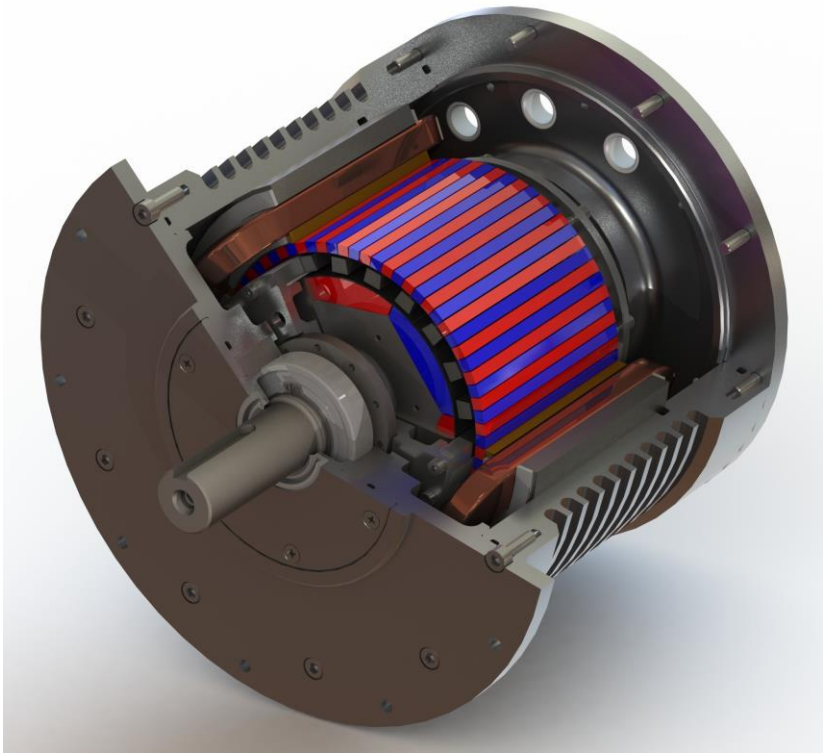
Javier Pereda
Profesor
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Pontificia Universidad Católica de Chile



IEE 2213
Máquinas Eléctricas

1. Introducción

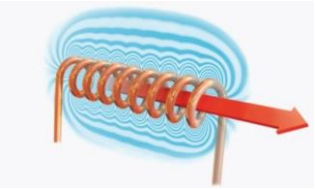
Historia, corriente continua y alterna, sistemas trifásicos, características, clasificación y aplicaciones de las máquinas eléctricas

Historia de la Electricidad y Magnetismo
Pasos de los grandes maestros

1820 Electromagnetismo — André-Marie Ampère

Relacionó electricidad y magnetismo

Ley de Ampère (“electrodinámica”) y electroimán



1821-31 Uno de los científicos más grandes — Michael Faraday

1er motor eléctrico

1er dínamo

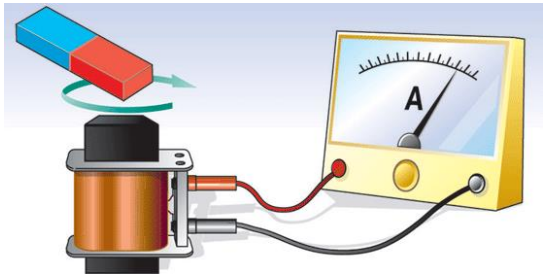
1er transformador

1er análisis matemático de un circuito

Inducción electromagnética (f.e.m)

Ley de Faraday

2 Leyes de Faraday de la Electrólisis

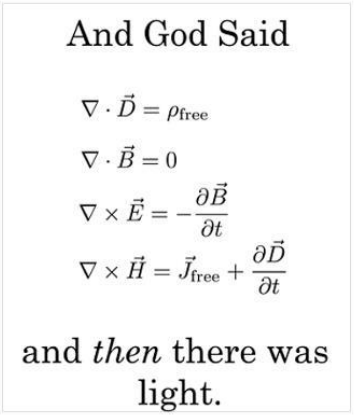


1861 El gran unificador !!!! — James Clerk Maxwell

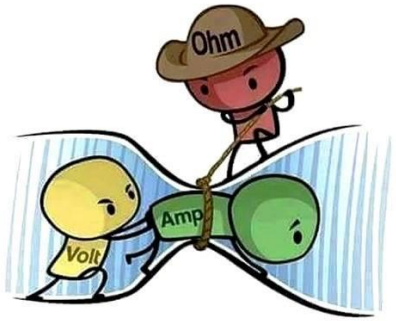
Unión de la electricidad, magnetismo y óptica

Segunda unificación de la física (después de la gravedad)

20 ecuaciones ➔ 4 ecuaciones (Heaviside)

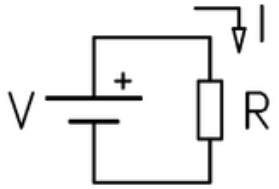


Corriente y Voltaje



- **Corriente (A)**: flujo de electrones en un material (Amperes).
- **Voltaje (V):** diferencial de potencial entre dos puntos. "Presión" que una fuente ejerce sobre los electrones (Voltios).

$$\mathbf{V = I \cdot R}$$

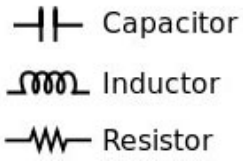




- **Potencia (W):** Es voltaje por corriente (Vatios).
- **Energía (Wh):** Es potencia por unidad de tiempo (Vatios-hora).

