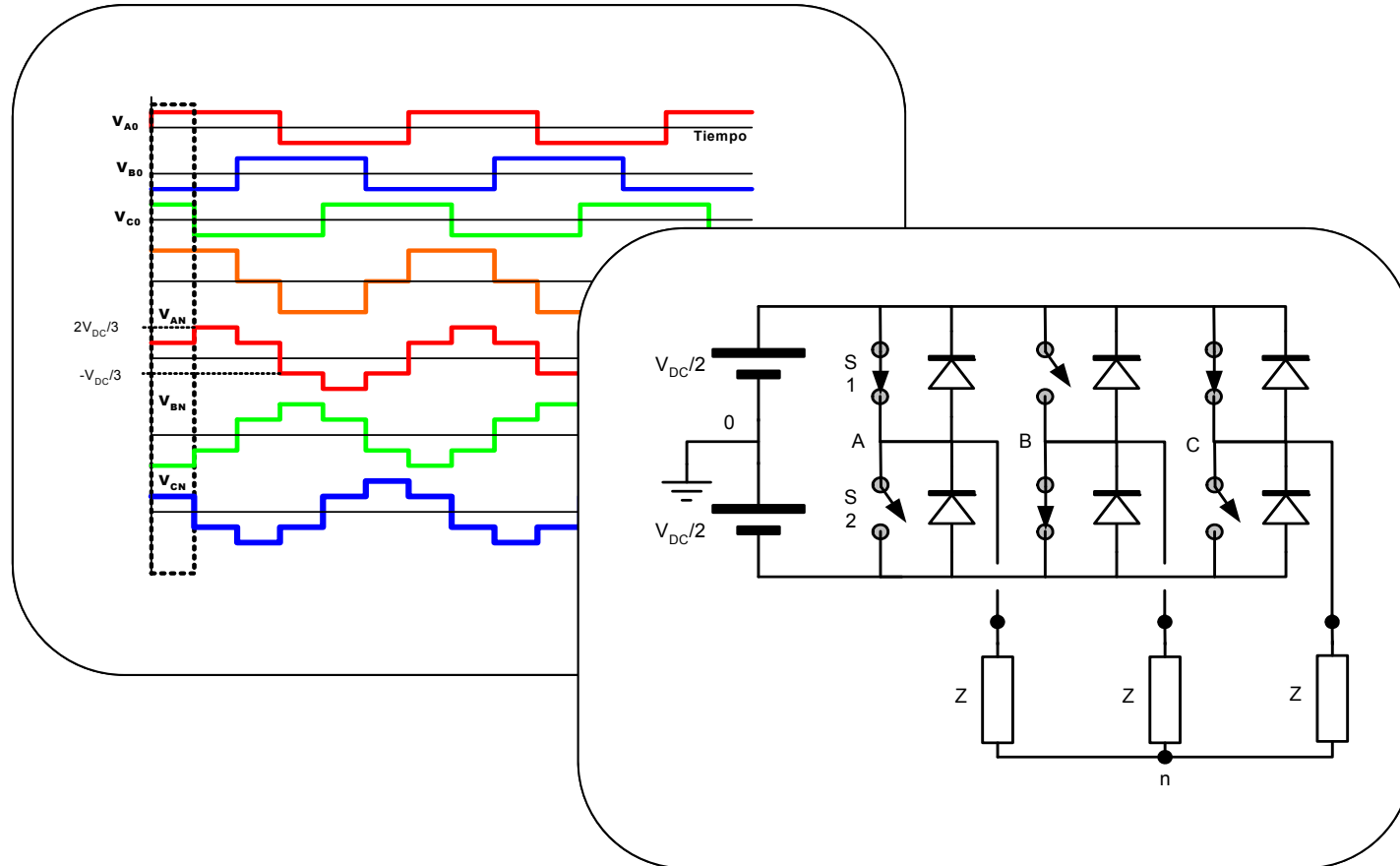




Inversores No Modulados



José Antonio Villarejo Mañas



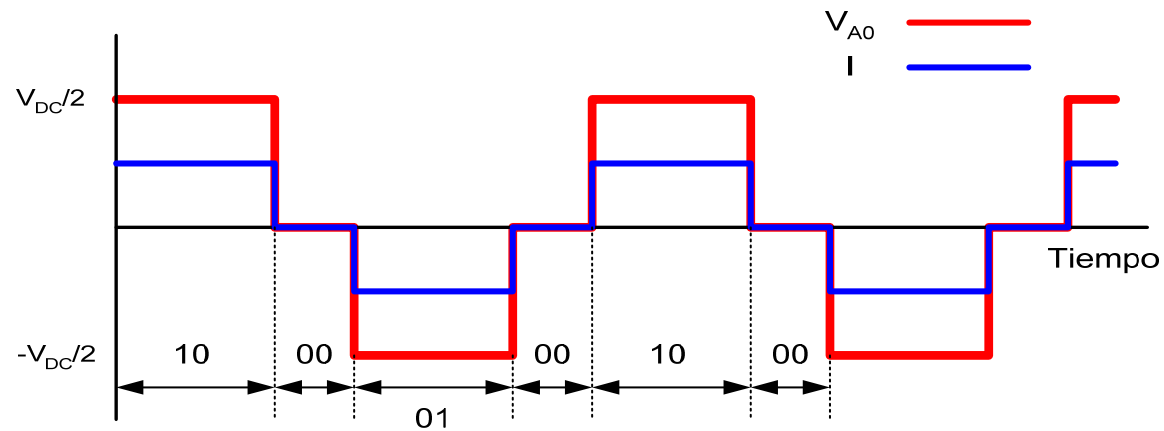
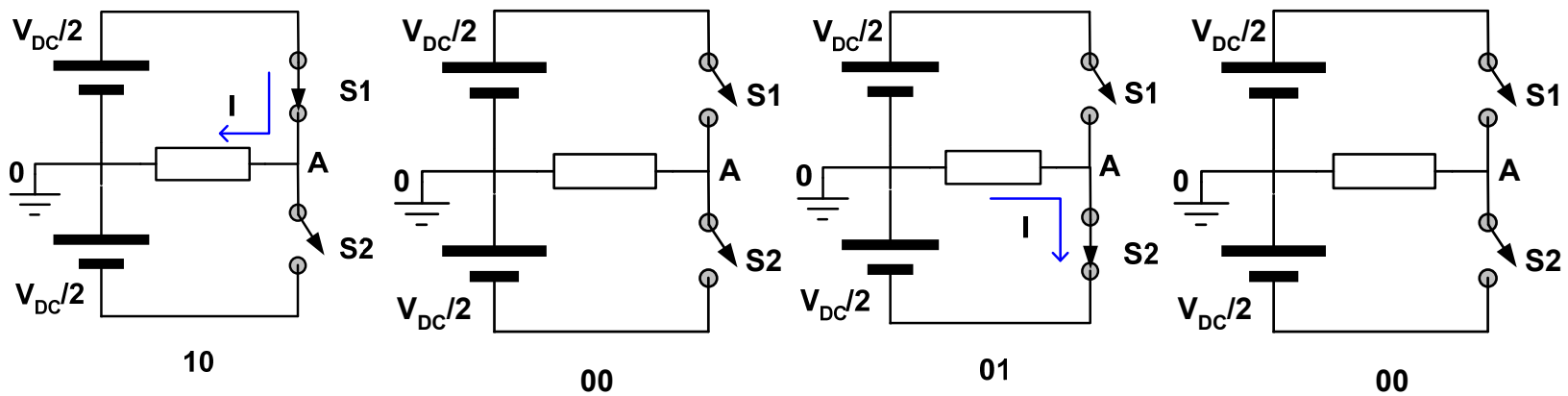
Objetivos del Tema

- Mostrar los aspectos básicos de funcionamiento de los convertidores CC/CA
- Estudiar las topologías más utilizadas en la construcción de convertidores CC/CA
- Presentar diferentes formas de abordar problemas con corrientes y tensiones no senoidales



Inversor en Medio Punte

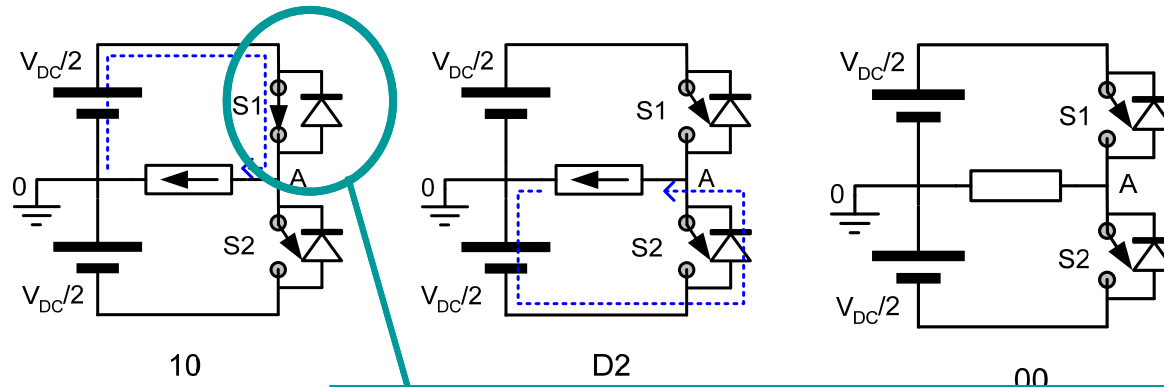
Funcionamiento con Carga Resistiva



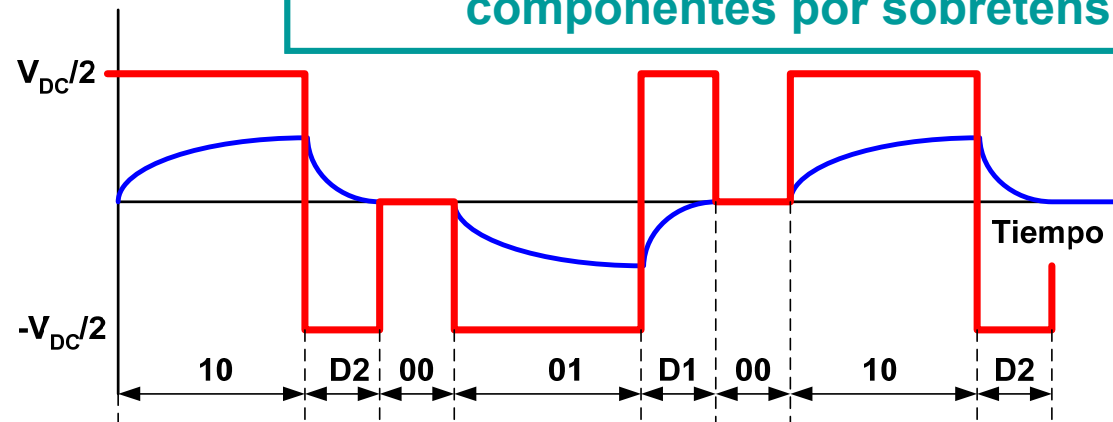


Inversor en Medio Punte

Funcionamiento con carga Inductiva (I)



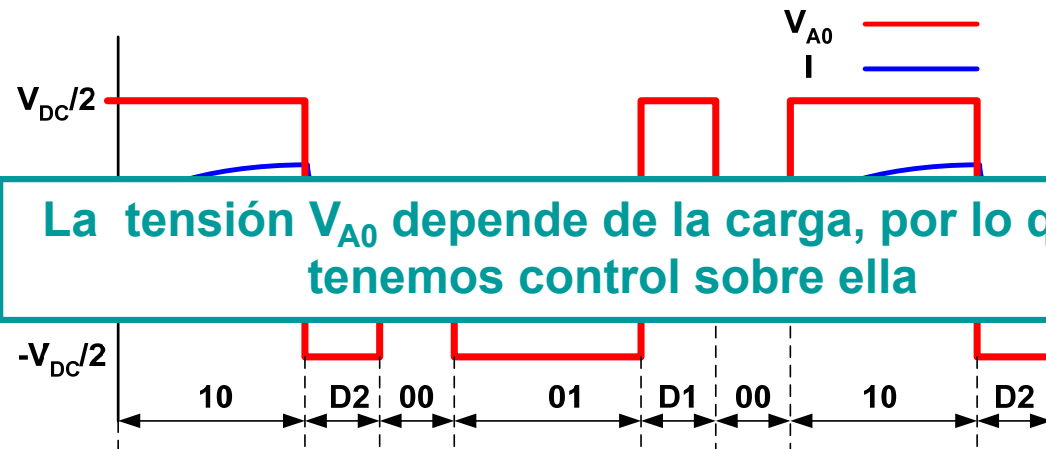
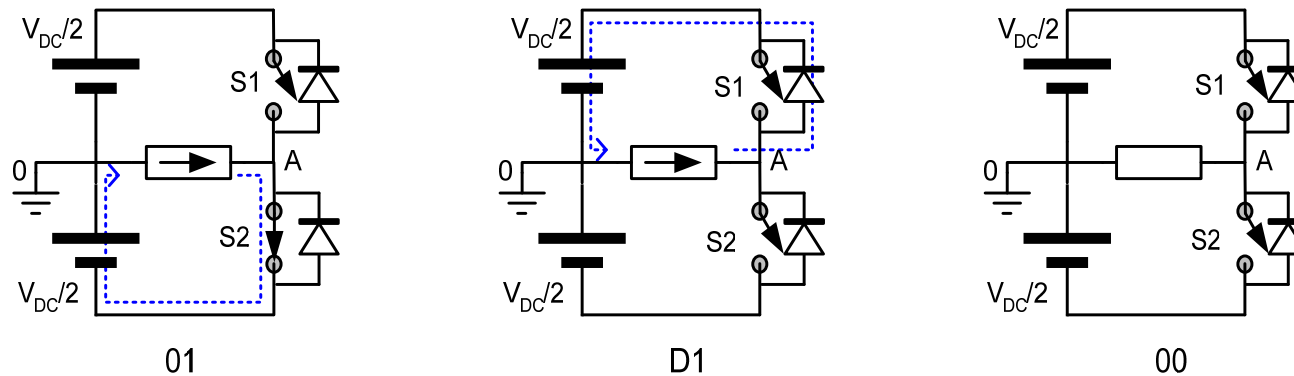
Los diodos evitan que se destruyan los componentes por sobretensión





Inversor en Medio Puento

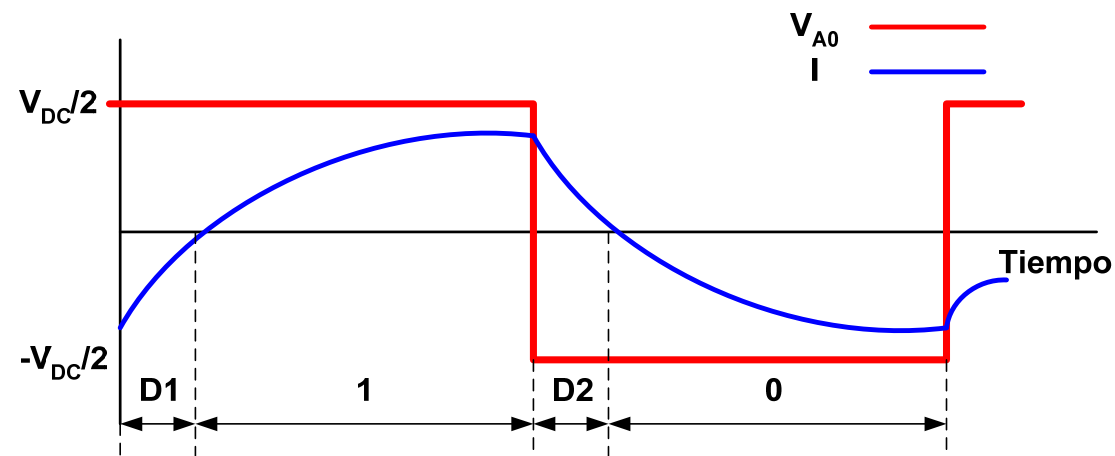
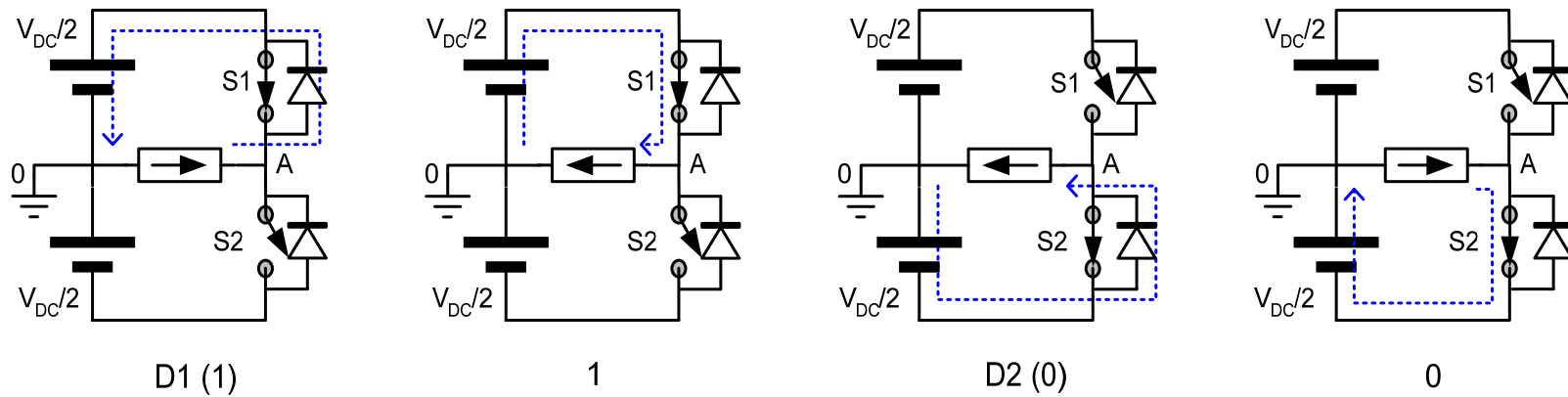
Funcionamiento con carga Inductiva (II)





