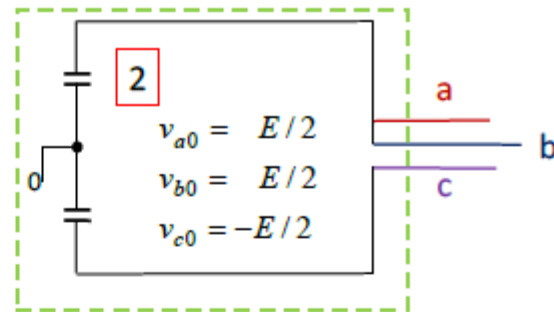
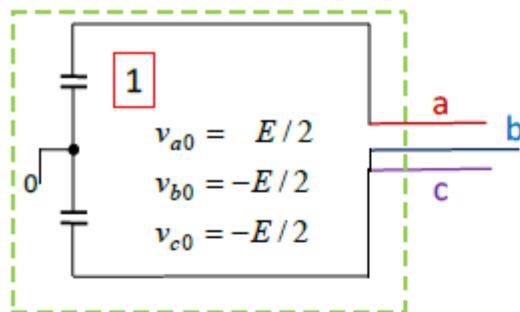


Vectores Giratorios



El inversor se puede considera un sistema
generador de vectores





Transformadas

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

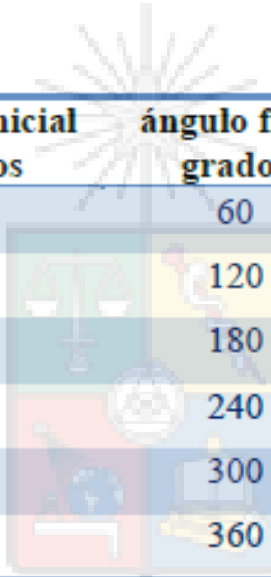
Transformada α - β

Se puede utilizar cualquier
manteniendo coherencia

$$\bar{V} = \frac{3}{2} V_m e^{j\omega t + \theta}$$

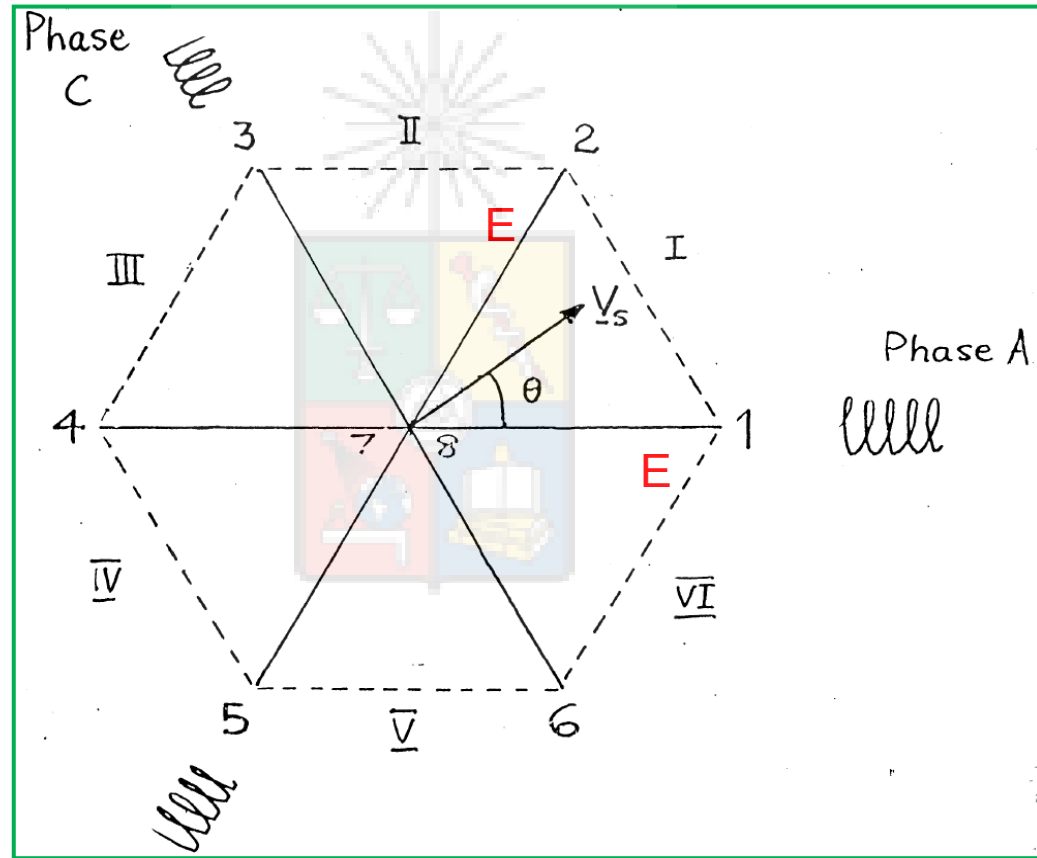
Vector giratorio con
módulo constante

Transformando los Vectores Activos



Sector	ángulo inicial grados	ángulo final grados	Vectores
I	0	60	V_1-V_2
II	60	120	V_2-V_3
III	120	180	V_3-V_4
IV	180	240	V_4-V_5
V	240	300	V_5-V_6
VI	300	360	V_6-V_1

Diagrama de Vectores



Utilizando la transformada α - β y las ecuaciones:

$$|V| = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad \theta_e = \tan^{-1}(V_{\beta} / V_{\alpha})$$

Se obtiene la tabla:

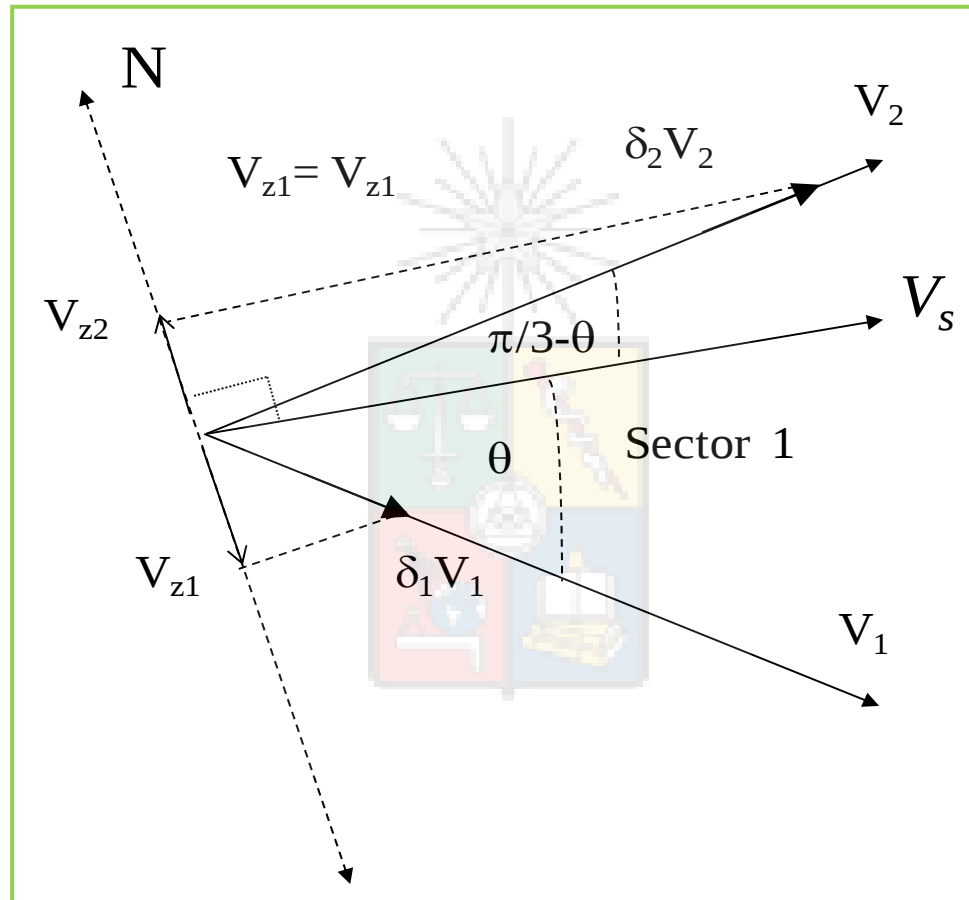
Vector	V_{ao}	V_{bo}	V_{co}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	Módulo	Ángulo (Grados)
1	$E/2$	$-E/2$	$-E/2$	E	0	$-E$	E	0
2	$E/2$	$E/2$	$-E/2$	0	E	$-E$	E	60
3	$-E/2$	$E/2$	$-E/2$	$-E$	E	0	E	120
4	$-E/2$	$E/2$	$E/2$	$-E$	0	E	E	180
5	$-E/2$	$-E/2$	$E/2$	0	$-E$	E	E	240
6	$E/2$	$-E/2$	$E/2$	E	$-E$	0	E	300
7	$E/2$	$E/2$	$E/2$	0	0	0	0	X
8	$-E/2$	$-E/2$	$-E/2$	0	0	0	0	X

