



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



*Unidad
de Formación*



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



TECNOLOGÍAS, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

23 MAYO – 03 JUNIO DE 2022

**Integración de sistemas de almacenamiento
mediante electrónica de potencia**

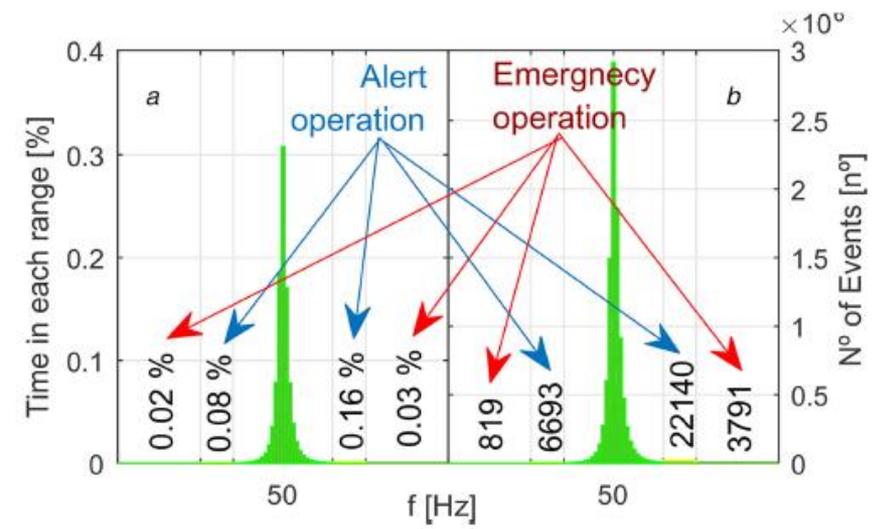
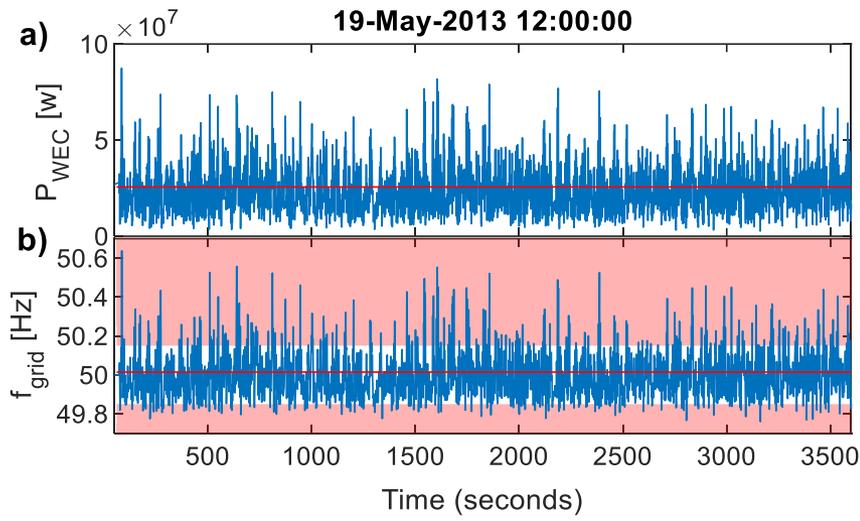
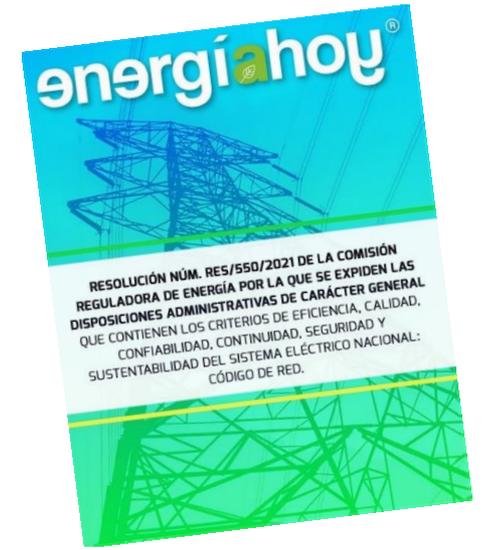
Dr. Marcos Lafoz-Pastor

24/05/2022

¿Por qué es necesario acondicionar la potencia de un sistema de generación, consumo o almacenamiento de energía?

Necesidad de cumplir con los códigos de la red eléctrica a la que se conecta. Básicamente estudiamos:

- Frecuencia
- Tensión



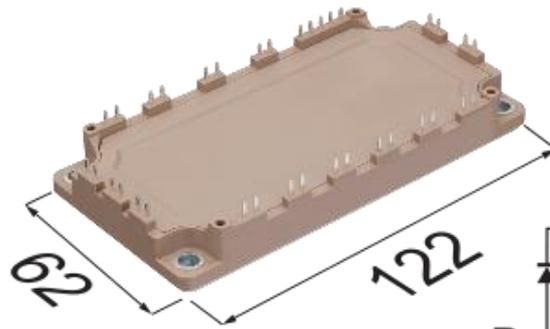
2. Convertidores electrónicos de potencia

Dispositivos industriales utilizados como convertidores electrónicos de potencia

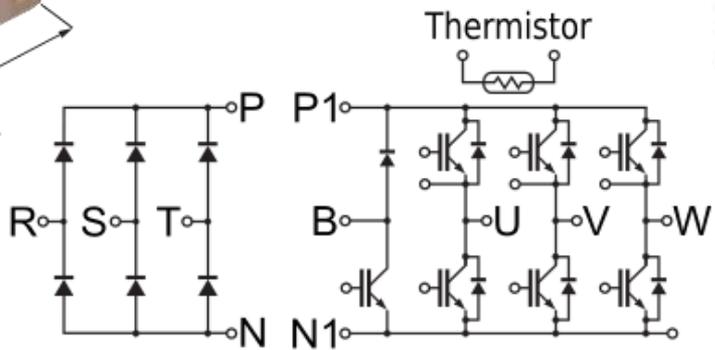


2. Convertidores electrónicos de potencia

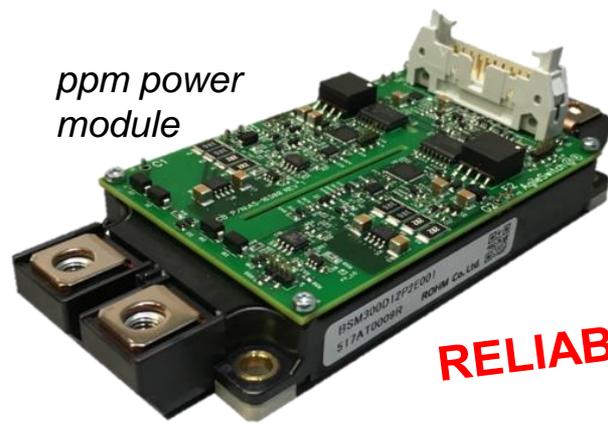
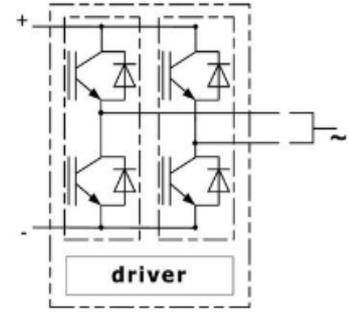
Elementos de convertidores electrónicos: módulos y drivers



Fuji Electric.
IGBT module



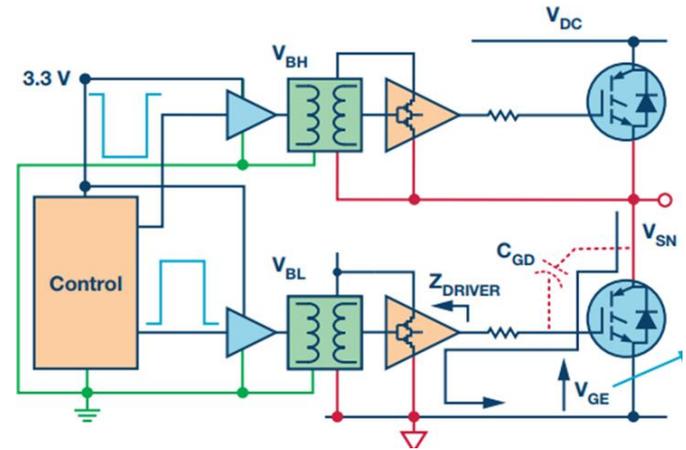
SkiIP module
Semikron



ppm power
module

RELIABILITY!!!!

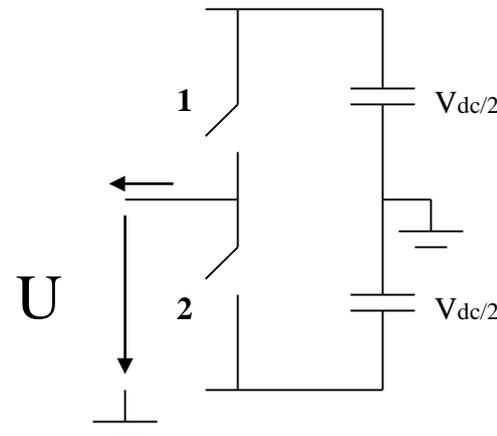
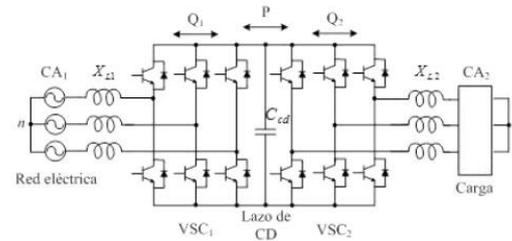
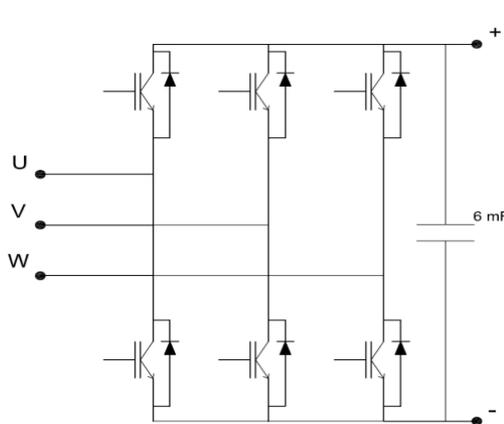
Driver
scheme.
Analog
devices



2. Introducción a convertidores electrónicos de potencia

CONCEPTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

El control de la potencia de un convertidor conectado a la red eléctrica se consigue poniendo una corriente determinada en las fases del mismo. Esta corriente se puede controlar directamente o indirectamente a través de la tensión aplicada sobre las fases.