Inversor en Medio Puento

Funcionamiento típico de un Medio Puento





Inversor en Medio Puente

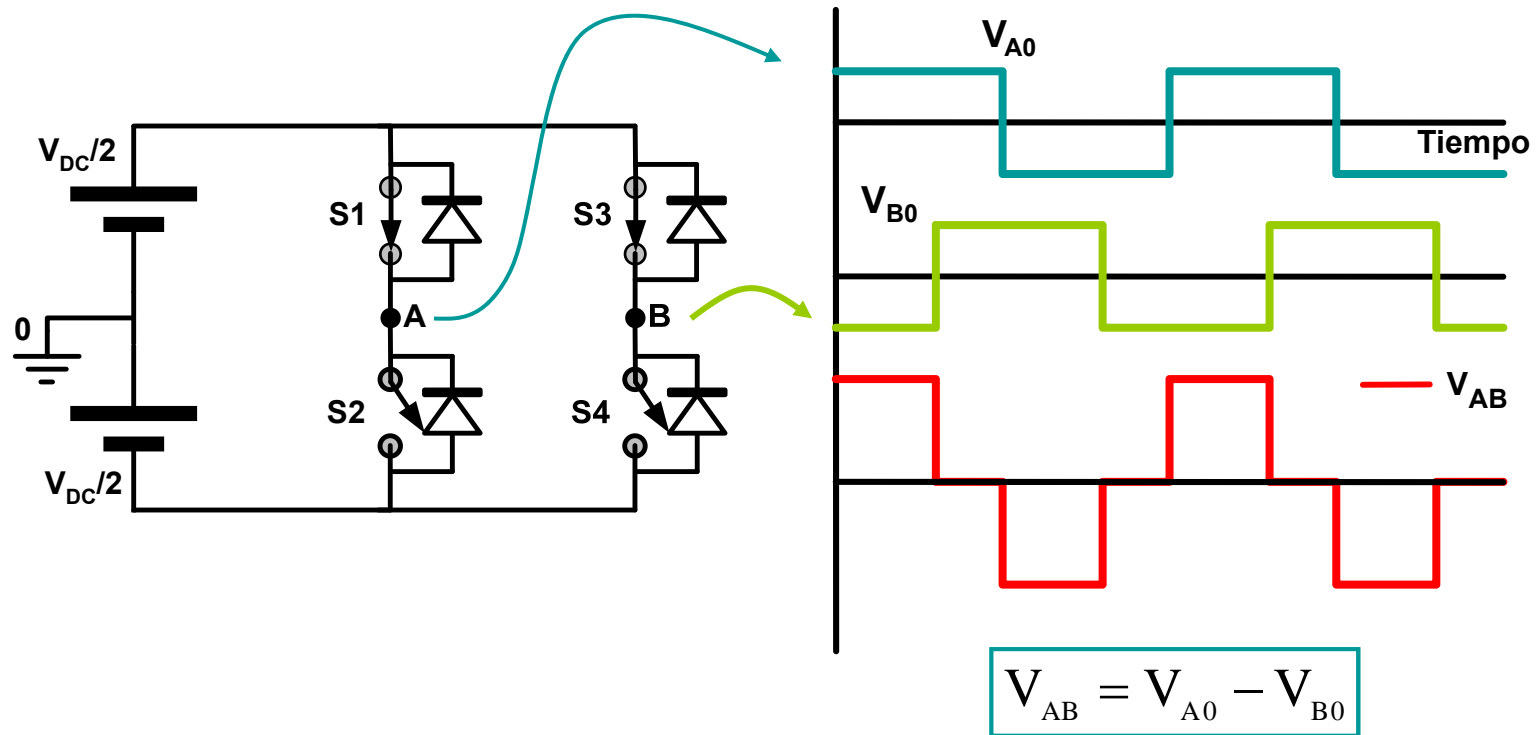
Conclusiones

- Dado que la mayor parte de las cargas son inductivas, **los diodos serán de obligada utilización**
- Si deseamos controlar en todo momento la tensión sobre la carga **sólo podemos tener tensiones positivas y negativas**
- **No es posible controlar el valor eficaz de la tensión sobre la carga**



Inversor en Puente Completo

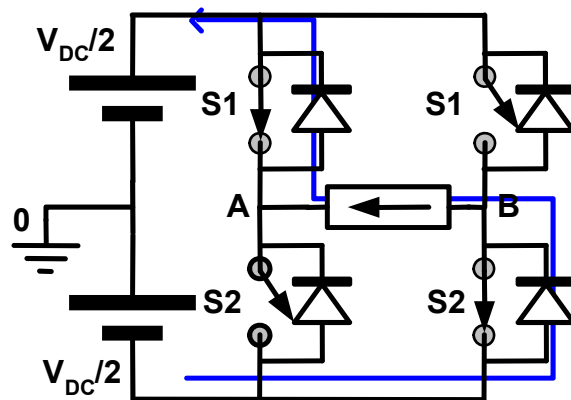
Topología



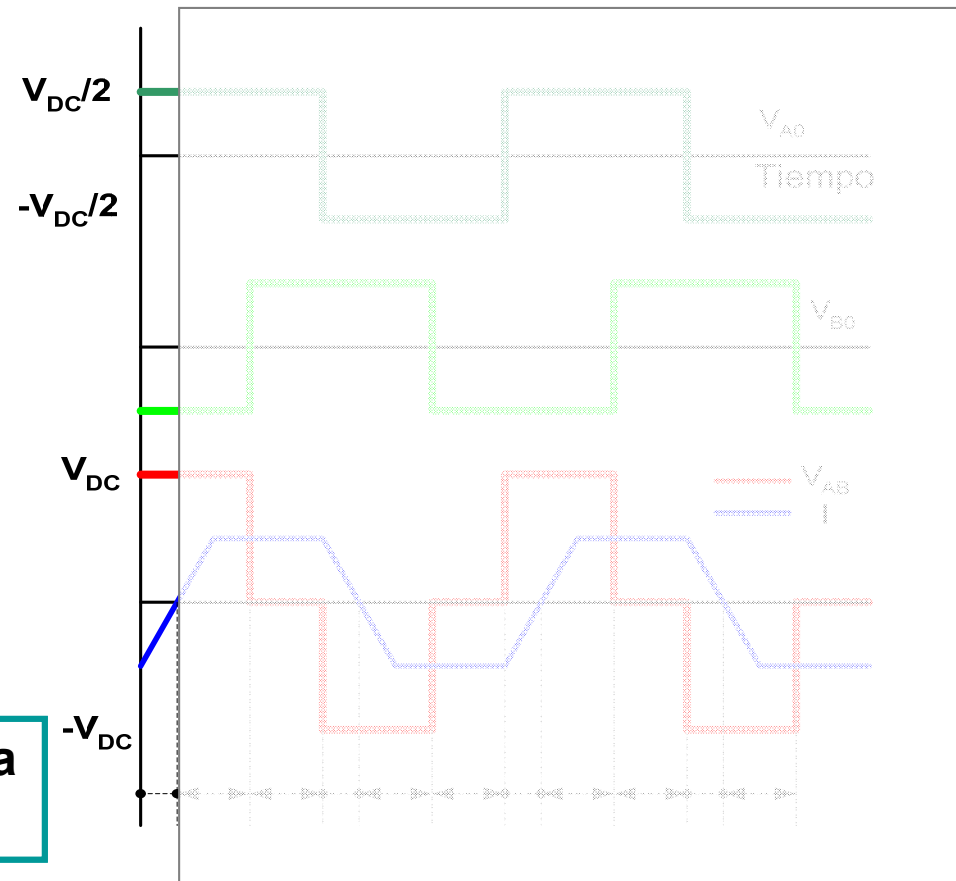


Inversor en Puente Completo

Funcionamiento con Carga Inductiva (I)



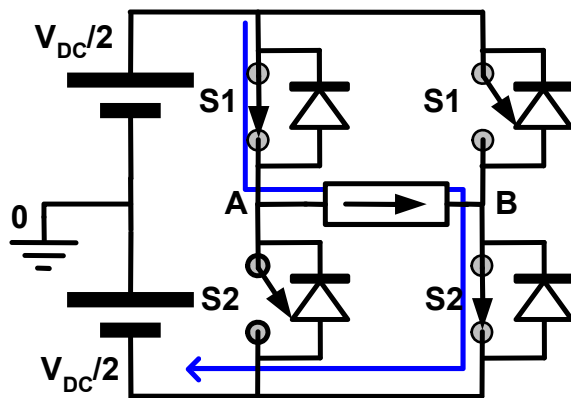
La carga devuelve energía a las fuentes de CC



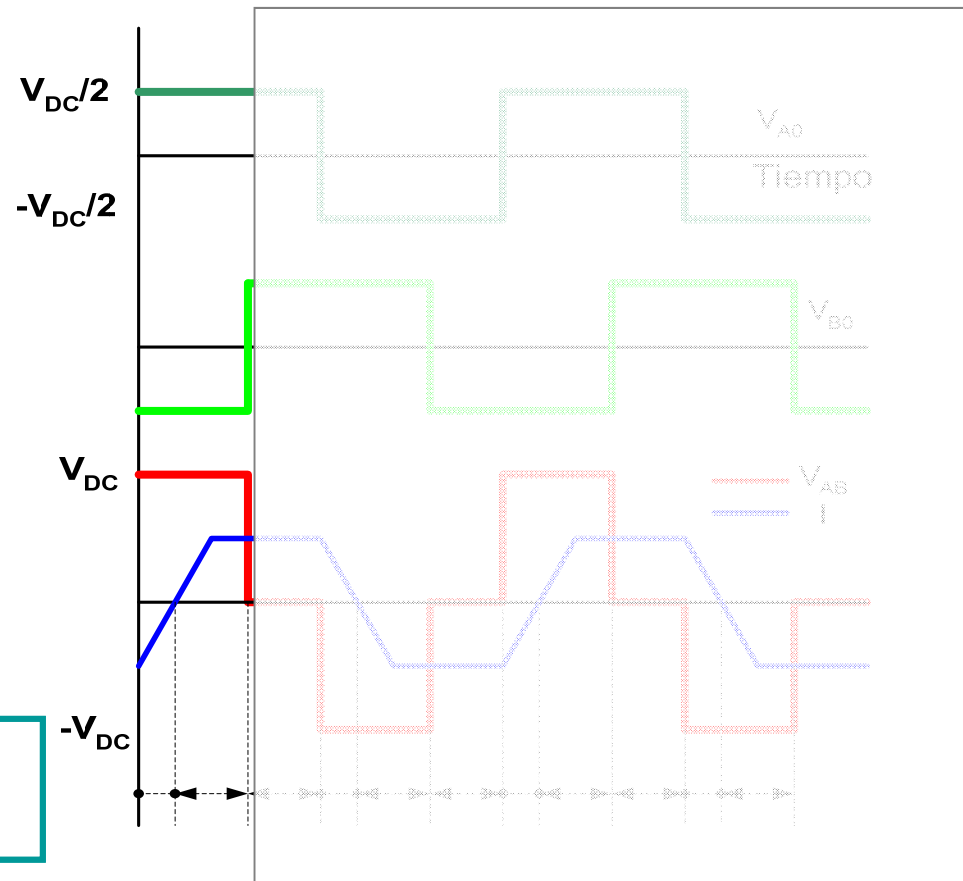


Inversor en Puente Completo

Funcionamiento con Carga Inductiva (II)



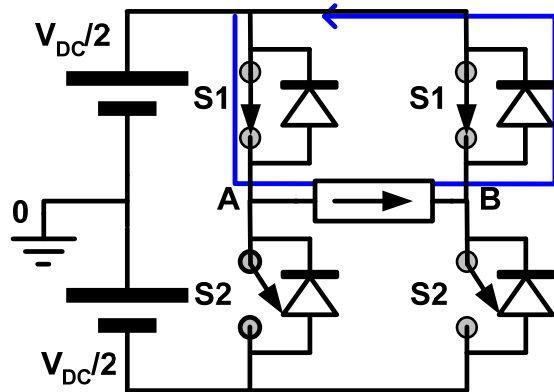
Las fuentes de CC dan energía a la carga



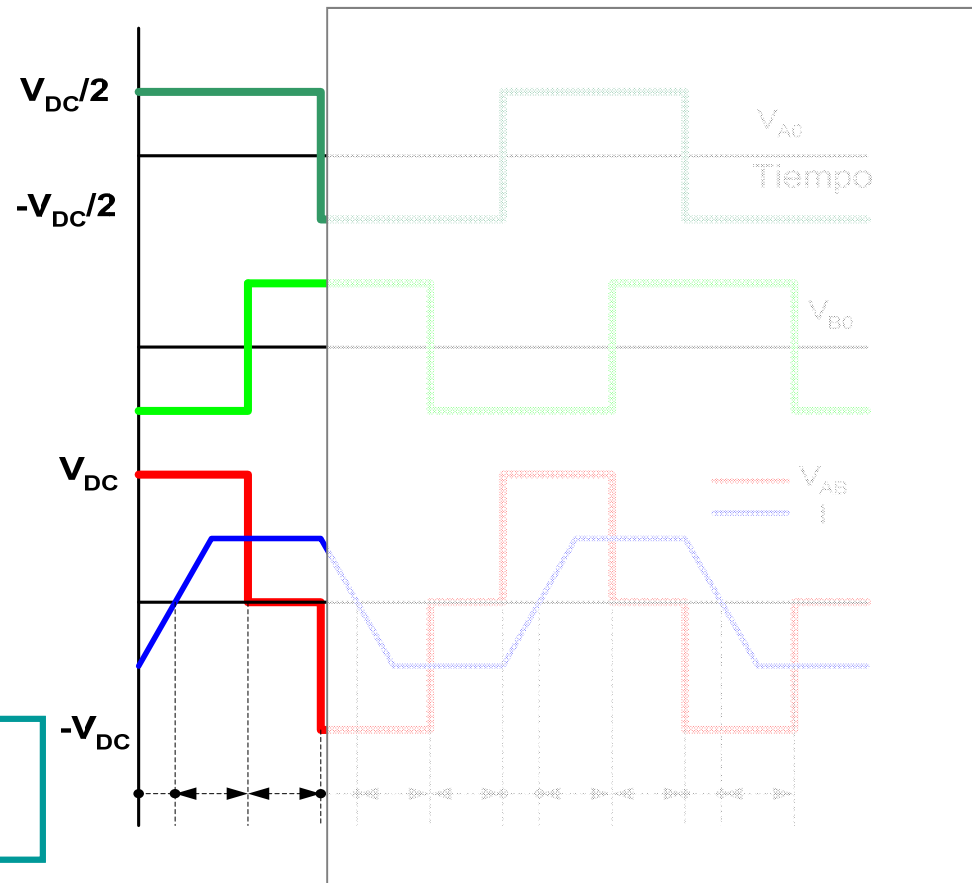


Inversor en Puente Completo

Funcionamiento con Carga Inductiva (III)



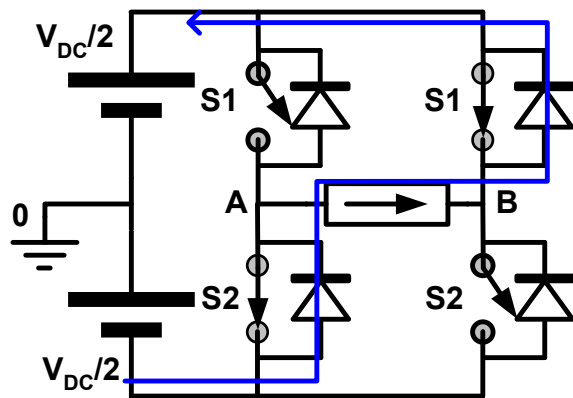
No hay intercambio de energía



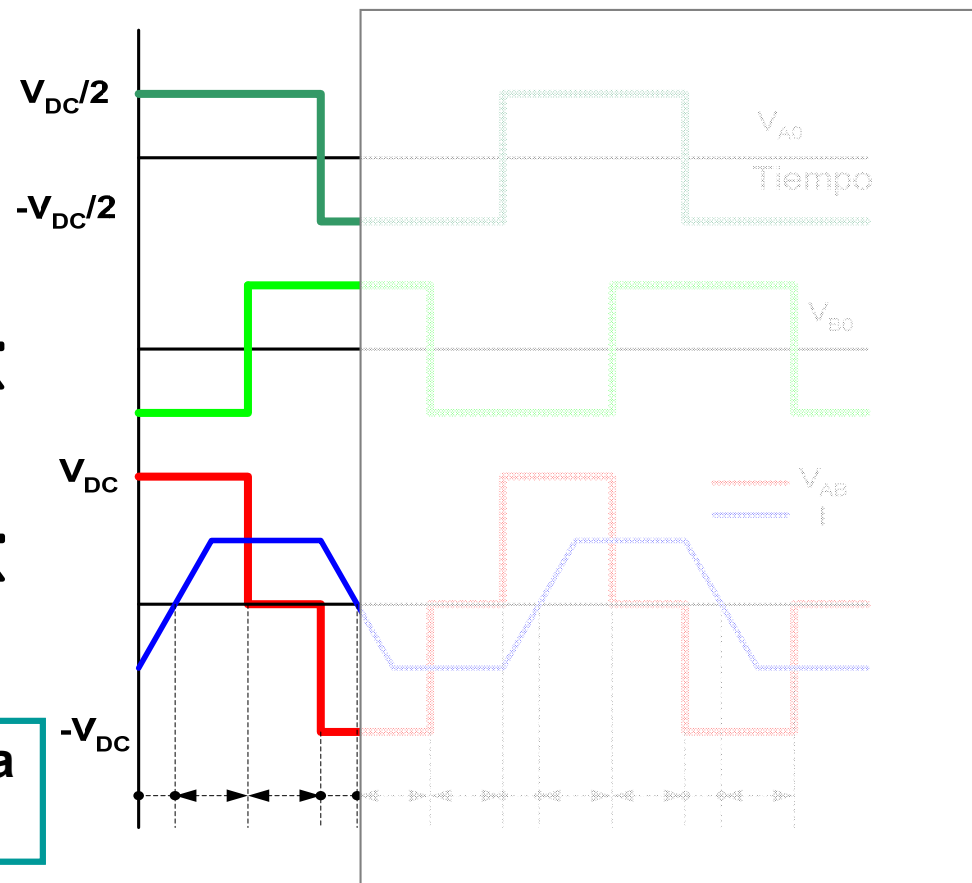


Inversor en Puente Completo

Funcionamiento con Carga Inductiva (IV)



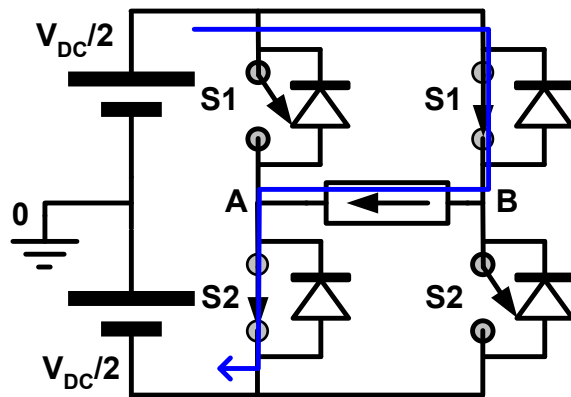
La carga devuelve energía a las fuentes de CC