Ejemplos

$$\begin{bmatrix} X_{\alpha} \\ X_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E/2 \\ -E/2 \\ -E/2 \end{bmatrix} = \frac{E}{2} + \frac{E}{4} + \frac{E}{4} + j0 = E$$

$$\begin{bmatrix} X_{\alpha} \\ X_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E/2 \\ E/2 \\ -E/2 \end{bmatrix} = \frac{E}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} E$$

Cálculo del Ciclo de Trabajo



$$\delta_i = \frac{\text{Tiempo Ocupado por Vector } V_i}{\text{Tiempo Total disponible}}$$

- Al modular se busca sintetizar un vector que en promedio sea igual a v_s . Para el sector I esto significa:

$$v_s = \frac{1}{T_s} \left[\int_0^{T_1} V_1 dt + \int_{T_1}^{T_2} V_2 dt + \int_{T_2}^{T_s} V_0 dt \right]$$

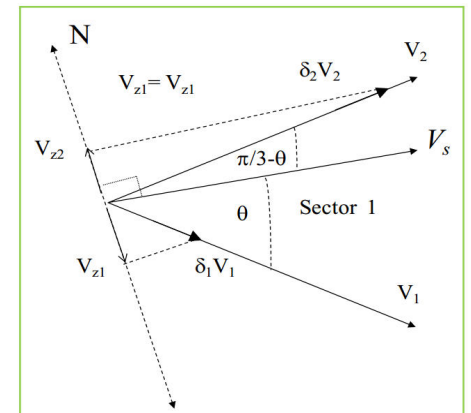
$$v_s = \frac{1}{T_s} [V_1 \Delta T_1 + V_2 \Delta T_2 + V_0 \Delta T_0] = \delta_1 V_1 + \delta_2 V_2 + \delta_0 V_0$$

¿Cómo se calculan los ciclos de trabajo?

Cálculo del Ciclo de Trabajo

$$V_s = \delta_1 E \cos \theta + \delta_2 E \cos(\pi/3 - \theta)$$

$$\delta_1 E \sin(\theta) = \delta_2 E \sin(\pi/3 - \theta) \Rightarrow \delta_1 = \delta_2 \frac{\sin(\pi/3 - \theta)}{\sin(\theta)}$$



Cálculo del Ciclo de Trabajo

$$\delta_2 [\text{sen}(\pi/3 - \theta) \cos(\theta) + \cos(\pi/3 - \theta) \text{sen}(\theta)] = \frac{V_s}{E} \text{sen}(\theta)$$

$$\delta_2 \left[\begin{array}{l} (\text{sen}(\pi/3) \cos(\theta) - \cos(\pi/3) \sin(\theta)) \cos(\theta) + \\ (\cos(\pi/3) \cos(\theta) + \sin(\pi/3) \sin(\theta)) \sin(\theta) \end{array} \right] = \frac{V_s}{E} \text{sen}(\theta)$$

$$\delta_2 = \frac{2V_s}{\sqrt{3}E} \text{sen}(\theta)$$

$$\delta_1 = \frac{2V_s}{\sqrt{3}E} \text{sen}(\pi/3 - \theta)$$

$$\delta_0 = 1 - (\delta_1 + \delta_2)$$

Otras Consideraciones

- Se debe recordar que V_s , el voltaje a sintetizar se obtuvo a partir de la transformada α - β con $k=1$.

$$|V_s| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} = \frac{3}{2} V_m$$

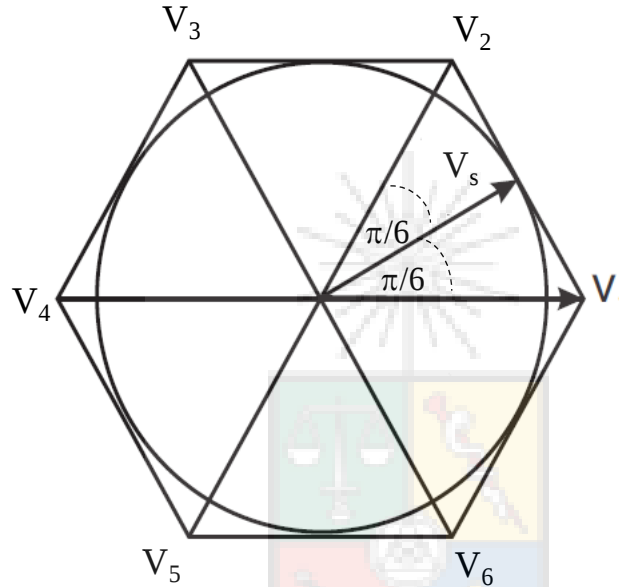
Definiendo:

$$m = 2 \frac{V_m}{E} \leftarrow$$

m =índice de modulación
 V_m =Valor máximo de V_s

$$\delta_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} m \sin(\pi/3 - \theta)$$
$$\delta_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} m \sin(\theta)$$

Valor Máximo de Voltaje a Sintetizar

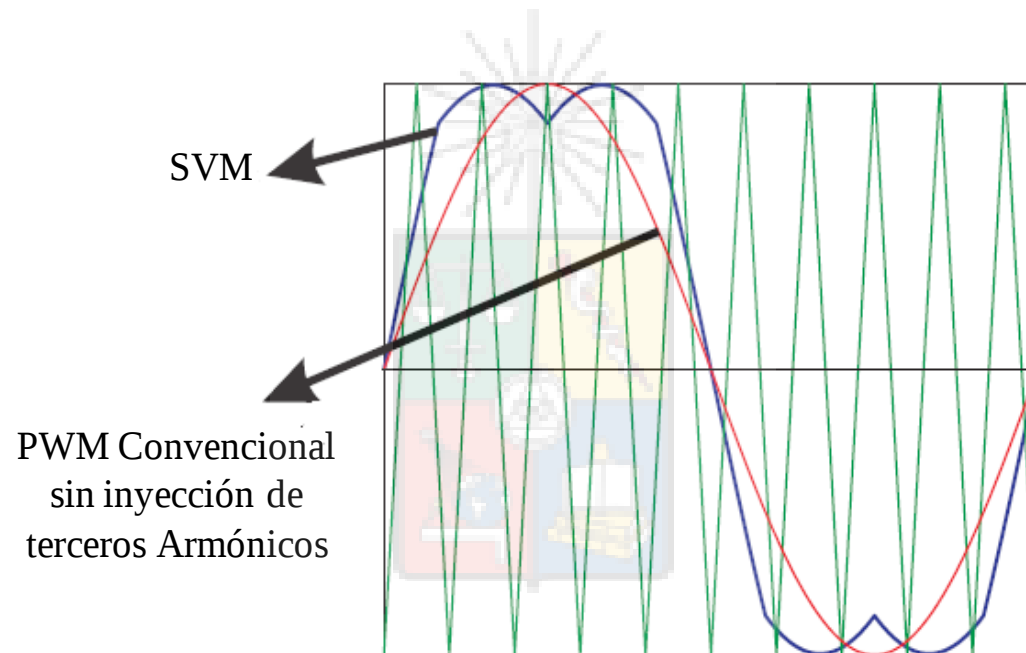


- El valor del voltaje máximo a sintetizar, es un círculo circunscrito en el hexágono.