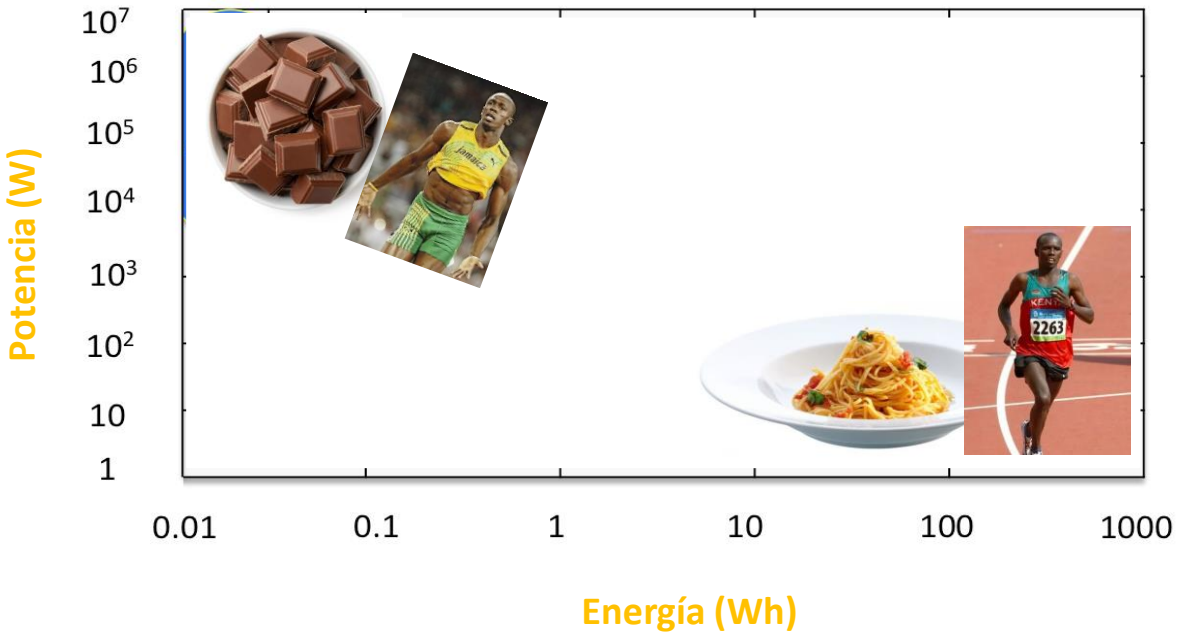
$$\mathbf{P = V \cdot I}$$

$$\mathbf{E = P \cdot T}$$



Energía y Potencia

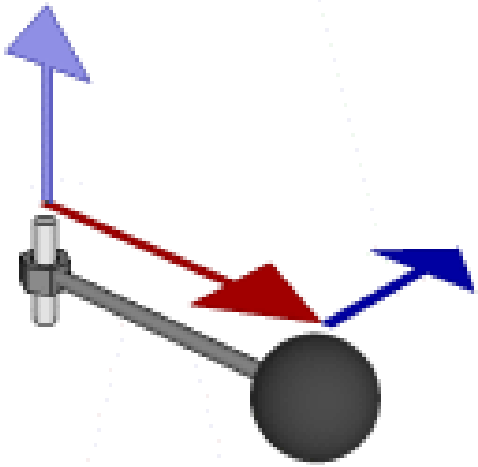
- **Energía (Wh):** capacidad de realizar un trabajo
- **Potencia (W):** cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo



Conceptos básicos

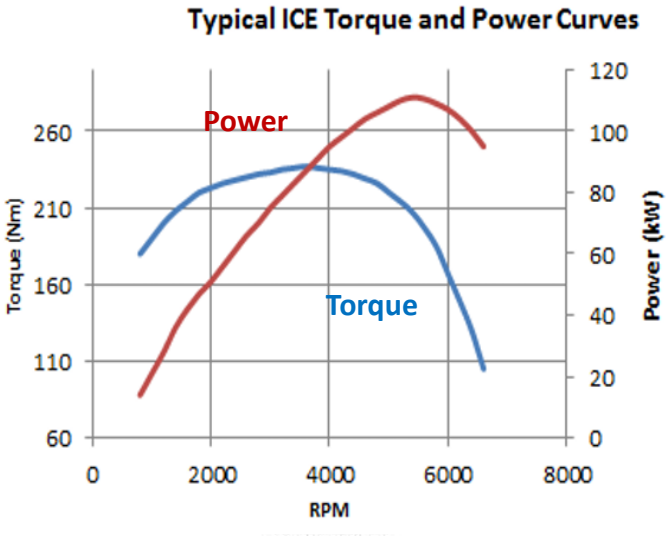
- **Torque o par motor (Nm):**
  Fuerza aplicada sobre el eje de transmisión
- **Relación Torque-Potencia:**

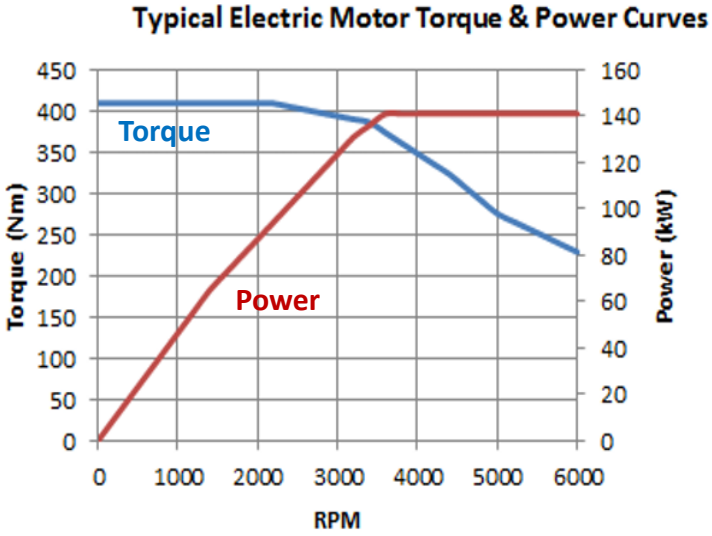
$$\tau = r \times F$$
$$L = r \times p$$



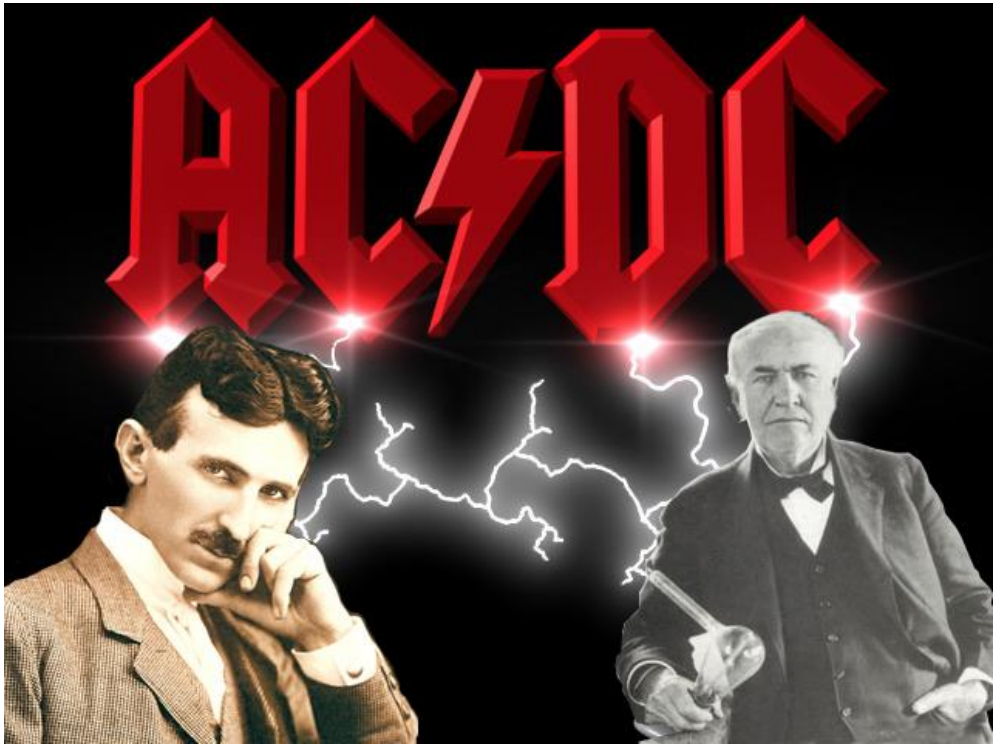
$$T = r \times F$$

$$P = T \cdot \omega_m$$





La Guerra de Las Corrientes: AC vs DC
Segunda Revolución Industrial (1880)