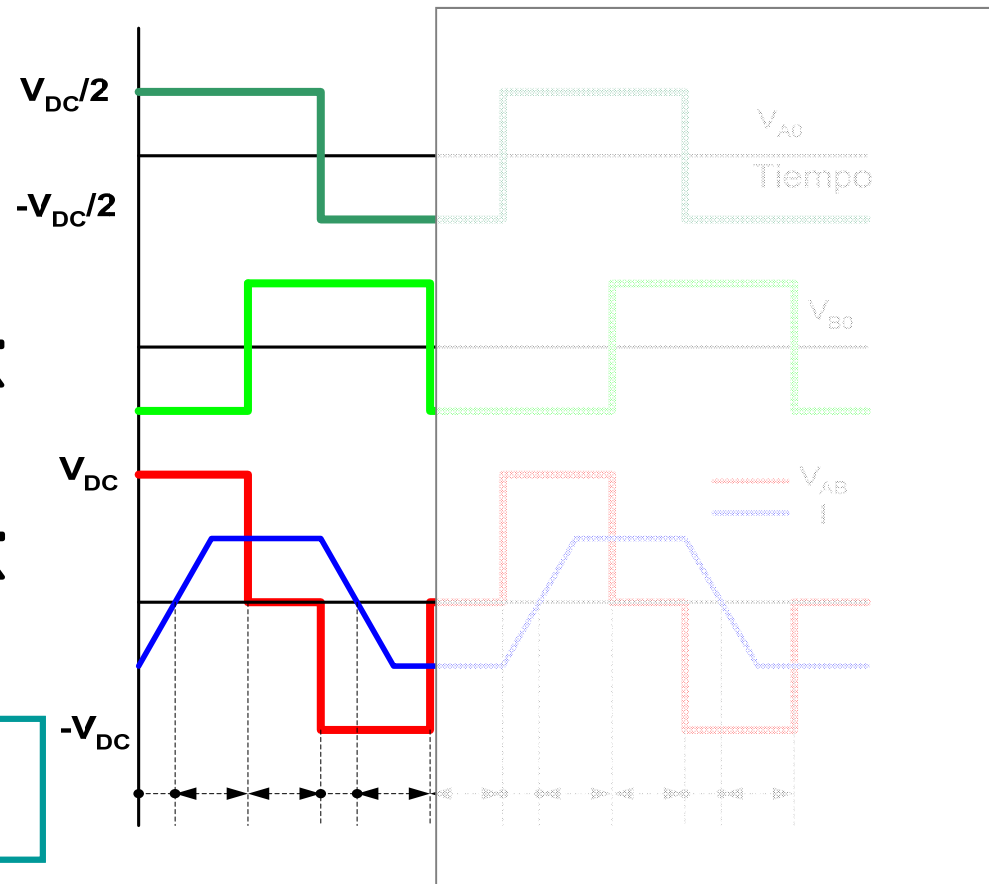


Inversor en Puente Completo

Funcionamiento con Carga Inductiva (V)



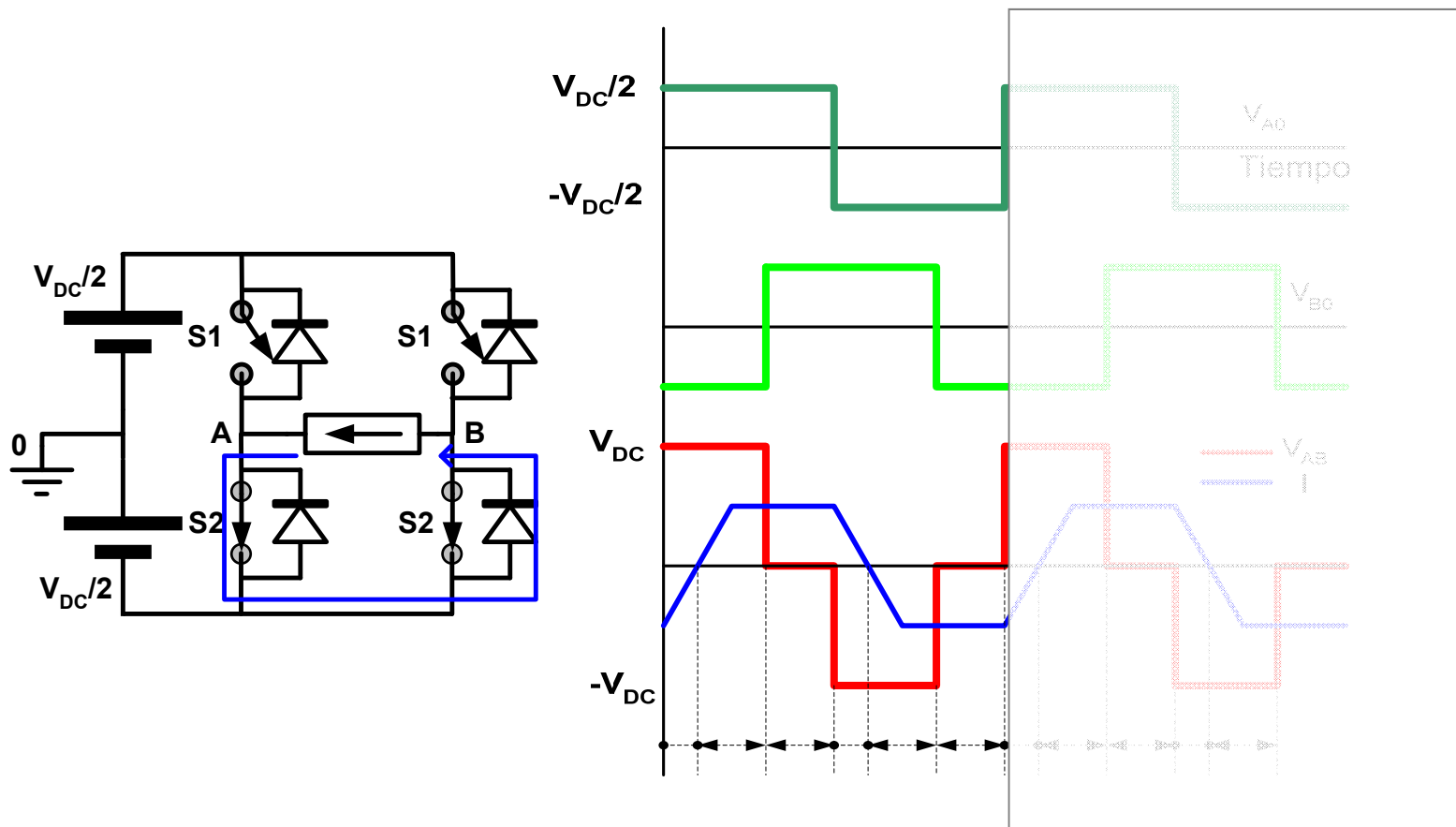
Las fuentes de CC dan energía a la carga





Inversor en Puente Completo

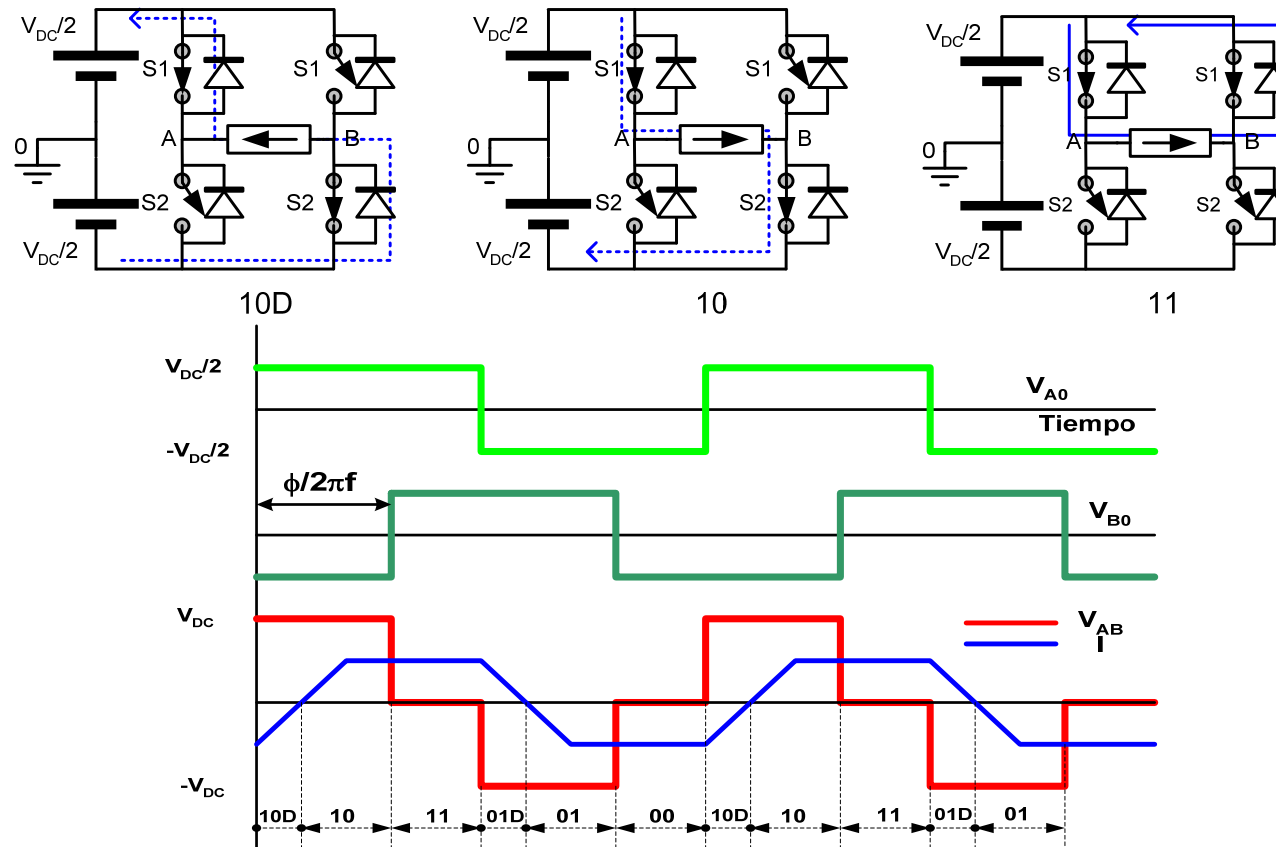
Funcionamiento con Carga Inductiva (VI)





Inversor en Puente Completo

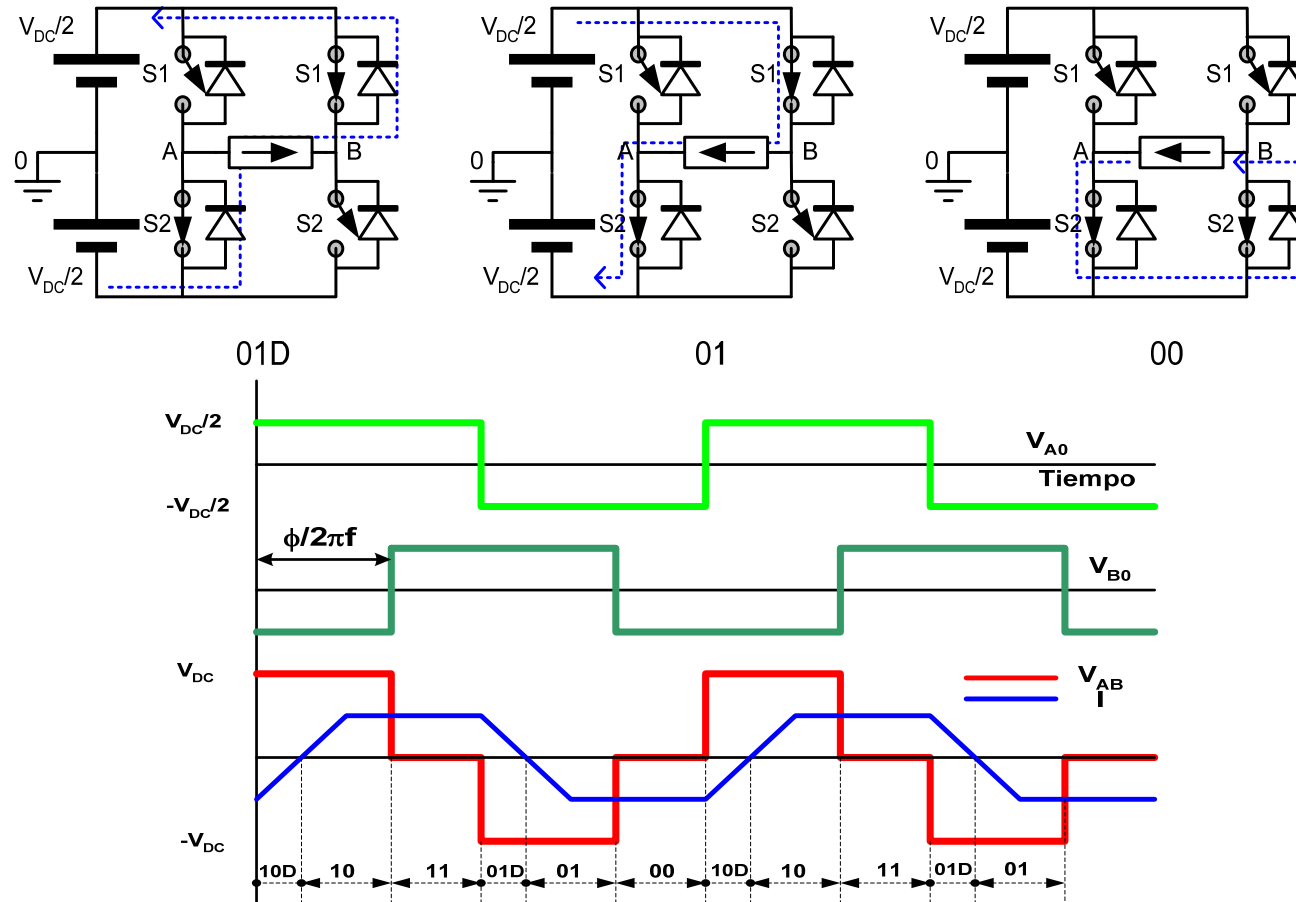
Funcionamiento con Carga Inductiva (VII)





Inversor en Puente Completo

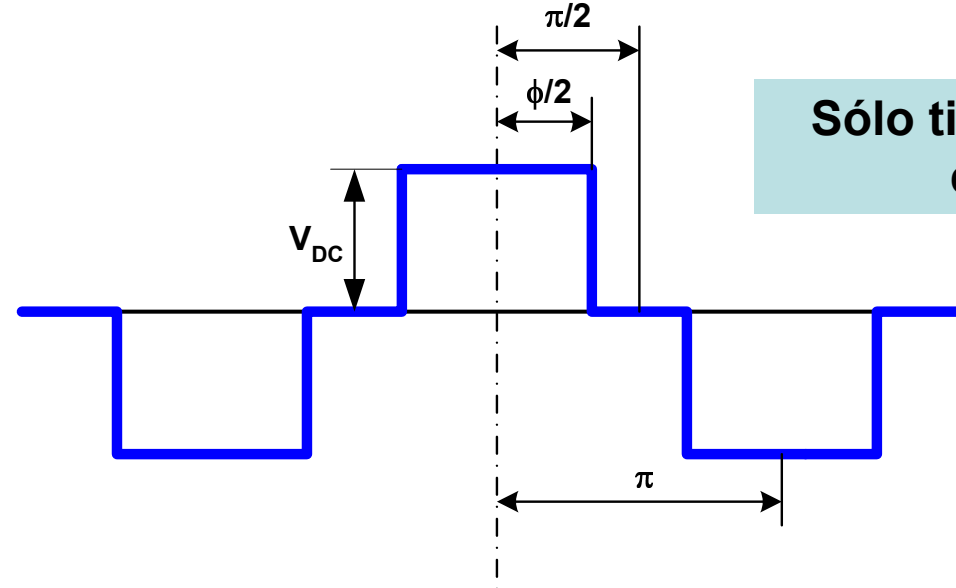
Funcionamiento con Carga Inductiva (VIII)





Inversor en Puente Completo

Variación de la tensión de salida



Sólo tiene términos coseno

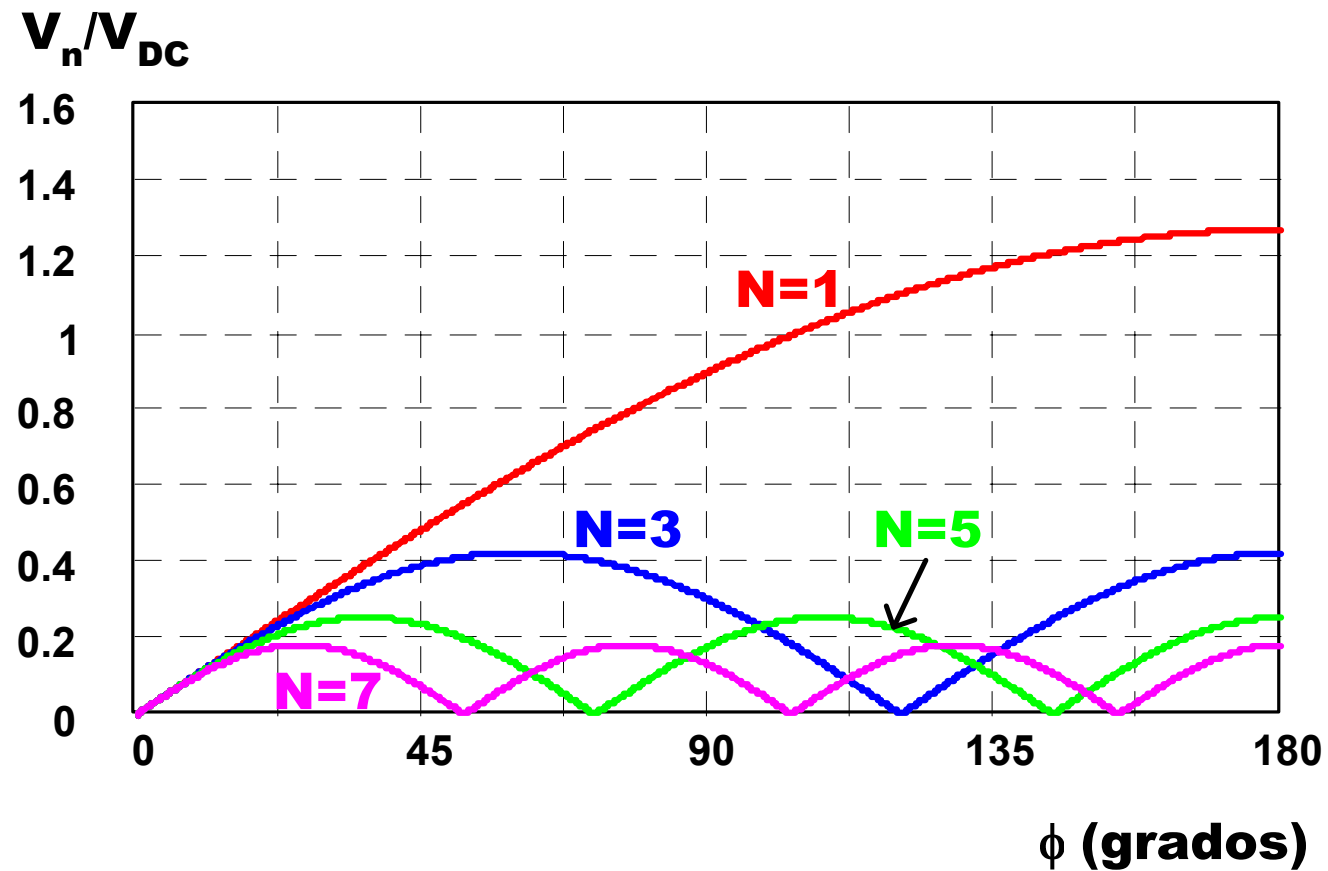
$$V_{AB}(n, \phi) = \frac{4}{\pi} \int_0^{\phi/2} V_{DC} \cos(\omega t) d\omega t = \frac{4V_{DC}}{\pi \cdot n} \sin\left(\frac{\phi}{2} n\right)$$

Sólo son valores válidos n=1,3,5,7.... Donde n=1 es la fundamental o primer armónico