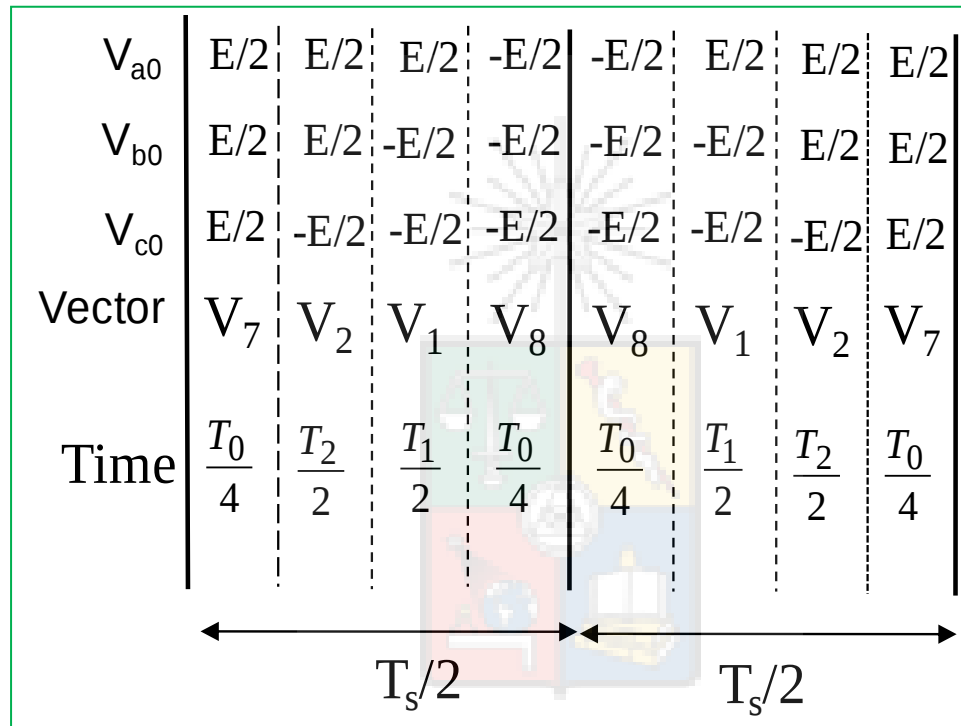
$$E \cos(\pi/6) = V_s^{\max} \Rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} E = \frac{3}{2} V_m^{\max} \Rightarrow m_{\max} = \frac{2}{\sqrt{3}}$$

$$m_{\max} \approx 1.1547$$

SVM y PWM



Implementación de un Patrón Simétrico Doble



- El patrón mostrado tiene baja distorsión armónica por el efecto 'Espejo'.
- Tiene bajas pérdidas debido a que sólo un switch cambia de estado cuando se cambia de vector

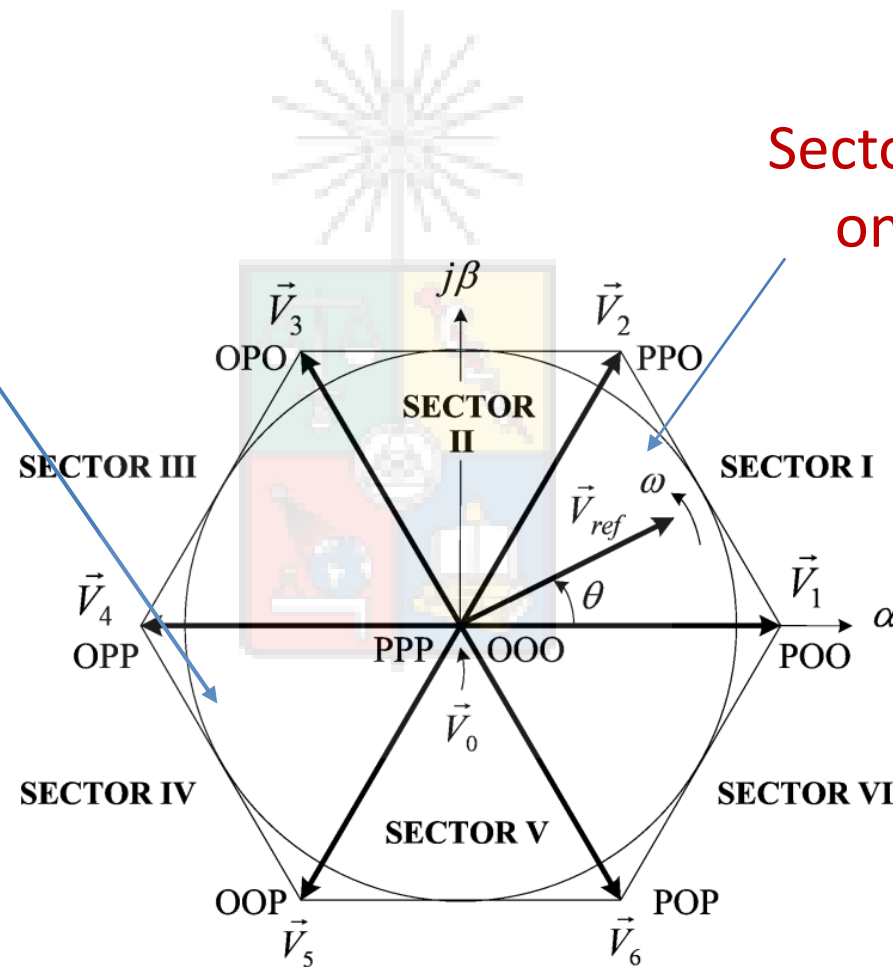
SVM

- Cuando se utiliza el SVM espejo, se pueden producir armónicos pares. Como se ha mencionado anteriormente, estos armónicos se producen cuando existen tensiones asimétricas aplicadas a la carga.
- Si se alimenta una máquina, las normas que regulan la calidad de la potencia entregada y los armónicos que pudieran estar asociados a las señales, generalmente no son tan estrictas.
- Si se está entregando energía directamente a la red a través de, por ejemplo, un convertidor fuente de voltaje y un sistema eólico, entonces las normas de la red son mucho más estrictas con respecto a los armónicos pares.

¿Que pasa si usamos siempre el mismo vector cero al inicio?

Sector negativo de la onda sinusoidal

Sector positivo de la onda sinusoidal

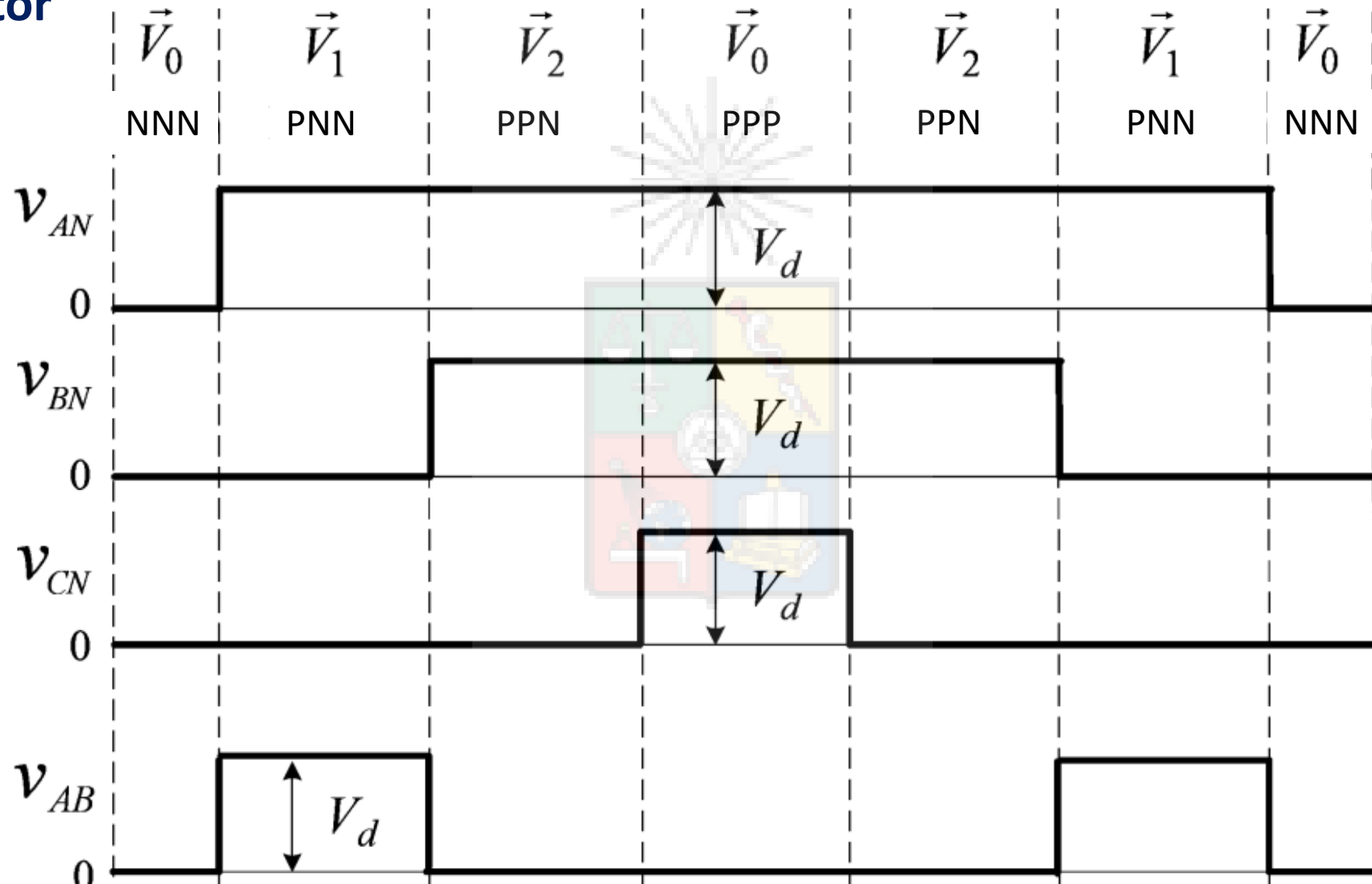


Vector	V_{ao}	V_{bo}	V_{co}
1	$E/2$	$-E/2$	$-E/2$
2	$E/2$	$E/2$	$-E/2$
3	$-E/2$	$E/2$	$-E/2$
4	$-E/2$	$E/2$	$E/2$
5	$-E/2$	$-E/2$	$E/2$
6	$E/2$	$-E/2$	$E/2$
7	$E/2$	$E/2$	$E/2$
8	$-E/2$	$-E/2$	$-E/2$

