

# Electrónica II

## 1 – Inversores monofásicos DC/AC

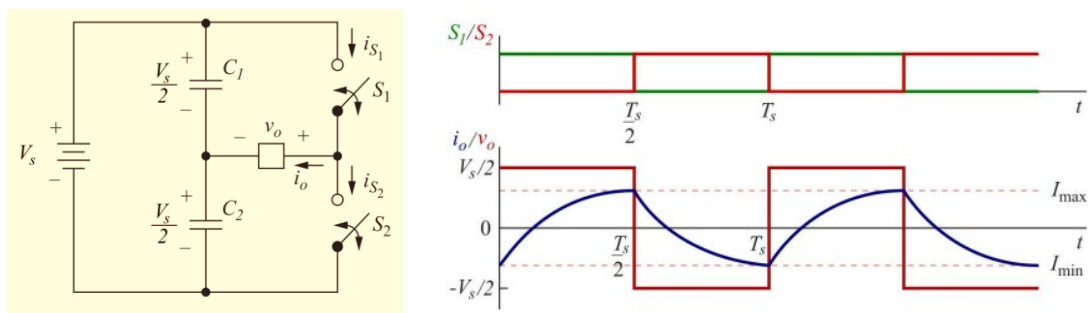
Monofásicos (clases 1-5) y trifásicos (clases 6-7).



### 1.1 – Semi puente

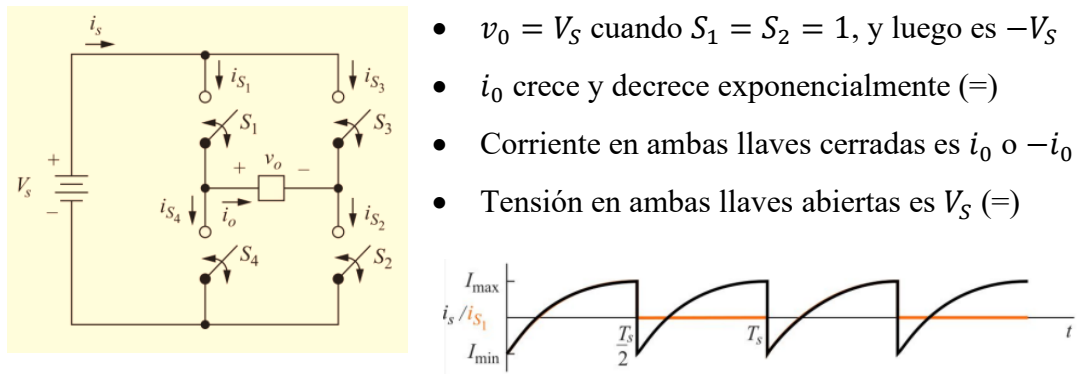
La carga se conecta con su borne negativo al punto medio de la batería.

Las llaves S1 y S2 se cierran de forma complementaria, entonces la tensión  $v_o$  será alternamente positiva y negativa, con valor medio cero ( $V_0 = 0$ , igual que  $I_0$ )



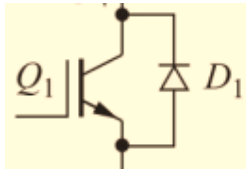
### 1.2 – Puente Onda Cuadrada

Se tienen 2 columnas de 2 llaves. Solo hay 2 estados: S1-S2 y S3-S4 cerradas.

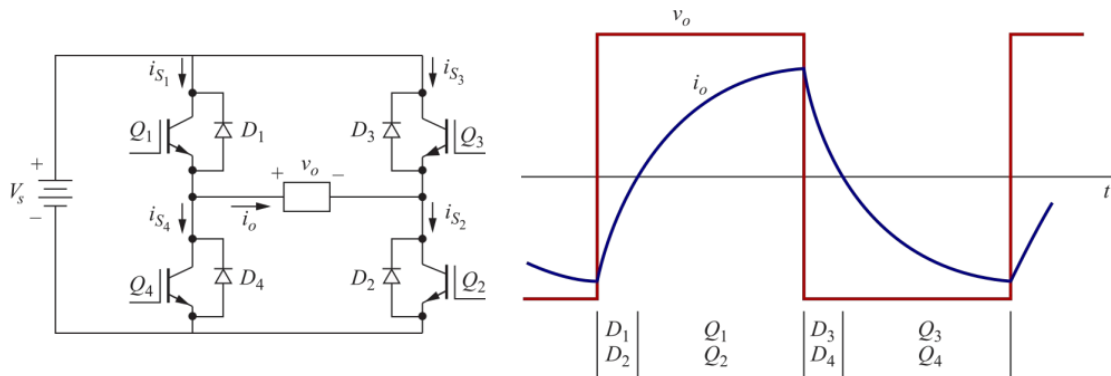


Cerradas		Carga RL	Columna 1	Columna 2
S1		$v_o = V_s$	$i_{S1} = i_o$	$i_{S3} = 0$
	S2	$i_o$ crece exp.	$v_{S1} = 0$	$v_{S3} = V_s$
	S3	$v_o = -V_s$	$i_{S1} = 0$	$i_{S3} = -i_o$
S4		$i_o$ decrece exp.	$v_{S1} = V_s$	$v_{S3} = 0$

Notar que  $i_o$  toma valores negativos y positivos en cada semiciclo, reflejándose también en las corrientes por las llaves, entonces deben ser **bidireccionales**.