Corriente Directa y Alterna

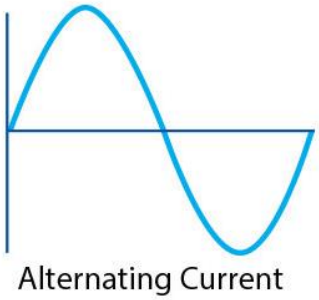


Generada por PV, celdas de hidrógeno o máquinas DC rotatorias (ineficientes).
Consumida en Data Centers, computadores y luminaria led, etc.
***Almacenamiento:** Baterías, ultracapacitores y H_2









Generada por máquinas AC rotatorias (eólica, hidro, térmica).
Consumida en motores industriales (inducción), luminarias incandescentes, etc.

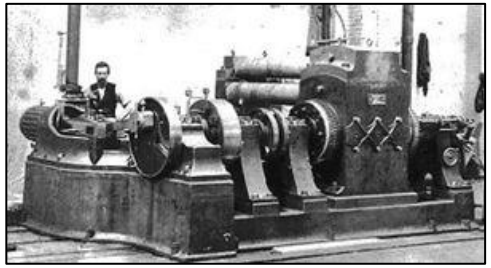


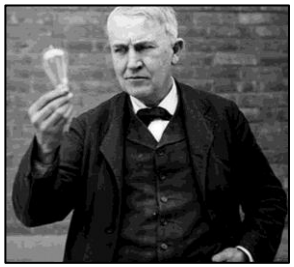


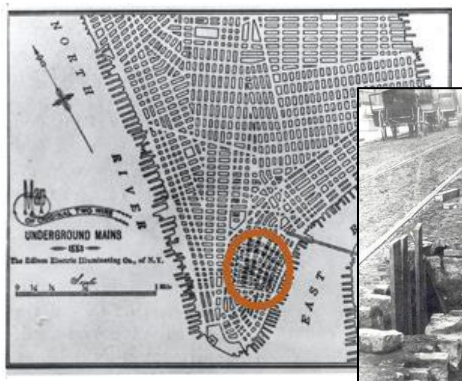


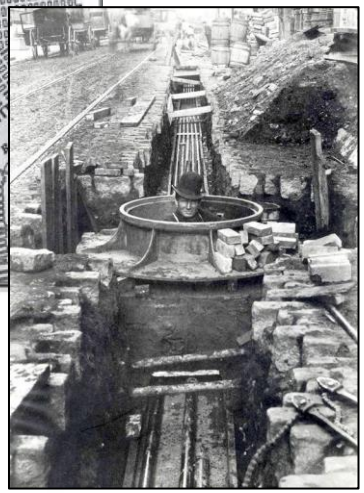
AC vs DC
Generador eléctrico







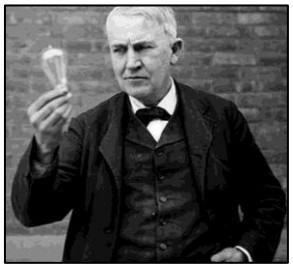


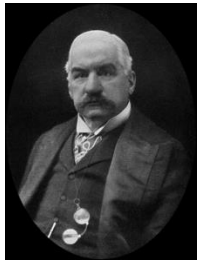


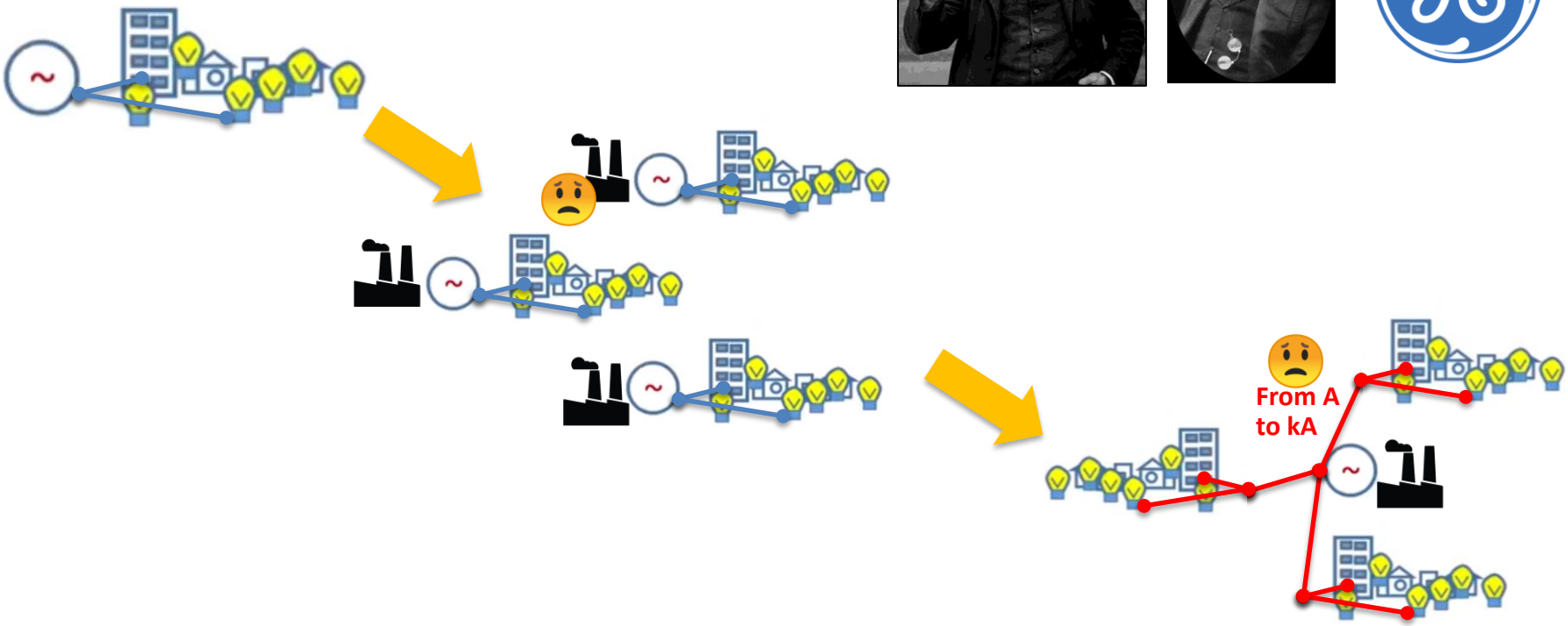


https://www.youtube.com/watch?v=-cP4NmVKras&list=PLi5hEpEXBAsLWtXR9_UYNDflNeoEK7s6y&index=19