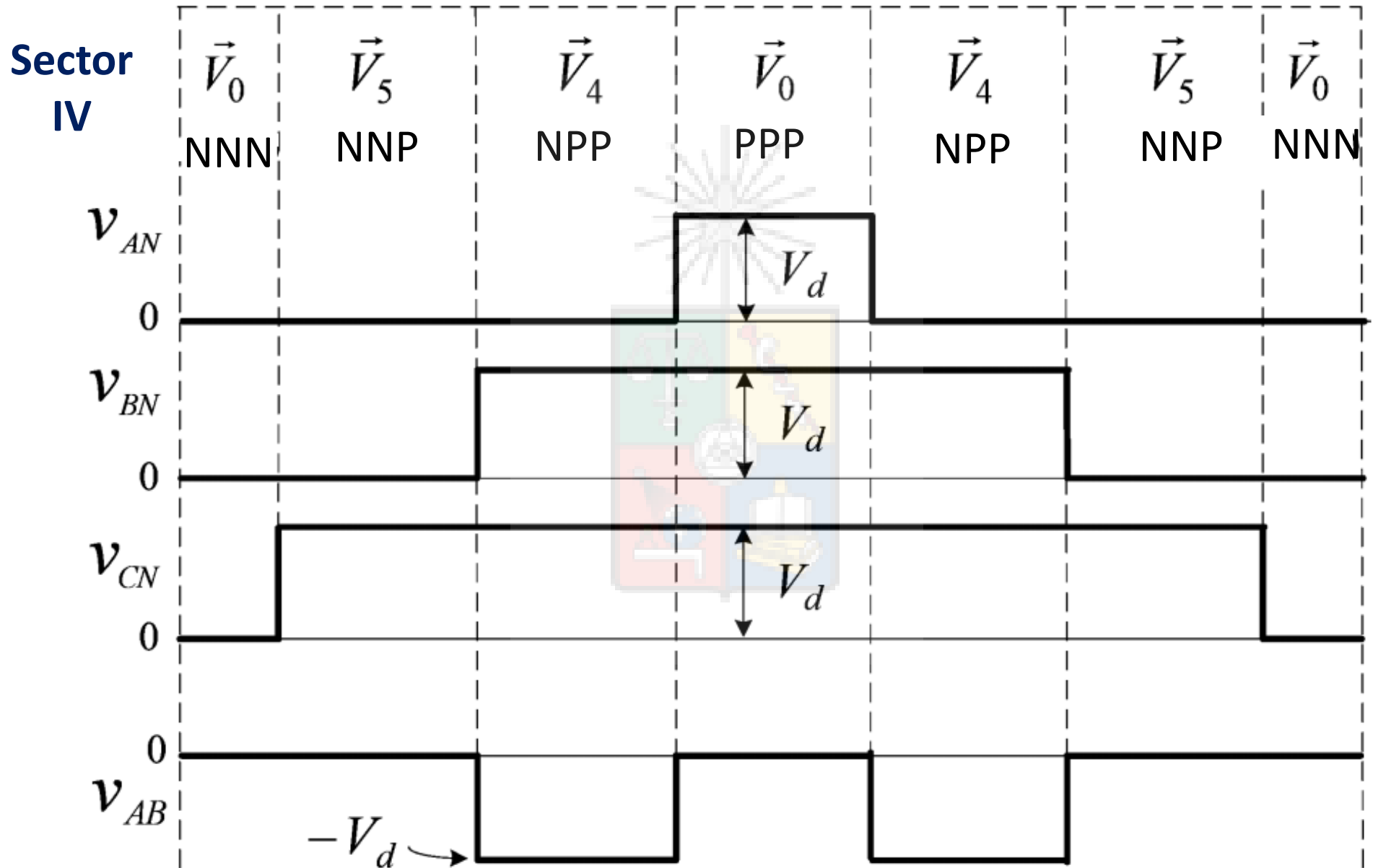
Supongamos que se usa el vector 8 al inicio.

Sector

I

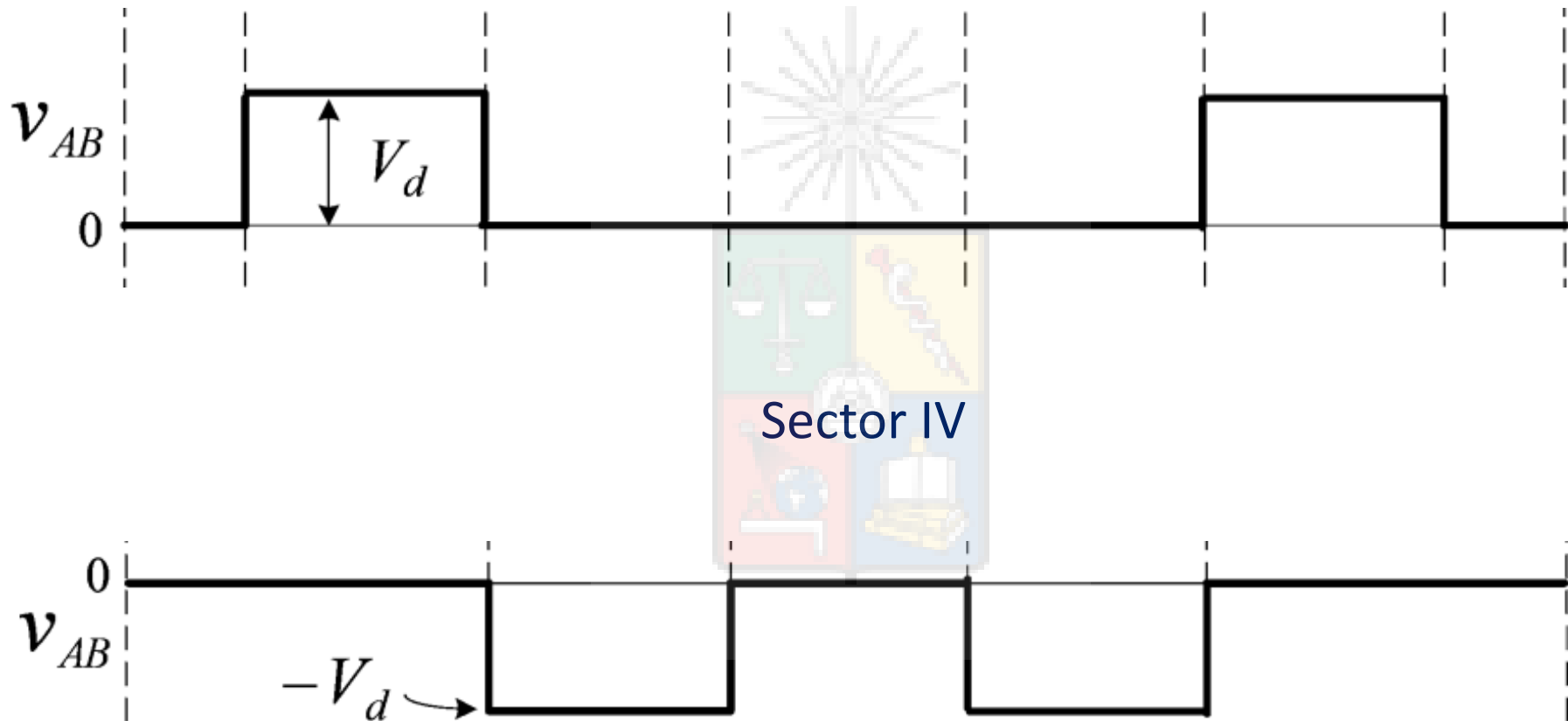


Supongamos que se usa el vector 8 al inicio.