- Consideramos sentido de  $i_{s1}$  igual que la flecha de  $Q_1$
- Cuando  $i_{s1} > 0$ , el transistor  $Q_1$  está en conducción.
- Cuando  $i_{s1} < 0$ , en su lugar conduce el diodo  $D_1$



Las señales  $v_o$  e  $i_o$  son periódicas → Representables en serie de Fourier

$$v_o = \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} \frac{4 V_S}{n \pi} \text{sen}(n\omega t) = \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} V_n \text{sen}(n\omega t) \Rightarrow V_1 = \frac{4 V_S}{\pi}$$

$$i_o = \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} I_n \text{sen}(n\omega t + \phi_n) \Leftrightarrow I_n = \frac{V_n}{|Z_n|} \Rightarrow I_1 = \frac{4 V_S}{\pi |R + j\omega L|}$$

$$P_S = P_0 = \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} (I_{n,rms})^2 R = \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} P_{0n} \Leftrightarrow P_{0n} = V_n I_n \cos(\theta_n)$$

La tensión fundamental generada solo depende de  $V_S$ . Para generar 220V eficaces usando una batería de 12V se coloca un transformador elevador a la salida del inversor.

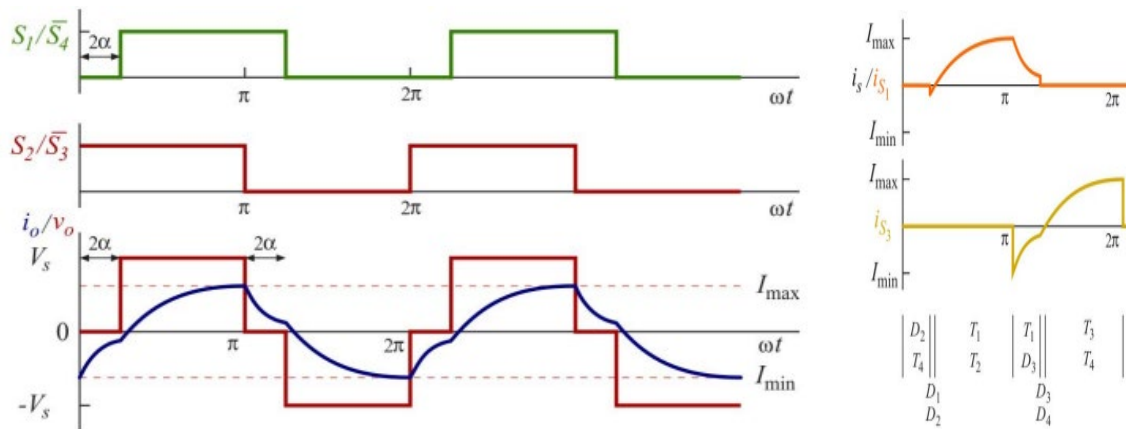
Por otra parte, para cuantificar la calidad existe un parámetro llamado “distorsión armónica total”, abreviado como THD, que mide el “peso” de los armónicos restantes respecto al fundamental (más bajo es mejor). Resulta **independiente** del valor  $V_S$

$$THD = \frac{\sqrt{\text{Cuadrados otros armónicos}}}{\sqrt{\text{Cuadrado del fundamental}}} = \frac{\sqrt{(V_{rms})^2 - (V_{1,rms})^2}}{V_{1,rms}}$$

En onda cuadrada,  $V_{rms} = V_S$  y  $V_{1,rms} = \frac{V_1}{\sqrt{2}} = \frac{4 V_S}{\sqrt{2} \pi}$ , entonces  $THD \cong 48\%$

### 1.3 – PWM Monopulso

El circuito puente es el mismo, cambia la conmutación de llaves, donde solo se desfasan las llaves de la primera columna (S1 y S4) en un ángulo  $2\alpha$ .



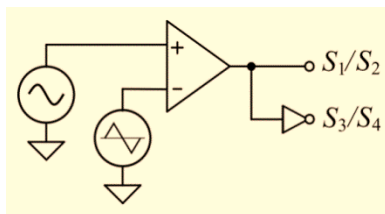
$\omega t$	Cerradas		Carga RL	Col 1	Col 2	Fuente
0			$v_0 = 0$	$i_{S1} = 0$	$i_{S2} = i_0$	$i_S = 0$
	S4	S2	$i_0 < 0$ crece	$i_{S4} = -i_0$	$i_{S3} = 0$	
$2\alpha$	S1		$v_0 = V_s$	$i_{S1} = i_0$	$i_{S2} = i_0$	$i_S = i_0$
		S2	$i_0$ crece	$i_{S4} = 0$	$i_{S3} = 0$	
$\pi$	S1	S3	$v_0 = 0$	$i_{S1} = i_0$	$i_{S2} = 0$	$i_S = 0$
			$i_0 > 0$ decrece	$i_{S4} = 0$	$i_{S3} = -i_0$	
$\pi + 2\alpha$		S3	$v_0 = -V_s$	$i_{S1} = 0$	$i_{S2} = 0$	$i_S = -i_0$
	S4		$i_0$ decrece	$i_{S4} = -i_0$	$i_{S3} = -i_0$	