AC vs DC
Electrificación

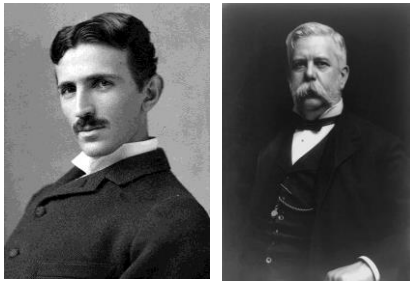




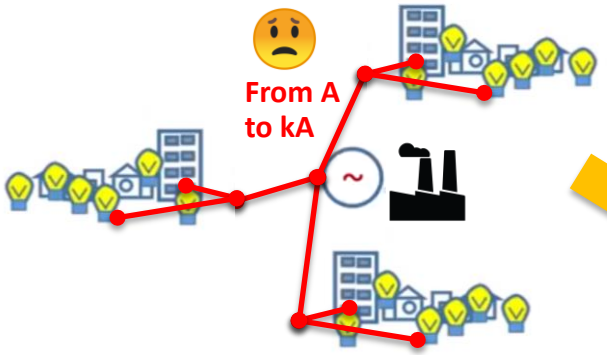


AC vs DC

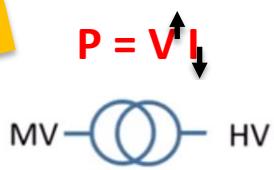
Transformador y generación centralizada















Problema en transmisión a bajo voltaje

Para una misma potencia ***P***, a mayor voltaje ***V***, menor corriente ***I***:

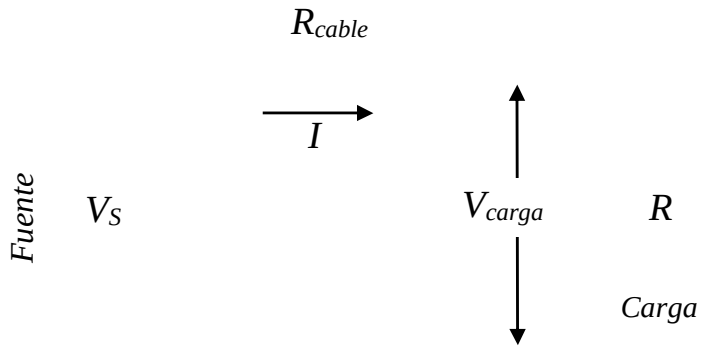
$$\boldsymbol{P = V \cdot I}$$

Y las pérdidas en un cable de resistencia ***R*** donde circula una corriente ***I*** son:

$$\boldsymbol{pérdidas = I^2 \cdot R}$$

Una opción es utilizar cables con menor resistencia, pero eso significa cables más pesados y costosos. Además no soluciona el problema de la regulación de voltaje a diferentes cargas:

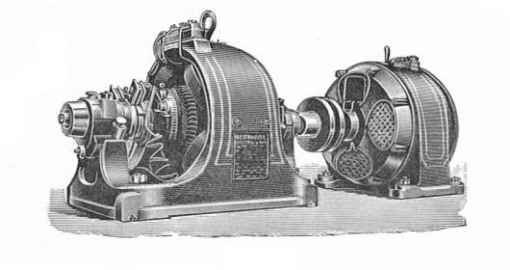
$$V_{carga} = V_S - I \cdot \boldsymbol{R_{cable}}$$



Solución:
transmitir en alto voltaje

Convertir Voltaje DC:

No es tan sencillo y la tecnología no estaba disponible en la época. Una opción era usar sistemas rotatorios (motor-generador dc) pero es costoso e ineficiente.



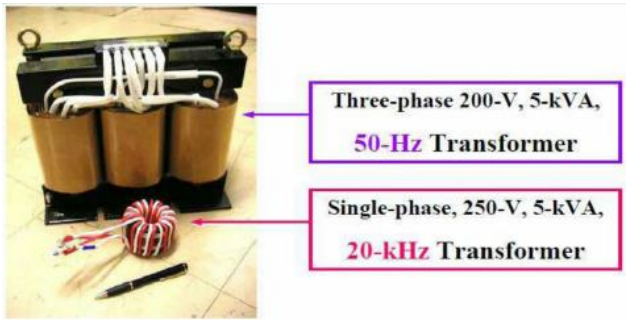


Convertir voltaje AC:

Westinghouse y Tesla descubrieron que el transformador era la clave, el cual ya existía (pero sólo funciona en AC).

La transmisión y distribución comienzan a desarrollarse en AC

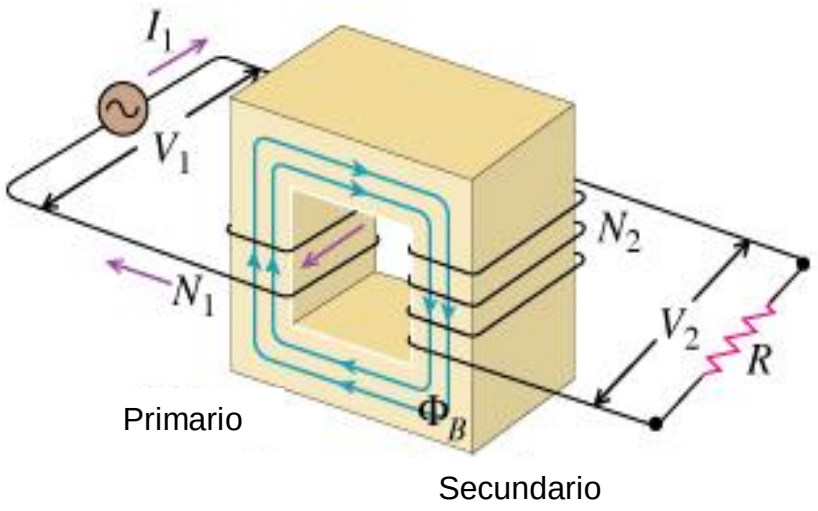


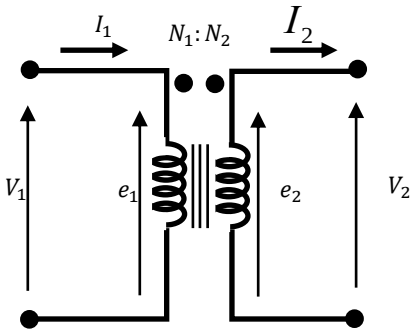


Transformador Ideal

Principio de Funcionamiento

El transformador es un circuito eléctrico acoplado magnéticamente que generalmente consta de un primario (bobina que entrega energía al circuito magnético) y un secundario (bobina que entrega energía al circuito eléctrico).