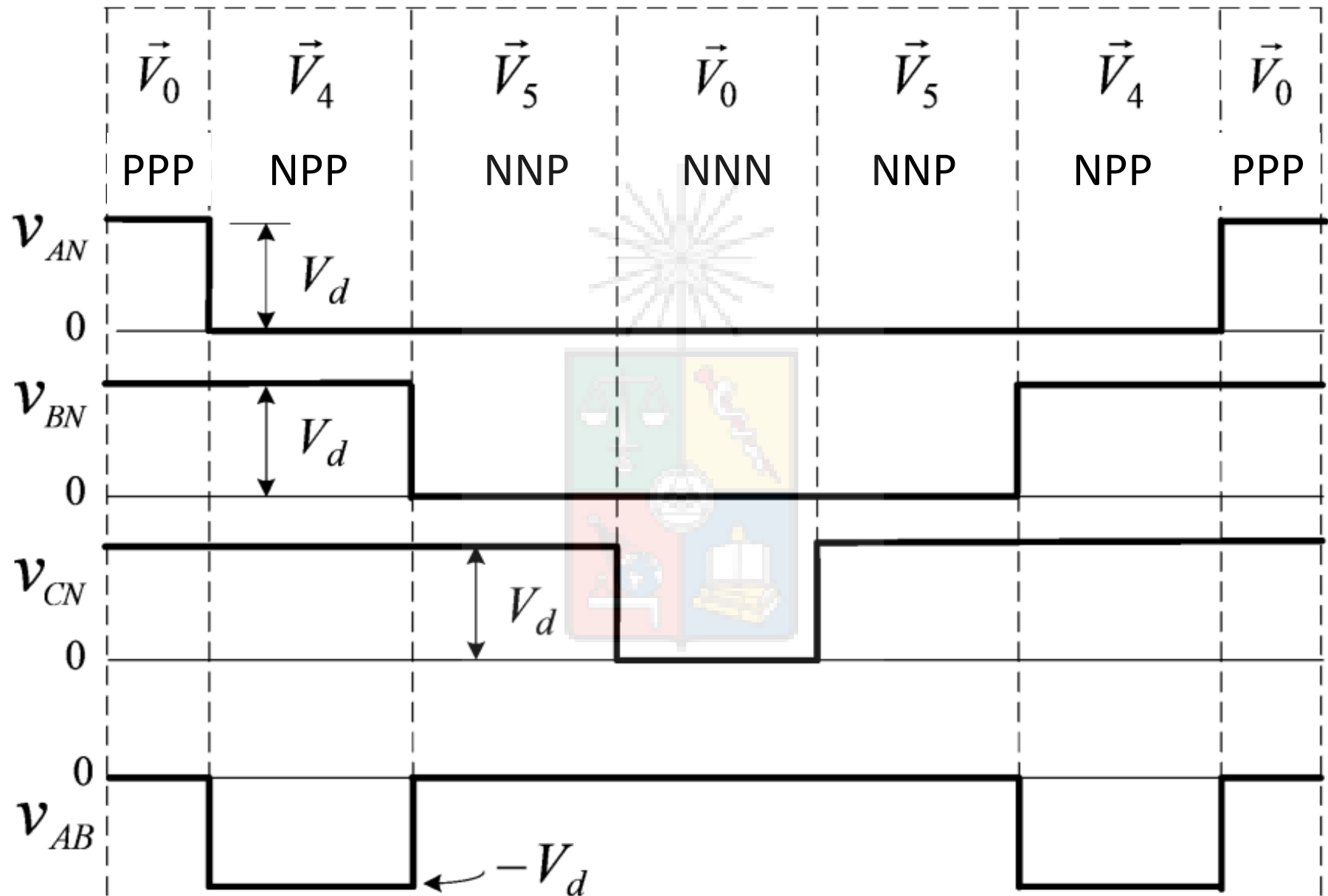
La tensiones son asimétricas

Sector I



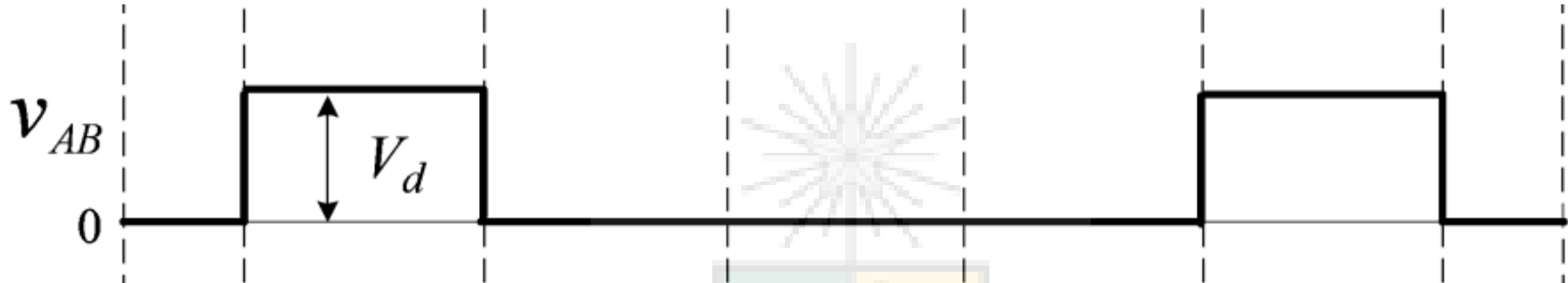
Se generan armónicos pares de bajo valor pero que puedan estar fuera de la norma