En Serie de Fourier: la  $V_1$  es la de onda cuadrada multiplicada por  $\cos(\alpha)$

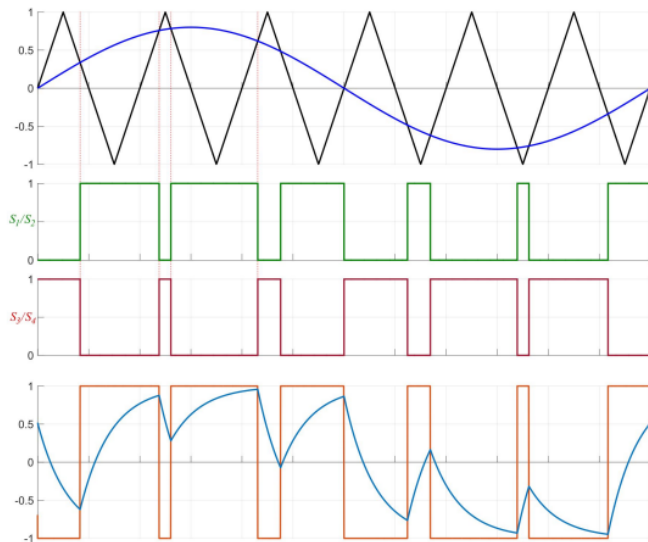
$$V_n = \frac{4 V_s}{n \pi} \cos(n\alpha) \Rightarrow \text{Si } \alpha = 30^\circ: V_3 = 0 \text{ y } THD \cong 31\%$$

### 1.4 – PWM Sinusoidal Bipolar

Las señales de disparo se obtienen al comparar una sinusoidal vs triangular.



- El ancho de cada conmutación va variando.
- S1-S2 cerradas cuando “gana” la senoide.
- S3-S4 cerradas cuando “gana” la triangular.
- Es “bipolar” porque  $v_0$  solo toma  $V_s$  y  $-V_s$



Cuando  $v_0 = V_S$

$$i_0 = \frac{V_S}{R} + A e^{-(t-t_0)/\tau}$$

El primer término es el valor asintótico, a donde “quiere” llegar.

Cuando  $v_0 = -V_S$

$$i_0 = -\frac{V_S}{R} + B e^{-(t-t_0)/\tau}$$

La relación entre la frecuencia de **la portadora (triangular)** y **la moduladora (seno)** está dado por el **índice de modulación en frecuencia ( $m_f$ )**. Se cumple que  $f_{v_0} = f_{sen}$

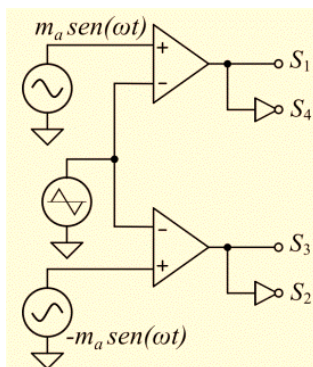
Por otra parte, está el índice de modulación en amplitud ( $m_a$ ), que es la relación de amplitud (tensión) entre la **moduladora y portadora**. Influye en ancho de pulsos de  $v_0$

En el espectro, siempre hay armónicos alrededor de múltiplos de  $m_f$

- Si  $m_a \leq 1$ : relación lineal  $V_1 = m_a V_S$  si se tiene  $m_f$  grande. Se pueden desaparecer los armónicos de  $f_{sen}$  si  $m_f$  es impar. El THD de tensión es alto, aunque el de corriente va bajando porque  $|Z_n|$  aumenta rápido (mejor  $m_a \rightarrow 1$ )
- Si  $m_a > 1$ :  $V_1$  es mayor, relación no-lineal y aparecen armónicos impares de  $f_{sen}$
- Si  $m_a \gg 1$ : la tensión  $v_0$  converge al caso onda cuadrada porque  $V_{sen} \gg V_{tri}$

## 1.5 – PWM Sinusoidal Unipolar

Ahora se compara la triangular vs la senoide, y también vs la senoide negada.