Inversor en Puente Completo

Contenido armónico (I)





Inversor en Puente Completo

Valor eficaz

$$V_{rms}(V_d, \phi) := \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} V_{ab}(V_d, \phi, \omega t)^2 d\omega t}$$

$$V_{abrms}(V_d, \phi) := V_d \cdot \sqrt{\frac{\phi}{\pi}}$$



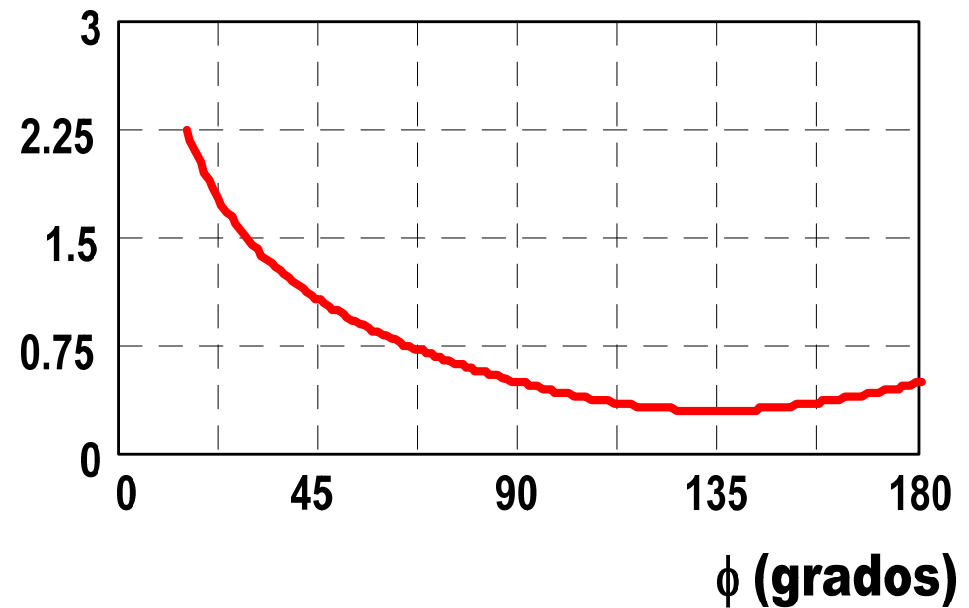
Inversor en Puente Completo

Distorsión armónica

$$\text{THD}(\phi) = \sqrt{\frac{V_{\text{RMS}}^2 - V_{1\text{RMS}}^2}{V_{1\text{RMS}}^2}}$$

Valor eficaz del primer armónico

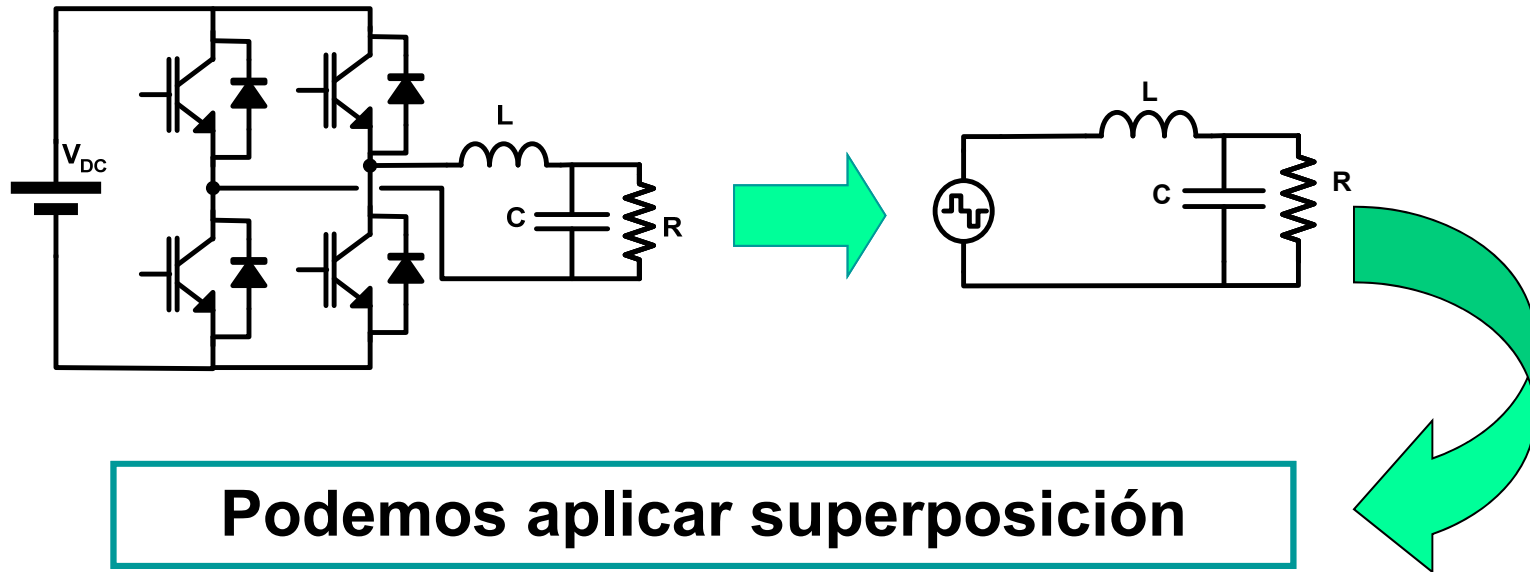
THD(ϕ)





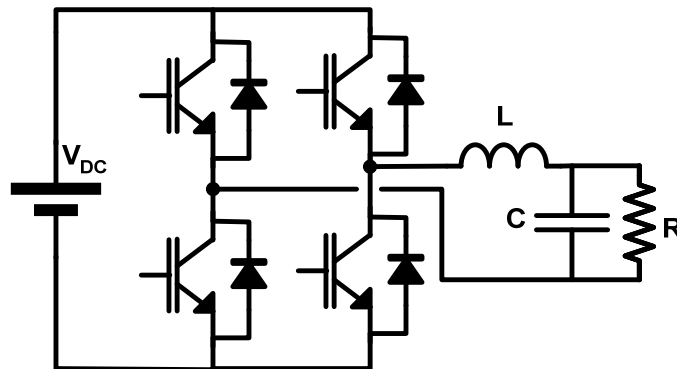
Cálculo utilizando series de Fourier

Circuitos con señales no senoidales



Cálculo utilizando series de Fourier

Ejemplo I: Corriente por la bobina



- La impedancia será diferente para cada armónico (n)

$$Z(n) = n \cdot \omega \cdot L \cdot j - \frac{\frac{R}{n \cdot \omega \cdot C} j}{R - \frac{R}{n \cdot \omega \cdot C} j}$$

- La corriente en la bobina para cada armónico será





Cálculo utilizando series de Fourier

Ejemplo I: Corriente por la bobina

Corriente en función de ωt para cada armónico n (1,3,5,7,.....)

$$I_L(n, \omega t) = \frac{4 \cdot V_{DC}}{\pi n} \operatorname{sen}\left(\frac{\phi}{2} n\right) \cos\left(n\omega t - \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}(Z(n))}{\operatorname{Re}(Z(n))}\right)\right) \frac{1}{|Z(n)|}$$

Diagram illustrating the components of the current equation:

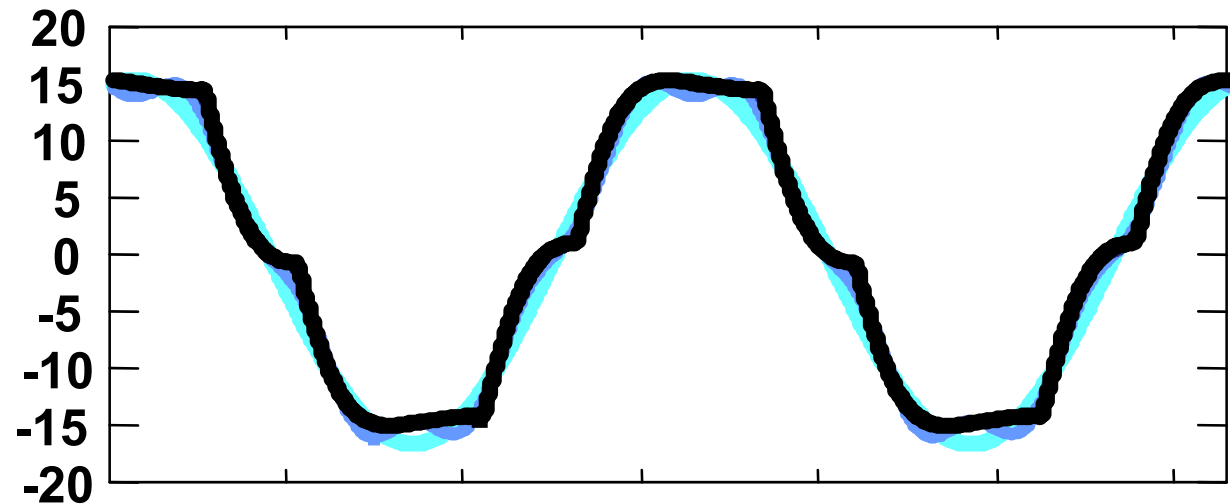
- Parte imaginaria de $Z(n)$** : Points to the imaginary part of the impedance in the arctangent function.
- Parte real de $Z(n)$** : Points to the real part of the impedance in the arctangent function.
- Módulo $Z(n)$** : Points to the magnitude of the impedance in the denominator.



Cálculo utilizando series de Fourier

Ejemplo I: Corriente por la bobina

Diferentes aproximaciones al valor de la corriente en la bobina

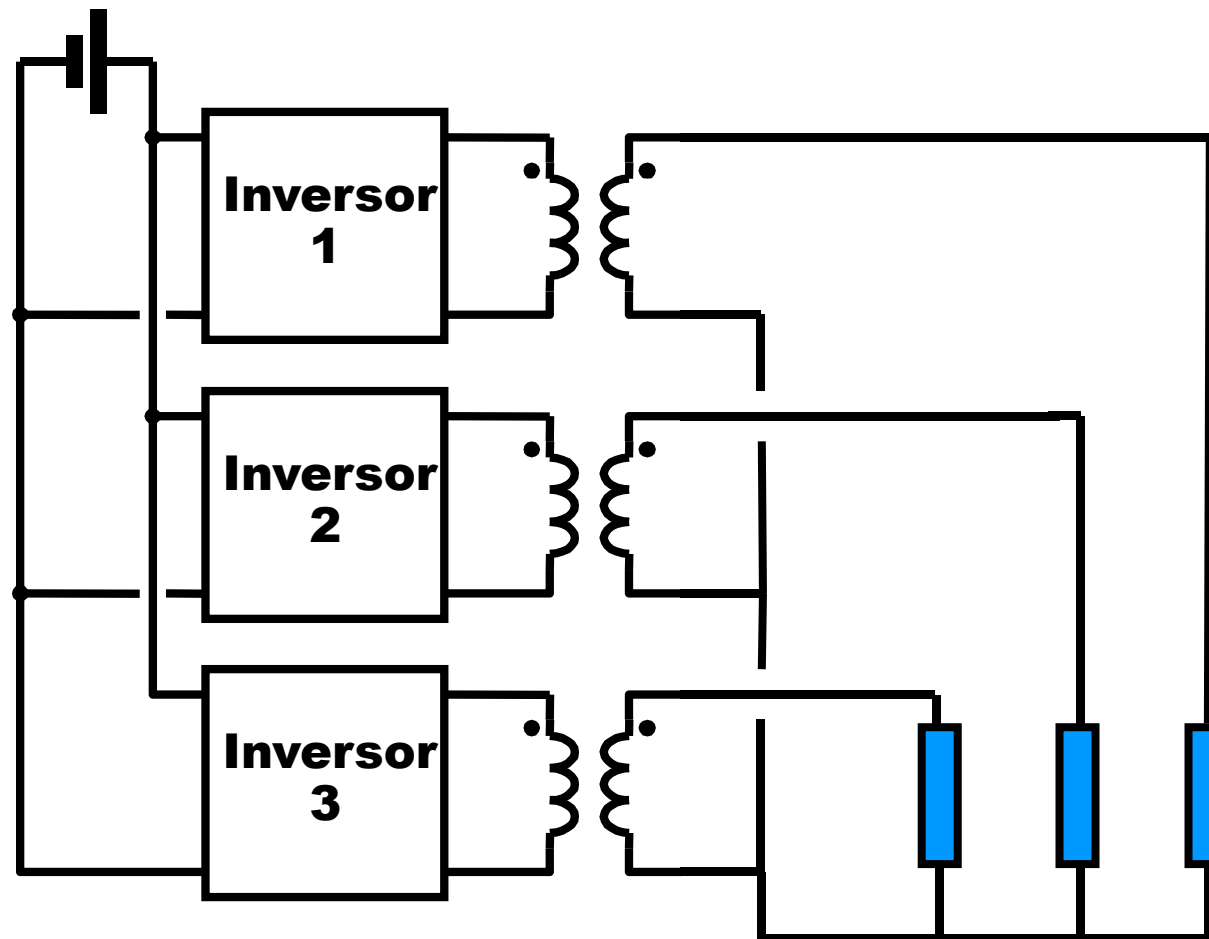


- n=1
- n=1 + n=3
- n=1 + n=3 + n=5
- n=1 + n=3 + n=5 + ... + n=51



Inversores trifásicos

Como unión de 3 monofásicos (I)

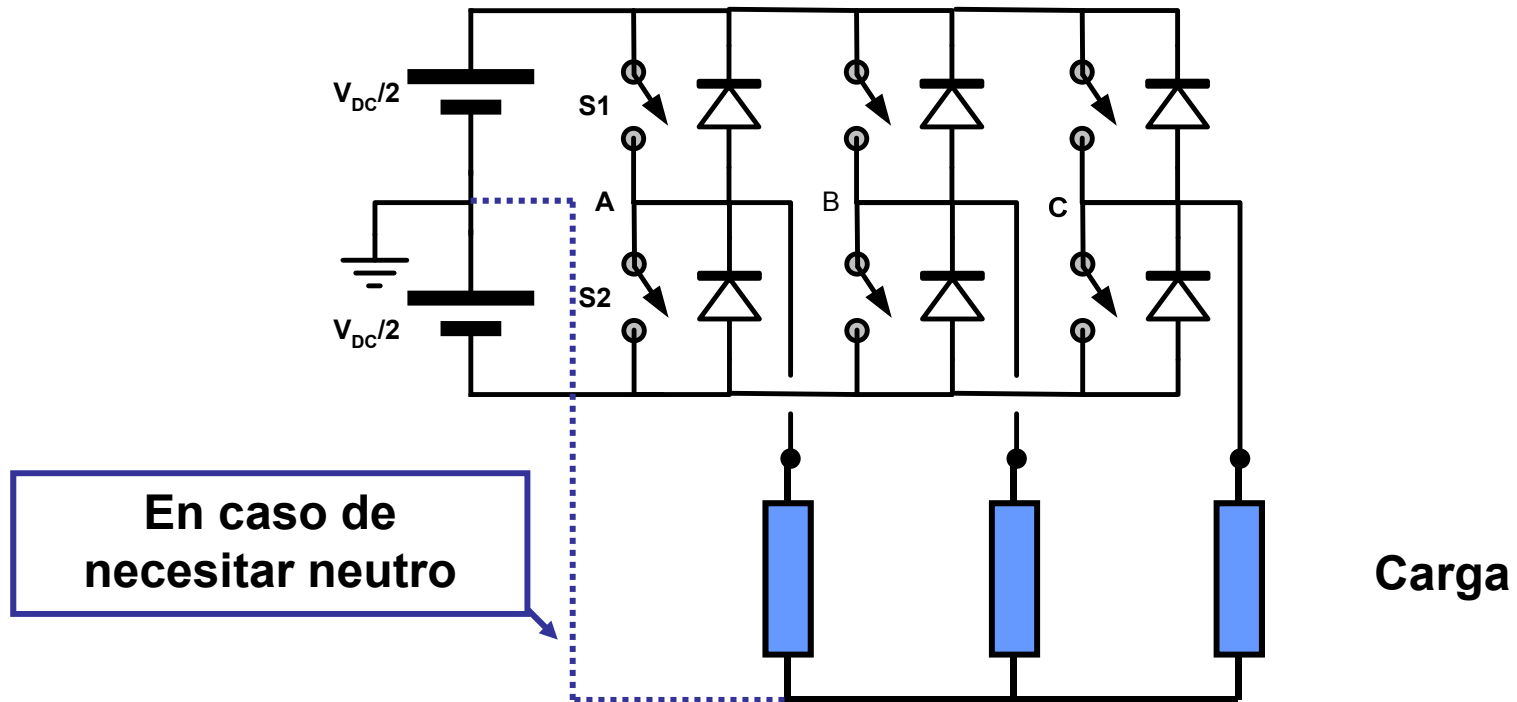




Inversores trifásicos

Como unión de 3 monofásicos (II)

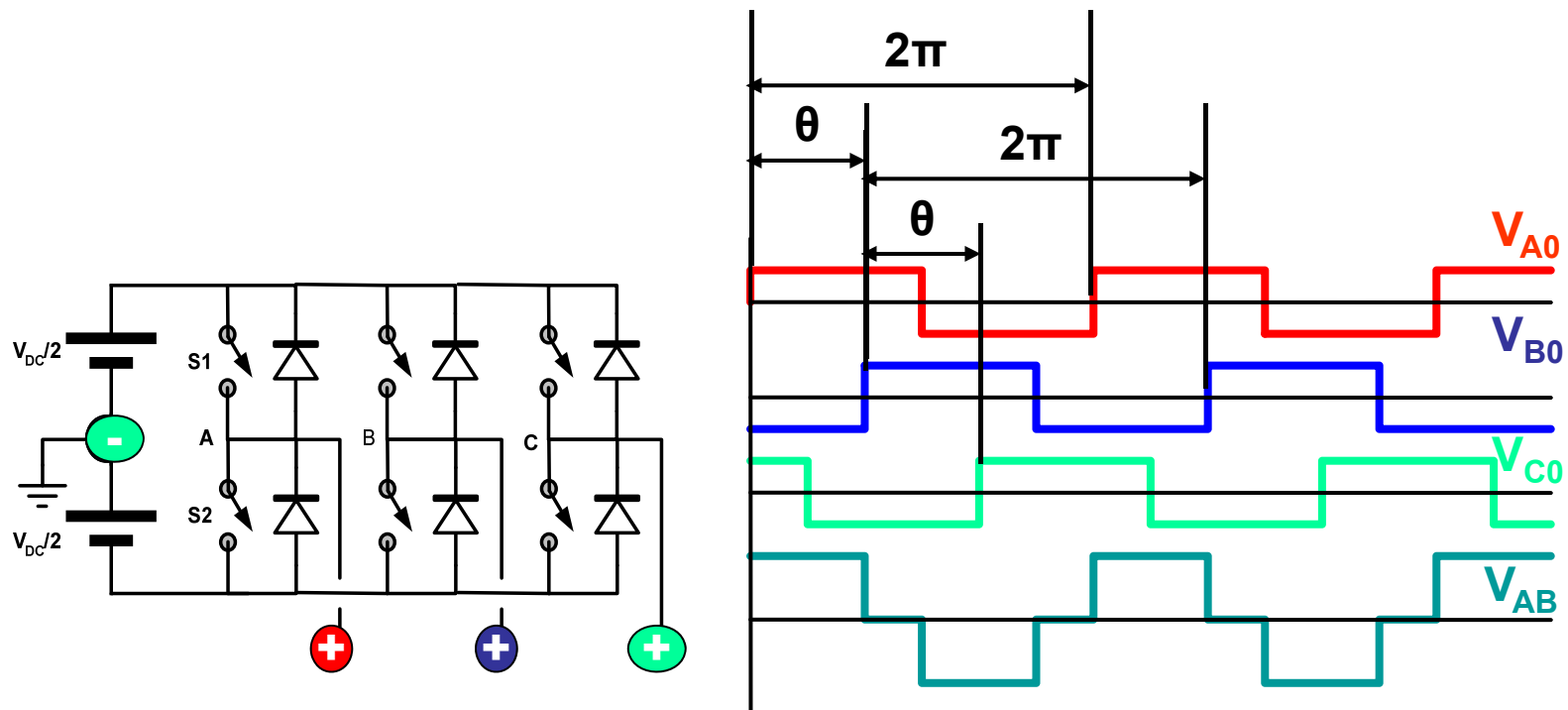
Podemos unir tres inversores en mediopunto