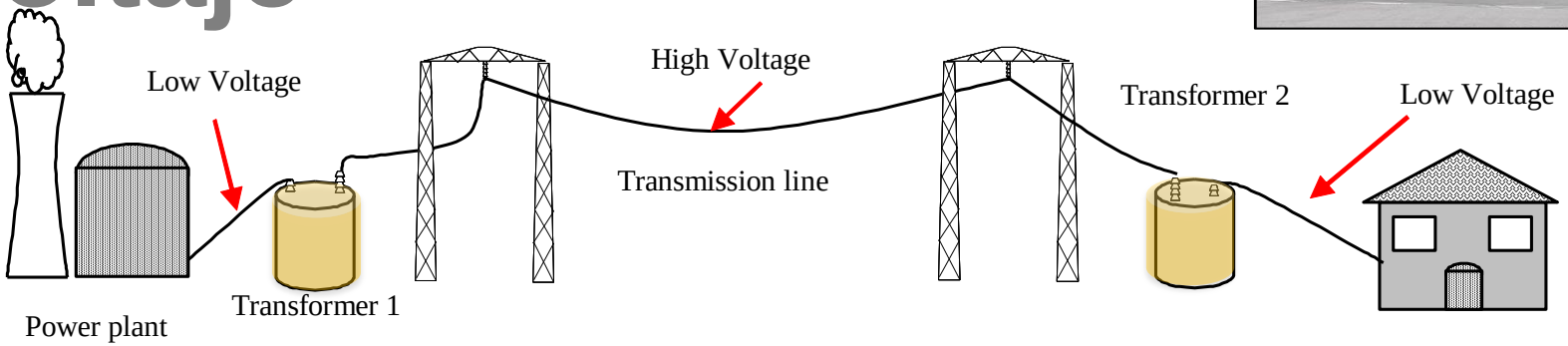


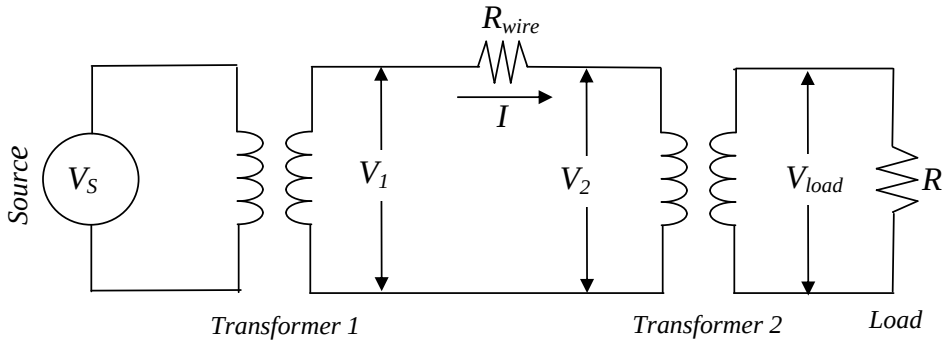
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

Solución: transmitir en alto voltaje









La Corriente Directa (DC) está retornando

AC vs DC

Nuevos sistemas de transmisión HVDC (2011)





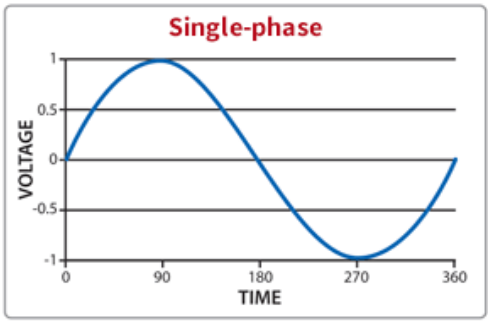
Sistemas polifásicos
Sistema trifásico

$$P = S \cdot \cos\varphi$$
$$Q = S \cdot \sin\varphi$$

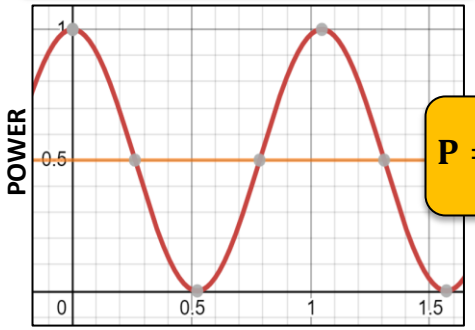
$$v(t) = V \cdot \cos \omega t$$
$$i(t) = I \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

Sistema monofásico

Requiere 2 conductores y la **potencia es pulsante**, representada como una función sinusoidal del doble de la frecuencia fundamental



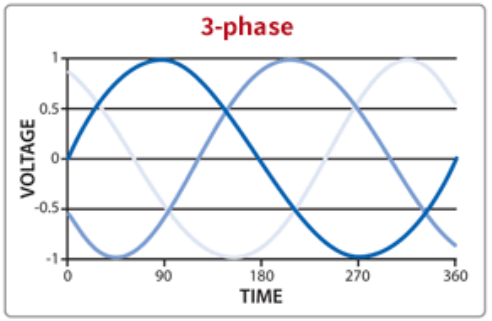
$$p(t) = VI \cdot \cos \omega t \cdot \cos \omega t \quad \varphi = 0$$



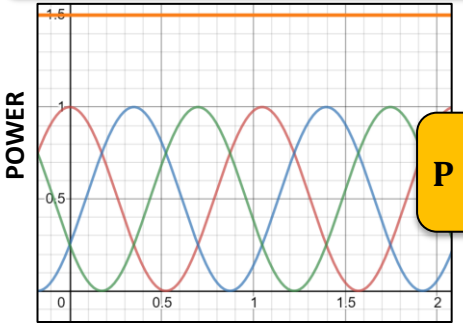
$$\mathbf{P} = \frac{V}{\sqrt{2}}\frac{I}{\sqrt{2}} = \frac{VI}{2}$$

Sistema trifásico

Requiere al menos 3 conductores y la **potencia puede ser constante** si el sistema está balanceado.



$$p(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t)$$



$$\varphi = 0$$

$$\mathbf{P} = p(t) = 3\frac{VI}{2}$$

¿Por qué Sistema trifásico?.... o bifásico?

Generación

- Generador trifásico produce **potencia constante** (el monofásico pulsante)
- Generador trifásico aprovecha mejor el **espacio físico** (menor tamaño y peso)
- Generador trifásico es más **económico** a igual potencia

Transmisión

- Línea monofásica necesita **2xC** conductores para trasmitir una potencia **P**
- Línea bifásica necesita **?xC** conductores para trasmitir una potencia ?**P (TAREA)**
- Línea trifásica balanceada necesita **3xC** conductores para trasmitir **3P**
- Monofásico (P/2 por conductor C) vs Trifásico (P por conductor C): **200% de potencia**

Distribución

- En LV se utiliza un neutro debido a desbalances (3/4 P por conductor): **150% de potencia**
- Distribución puede ser trifásica y monofásica
- Transformadores trifásicos (distintas configuraciones, menor volumen y peso)

Consumo

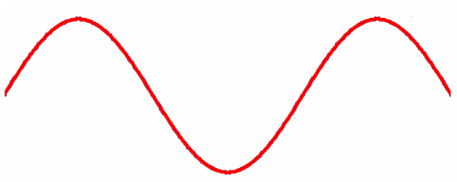
- Motores trifásicos son superiores (más de 50% del consumo de energía mundial)
- Consumo puede ser trifásico o monofásico (consumo trifásico es a **potencia constante**)
- Rectificadores trifásicos tienen mayor calidad y prestaciones