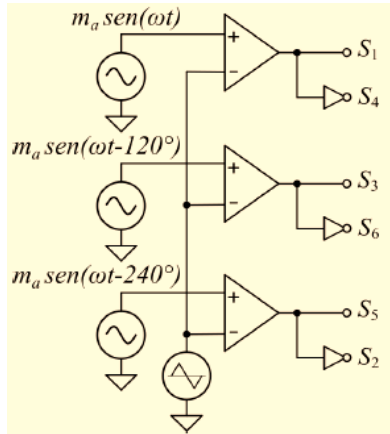
- Llave S1 cerrada cuando “gana” la moduladora positiva.
- Llave S3 cerrada cuando “gana” la moduladora negativa.
- En el primer semiciclo se alterna entre  $v_0 = 0$  y  $v_0 = V_S$
- En el segundo semiciclo se alterna  $v_0 = 0$  y  $v_0 = -V_S$
- Armónicos alrededor de múltiplos *pares* de  $m_f$
- Mejores THD de tensión (aún alto) y corriente.
- $V_1$  sigue las reglas del bipolar según valor de  $m_a$

## 2 – Inversores trifásicos

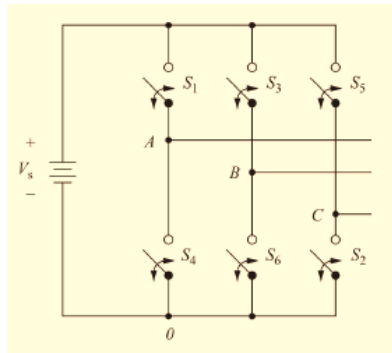
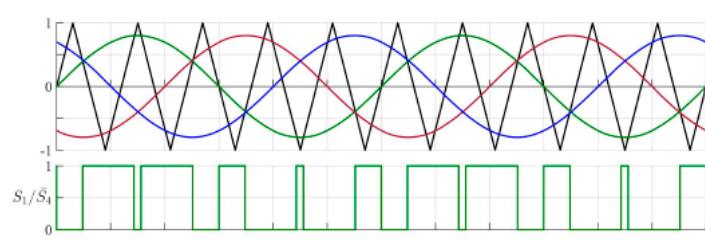
Se deben generar tres señales alternadas, desfasadas  $120^\circ$  una de la otra.

### 2.1 – PWM Sinusoidal

Se comparan tres sinusoides contra una misma portadora triangular. Cada senoide es la moduladora para la señal de disparo de cada columna (S14, S36, S52).



- Cuando seno con fase  $0^\circ$  gana a triangular, **S1 = 1**.
- Cuando seno con fase  $-120^\circ$  ( $\rightarrow$ ) gana, **S3 = 1**.
- Cuando seno con fase  $-240^\circ$  ( $\rightarrow$ ) gana, **S5 = 1**.

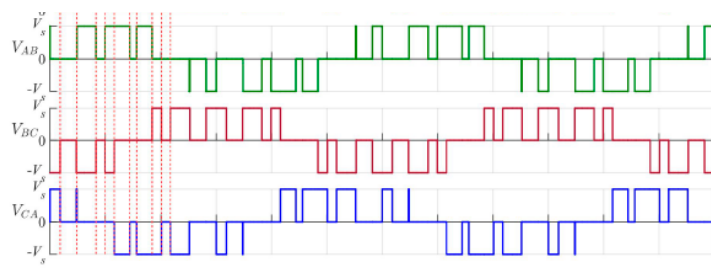


Las tensiones de columna  $V_{A0}$ ,  $V_{B0}$  y  $V_{C0}$  tienen la misma forma y fase que la llave superior de esa columna, pero escalado entre 0 y  $V_s$ . Las tensiones de línea  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{CA}$  son restas entre dichas columnas, tomando valores entre 0 y  $V_s$  durante medio ciclo, luego 0 y  $-V_s$ .

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

$$V_{CA} = V_{C0} - V_{A0}$$

Las tensiones de fase se calculan respecto al neutro, por lo que se considera la carga, son 4 configuraciones, toma valores 0,  $\pm 1/3 V_s$  y  $\pm 2/3 V_s$

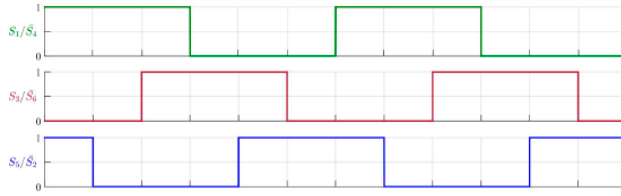


Importante: la tensión fundamental de línea es  $V_{1,lin} = \frac{\sqrt{3}}{2} m_a V_s$  si se tiene un índice de modulación en amplitud  $m_a < 1$  (moduladora menor a portadora) y un índice de modulación en frecuencia  $m_f$  grande. Sigue aplicándose la regla de usar  $m_f$  impar para desaparecer los armónicos del seno. Sin embargo, siempre aparecerán armónicos en las cercanías de cada múltiplo de  $m_f$ . Para hallar  $V_{1,fase} = \frac{V_{1,lin}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{2} m_a V_s$

En este caso, la fundamental de  $V_{fase}$  está sincronizada con la moduladora.

## 2.2 – Puente trifásico

Mismo circuito que 2.1. Se cierran llaves de la parte superior (S1, S3 y S5) cada  $60^\circ$  durante  $120^\circ$ , quedando cada llave inferior complementaria a la de la misma columna.