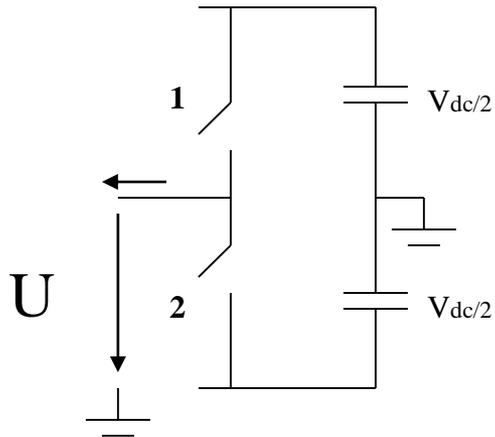


Esquema de una de las tres ramas que constituyen el convertidor de conexión a red

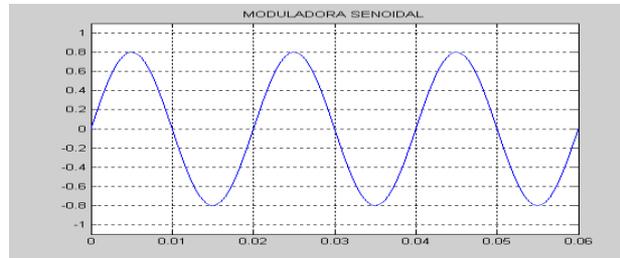
2. Introducción a convertidores electrónicos de potencia

CONCEPTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

CONTROL EN CORRIENTE DEL CONVERTIDOR.



A partir de la consigna de corriente procedente del tipo de control que se haya aplicado al sistema se generan las corrientes senoidales.

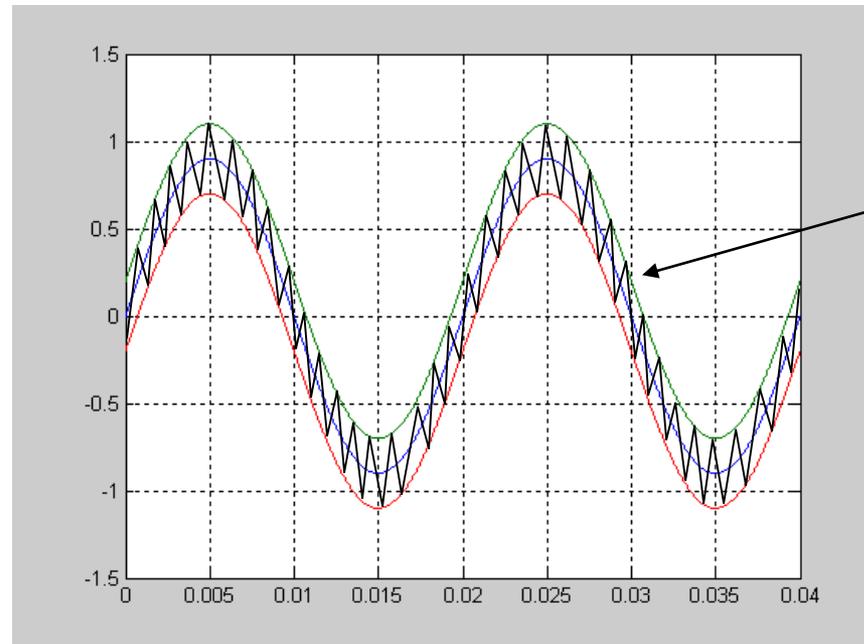
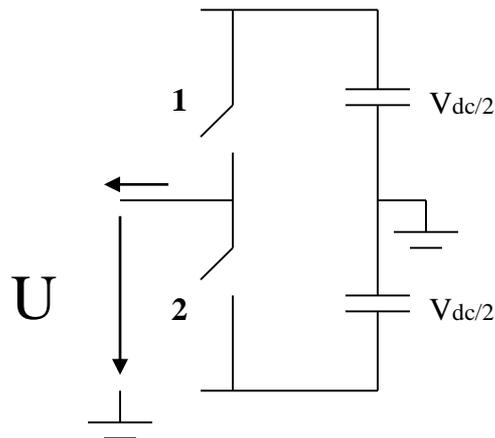


Se establece una banda de histéresis alrededor de la corriente senoidal de referencia y la comparación (con histéresis) de la referencia con la corriente medida, da lugar a los pulsos de disparo de la rama correspondiente del convertidor.

2. Introducción a convertidores electrónicos de potencia

CONCEPTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

CONTROL EN CORRIENTE DEL CONVERTIDOR.



Corriente
conmutando entre
las bandas de
histéresis

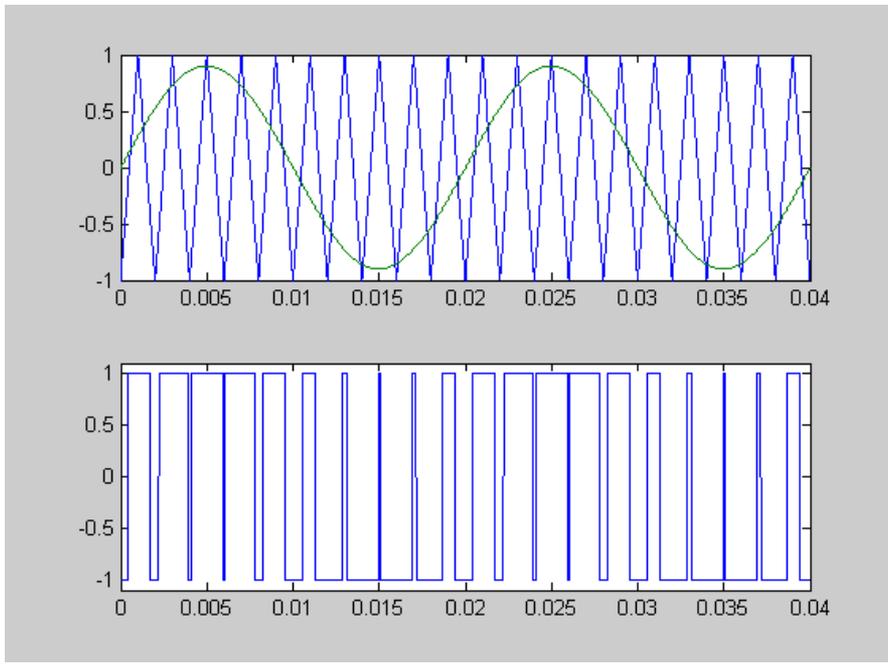
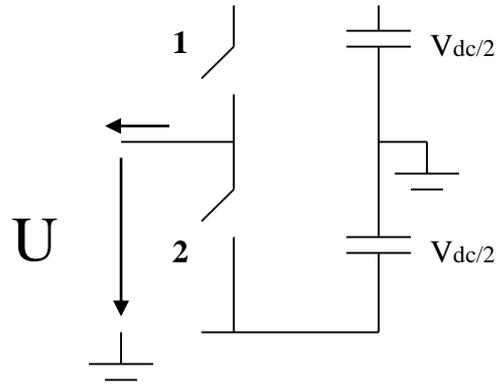
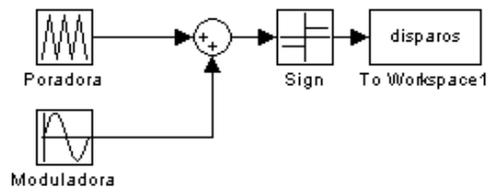
Se establece una banda de histéresis alrededor de la corriente senoidal de referencia y la comparación (con histéresis) de la referencia con la corriente medida, da lugar a los pulsos de disparo de la rama correspondiente del convertidor.

2. Introducción a convertidores electrónicos de potencia

CONCEPTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

¿Cómo se consigue la tensión U de salida del convertidor?