Sistemas AC
Representación

Fasor: Un vector que representa una onda (Una magnitud compleja que representa funciones que varían sinusoidalmente)

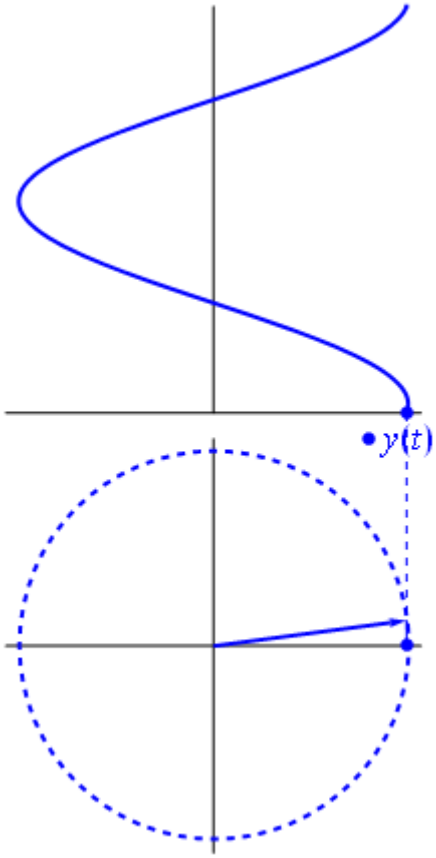
$$v = V_0 \cdot \cos(\omega t + \theta)$$

$$v = \Re\left\{V \cdot e^{j(\omega t+\theta)}\right\}$$



$$\vec{V} = V_0 \cdot e^{j\theta}$$

$$\vec{V} = V_0 \angle \theta$$

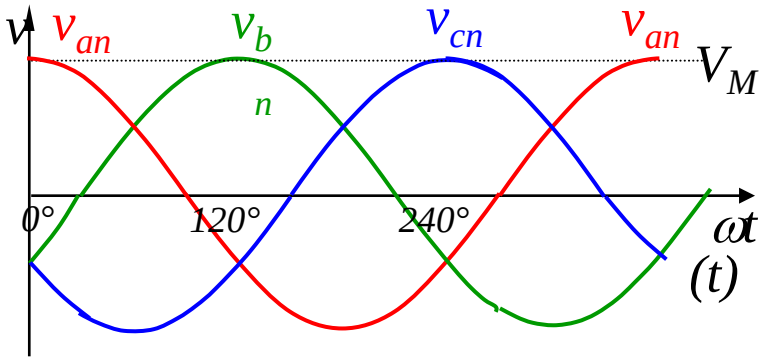


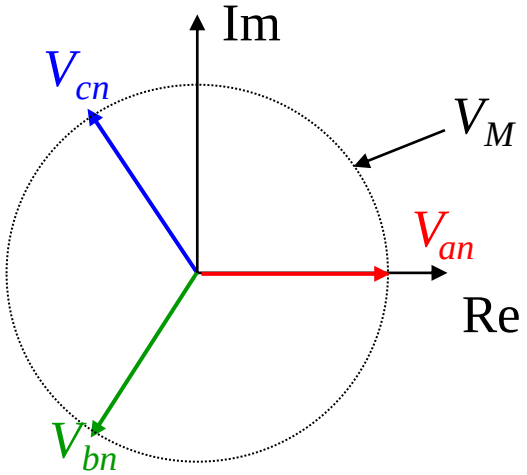
Sistemas Trifásicos
Representación

Un sistema polifásico tiene un fasor por fase
Trifásico: fasores desfasados en 120° y de igual frecuencia y amplitud*

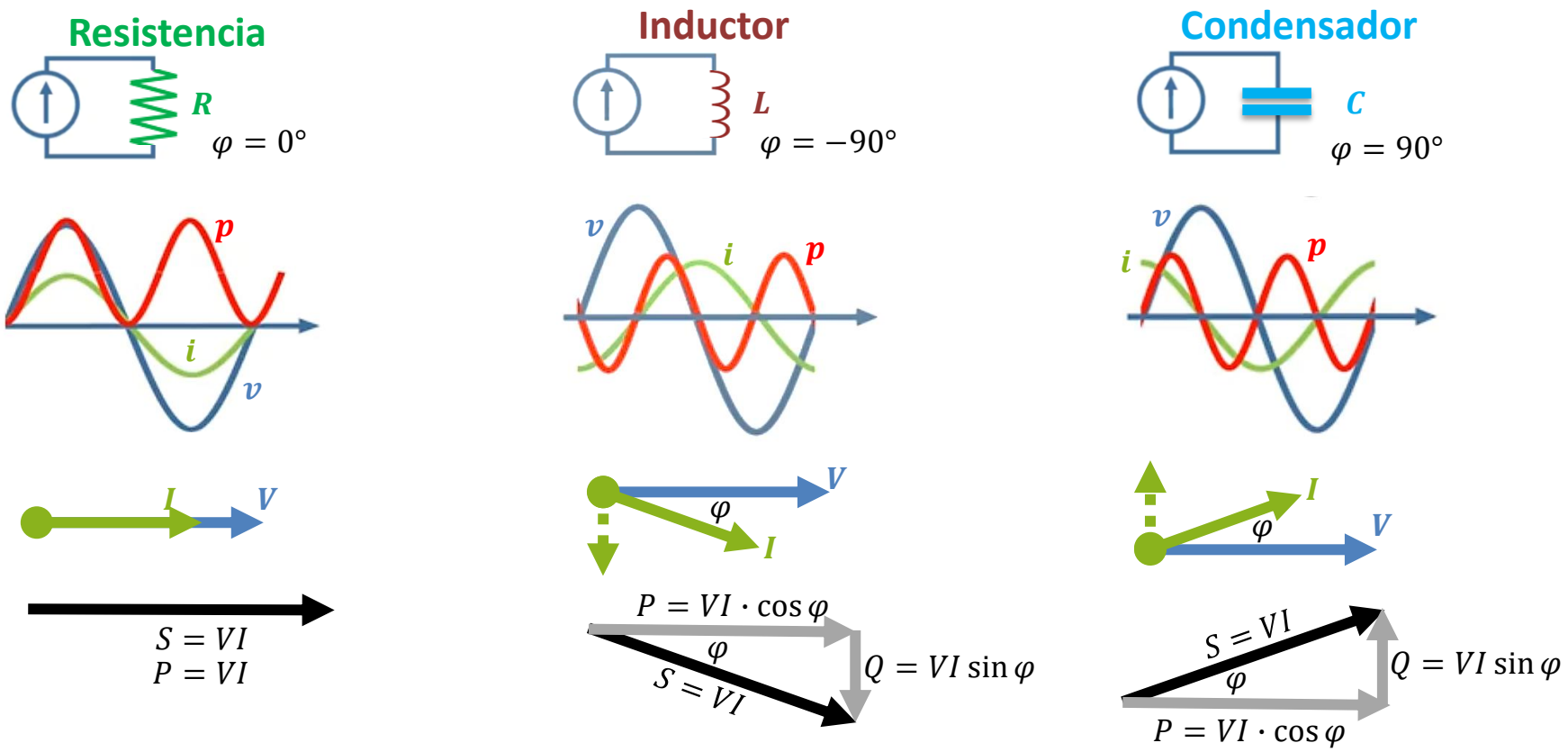
$$\vec{V}_{an} = v_{an} \cdot e^{ja} = v_{an}$$
$$\vec{V}_{bn} = v_{bn} \cdot e^{jb} = v_{bn} \cdot a$$
$$\vec{V}_{cn} = v_{cn} \cdot e^{jg} = v_{cn} \cdot a^2$$