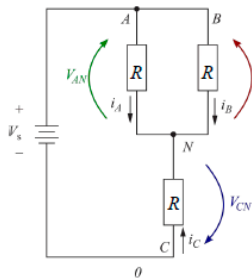
Las tensiones de columna son de la misma forma y fase que la señal de la llave superior de la misma, con valores entre 0 y  $V_S$  (igual 2.1)

Las tensiones de línea siguen siendo las restas entre sus correspondientes, resultan idénticas al caso PWM Monopulso con  $\alpha = 30^\circ$ , pero desfasadas. Por su parte, las de fase referidas a neutro se obtienen considerando la carga en estrella, tomando valores de  $\pm 1/3 V_S$  y  $\pm 2/3 V_S$  (nunca cero), y la forma es tipo *sombrero* normal y luego invertido.



$$R_{eq} = R + R//R = R + R/2 = \frac{3R}{2}$$

A la izquierda se muestra cómo se calcula un caso particular (S1=S3=S5).



$$i_s = \frac{V_s}{3R/2} = \frac{2V_s}{3R}$$

$$i_A = i_s/2 = \frac{V_s}{3R}$$

$$V_{AN} = R \cdot i_A = \frac{V_s}{3}$$

Respecto a la tensión fundamental, se tiene  $V_{1,lin} = \frac{4 V_S}{\pi} \cos(30^\circ)$ , como PWM monofásico, entonces desaparece el tercer armónico. Quedan armónicos impares no múltiplos de 3. El THD es aprox. 31%

$$V_{n,lin} = \frac{4 V_S}{n \pi} \cos\left(n \frac{\pi}{6}\right) \Rightarrow V_{1,base} = \frac{V_{1,lin}}{\sqrt{3}} = \frac{4 V_S}{\sqrt{3} \pi} \cos(30^\circ) = \frac{2 V_S}{\pi} \text{ ¿?}$$

Tipo	Tipo	Est.	$V_1$ o $V_{1,lin}$	1º Armónico	THD $V_n$
MONO	Onda Cuad.	2	$4 V_S / \pi$	2do	48%
	PWM	4	$(4 V_S / \pi) \cos \alpha$	5to *	31% *
	PWM-S Bi	2	$m_a V_S$	$m_f$ **	Muy alto
	PWM-S Uni	$2^2$	$m_a V_S$	$2 m_f$ **	Alto
TRIF	PWM-S	$2^3$	$(\sqrt{3}/2) m_a V_S$	$m_f$ **	Muy alto
	Puente	6	$(4 V_S / \pi) \cos 30^\circ$	5to	31%

### 3 – SAI

Sistema que permite garantizar el suministro de energía de forma continuada, evitando problemas en la calidad de servicio eléctrico.



*"La CSE es una característica física del suministro de electricidad que, en condiciones normales de operación, no debe producir perturbaciones ni interrupciones en los procesos del consumidor. Desde otra perspectiva, implica el cumplimiento de los parámetros eléctricos nominales, como la tensión, la frecuencia y la forma de onda, para prevenir desviaciones que puedan resultar en fallas o un funcionamiento incorrecto de las instalaciones o equipos del usuario".* Los parámetros que la definen son:

- ✓ Confiabilidad: que haya continuidad, sin cortes o interrupciones en el servicio.
- ✓ Fluctuaciones de tensión y desviaciones de frecuencia
- ✓ Distorsión: presencia de armónicos
- ✓ Asimetrías: desbalances en tensiones trifásicas



#### 3.1 – Perturbación eléctrica

Es cualquier desviación de los parámetros de la red respecto a sus valores nominales. Pueden ser de la propia red (fallas, maniobras) o bien provocadas por los usuarios (ej: conexión y desconexión de grandes cargas). Se pueden mencionar:

- Transitorios: muy corta duración, de cualquier amplitud (puede ser grande).
- Interrupción: pérdida instantánea (hasta 30 ciclos), momentánea, temporal (+2s) o sostenida (+2 min) que puede ser total o por debajo del 10% del valor nominal.
- Bajada de tensión: caída no mayor al 20% de hasta un minuto de duración.
- Aumento de tensión: variación entre 110% y 180% del valor nominal.
- Subtensión/sobretensión: bajada o aumento de larga duración, respectivamente.
- Desbalances de tensión: debido a cargas monofásicas en circuitos trifásicos.
- Distorsiones de la forma de onda: desplazamiento, corte intermitente, ruido.

Los equipos conectados a fuentes de alimentación sufren mayormente variaciones de la amplitud de tensión. Según la variación (%) y su duración se definen 3 regiones:

- ☆ No-interrupción: aceptables, sea por variación o duración poco apreciable.
- ☆ No-dañina: LVRT (remontable), caída debajo del 20% de al menos 20 ms.
- ☆ Prohibida: sobretensión mayor al 10% de al menos 10 ms.

### 3.2 – Carga crítica

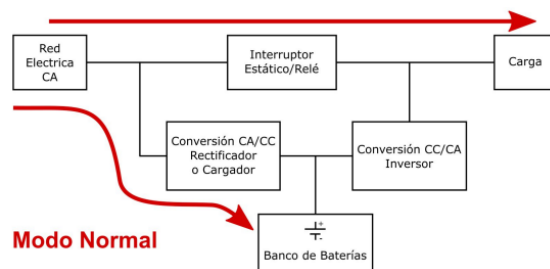
Son aquellas cargas de cualquier potencia cuya alimentación eléctrica debe ser de alta calidad e ininterrumpible, lo cual no siempre está garantizado por la red eléctrica.