Modulación PWM de convertidores electrónicos de potencia



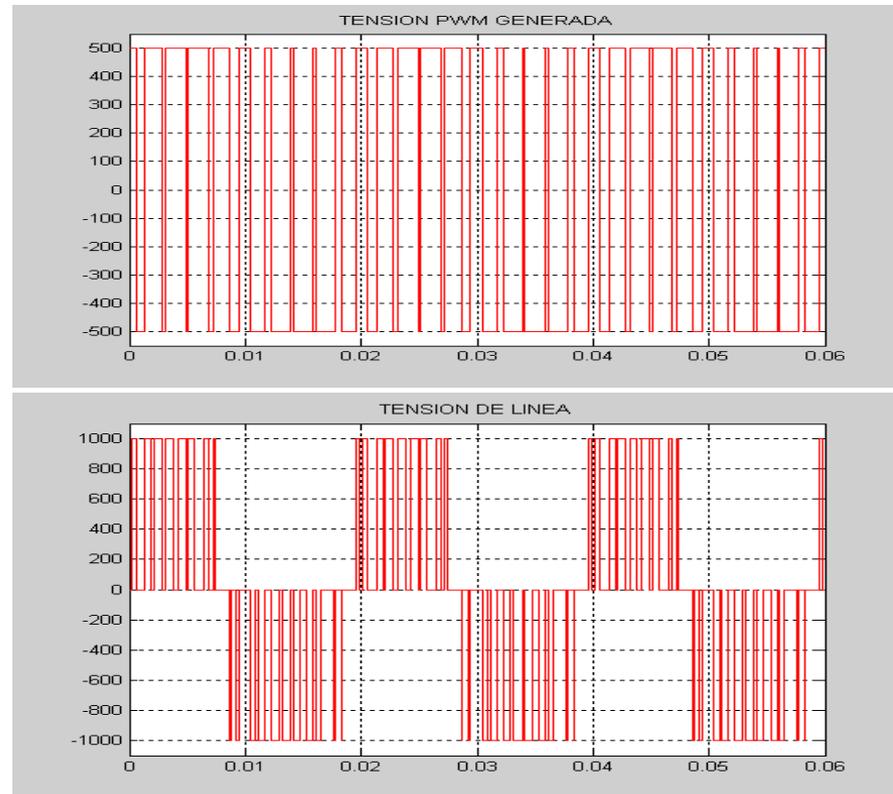
El resultado de la comparación entre la onda de referencia y una triangular proporciona las señales de conmutación de los interruptores electrónicos

2. Introducción a convertidores electrónicos de potencia

CONCEPTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

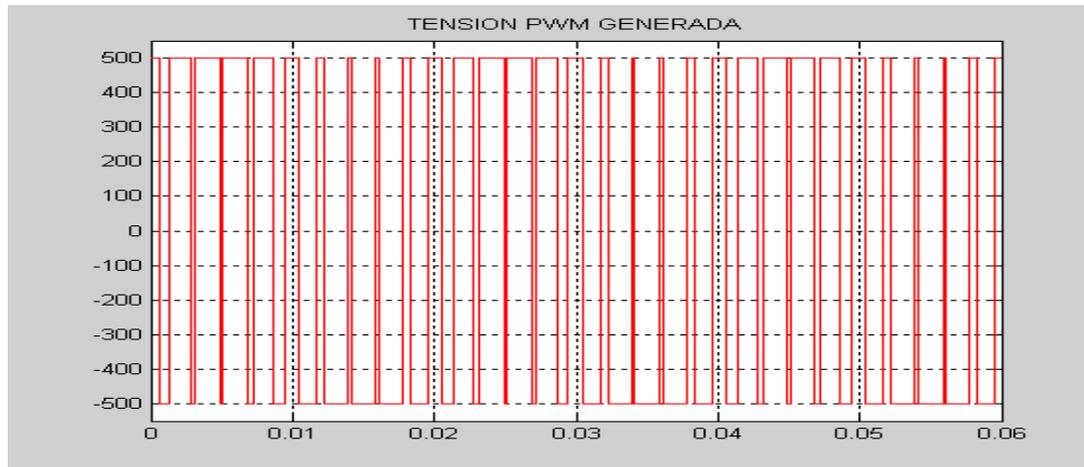
¿Cómo se consigue la tensión U con fase δ alimentando la máquina?

El resultado de la aplicación de las anteriores aperturas y cierres, da lugar a la siguiente tensión en bornas de la máquina

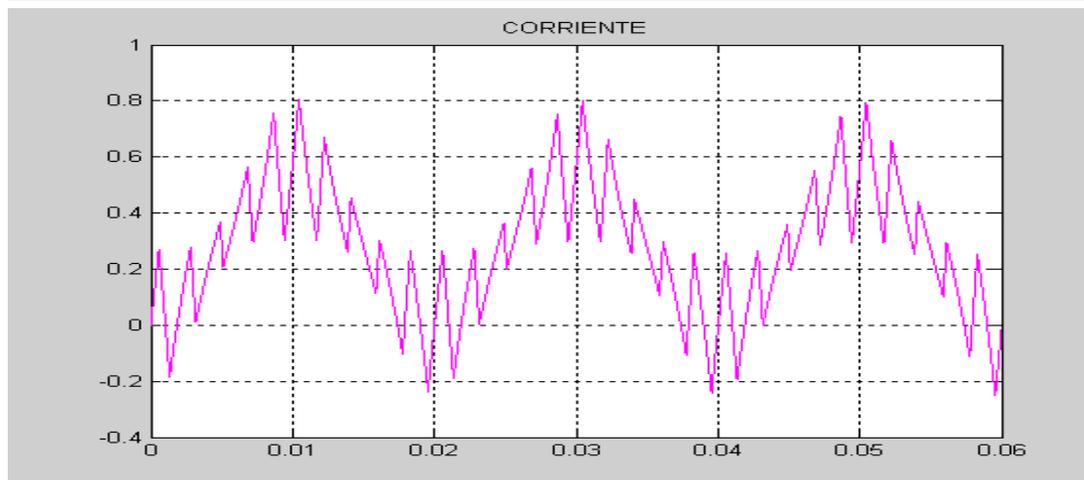


2. Introducción a convertidores electrónicos de potencia

CONCEPTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA



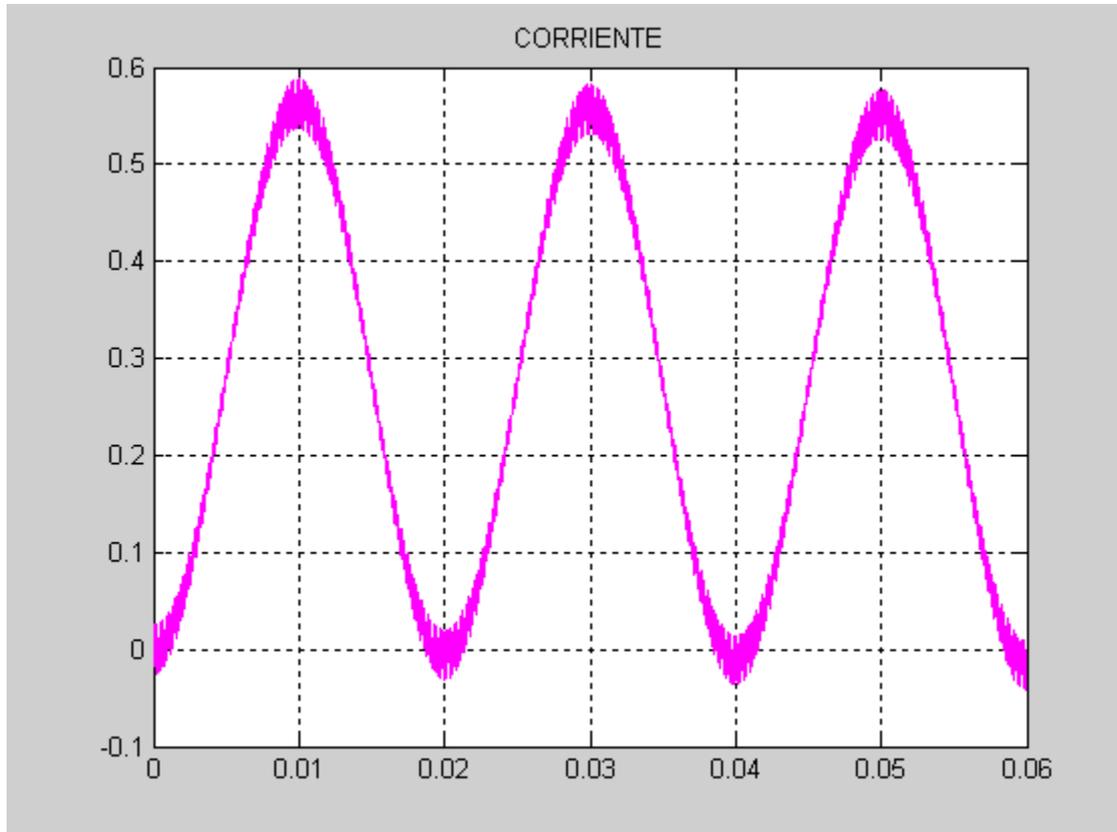
Tensión fase-neutro aplicada sobre una fase de la red con un convertidor electrónico de potencia.



Alimentando una carga inductiva (como es el caso de la red), la corriente que se obtiene es la siguiente.