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$$

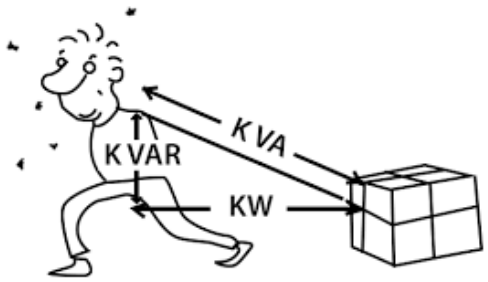




Sistemas AC
Potencia Reactiva



Sistemas AC
Potencia Reactiva



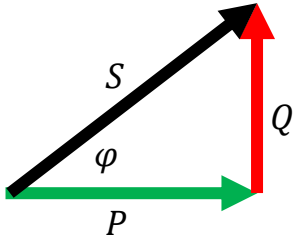
Potencia aparente (VA): $\vec{S} = \vec{V}\vec{I}^{\,*} = P + jQ$
$= VI\angle(\theta_V - \theta_I)$

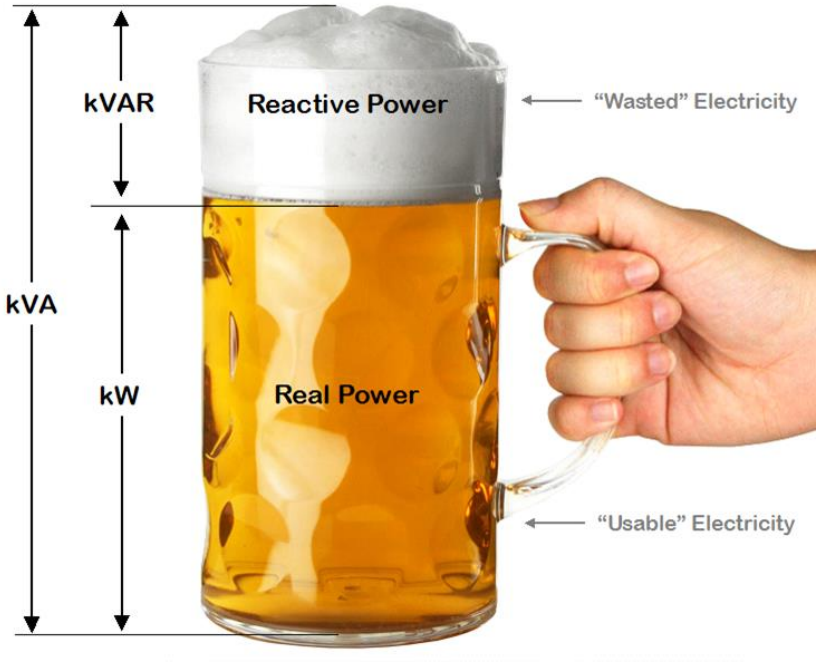
Potencia Activa (W): $P = S \cdot \cos\varphi$

Potencia Reactiva (VAr): $Q = S \cdot \sin\varphi$

Factor de potencia* (fdp): $\text{fdp} = \cos\varphi$

Ejemplo:
P = 500 kW
Q= 510 kVAr (ind)
S = 714 kVA
fdp = 0.7





Máquinas Eléctricas
Características y Ventajas

Generan o funcionan con Energía Eléctrica
Es el tipo de energía más utilizada en el mundo, fácil de transportar y manejar.

Amigables con el medio ambiente
Silenciosas, **extremadamente eficientes**, no consumen oxígeno y no contaminan.

Altas prestaciones
Alta respuesta dinámica, torque a diferentes velocidades, inversión de giro y potencia, amplio rango de operación (velocidad, voltaje, corrientes, temperaturas, altitud, etc.) y pueden operar bajo líquidos.

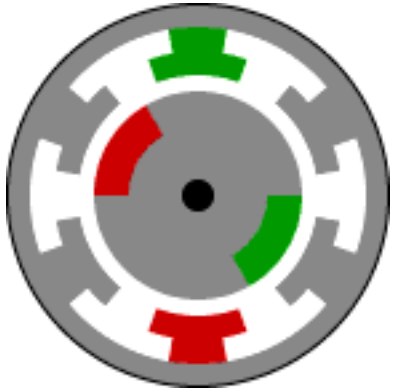
Costo y Duración
En comparación con otras máquinas son muy económicas, simples de construir y controlar, confiables, de bajo mantenimiento y de muy larga duración.

Amplia gama de topologías
Maquinas lineales, rotatorias, pequeñas, grandes, livianas, pesadas, etc.

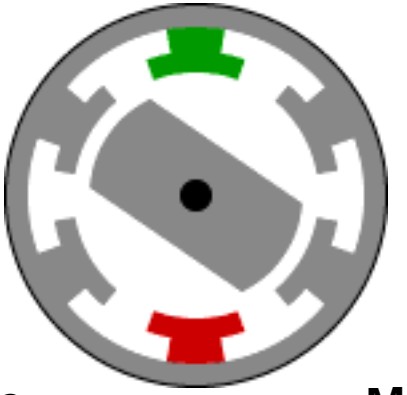
Máquinas Electromecánicas

Principales tipos de Máquinas Eléctricas

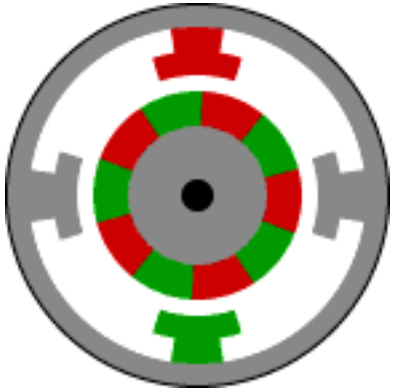
Máquina Síncrona



Máquina de Reluctancia (Síncrona)