Inversores trifásicos

Como unión de 3 monofásicos (II)



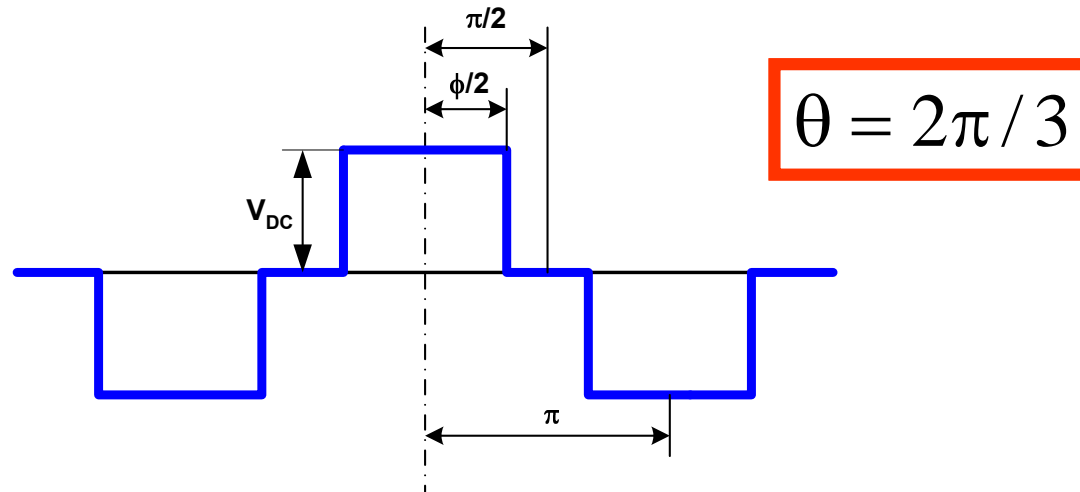
$$\theta = 2\pi / 3$$

$$V_{AB} = V_{A0} - V_{B0}$$



Inversores Trifásicos

Tensión de línea



$$V_{AB}(n, \phi) = \frac{4}{\pi} \int_0^{\phi/2} V_{DC} \cos(\omega t) d\omega t = \frac{4V_{DC}}{\pi \cdot n} \sin\left(\frac{\phi}{2} n\right)$$

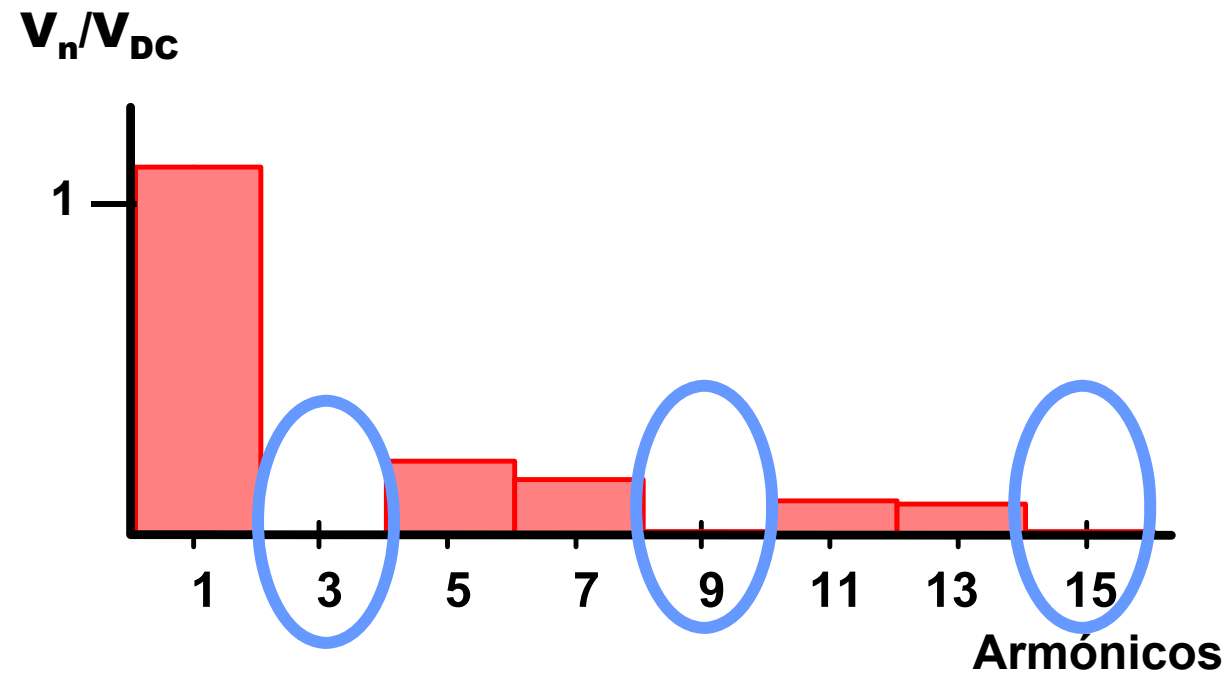
$$V_{AB}(n, 2\pi/3) = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/3} V_{DC} \cos(\omega t) d\omega t = \frac{4V_{DC}}{\pi \cdot n} \sin\left(\frac{\pi}{3} n\right)$$