Supongamos que se usa el vector 7 al inicio



La tensiones son simétricas

Sector I. Se inicia la secuencia con NNN

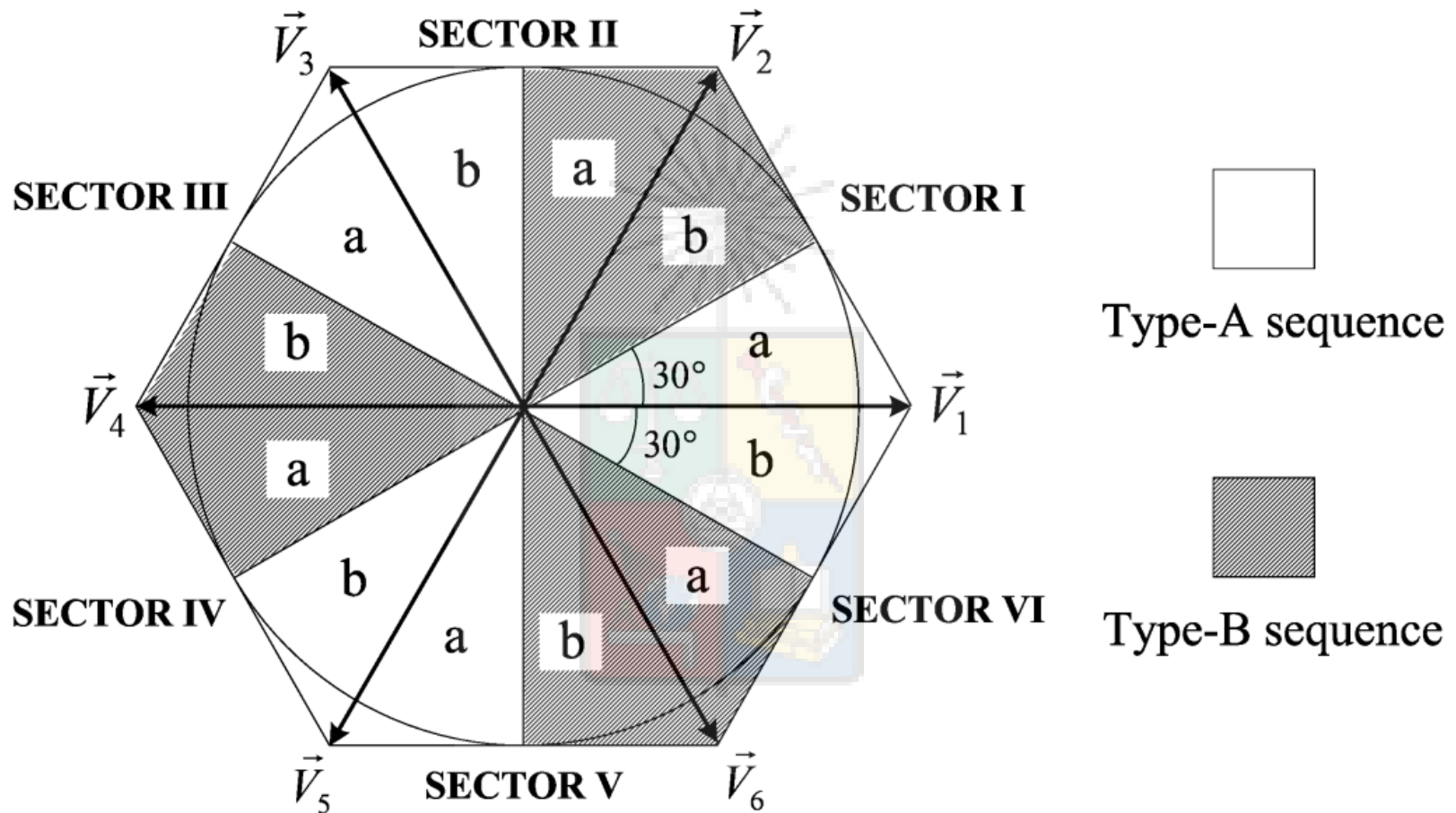


Sector IV. Se inicia la secuencia con PPP



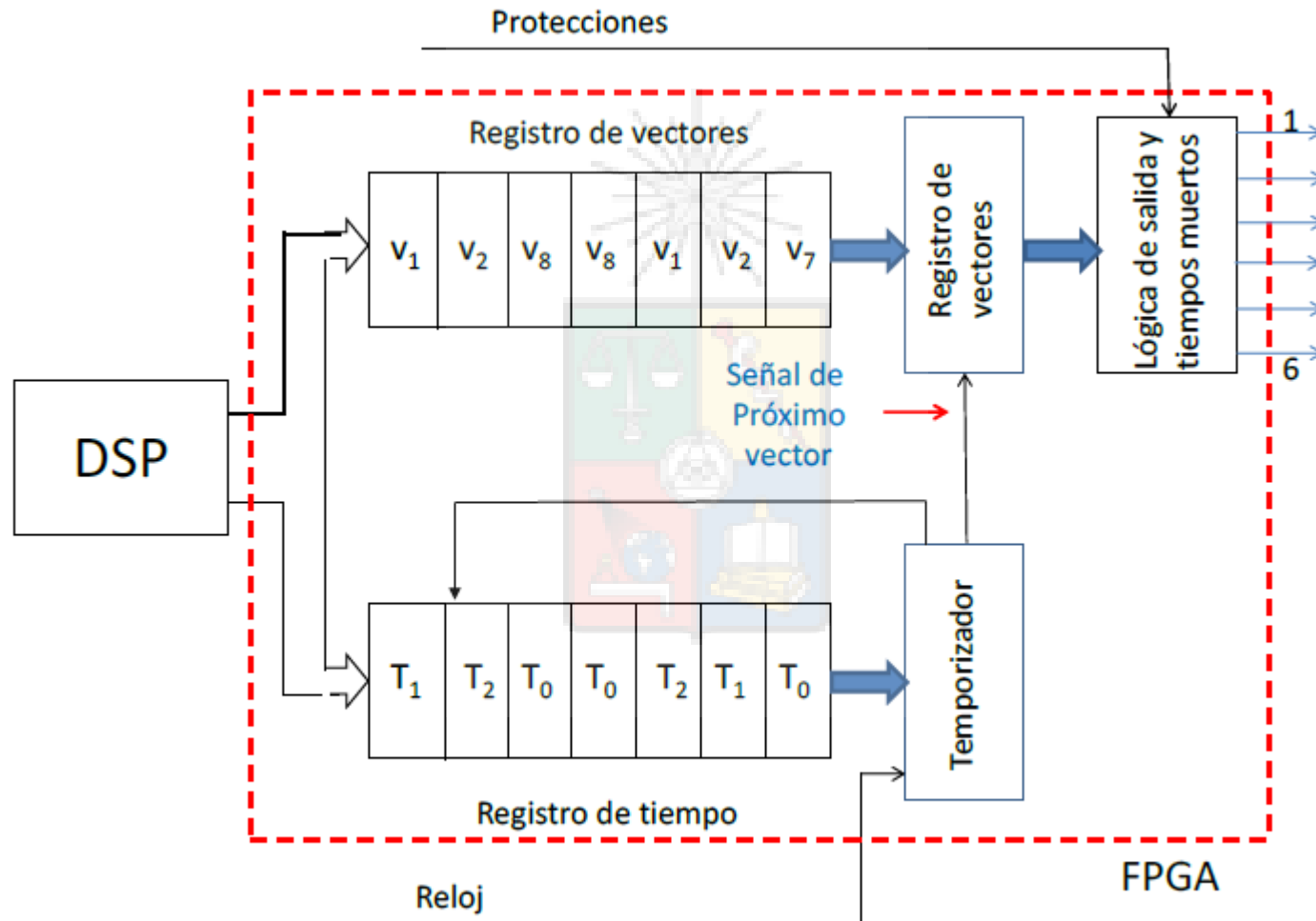
Ahora las tensiones son simétricas, pero se requiere cambiar el vector cero inicial lo que genera un aumento en la frecuencia de switching que se estima en tres veces la frecuencia fundamental. Por ejemplo si f_{sw} es 5kHz, entonces llegaría a $f_{sw} = 5150\text{Hz}$ al operar a 50Hz.