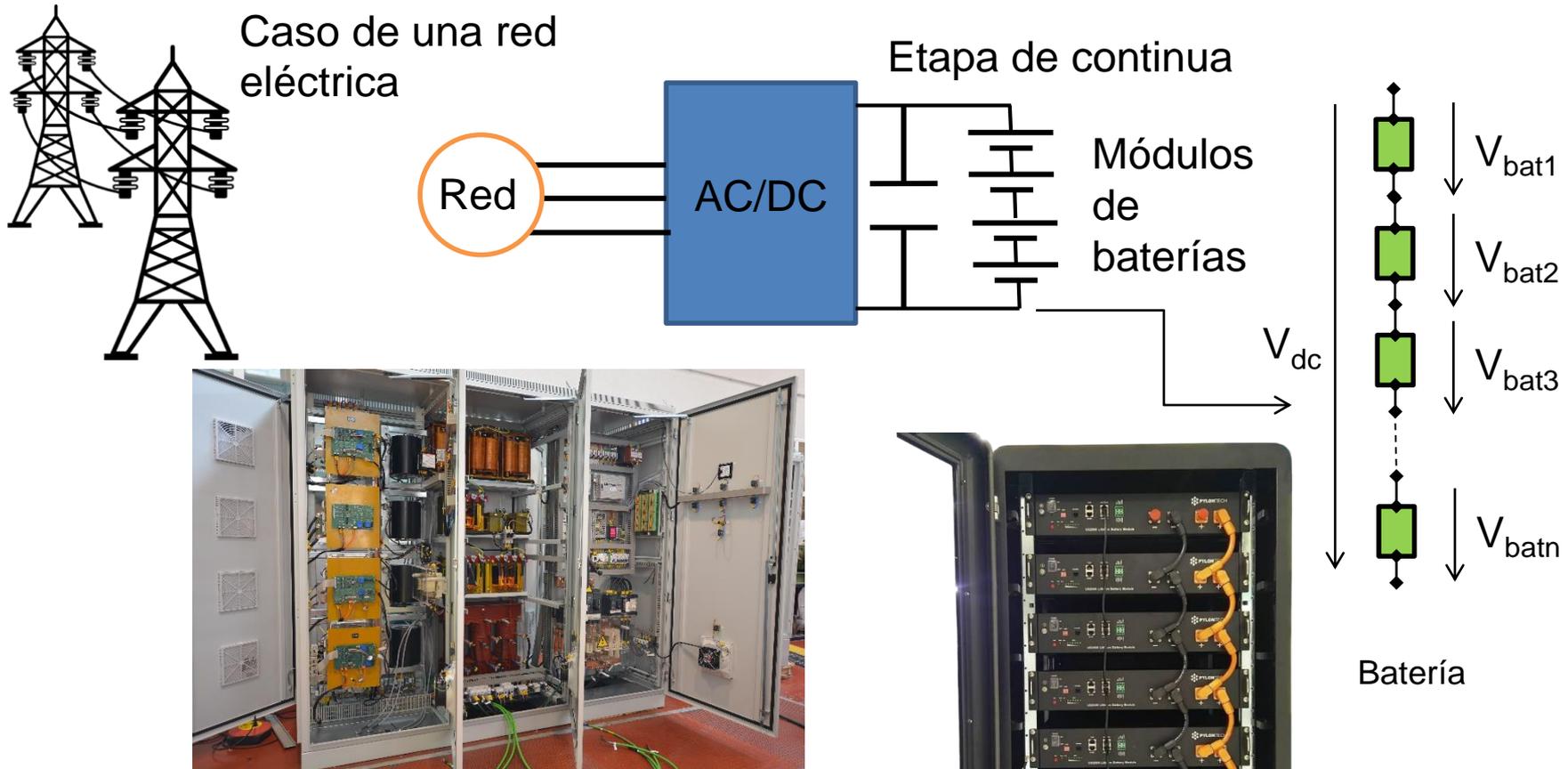
2. Introducción a convertidores electrónicos de potencia

CONCEPTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA



Con una frecuencia de conmutación (frecuencia de la triangular), la distorsión armónica de las corrientes disminuye.

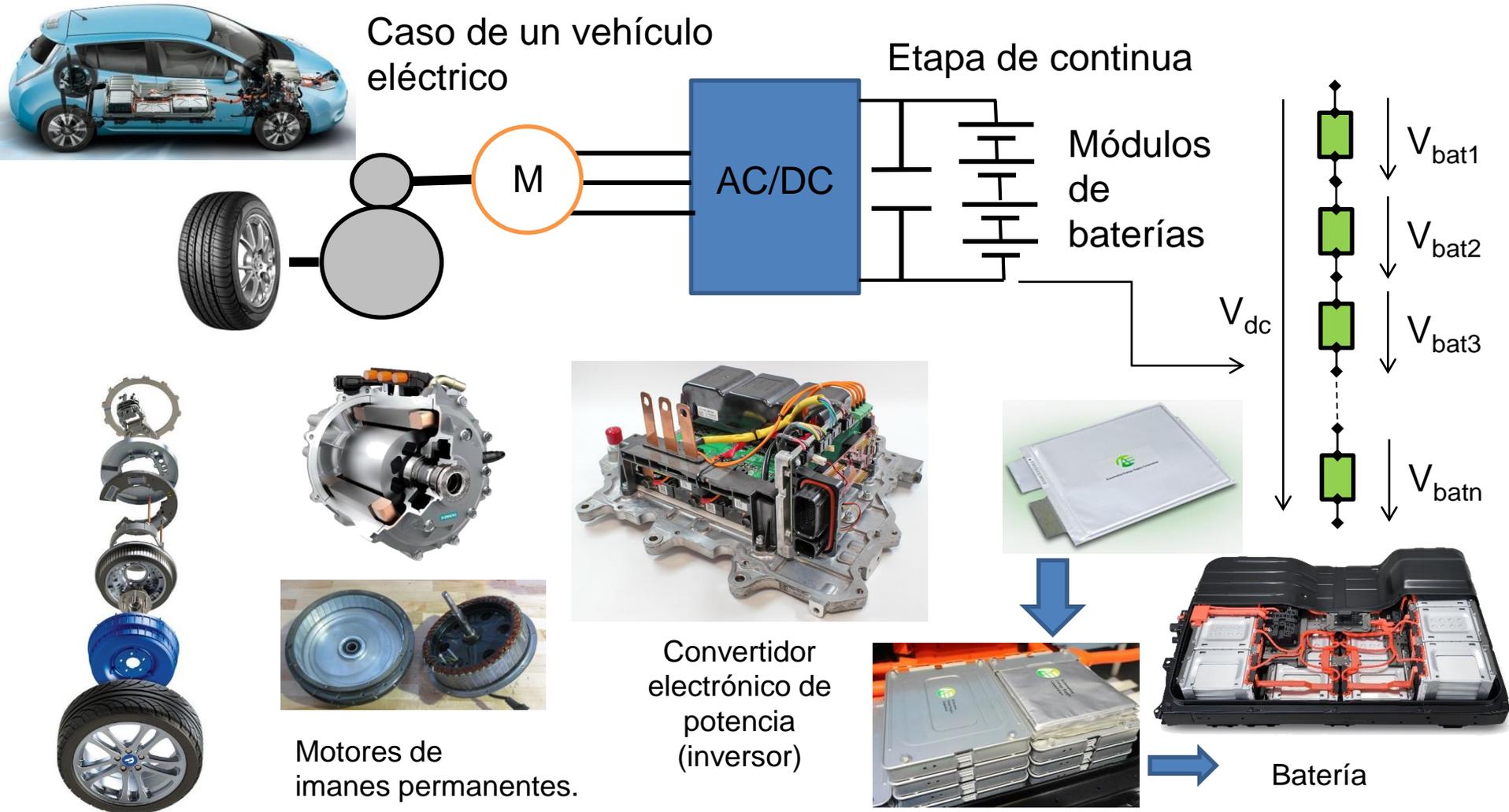
3. Acondicionamiento de potencia en sistemas de almacenamiento de energía



Convertidor electrónico
de potencia
(inversor)

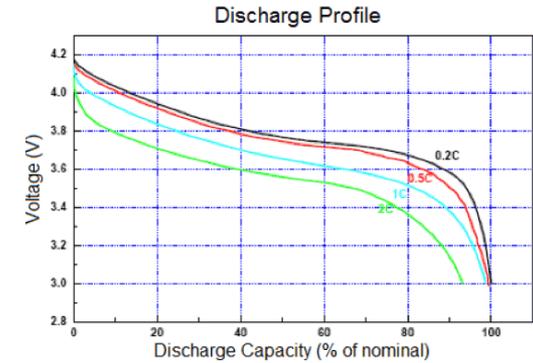
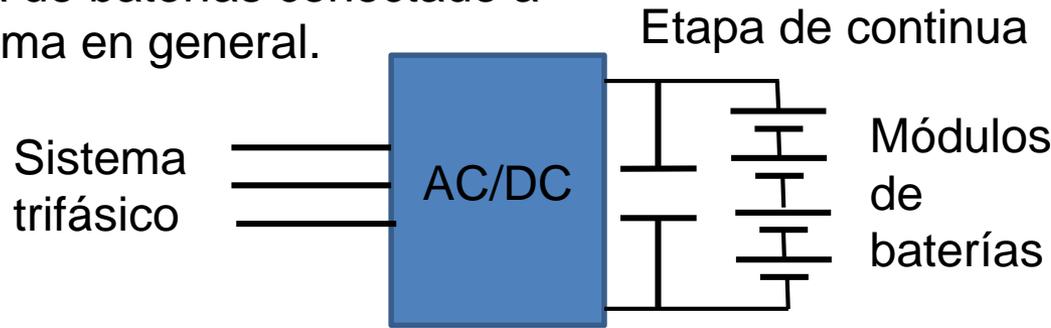


3. Acondicionamiento de potencia en sistemas de almacenamiento de energía



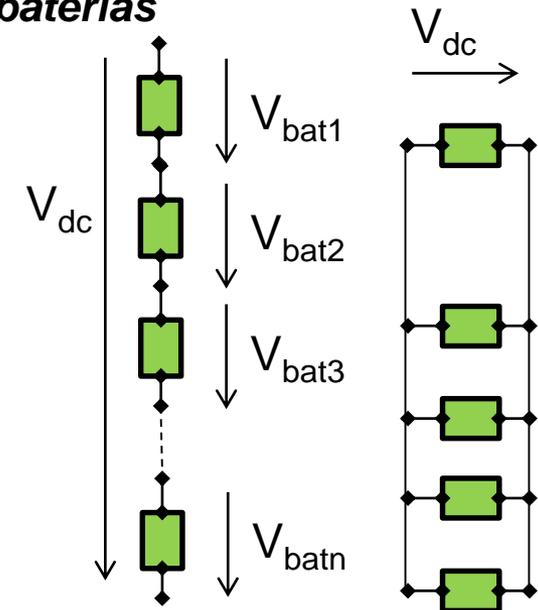
4. Dimensionado de sistemas de almacenamiento de energía

Sistema de baterías conectado a un sistema en general.