Todos los armónicos múltiplos de 3 se anulan



Inversores Trifásicos

Contenido armónico de la tensión de línea

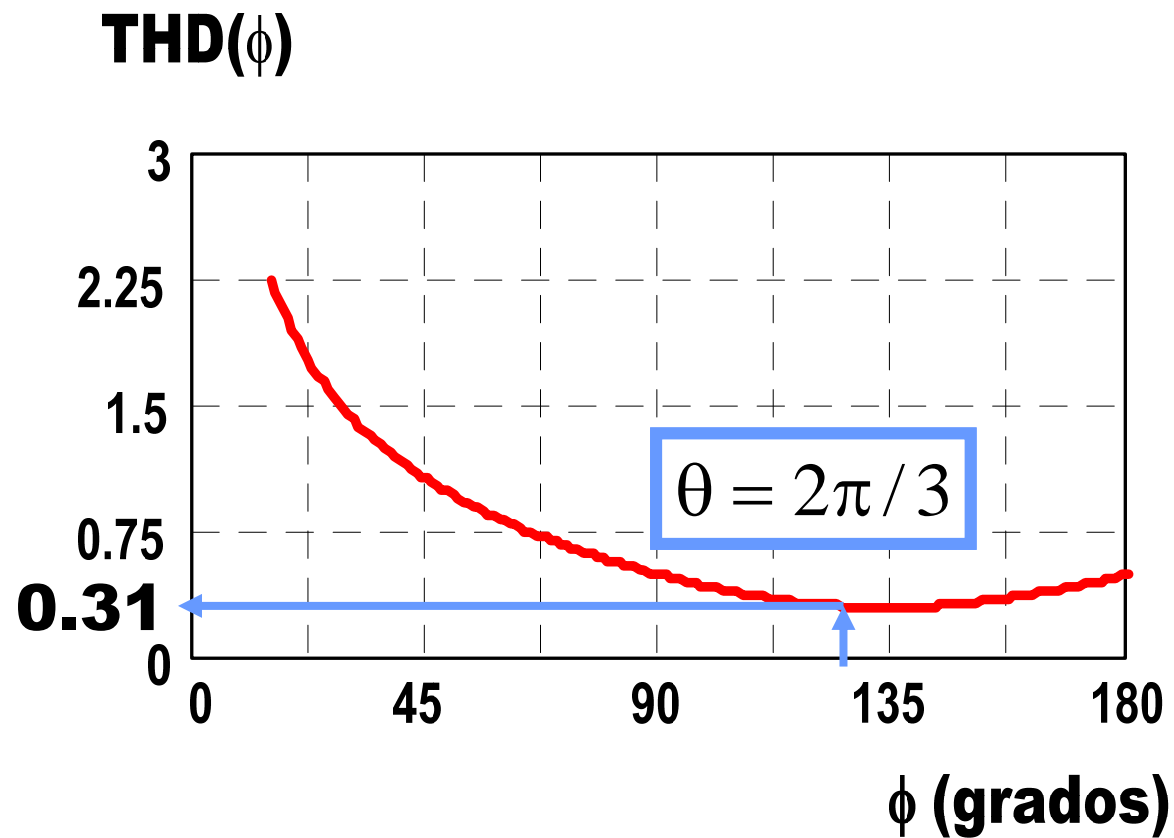


Todos los armónicos múltiplos de 3 se anulan



Inversores Trifásicos

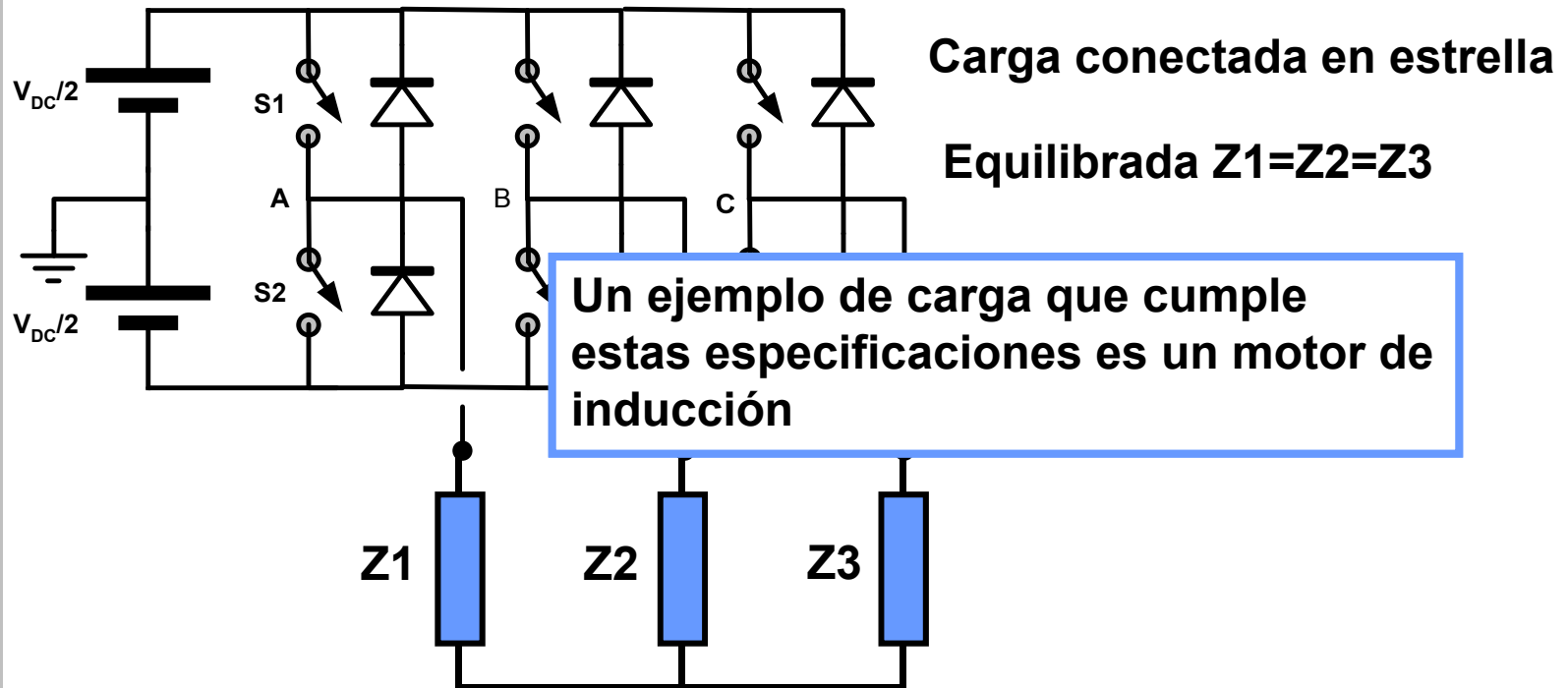
Distorsión armónica





Inversores Trifásicos

Tensión de fase con carga en estrella equilibrada

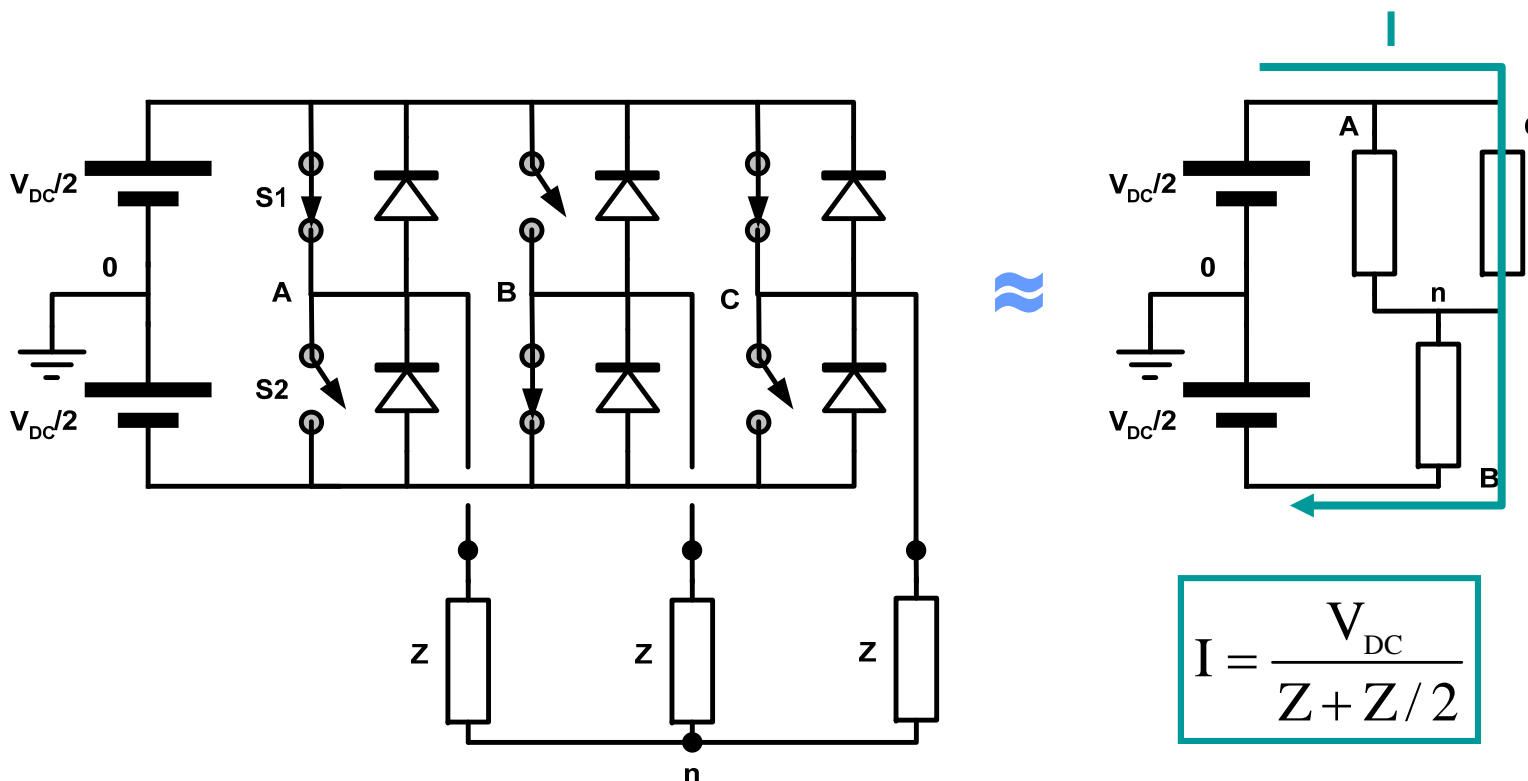




Inversores Trifásicos

Tensión de fase con carga en estrella equilibrada

Interruptores cerrados: S1A, S2B, S1C

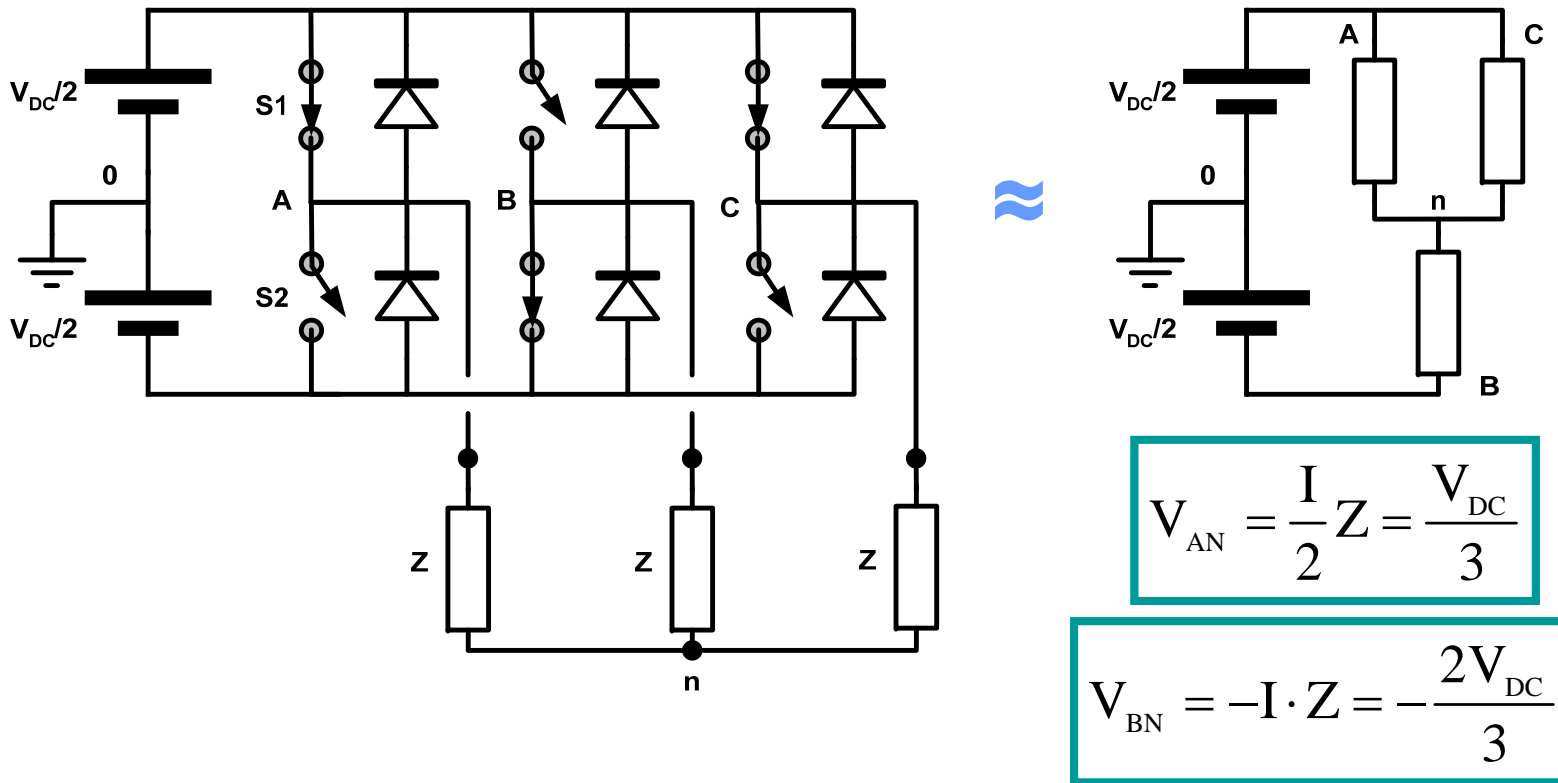




Inversores Trifásicos

Tensión de fase con carga en estrella equilibrada

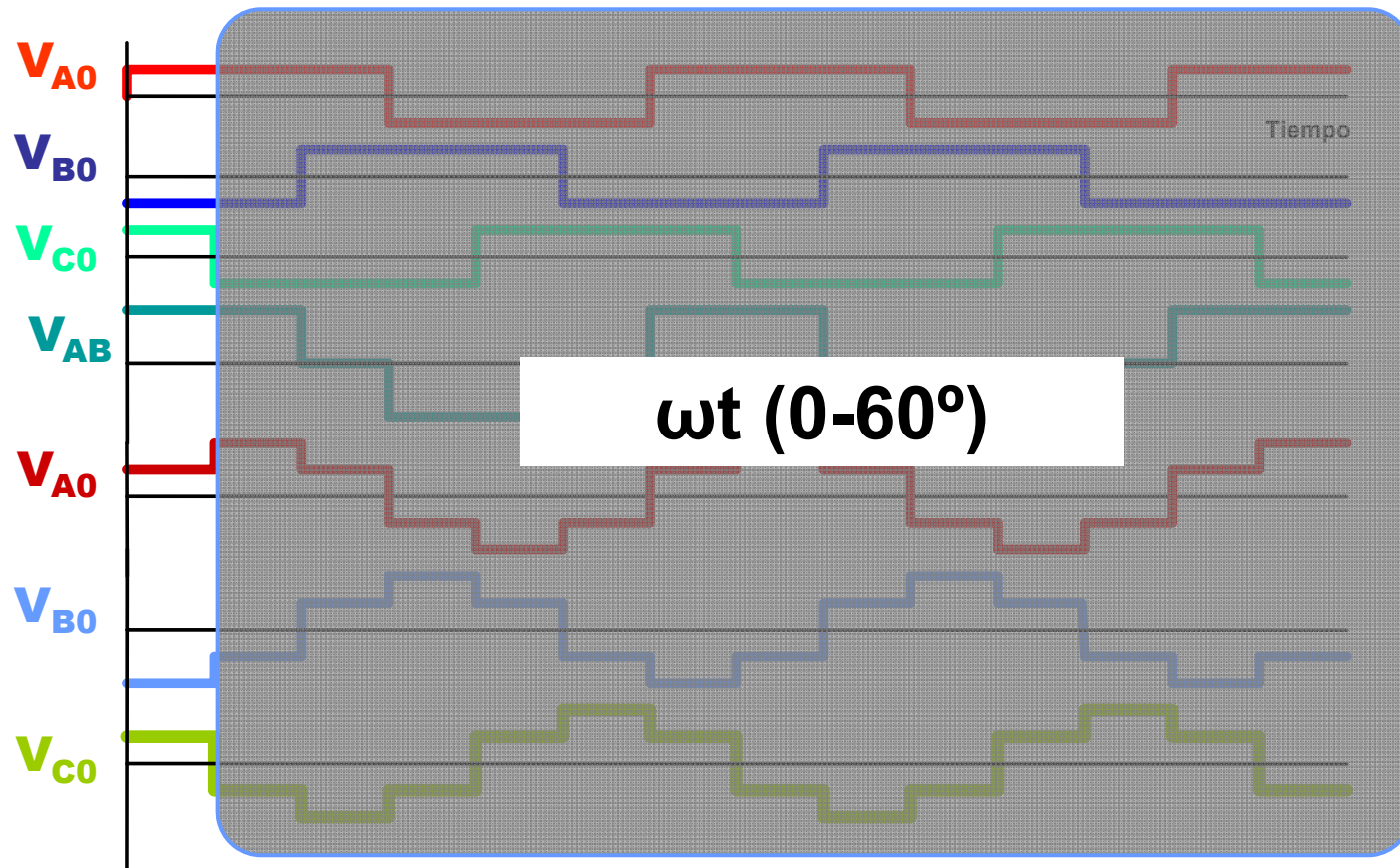
Interruptores cerrados: S1A, S2B, S1C





Inversores Trifásicos

Interruptores cerrados: S1A, S2B, S1C

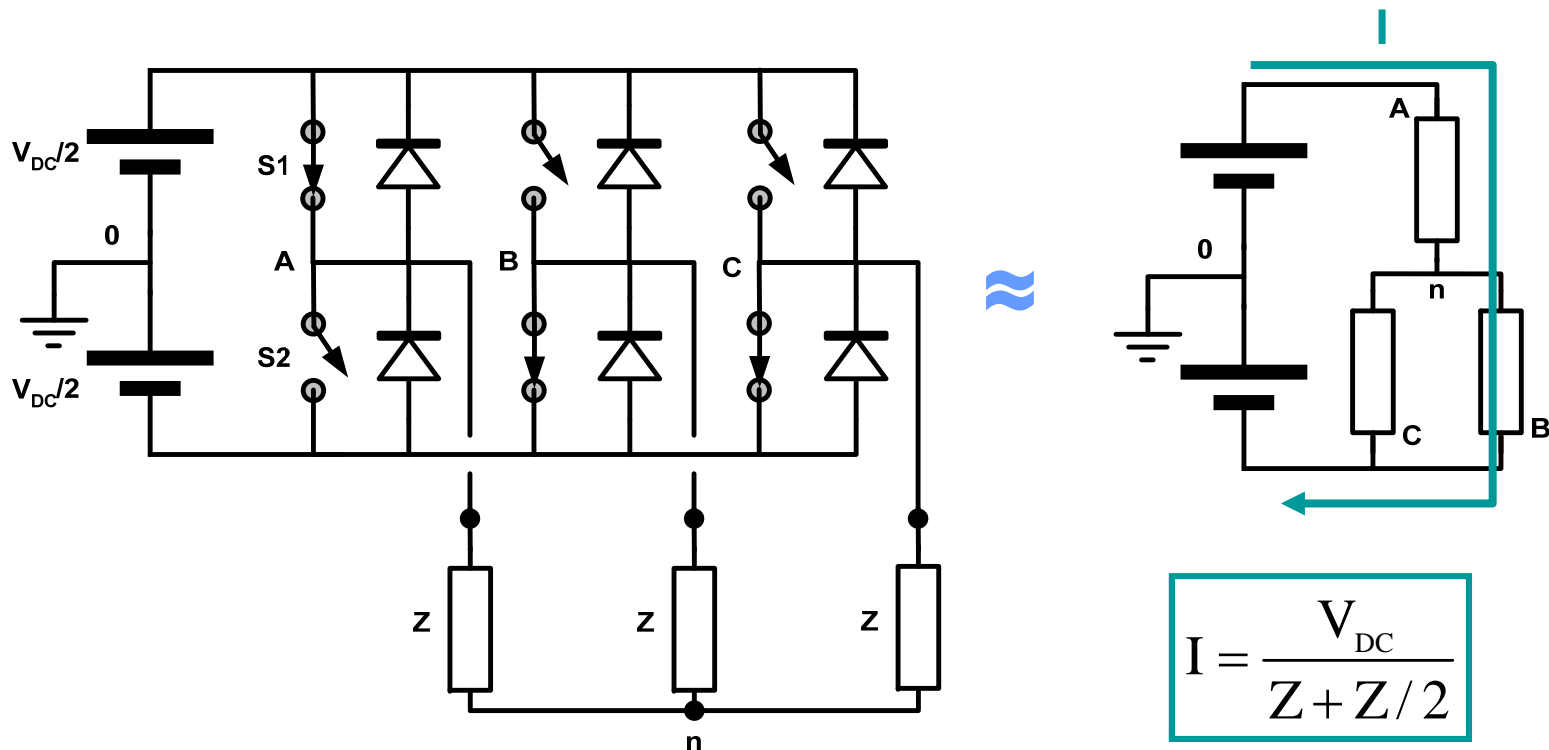




Inversores Trifásicos

Tensión de fase con carga en estrella equilibrada

Interruptores cerrados: S1A, S2B, S2C

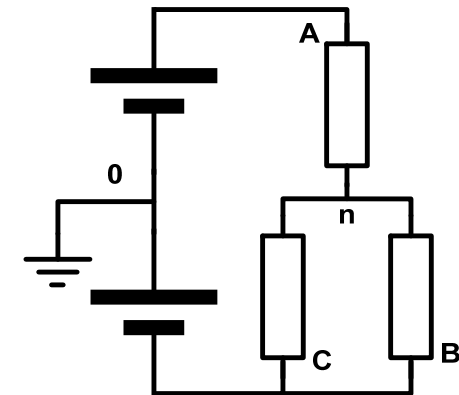
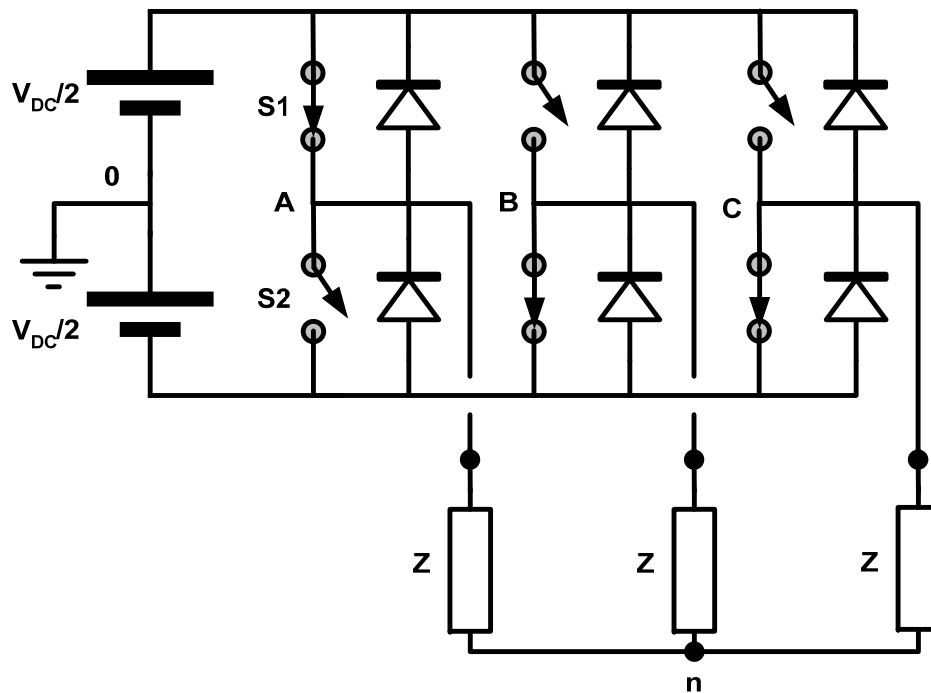




Inversores Trifásicos

Tensión de fase con carga en estrella equilibrada

Interruptores cerrados: S1A, S2B, S2C



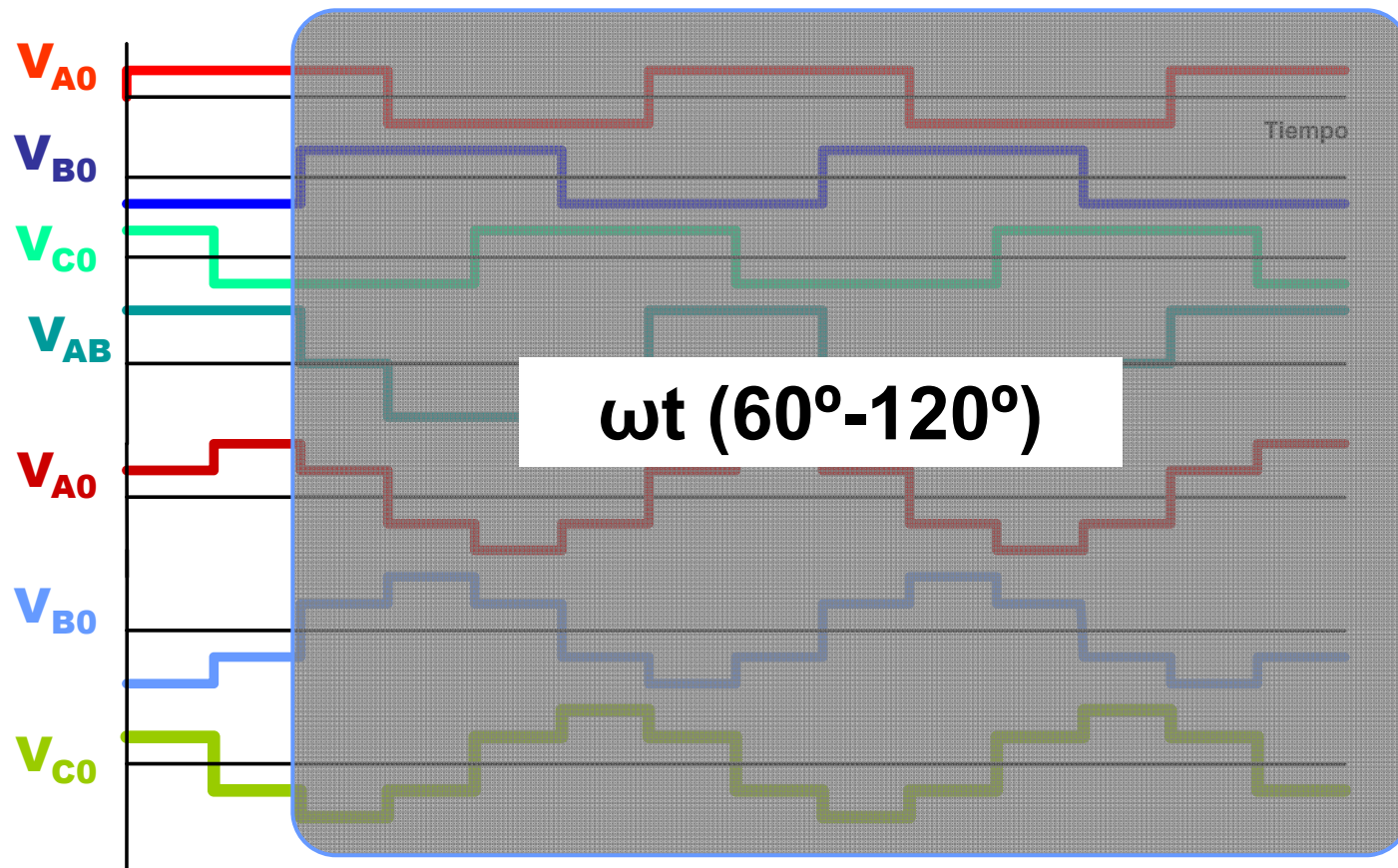
$$V_{AN} = I \cdot Z = \frac{2V_{DC}}{3}$$