Un SAI persigue este objetivo, para brindar regulación de la tensión sinusoidal, aislación eléctrica, buena eficiencia y bajo THD y tiempo de transferencia. Los hay estáticos (convertidores + batería), rotantes (motores para mayor potencia) e híbridos.

Un SAI estático posee rectificador, inversor y almacenamiento, y dispone de un modo normal y un modo energía almacenada, más *by-pass* optativo en caso de falla.

### 3.3 – SAI Offline

Para cargas pequeñas de hasta 2 kVA, usado generalmente para PC.



- Modo normal: parámetros dentro de los límites permitidos, se carga batería y se conecta la carga a la red, queda el inversor desconectado (decimos entonces que el rendimiento es alto). Rectificador chico.

- Modo energía almacenada: ante CSE inadecuada, se abre interruptor/relé y ahora la carga es alimentada por las baterías (hasta agotarse) mediante el inversor. Al existir dos caminos de alimentación decimos que el sistema es fiable.

Para pasar de un modo a otro existe un tiempo de transferencia de 10 ms en caso de usar un relé o 5 ms si es interruptor estático, es decir, al menos  $\frac{1}{4}$  de ciclo de línea. El equivalente estático del relé se consigue mediante 4 tiristores o triacs.

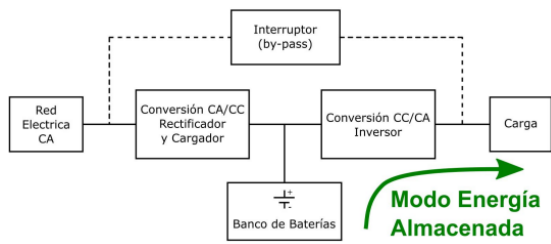
La tensión del banco dependerá del tipo de modulación del inversor utilizado. Por ejemplo, para onda cuadrada  $V_{CC} = 244V$ . Si se usan baterías de 12V para alimentar una carga de 220V eficaces, lo normal es agregar un transformador elevador al inversor. Otro problema es que la tensión del inversor deberá estar en fase con la de red (monitorear).

En modo normal, la carga no posee aislación galvánica. Esto se puede lograr mediante un transformador de 3 bobinados, cuyo primario es la red (relé), y posee dos secundarios: carga y convertidor bidireccional (rectificador/inversor) al banco. Otro problema es la falta de regulación de tensión y frecuencia (agregar filtro en la entrada).



### 3.4 – SAI Online

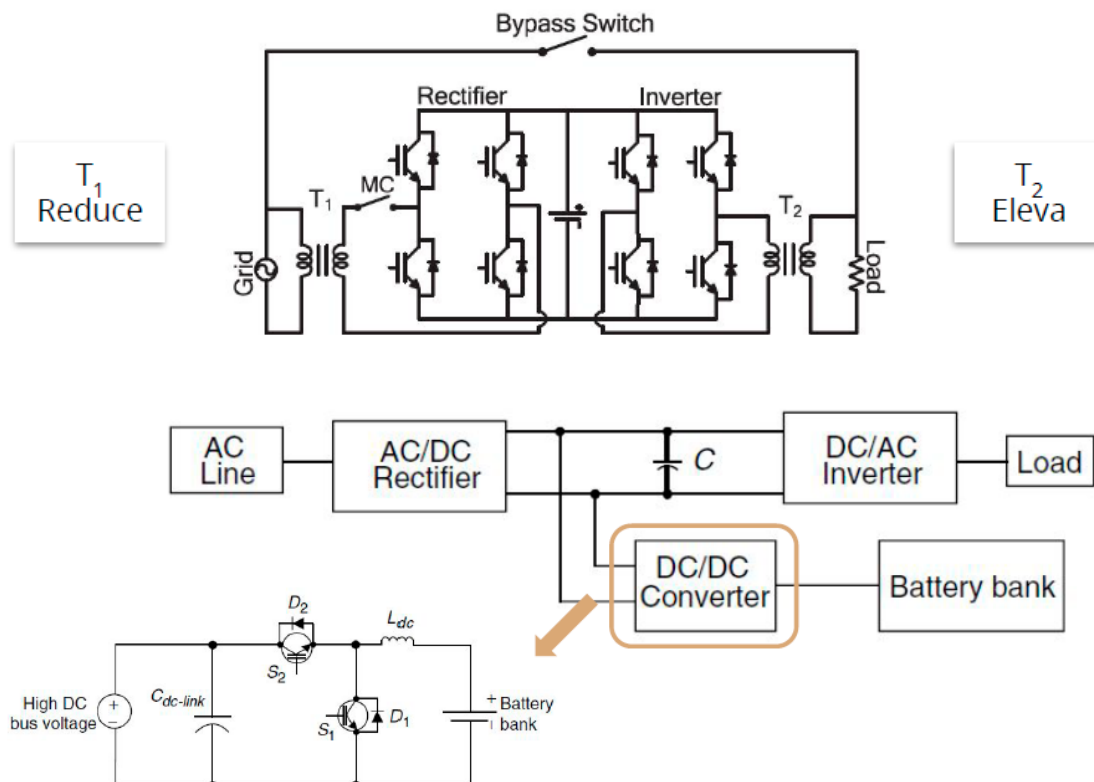
Mismas partes constitutivas, otra conexión. Destinado a cargas muy críticas.