Consideraciones a tener en cuenta para la selección de las baterías

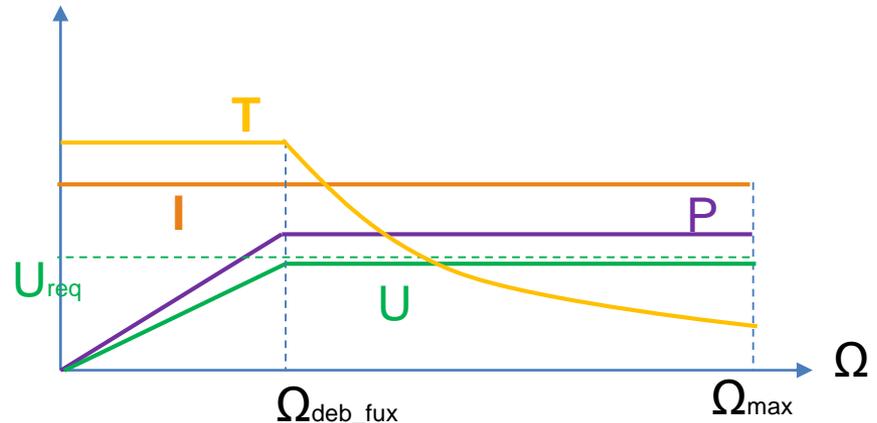
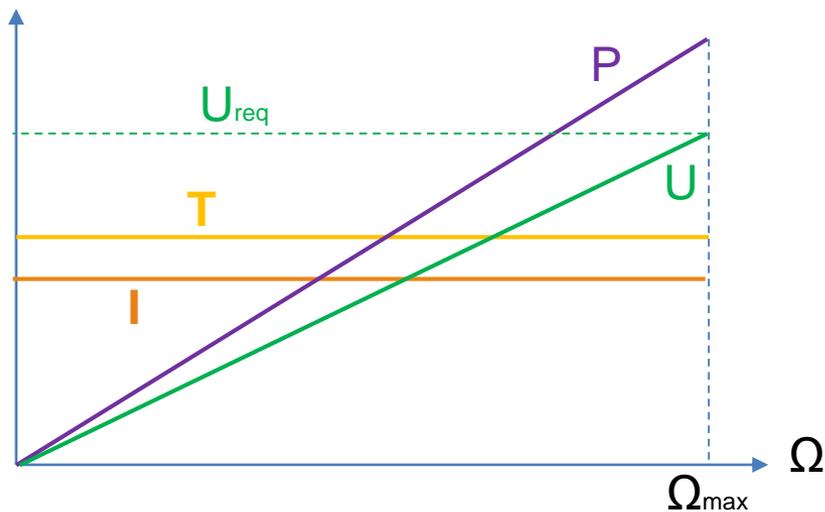
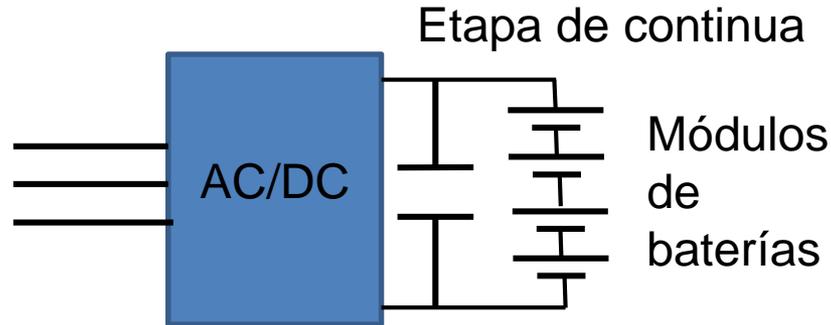
- Corriente lo más baja posible -> reducir pérdidas
- Tensión sin superar límites de aislamiento
- Menor número de celdas en serie
- Ecuilibración de las celdas de baterías en serie (BMS)
- Potencia del sistema (kW)
- Energía del sistema (kWh) – autonomía
- Tipo de celda de batería (C[Ah], V, I_{max})
- Disposición en serie / paralelo de las celdas -> tensión
- Tensión de red o de motor [U]



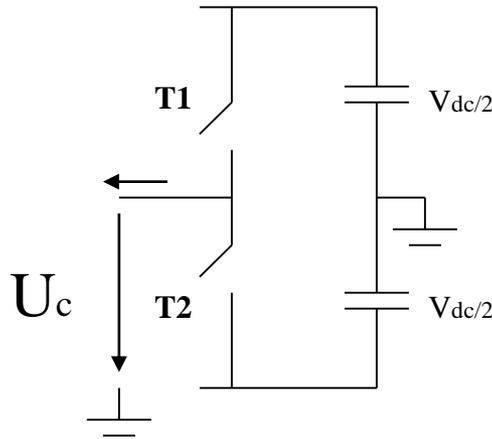
4. Dimensionado de sistemas de almacenamiento de energía

**Para el caso de
utilización de baterías
con vehículos
eléctricos:**

Perfil de utilización del
sistema, perfiles P
constante o T constante



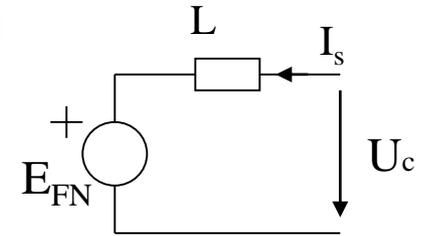
4. Dimensionado de sistemas de almacenamiento de energía



HIPÓTESIS: En un convertidor electrónico trifásico equilibrado, la tensión del punto neutro de la etapa de continua es, en régimen permanente, igual a la tensión del neutro de la carga que alimenta el convertidor.

Considerando el circuito equivalente aproximado de una fase de la red:

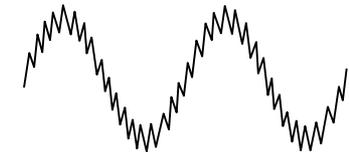
$$E_{FN} = -L \frac{di_s}{dt} + U_c$$



Cierre T1: $E_{FN} = -L \frac{di_s}{dt} + \frac{V_{dc}}{2} \Rightarrow \frac{di_s}{dt} = \frac{1}{L} \left(\frac{V_{dc}}{2} - E_{FN} \right)$

Cierre T2: $E_{FN} = -L \frac{di_s}{dt} - \frac{V_{dc}}{2} \Rightarrow \frac{di_s}{dt} = \frac{1}{L} \left(-\frac{V_{dc}}{2} - E_{FN} \right)$

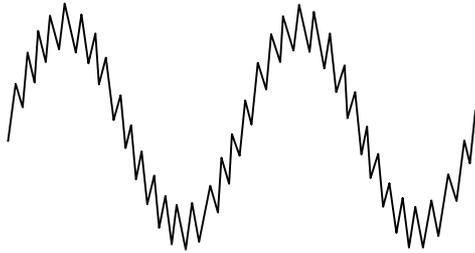
Queremos que el cierre de T1 y T2 controle crecer y decrecer la corriente para que se vaya adaptando a la referencia



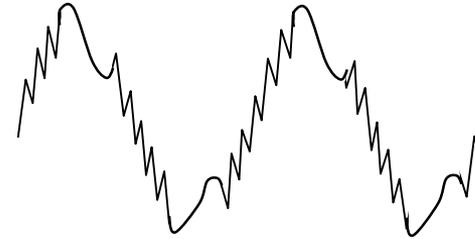
(Analizando los 4 casos de circuito en función de signo de E y i_s)

4. Dimensionado de sistemas de almacenamiento de energía

Para que se produzca la evolución deseada de la corriente en todo momento y se siga la referencia, se tiene que cumplir $V_{dc} > 2E_{FN}$



Si no hubiera tensión suficiente, la corriente tendría la siguiente forma:



Problemas
eléctricos y
mecánicos

$$\frac{V_{dc}}{2} > \widehat{E}_{FN}$$

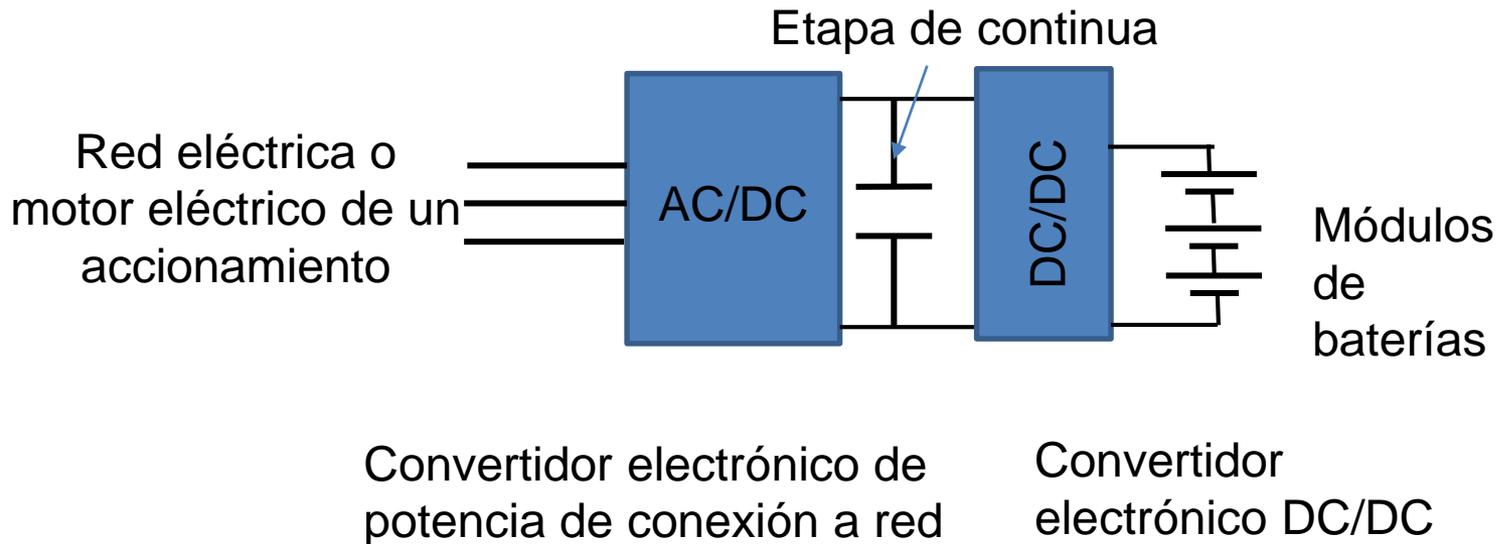
Expresado en términos de tensión de línea en valor eficaz de la red,

$$V_{dc} > \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E_L \approx 1,7U_{med}$$