$$V_{BN} = V_{CN} = -\frac{I}{2} \cdot Z = -\frac{V_{DC}}{3}$$



Inversores Trifásicos

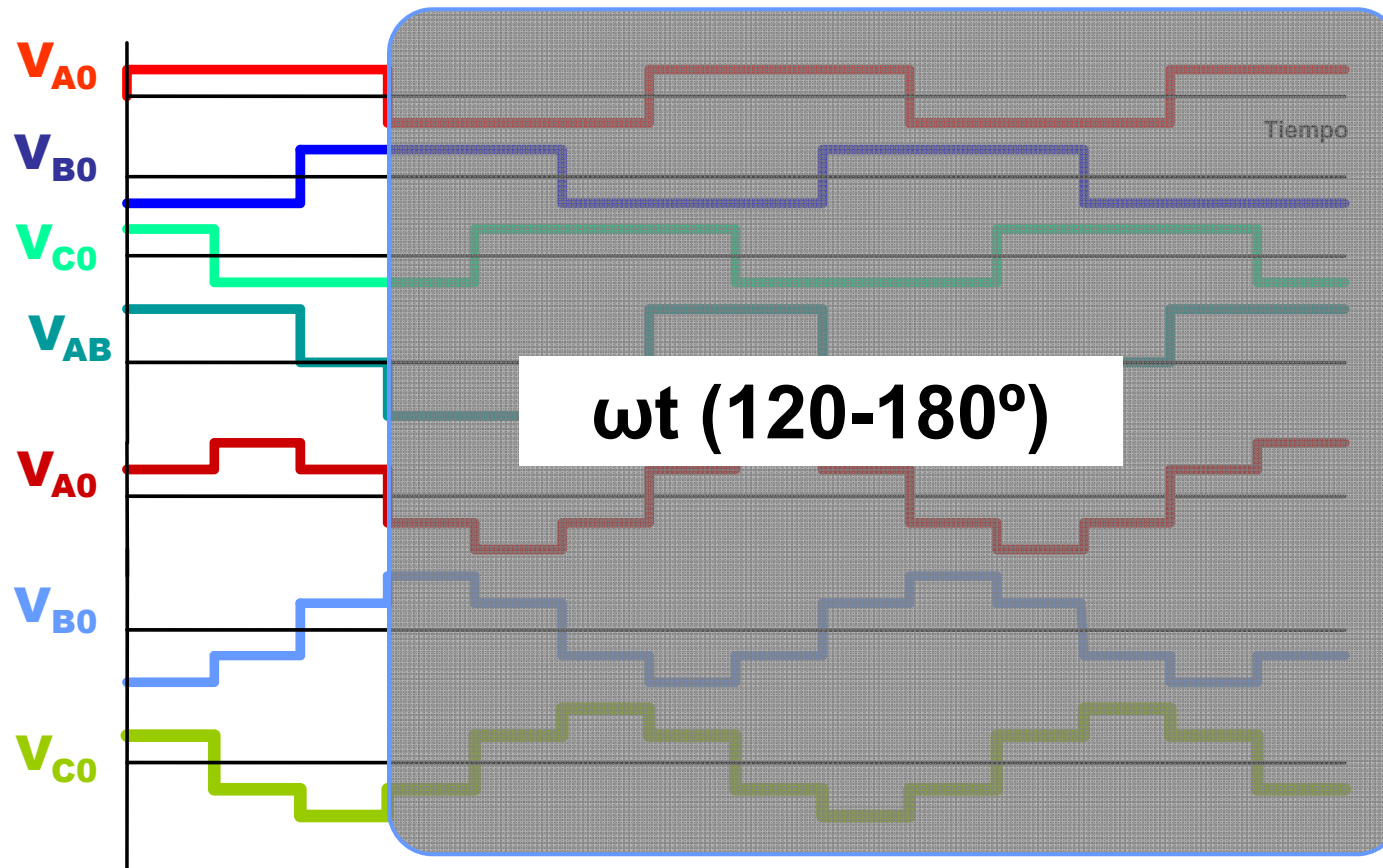
Interrupidores cerrados: S1A, S2B, S2C





Inversores Trifásicos

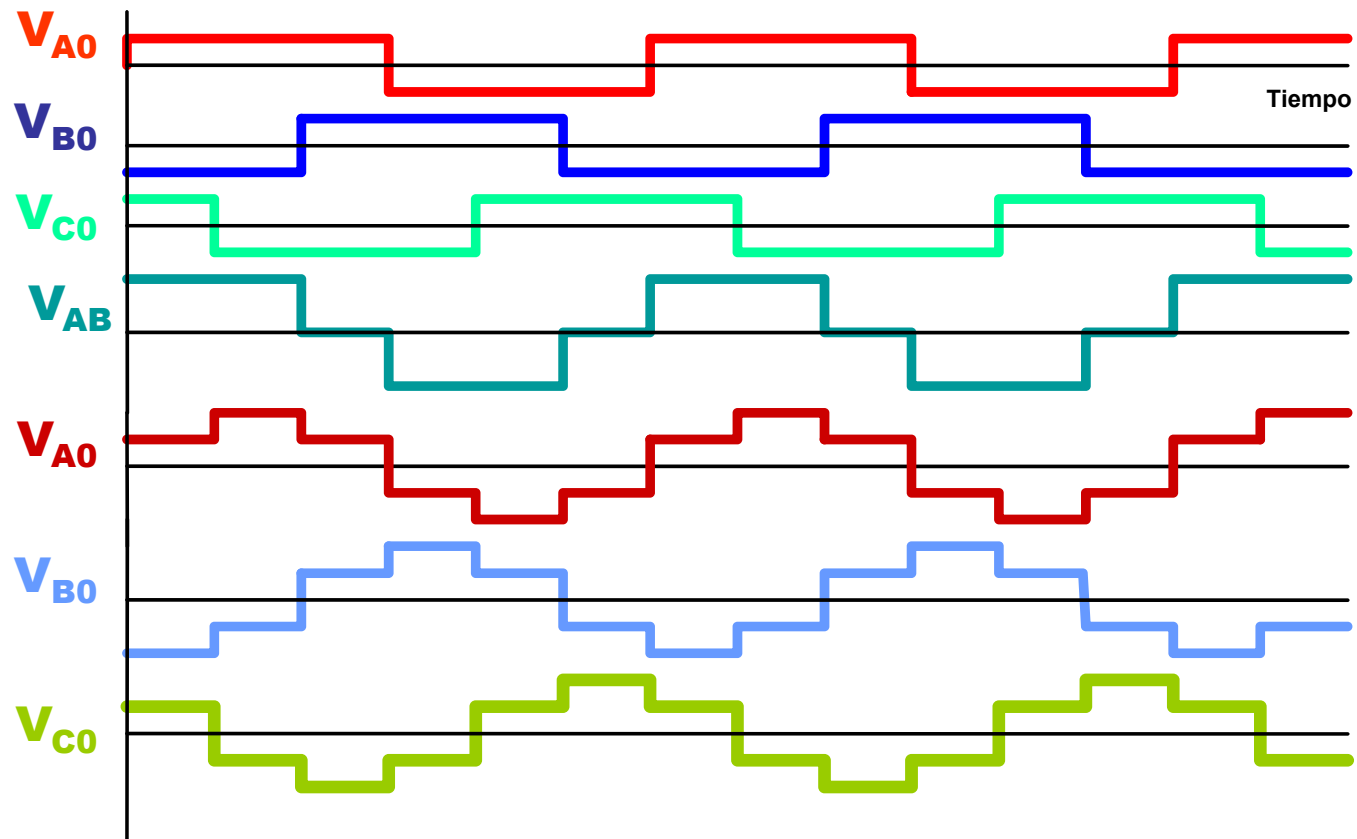
Interruptores cerrados: S1A, S1B, S2C





Inversores Trifásicos

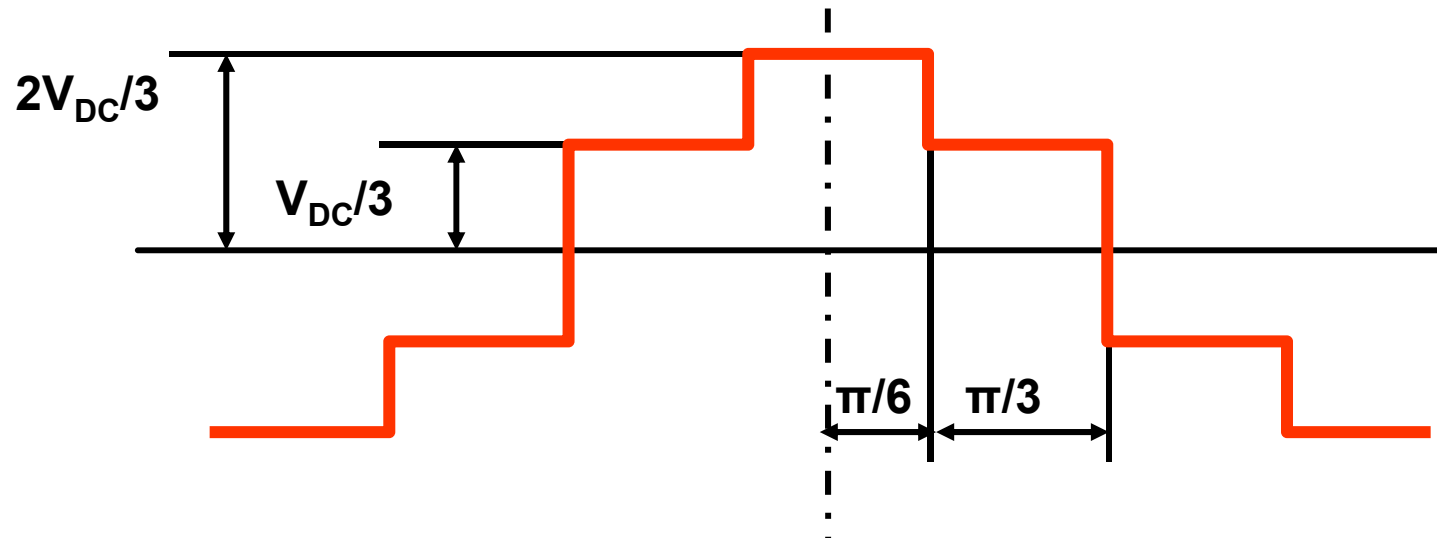
Tensiones





Inversores Trifásicos

Desarrollo en serie de Fourier de la tensión de fase



$$V_{AN}(n) = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/6} \frac{2V_{DC}}{3} \cos(\omega t) d\omega t + \frac{4}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/6+\pi/3} \frac{V_{DC}}{3} \cos(\omega t) d\omega t =$$

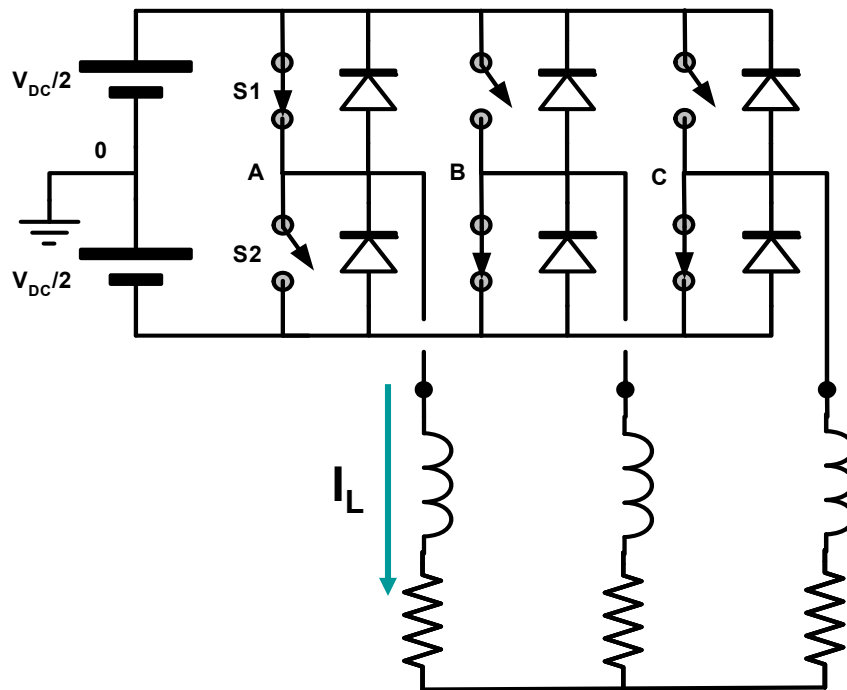
$$V_{AN}(n) = \frac{4}{3} \frac{V_{DC}}{n\pi} \left[\text{sen}\left(\frac{1}{6}n\pi\right) + \text{sen}\left(\frac{1}{2}n\pi\right) \right]$$

Sólo son valores válidos $n=1,3,5,7,\dots$. Donde $n=1$ es la fundamental o primer armónico



Inversores Trifásicos

Ejemplo de cálculo



$$R=10\Omega$$

$$L=0.01H$$

$$F=50Hz$$

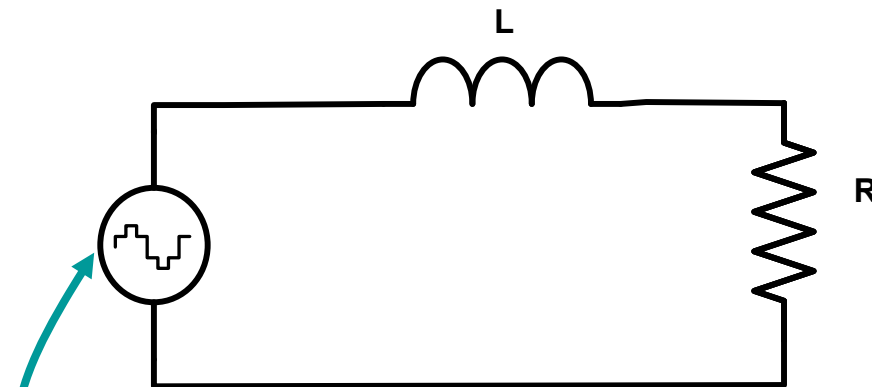
$$V_{DC}=500V$$

¿ I_L ?



Inversores Trifásicos

Equivalente monofásico



$$R=10\Omega$$

$$L=0.01H$$

$$F=50Hz$$

$$V_{DC}=500V$$

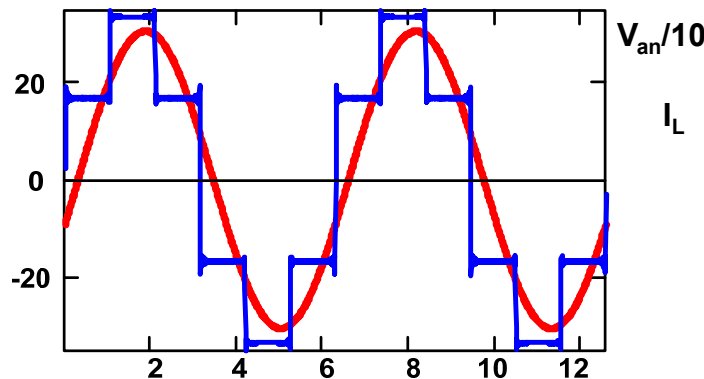
$$V_{AN}(n, \phi) = \frac{4}{3} \frac{V_{DC}}{n\pi} \left[\text{sen}\left(\frac{1}{6}n\pi\right) + \text{sen}\left(\frac{1}{2}n\pi\right) \right]$$



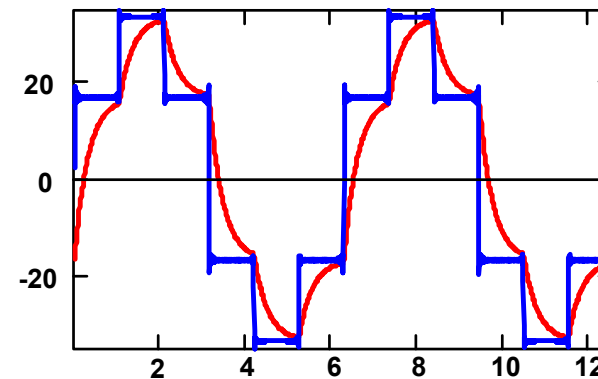
Inversores Trifásicos

Solución

$$I(n) = \frac{V_{AN}(n)}{|Z(n)|} \cos\left(n\omega t - \arctg\left(\frac{\text{Im}(Z(n))}{\text{Re}(Z(n))}\right)\right)$$



Aproximación con un armónico



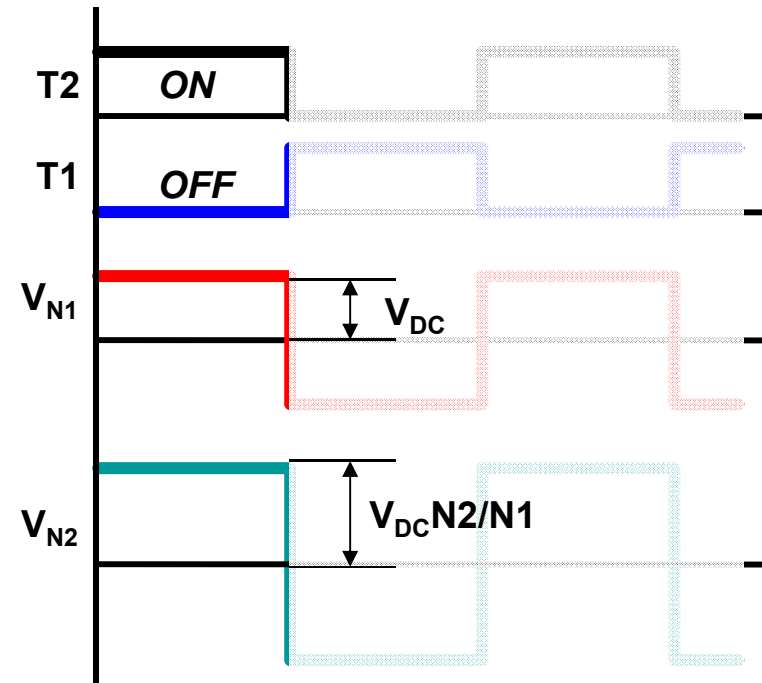
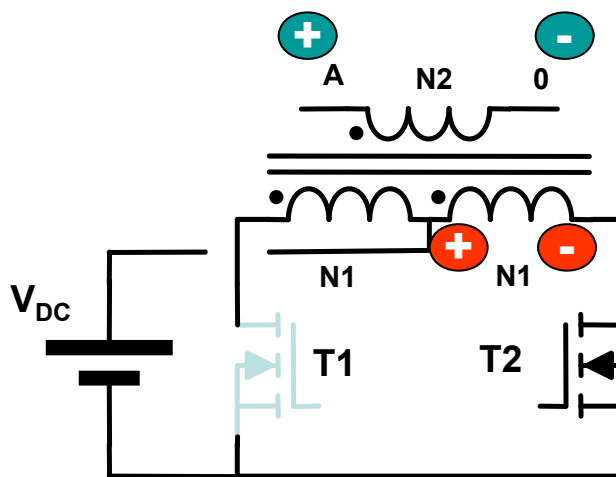
Aproximación con 20 armónicos



Otras configuraciones

Con transformador de toma media (medio puente)

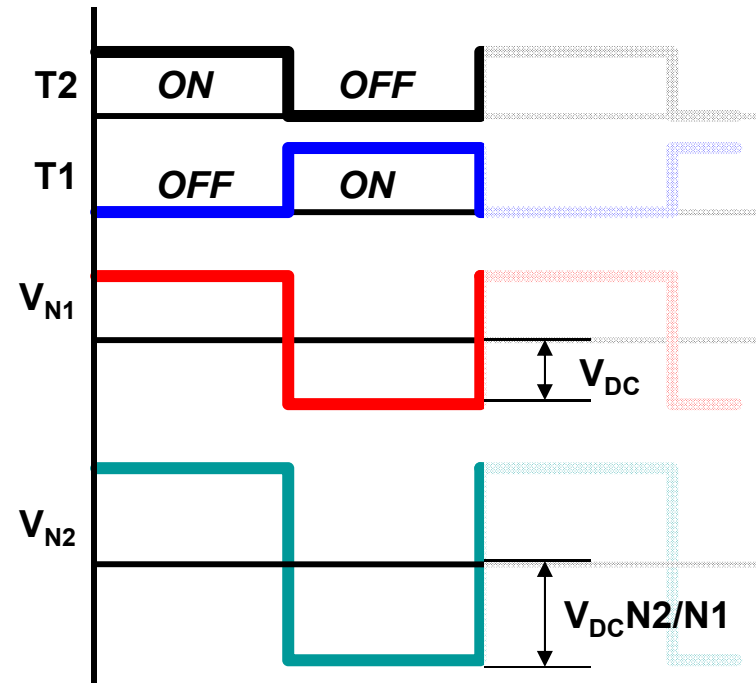
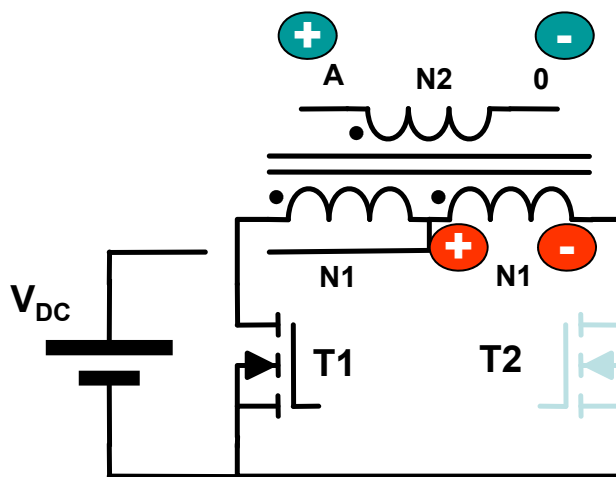
La tensión soportada por los transistores es $2 \cdot V_{N1} = 2V_{DC}$





Otras configuraciones

Con transformador de toma media (medio puente)