- Modo normal: se carga batería y se alimenta la carga realizando una doble conversión (rectificación e inversión).
- Modo energía almacenada: carga alimentada desde banco mediante inversor.

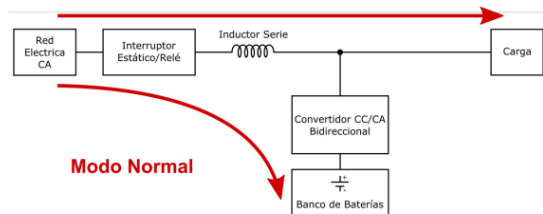
- By-pass: si falla el SAI, se cierra interruptor para conexión directa de carga a red.

Se observa que el inversor siempre está activo, no hay tiempo de transferencia. El bus de continua tiene una tensión alta, necesitando conectar baterías en serie. Como alternativa, se puede agregar un convertidor CC/CC de modo de separar el banco, o bien, transformadores a la entrada y salida del SAI para usar bus de baja tensión (mayor I).



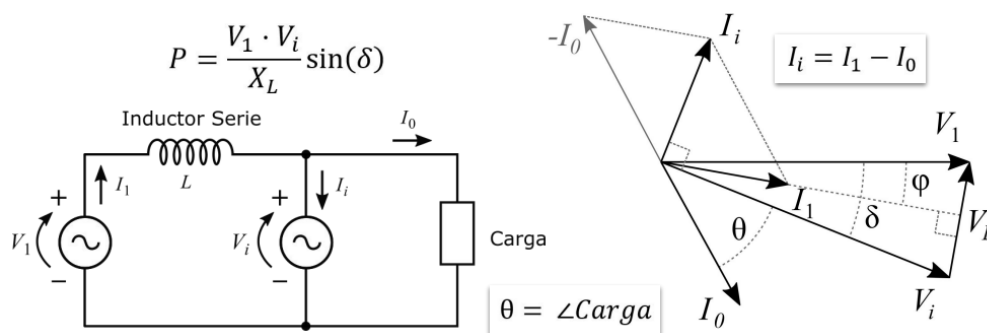
### 3.5 – SAI Line Interactive

Para cargas de 0.5 a 5 kVA. Tienen muy buena eficiencia (97%). Su principio de



funcionamiento consiste en alimentar la carga mediante potencia activa de la red, y el convertidor impone la tensión  $v_i$  debiendo absorber o inyectar potencia reactiva. El inductor no es variable.

El siguiente diagrama fasorial muestra el caso con tensión de red ( $V_1$ ) perfecta.



Dibujamos las 3 tensiones, después  $I_1$  atrasado  $90^\circ$  de  $V_L$  por el inductor. El inversor entrega solo  $Q$ , entonces  $I_i$  adelanta  $90^\circ$  a  $V_i$ . Ajustando  $\delta$  cambio la potencia, por ejemplo, si hay sobretensión debo bajar  $\delta$ , y si hay subtensión lo aumento.

### 3.6 – Comparación SAI

	Offline	Online	Line Interactive
Bajo costo	✓	✗	Intermedio
Tamaño y peso	✓	Depende de TF	
Alto rendimiento	✓	✗	
Rectificador simple	✓	Mayor potencia	
Confiabilidad	✓	✗	✓
No-break <sup>1</sup>	✗	✓	✓
Aislamiento	✗ (agregar TF)	✓	✗ (agregar TF)
Regula tensión	✗	✓	✓
Regula frecuencia	✗	✓	✗
FP	Según carga	✓ no depende de la carga	Según carga y tensión de red

<sup>1</sup> Significa “sin tiempo de transferencia”.

## 4 – Baterías

Una batería es un acumulador electroquímico formado por un arreglo de celdas que están ubicadas en un vaso aislante. A su vez, cada celda está compuesta por placas positivas y negativas (contenedoras de elementos activos), sumergidas en electrolito.

Según la aplicación, se clasifican en:

- ❑ De arranque: proporcionan altas intensidades de corriente durante segundos o minutos. Admiten ciclos de carga/descarga de poca profundidad (hasta 10 %).
- ❑ De ciclo profundo: intensidades medias durante tiempo prolongado (horas), son robustas, pesadas y costosas. Ciclos de carga/descarga de profundidad +50%.

Según la constitución específica, se clasifican en:

- ❑ De electrolito líquido: también llamada inundada, generalmente usado en autos.
- ❑ Regulada por válvula (VRLA): sellada, no requiere mantenimiento ni ventilación.

En SAI se suelen utilizar las de plomo-ácido VRLA por ser baratas y confiables, aunque se va transicionando a las de ion-litio, que tienen mayor vida útil (hasta 15 años), admiten muchos ciclos de carga/descarga (más de 1000) y se cargan más rápido.