Una de las soluciones propuestas

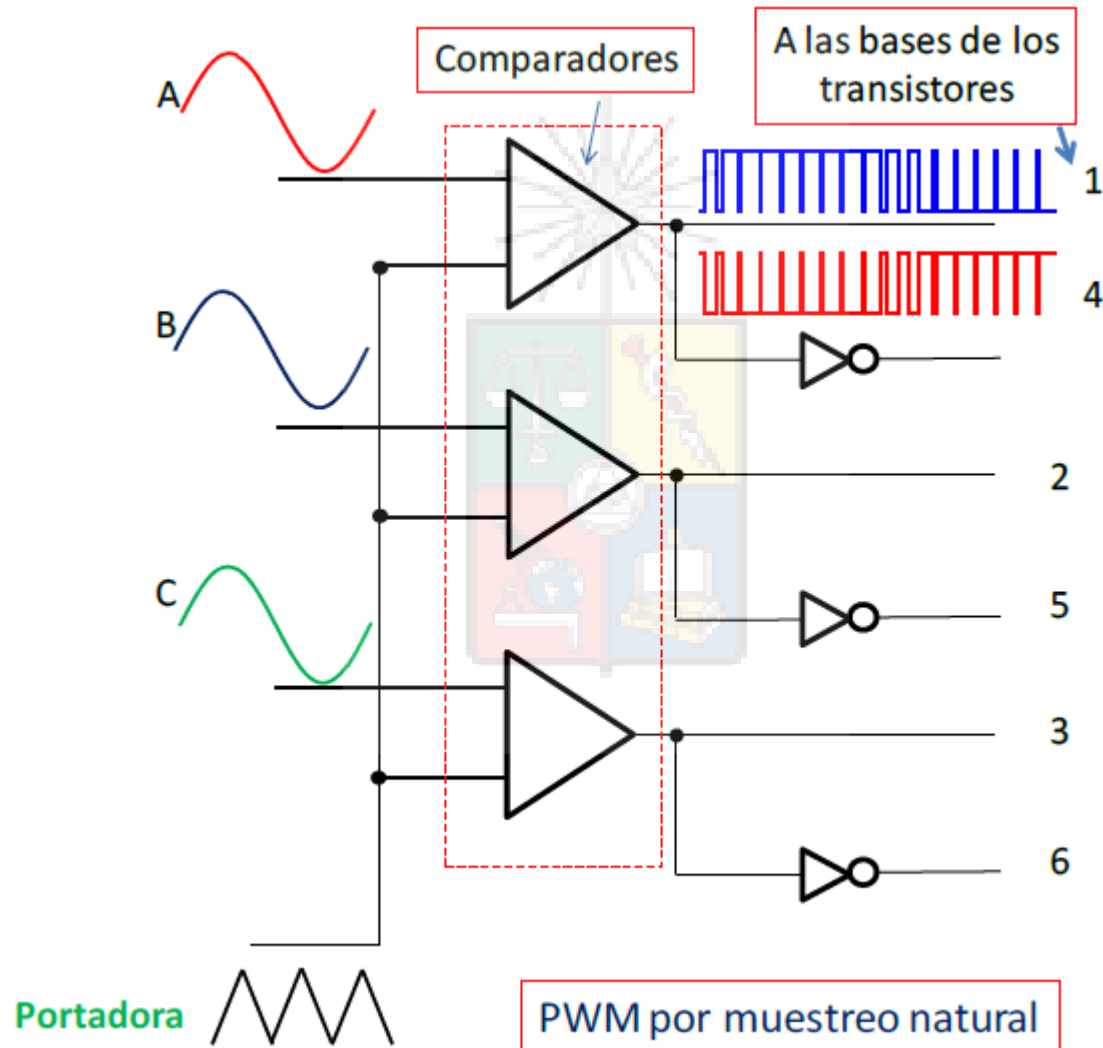


Ver: High Power Converters and AC drives
Bin Wu University of Toronto

Implementación



Implementación 'Natural' PWM Convencional



Implementación Digital PWM Convencional

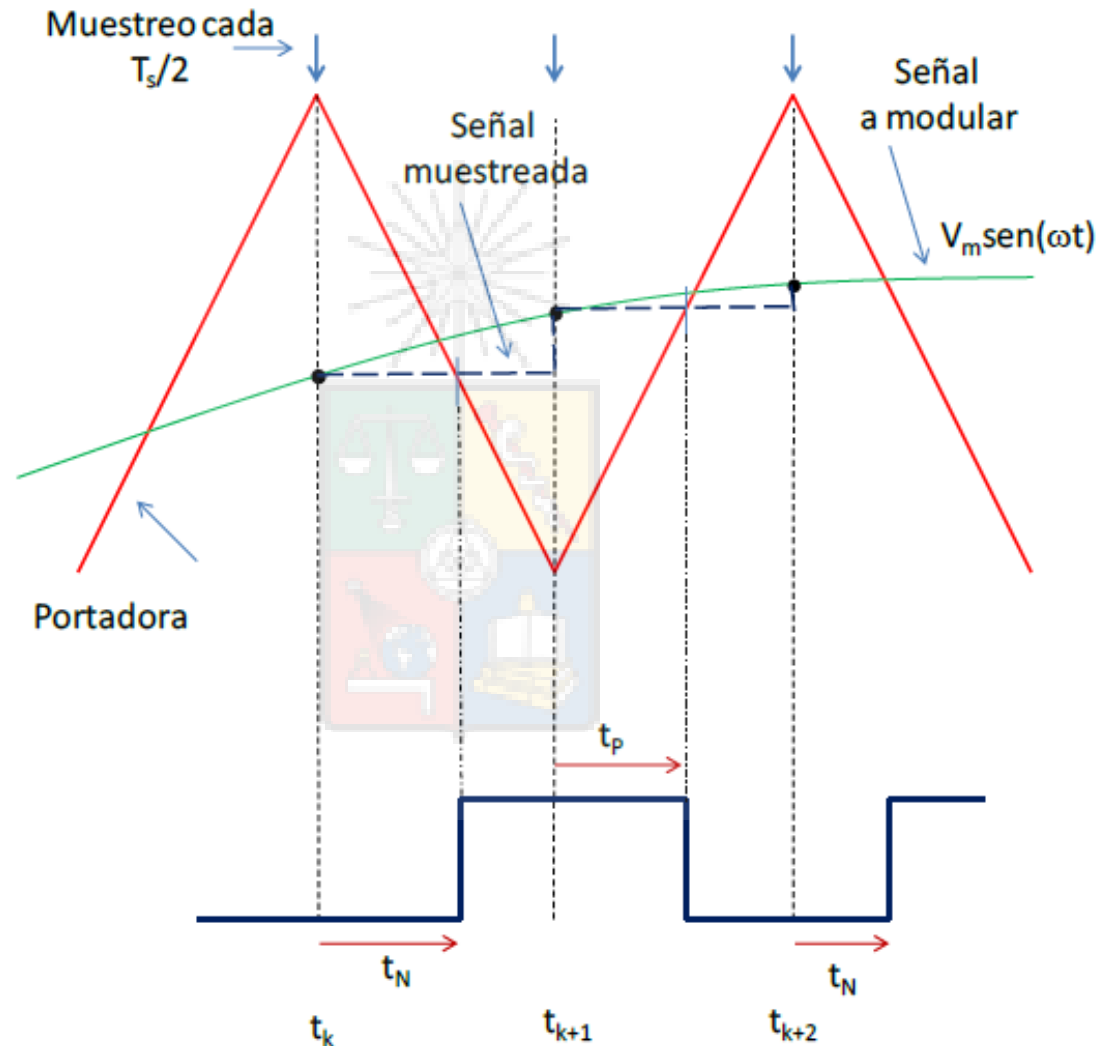


Fig. 1.22. PWM regular asimétrico.

Ecuaciones utilizadas

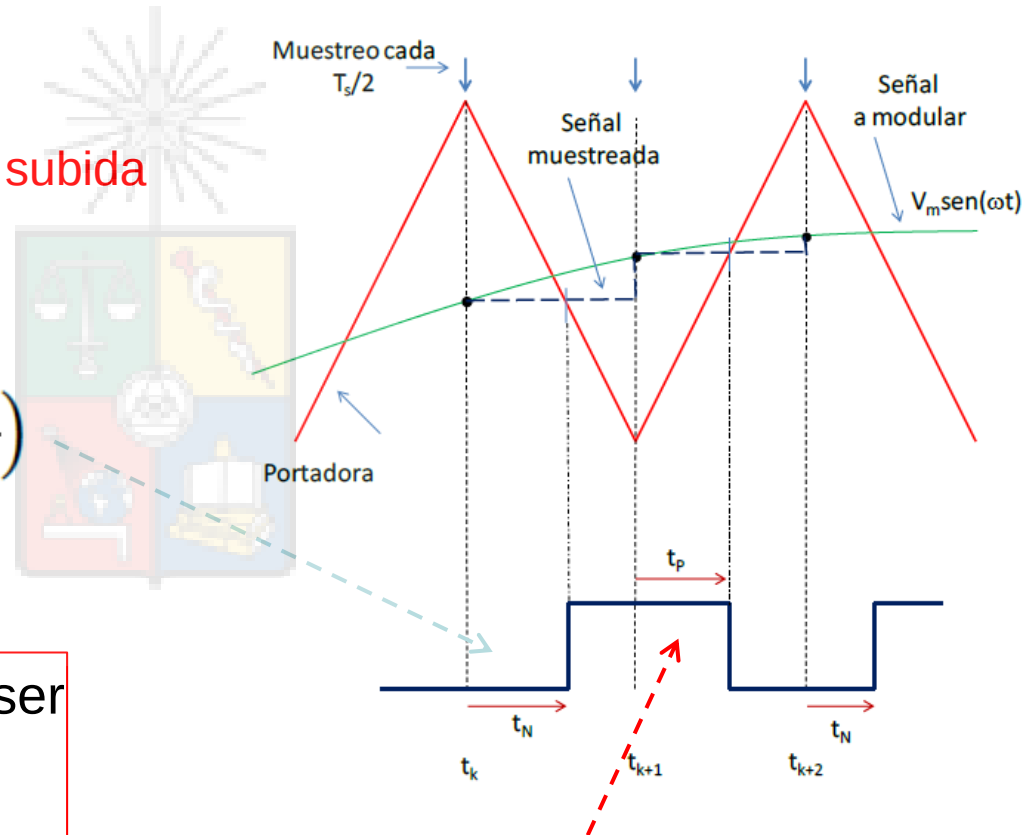
$$v = -2 \frac{E}{T_s} t + \frac{E}{2}$$

Rampa de bajada

$$v = 2 \frac{E}{T_s} t - \frac{E}{2}$$

Rampa de subida

$$t_N = \frac{T_s}{2} \left(\frac{1}{2} - \frac{v_k}{E} \right)$$



Los tiempos obtenidos deben ser Implementados utilizando Timers/Counters u otros

$$t_p = \frac{T_s}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{v_{k+1}}{E} \right)$$