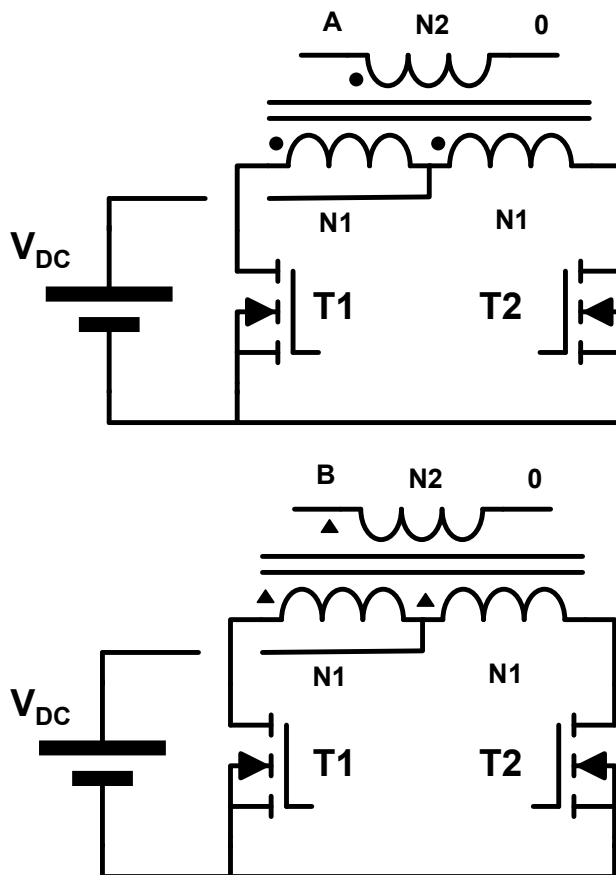




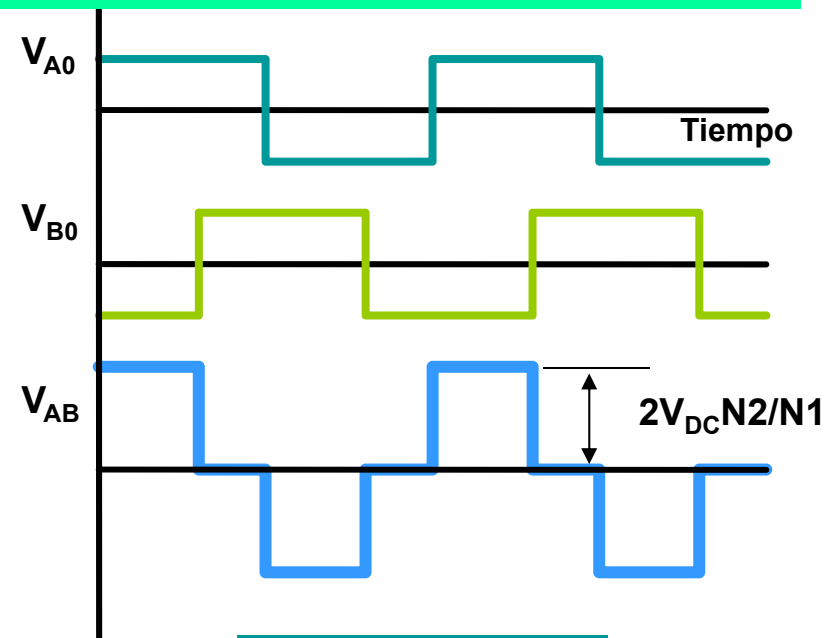
Otras configuraciones

Control de la tensión de salida

(≈puente completo)



Puedo obtener una señal de tres niveles y controlar la tensión



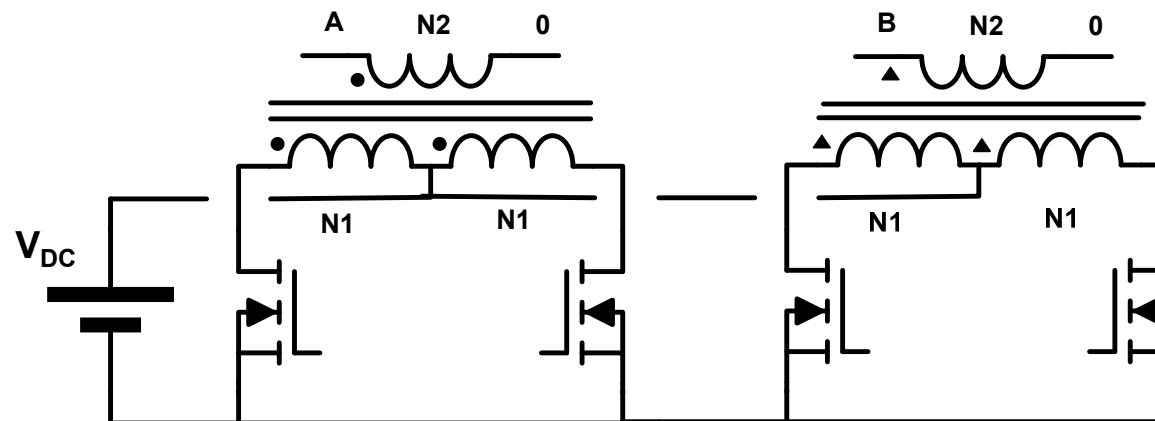
$$V_{AB} = V_{A0} - V_{B0}$$



Otras configuraciones

Con transformador de toma media (puente)

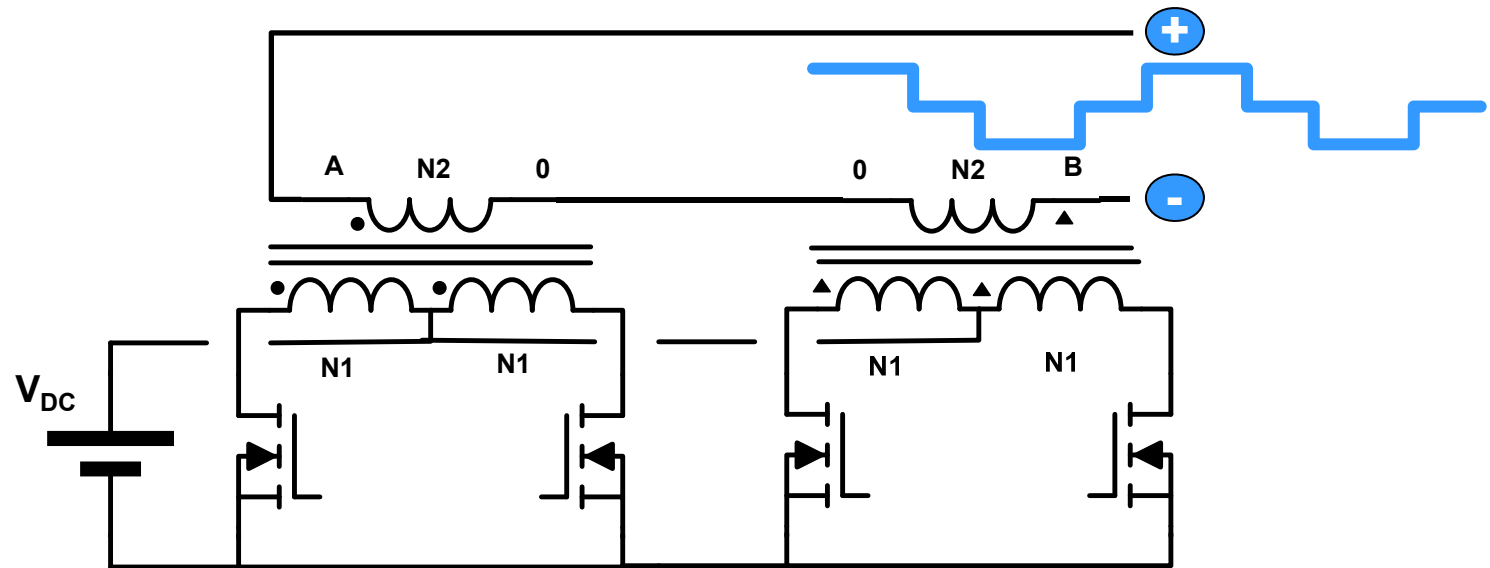
Para obtener V_{AB} debemos unir los terminales "0"





Otras configuraciones

Con transformador de toma media (puente)





Otras configuraciones

Comparativa. Puente VS Toma-media

La comparativa se realizará mediante un diseño con las siguientes características:

| | |
|-------------------------|--|
| Potencia nominal | 1kVA |
| V salida | 220V (eficaces) |
| Tensión de alimentación | 24V (+10% y -15%) |
| Frecuencia | 50Hz |
| Rendimiento estimado | 85% |
| Transistores MOSFET | $\left\{ \begin{array}{l} R_{DSon}=0,04\Omega \\ I_{pico}=25A \end{array} \right.$ |



Otras configuraciones

Comparativa. Puente VS Toma-media

Datos a calcular en el diseño, para realizar la comparativa:

Relación de transformación

Nº de transistores

Tensión soportada por los transistores

Calidad de la tensión de salida

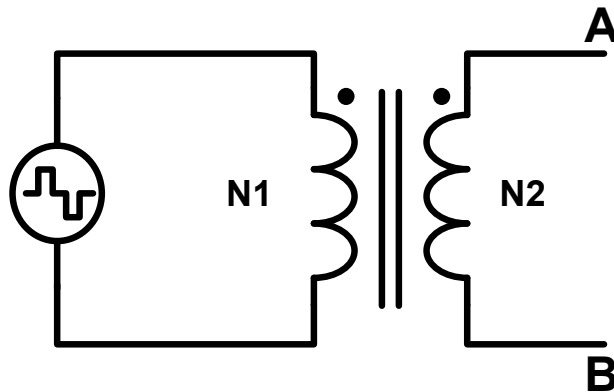
Factor de utilización de los transformadores



Otras configuraciones

Cálculos para el Punte

Relación de transformación y calidad de la tensión de salida



$$V_{AB}(n, \phi) = \frac{4V_{DC}}{\pi \cdot n} \sin\left(\frac{\phi}{2} n\right) \frac{N2}{N1}$$

Para mantener el valor del primer armónico constante ($n=1$) a pesar de que varíe V_{DC} el sistema de control tendrá que modificar el ángulo ϕ

Teóricamente el valor máximo de ϕ es 180° , sin embargo el valor que tomemos afectará a la distorsión y por tanto a la calidad de la señal



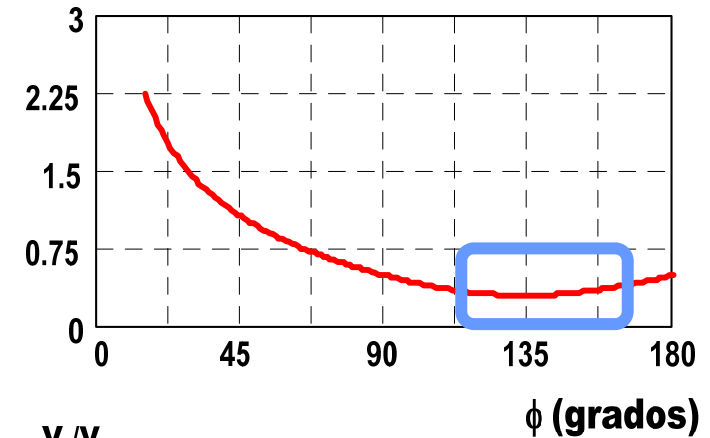
Otras configuraciones

Cálculos para el Puente

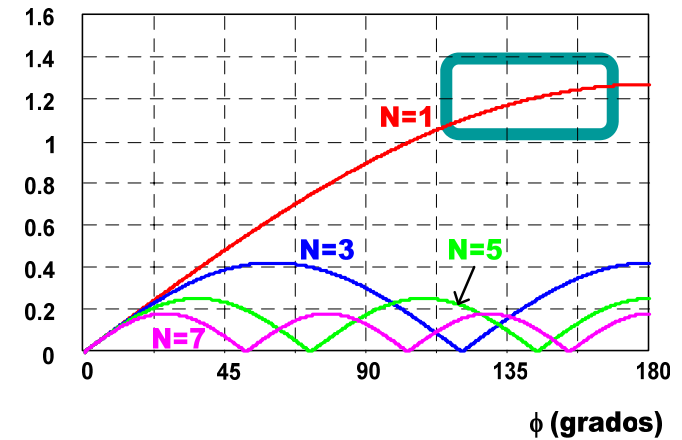
Los ángulos comprendidos entre $110-160^\circ$ dan buena calidad de señal

Ángulos mayores de 160° empeoran la calidad y no aportan una diferencia de tensión apreciable

THD(ϕ)



V_n/V_{DC}





Otras configuraciones

Cálculos para el Puento

$$V_{out} = \frac{4V_{in_{min}}}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{\theta_{max}}{2}\right) \frac{N_2}{N_1} \quad 220\sqrt{2} = \frac{4 \cdot 24(1-0,15)}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{160}{2}\right) \frac{N_2}{N_1}$$

Relación de transformación

$$\frac{N_2}{N_1} = 12,16$$

$$V_{out} = \frac{4V_{in_{max}}}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{\theta_{min}}{2}\right) \frac{N_2}{N_1} \quad 220\sqrt{2} = \frac{4 \cdot 24(1+0,1)}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{\theta_{min}}{2}\right) 12,16$$

$$\theta_{min} = 99,1$$



Otras configuraciones

Cálculos para el Punte

**Intensidad de pico en el primario del transformador
(aproximación $n=1$)**

$$P_{\text{aparente}} = V_{\text{eficaz}} I_{\text{eficaz}} \eta = 220 \cdot I_{\text{eficaz}} \cdot 0,85 \quad I_{\text{eficaz}} = 1000 / (220 \cdot 0,85) = 5,35 \text{A}$$

| | |
|---|--|
| Intensidad de pico referida al primario | $I_{\text{eficaz}} \frac{N_2}{N_1} \sqrt{2} = 92 \text{A}$ |
| Número de transistores en paralelo | 5 * |
| Resistencia de transistor equivalente | 0,008 Ω |
| Número total de transistores | 4x5=20 |
| Tensión que soportan | 26,4V |

* No debemos ajustar demasiado ya que el reparto no tiene por que se idéntico en cada transistor



Otras configuraciones

Cálculos para el Punte

Factor de Utilización del Transformador (FUT)

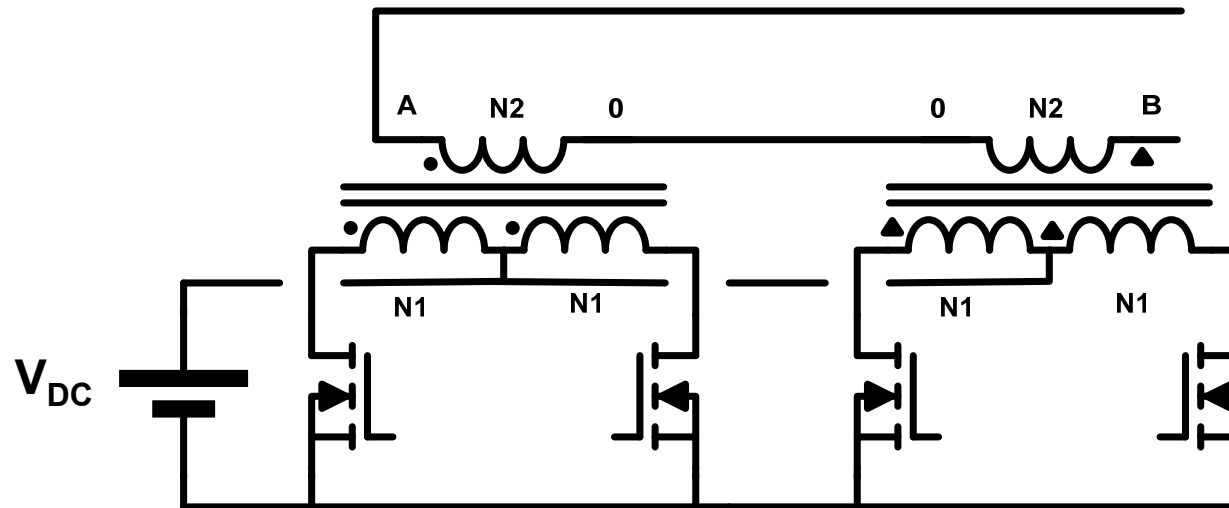
$$\text{FUT} = \frac{\text{Potencia aparente sobre la carga}}{\text{Potencia construida}}$$

$$P_{\text{construida}} = \frac{1}{2} \sum_i V_{\text{irms}} I_{\text{irms}}$$

$$\text{FUT} = \frac{V_{2\text{rms}} I_{2\text{rms}}}{\frac{1}{2} (V_{2\text{rms}} I_{2\text{rms}} + V_{1\text{rms}} I_{1\text{rms}})} = 1$$

Otras configuraciones

Cálculos con transformador de toma media



$$V_{AB}(n, \phi) = \frac{4V_{DC} \cdot 2}{\pi \cdot n} \sin\left(\frac{\phi}{2} n\right) \frac{N2}{N1}$$



Otras configuraciones

Cálculos con transformador de toma media

$$V_{out} = \frac{8V_{in_{min}}}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{\theta_{max}}{2}\right) \frac{N_2}{N_1} \quad 220\sqrt{2} = \frac{8 \cdot 24(1-0,15)}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{160}{2}\right) \frac{N_2}{N_1}$$

Relación de transformación

$$\frac{N_2}{N_1} = 6,08$$

$$V_{out} = \frac{8V_{in_{max}}}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{\theta_{min}}{2}\right) \frac{N_2}{N_1} \quad 220\sqrt{2} = \frac{8 \cdot 24(1+0,1)}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{\theta_{min}}{2}\right) 6,08$$

$$\theta_{min} = 99,1$$



Otras configuraciones

Cálculos con transformador de toma media

**Intensidad de pico en el primario del transformador
(aproximación n=1)**

$$P_{\text{aparente}} = V_{\text{eficaz}} I_{\text{eficaz}} \eta = 220 \cdot I_{\text{eficaz}} \cdot 0,85 \quad I_{\text{eficaz}} = 1000 / (220 \cdot 0,85) = 5,35\text{A}$$

| | |
|---|---|
| Intensidad de pico referida al primario | $I_{\text{eficaz}} \frac{N_2}{N_1} \sqrt{2} = 46\text{A}$ |
| Número de transistores en paralelo | 3 * |
| Resistencia de transistor equivalente | 0,033Ω |
| Número total de transistores | 4x3=12 |
| Tensión que soportan | 26,4x2V |

* No debemos ajustar demasiado ya que el reparto no tiene por que se idéntico en cada transistor



Otras configuraciones

Cálculos con transformador de toma media

Factor de Utilización del Transformador (FUT)

$$FUT = \frac{V_{2rms} I_{2rms}}{\frac{1}{2} (V_{2rms} I_{2rms} + 2V_{1rms} I_{1rms})}$$

$$FUT = \frac{V_{2rms} I_{2rms}}{\frac{1}{2} \left(V_{2rms} I_{2rms} + 2V_{2rms} \frac{I_{2rms}}{\sqrt{2}} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{2} (1 + \sqrt{2})}$$

Solo circula corriente durante un semiciclo en cada devanado del primario, por eso la corriente eficaz es $\sqrt{2}$ veces menor