### 4.1 – Tensión en bornes

Es la suma de las tensiones de cada celda, que depende de los materiales usados y el estado de carga (SOC). En las de plomo-ácido, siempre la tensión nominal de cada celda es 2V, pero el valor viene dado por el SOC (constantes para mismo tipo).

SOC	¿?	$V_{celda}$
Muerte	La batería se encuentra descargada, en un valor mínimo al límite de producir un daño irreversible	1.75V
Absorción	Posterior a la fase inicial (profunda) de carga	2.4 - 2.5V
Flote	Mantener batería completamente cargada, sin producir sobrecargas (reduce vida útil) o autodescarga.	2.2 - 2.3V

### 4.2 – Capacidad

Es la carga eléctrica que puede almacenar y entregar, medido en A-h. Depende de la corriente de descarga y la duración de la misma, aunque no es relación lineal. Se suele

indicar un régimen de descarga  $C_{\#\#}$  donde “ $\#\#$ ” es la duración en horas si se descarga con una corriente  $I = C_{bat}/\#\#$ . Ejemplo: 2A para 20 A-h si el régimen es C10.

Una ecuación más realista de autonomía es la siguiente, donde  $C_{bat}$  y  $H_R$  se dan como dato en la misma batería. La constante  $k \in (1; 1.5)$ , y luego  $C = I * t \leq C_{bat}$

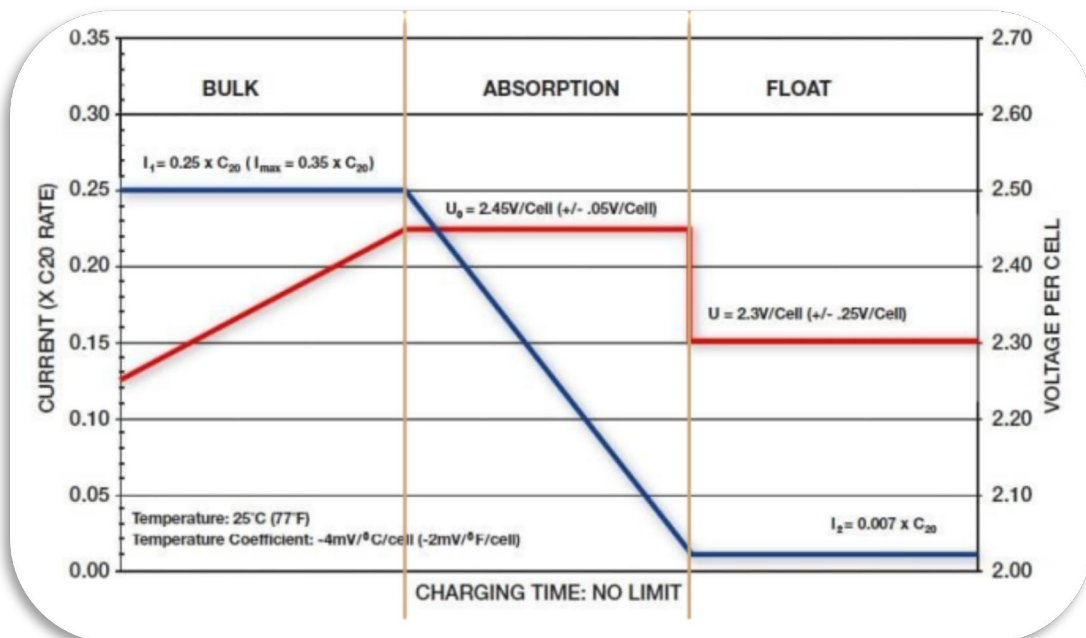
$$t = H_R * \left( \frac{C_{bat}}{I * H_R} \right)^k \rightarrow t = 20 * \left( \frac{4.5 \text{ Ah}}{10 \text{ A} * 20} \right)^{1.2} = 0.21 \text{ h} \Rightarrow C = 2.1 \text{ Ah}$$



La autonomía del SAI se denomina *backup time* o *runtime*, y depende de la capacidad del banco y la potencia consumida por la carga, afectada por el rendimiento del inversor. Se suelen dar tablas que indican la corriente de descarga a aplicar para una cierta duración, tensión de celda y temperatura.

### 4.3 – Ciclo de carga

- ✓ Carga profunda o *bulk*: corriente constante de 10-20% de  $C_{bat}$ . Sube  $V_{celda}$
- ✓ Absorción: luego de alcanzar cierto valor, se carga a tensión constante. Baja  $I$
- ✓ Flotación: luego de bajar  $I$  a cierto umbral, se baja tensión a 2.2V. El cargador sigue entregando una mínima corriente que compensa las pérdidas de la batería.



⚠ Atención: el ciclo de carga debe ser controlado por el cargador de baterías (CCCV).

## Filminas filtradas

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
			I				II				III

## Filminas resumidas

Filas: INV-MONO, INV-TRI, SAI y BAT.

x5							Sb								
x2							sin								
x6					off		X								
bat											-				