Implementación Digital PWM Convencional

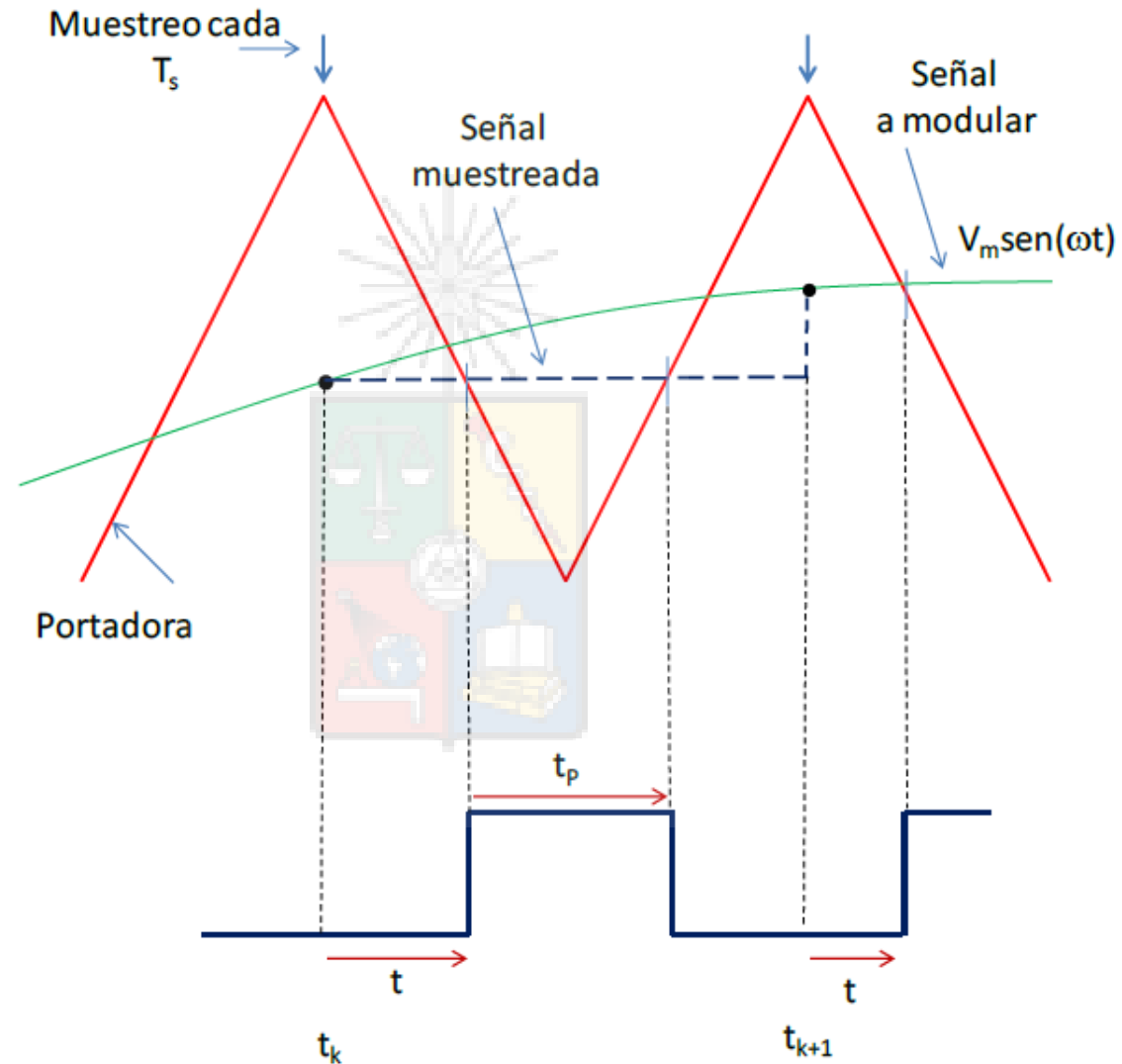
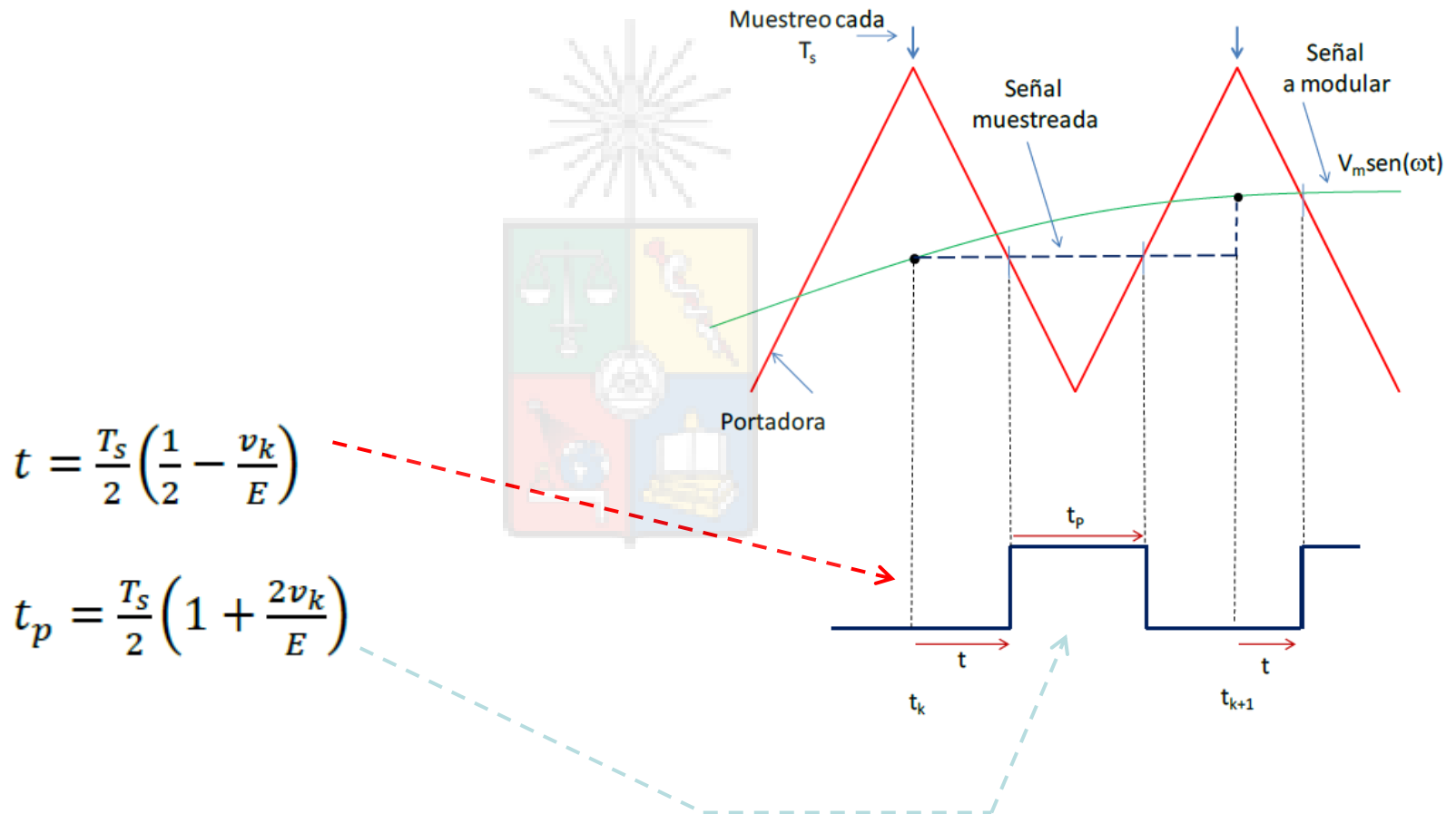


Fig. 1.23. PWM regular simétrico.

Ecuaciones utilizadas



Resultados

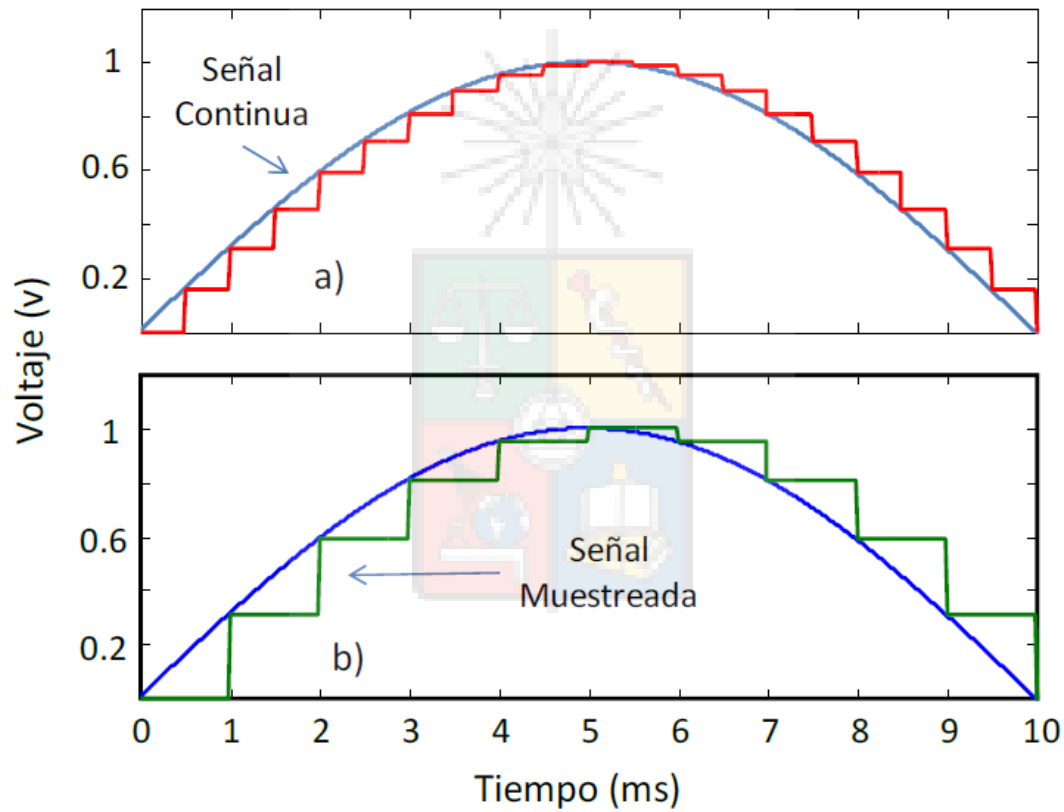


Fig. 1.24. Implementación digital de PWM. A) PWM asimétrico regular. B). PWM simétrico regular.