Así, por ejemplo, para una red de 400V, $V_{dc}=680V$

5. Convertidores electrónicos de potencia continua-continua (DC/DC)

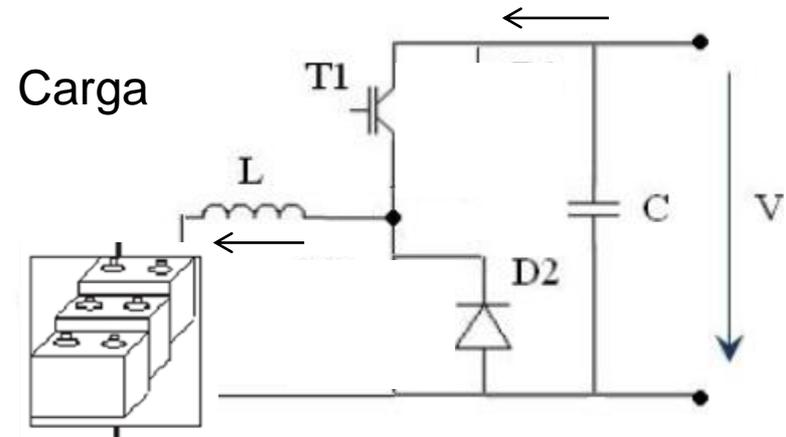
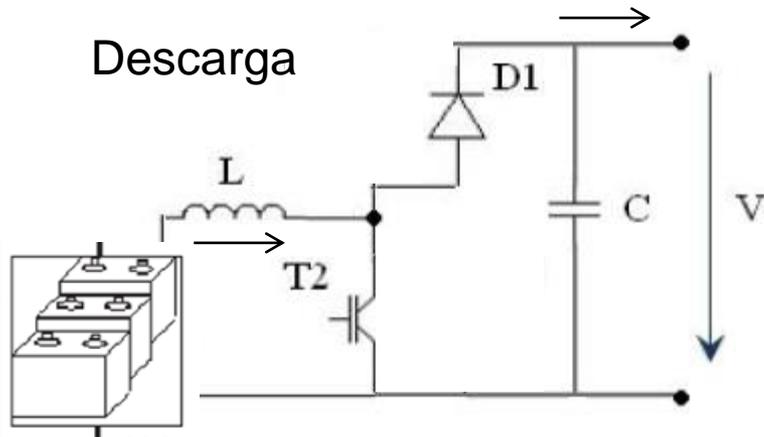
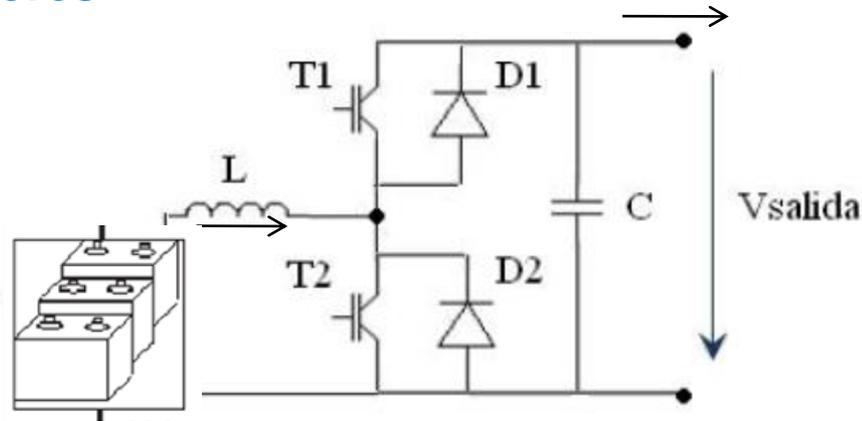
En algunos casos se combina el uso de convertidores DC/AC con convertidores continua/continua.



La misión del AC/DC es aplicar sobre el motor las corrientes que dan lugar a un par requerido por la aplicación. La misión del DC/DC es mantener la V_{dc} constante independientemente de V_{bat}

5. Convertidores electrónicos de potencia continua-continua (DC/DC)

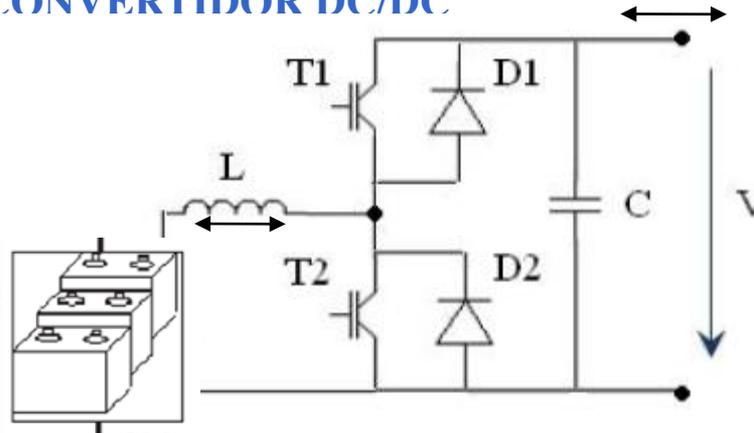
Topología de convertidores
DC/DC sin aislamiento
galvánico.



2. Convertidores electrónicos de potencia

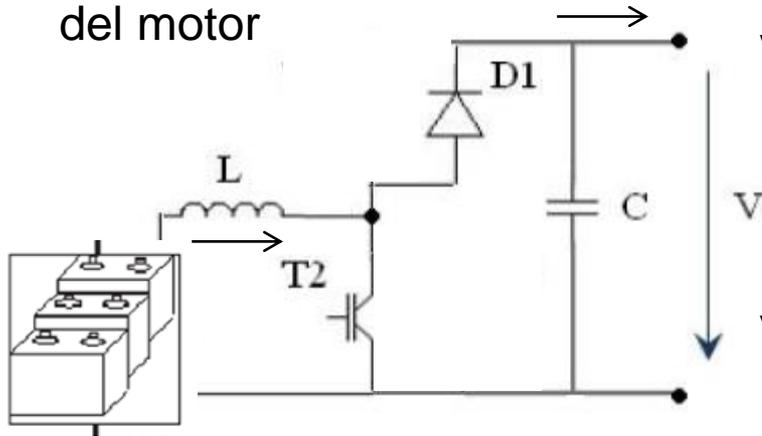
OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR DC/DC

Opción básica de convertidor electrónico bidireccional para la conexión de baterías en vehículos

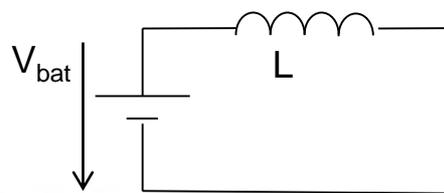


Este dispositivo tiene la misión de controlar la V_{dc} , para lo cual se regula la I_{bat} .

Aceleración del motor

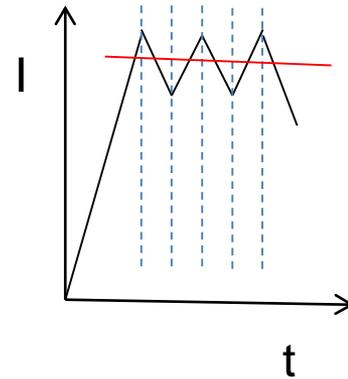


T2 Cerrado

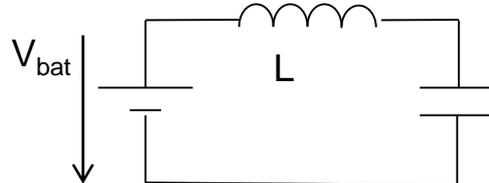


$$V_{bat} = L \frac{di}{dt}$$

$$\frac{di}{dt} > 0$$



T2 Abierto



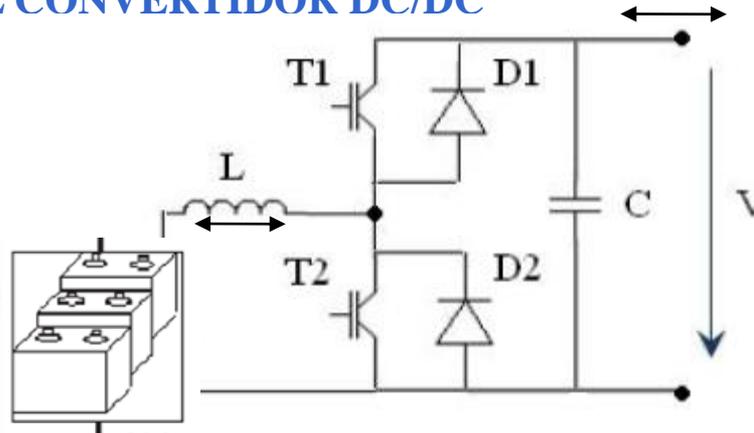
$$V_{bat} = L \frac{di}{dt} + V_{dc}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{-1}{L} (V_{dc} - V_{bat}) < 0$$

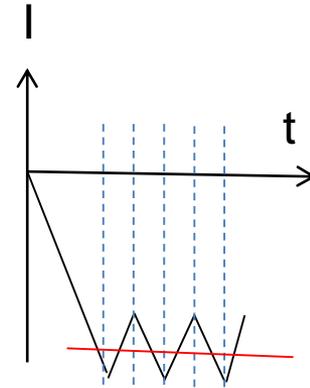
2. Convertidores electrónicos de potencia

OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR DC/DC

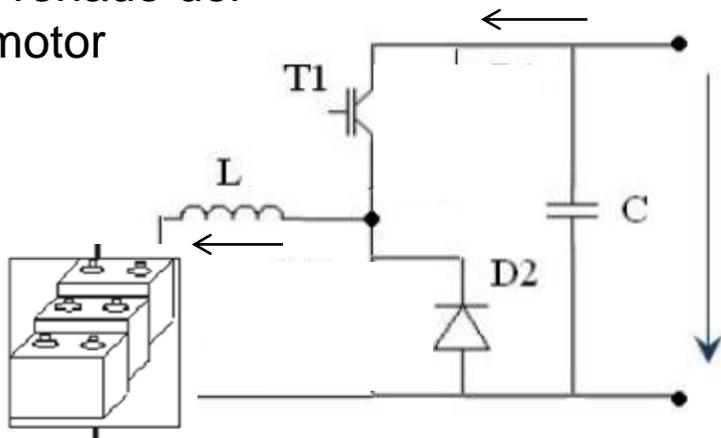
Opción básica de convertidor electrónico bidireccional para la conexión de baterías en vehículos



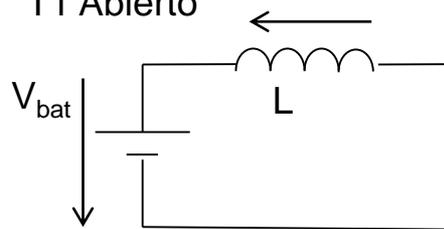
Este dispositivo tiene la misión de controlar la V_{dc} , para lo cual se regula la I_{bat} .



Frenado del motor



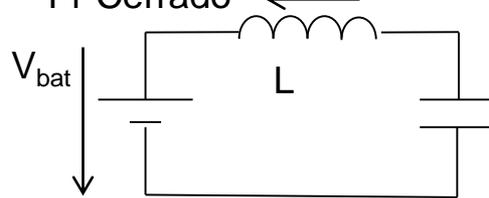
T1 Abierto



$$V_{bat} = -L \frac{di}{dt}$$

$$\frac{di}{dt} < 0$$

T1 Cerrado



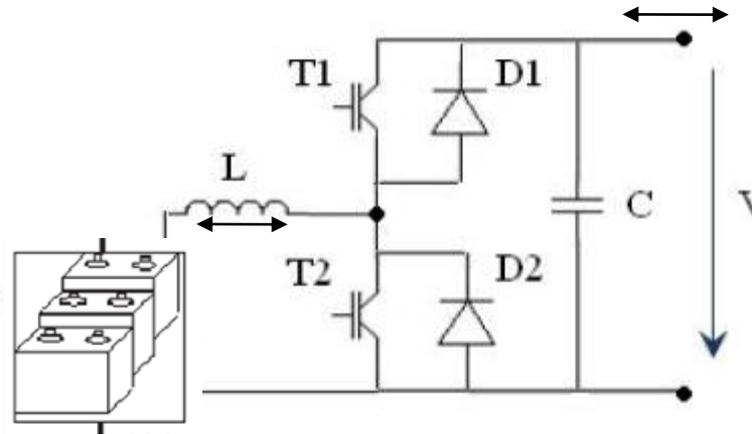
$$V_{bat} = -L \frac{di}{dt} + V_{dc}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (V_{dc} - V_{bat}) > 0$$

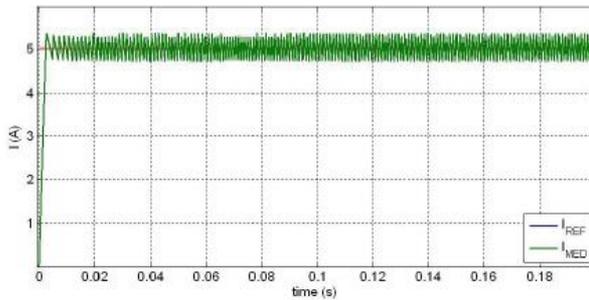
2. Convertidores electrónicos de potencia

OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR DC/DC

Opción básica de convertidor electrónico bidireccional para la conexión de baterías en vehículos



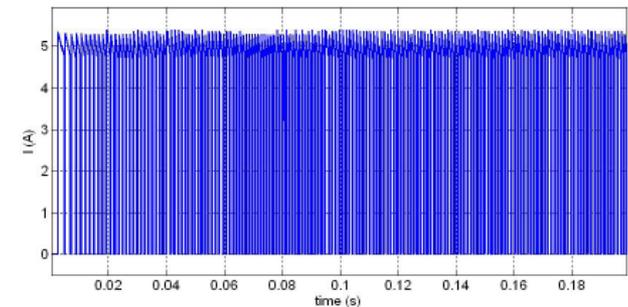
Existe la alternativa de convertidores DC/DC con etapa intermedia de alterna para saltos importantes de tensión y potencias elevadas



Corriente en el lado de baja tensión

Modos de control:

1. Banda histéresis
2. Regulador + PWM



Corriente en el lado de alta tensión

3. Acondicionamiento de potencia en sistemas de almacenamiento de energía

Baterías y Supercondensadores: DC/DC a una carga en continua; DC/AC a una carga alterna; ambos en algunas ocasiones (sistemas híbridos)

Almacenamiento térmico (no requiere convertidores específicos)

Hidrógeno: La celda de combustible con salida en continua requiere DC/DC, DC/AC o ambos

Hidrobombeo: Conexión directa o AC/DC + DC/AC en caso de veloc. variable

Aire Comprimido (CAES): Normalmente conexión directa

Volantes de inercia: convertidor AC/DC o AC/DC+DC/AC

SMES: Convertidor DC/DC, DC/AC o ambos. Convertidor en fuente de corriente

Compensadores de reactiva (STATCOM): Suministro potencia reactiva. Control de tensión

6. Ejemplo de dimensionado de sistemas de almacenamiento de energía

Se dispone de 210 celdas de batería de ión litio de 3.2V, 25.30Ah y con una capacidad de corriente máxima de 3C. Se necesita una aplicación que requiere: 370V de tensión de red, una energía de 16.3kWh y una potencia de 104.6kW. Determinar la solución de almacenamiento de energía.

1. Dimensionado por tensión:
$$N_{celdas_V} = \frac{370 \cdot 1.7}{3.2} = \frac{629}{3.2} = 197$$

2. Dimensionado por energía:

$$N_{celdas_E} = \frac{16.3 \cdot 10^3}{3.2 \cdot 25.30} = \frac{16.3 \cdot 10^3}{80.95} = 202$$

*Relación entre
tensión continua
y tensión de línea
trifásica.*

2. Dimensionado por potencia:

$$3C = 3 \cdot 25.30 = 75.89A \quad N_{celdas_P} = \frac{104.6 \cdot 10^3}{3.2 \cdot 75.89} = \frac{104.6 \cdot 10^3}{242.85} = 430$$

6. Ejemplo de dimensionado de sistemas de almacenamiento de energía

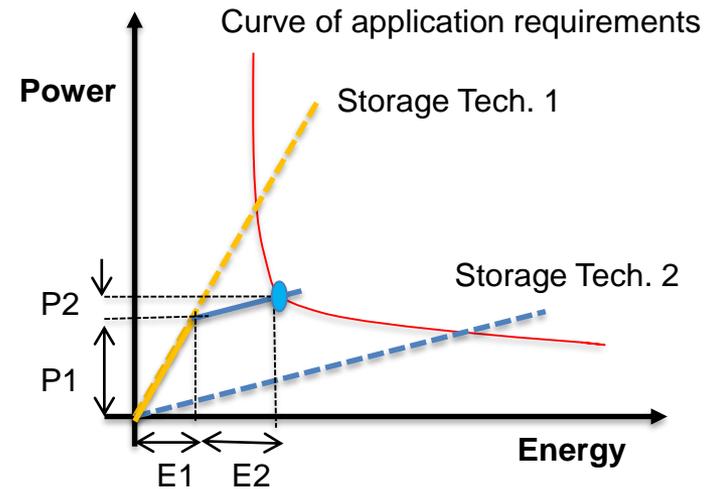
A veces, una solución de almacenamiento híbrido, basado en varias tecnologías, resulta más interesante para cubrir una determinada solución.

En los casos en que cumplir el requisito, por ejemplo de potencia, supone una cantidad de energía excesiva (o viceversa) puede ser más conveniente elegir una solución donde se combine potencia y energía de dos tecnologías conjuntamente.

$$P_{total} = N_{bat} \cdot P_{cell_{bat}} + N_{SC} \cdot P_{cell_{SC}}$$

$$E_{total} = N_{bat} \cdot E_{cell_{bat}} + N_{SC} \cdot E_{cell_{SC}}$$

Si se completa con una ecuación de costes y una ecuación que defina el envejecimiento de los dispositivos con el número de ciclos, esto supone un exceso en potencia y/o energía.



$$P_{total} = N'_{bat} \cdot P_{cell_{bat}} + N'_{SC} \cdot P_{cell_{SC}} + \Delta P$$

$$E_{total} = N'_{bat} \cdot E_{cell_{bat}} + N'_{SC} \cdot E_{cell_{SC}} + \Delta E$$

6. Ejemplo de dimensionado de sistemas de almacenamiento de energía

... volviendo a nuestro ejercicio:

Se dispone de una opción que son unos volantes de inercia con estas características: P=11,34kW, E=66,15Wh.

¿Cómo resultaría una opción de almacenamiento híbrido entre baterías y volantes de inercia?

Power and Energy required: 104.6kW; 16.3kWh.

$$P_{celda_bat} = 3.2 \cdot 75.89 = 242.85 \text{ W}$$

$$P_{unit_FW} = 11.34 \text{ kW}$$

$$E_{celda_bat} = 3.2 \text{ V} \cdot 25.30 \text{ Ah} = 80.95 \text{ Wh}$$

$$E_{unit_FW} = 66.15 \text{ Wh}$$

$$P_{total} = N_{bat} \cdot P_{cell_{bat}} + N_{FW} \cdot P_{unit_FW}$$

$$E_{total} = N_{bat} \cdot E_{cell_{bat}} + N_{FW} \cdot E_{unit_FW}$$

$$N_{FW} = \frac{E_{total} - \frac{P_{total}}{P_{cell_{bat}}} \cdot E_{cell_{bat}}}{E_{unit_FW} - \frac{P_{unit_FW}}{P_{cell_{bat}}} \cdot E_{unit_FW}}$$

$$N_{bat} = \frac{P_{total}}{P_{cell_{bat}}} - \frac{P_{unit_FW}}{P_{cell_{bat}}} \cdot N_{FW}$$

$$N_{bat} = 197 \text{ cells}$$

$$N_{FW} = 5 \text{ units}$$

6. Ejemplo de dimensionado de sistemas de almacenamiento de energía



2 sept 2020

**Flywheel-lithium battery
hybrid energy storage system
joining Dutch grid services
markets**



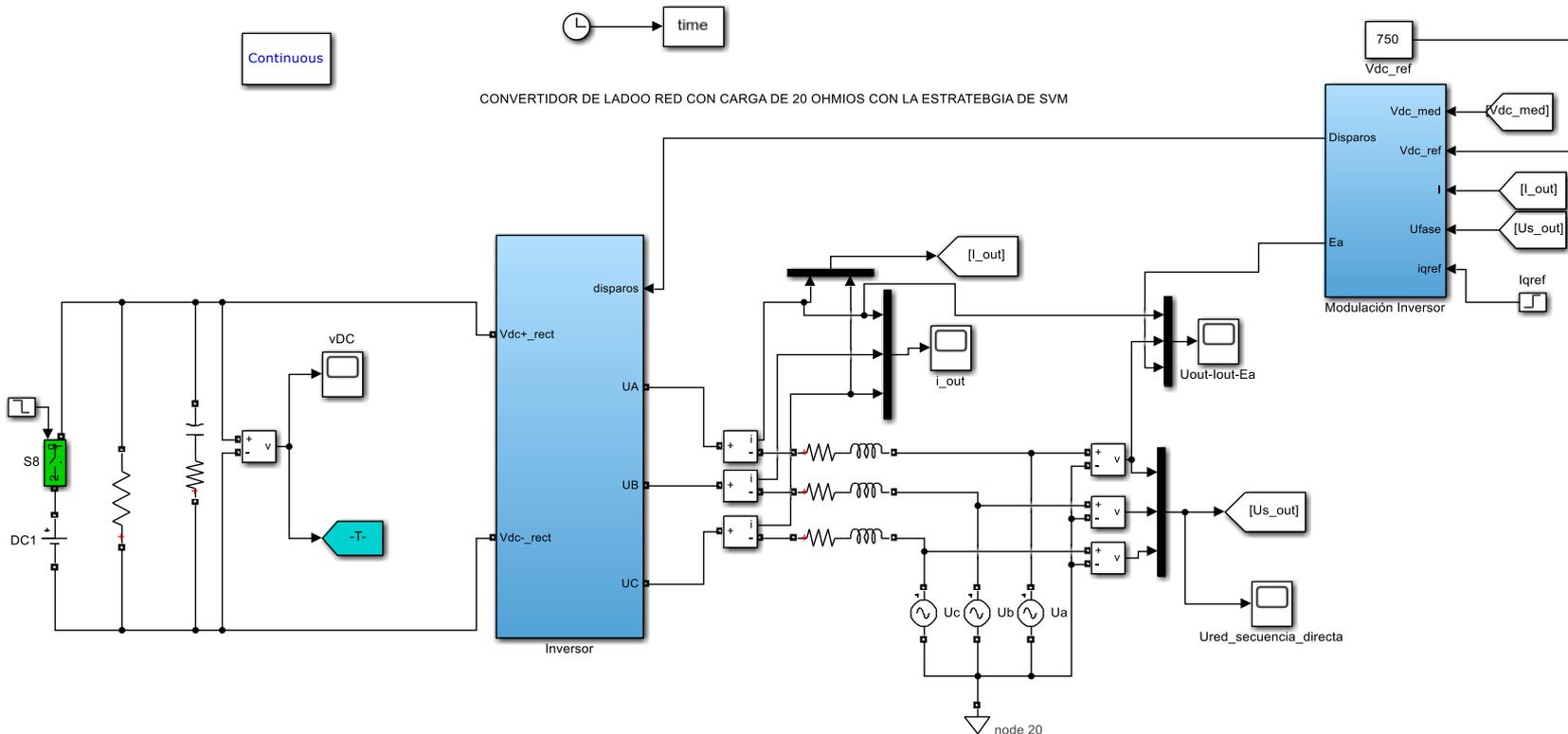
The hybrid system in Almelo, Netherlands. S4 Energy's flywheels in foreground with Leclanché containerised battery storage systems behind. Image: Leclanché.

Los volantes de inercia son una buena combinación para sistemas híbridos de almacenamiento.

El sistema híbrido combina baterías de litio de 8.8MW/7.12 MWh con 6 volantes de inercia que aportan 3MW. En total, tienen una capacidad de potencia de 9MW para la estabilización de la frecuencia durante el control primario. Localización: Almelo (The Netherlands)

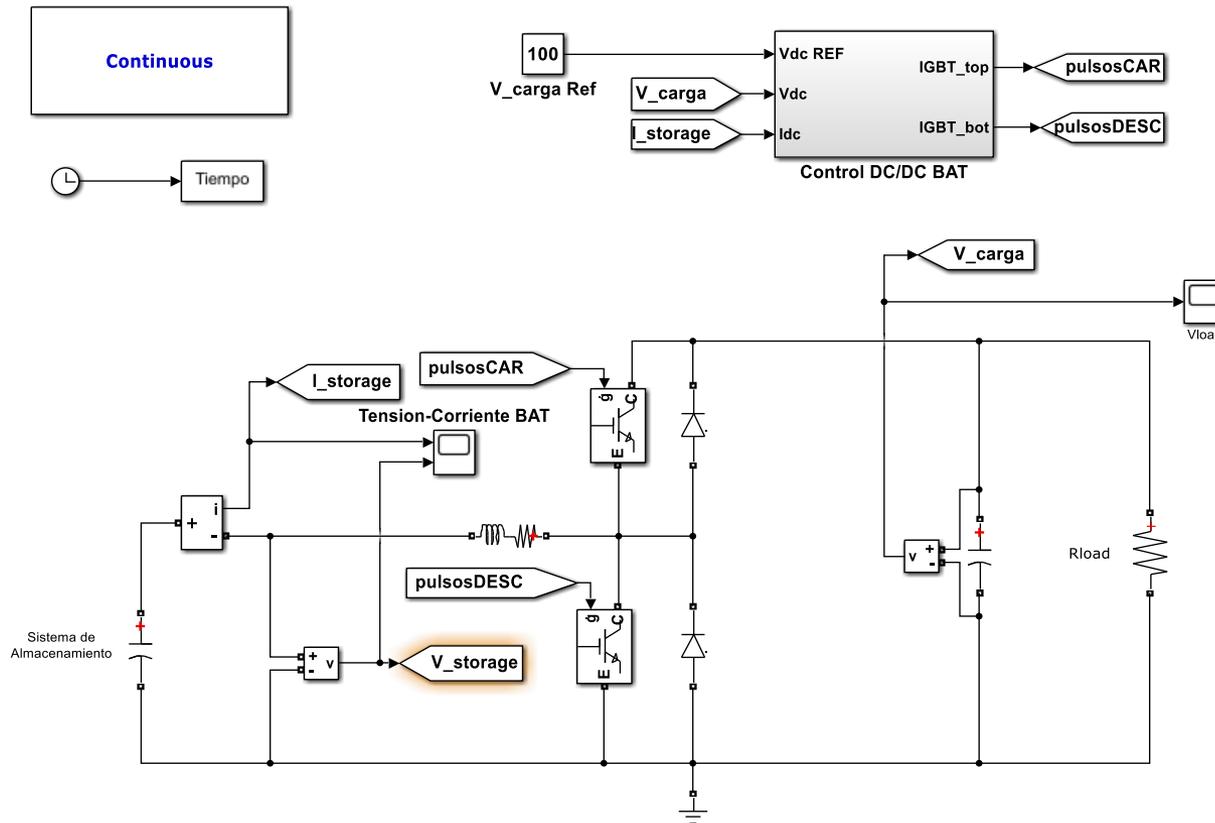
7. Modelos de inversor trifásico con control SVM y modelo DC/DC

Modelo DC/AC en Simulink con control de la potencia de salida y regulación de tensión Vdc.



7. Modelos de inversor trifásico con control SVM y modelo DC/DC

Modelo DC/DC en Simulink con control de la potencia de salida y regulación de tensión Vdc.



Gracias por su atención

Dr. Marcos Lafoz Pastor

marcos.Lafoz@ciemat.es