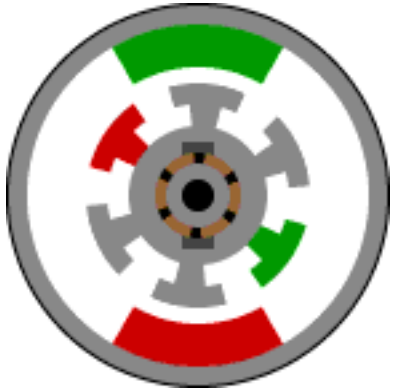
Máquina Paso-paso (Síncrona)



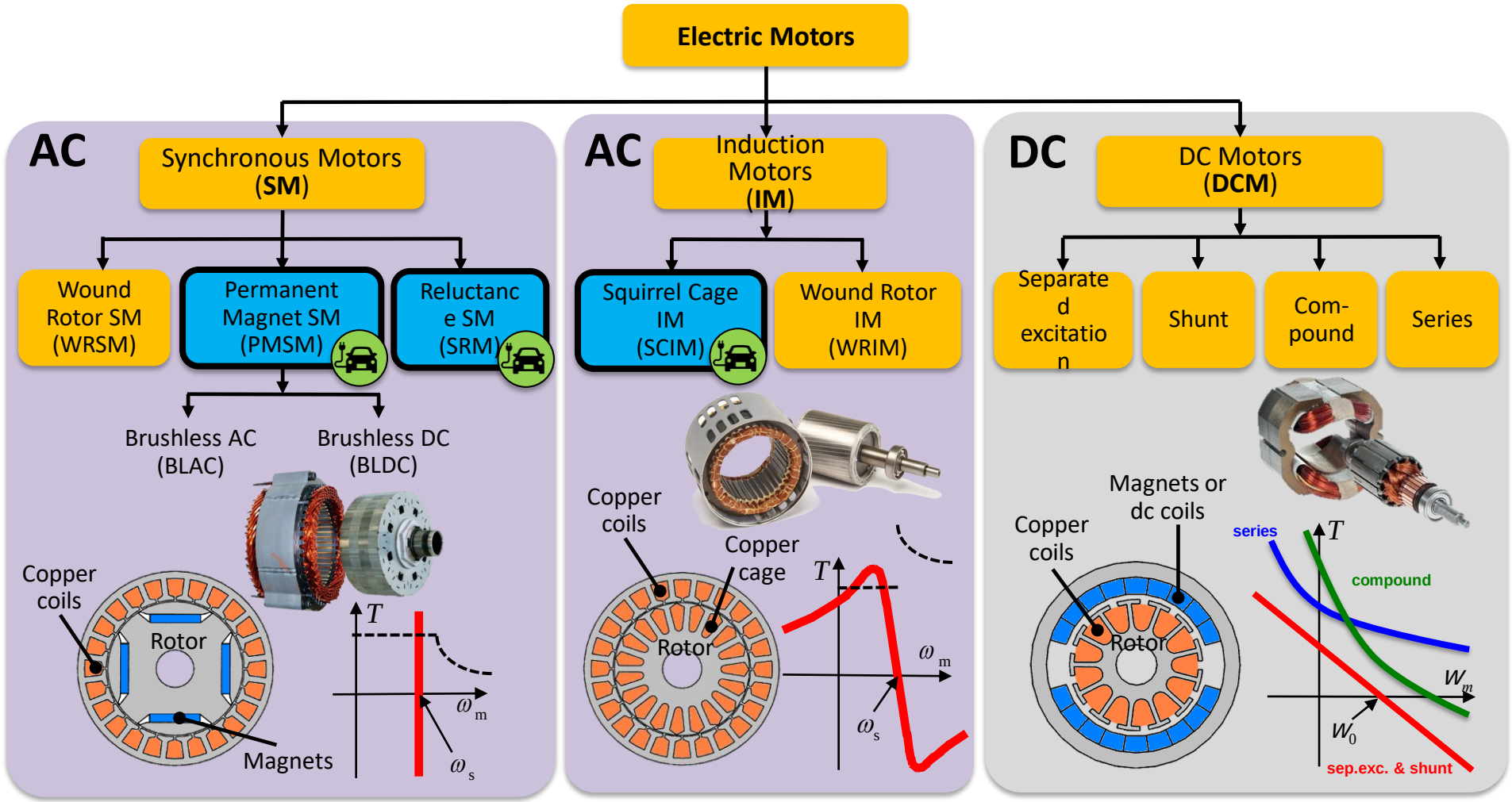
Máquina de Inducción



Máquina DC (corriente continua)

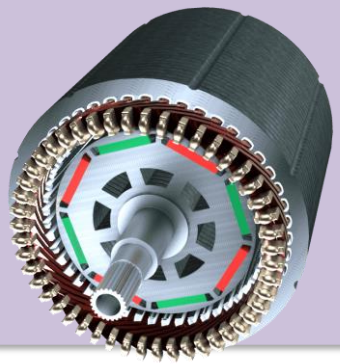


Electric Motor
Classification

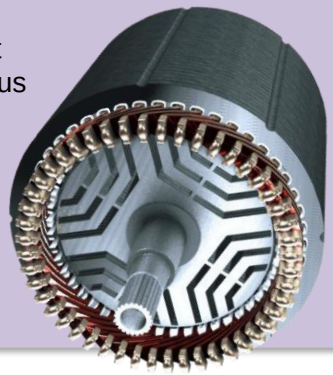


Máquinas Eléctricas más utilizadas en tracción

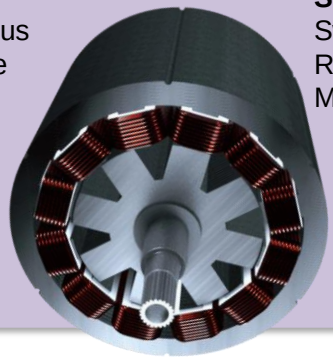
Synchronous Machine (SM)



PMSM
Permanent Synchronous Machine



SynRM
Synchronous Reluctance Machine

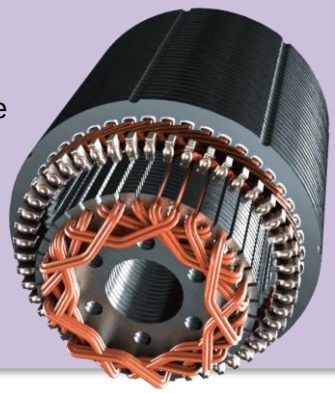


SRM
Switched Reluctance Machine

Induction Machine (IM)



SCIM
Squirrel Cage Induction Machine



WRIM
Wound Rotor Induction Machine

Máquinas Electromecánicas
Características y Ventajas

Motor Térmico		Motor Eléctrico
		
Alto	**Peso y Volumen**	Bajo
Nulo a la partida	**Torque**	Constante*
1000-6000rpm	**Rango de velocidad**	0-12000rpm
20-25% (30-35% HDI)	**Eficiencia**	80-97%
Altas	**Emisiones**	Cero
Alto	**Mantenimiento**	Muy bajo-Nulo
Compleja	**Construcción**	Simple
Medio (masivo)	**Costo**	Bajo-Medio (específico)
Necesaria	**Refrigeración**	Opcional

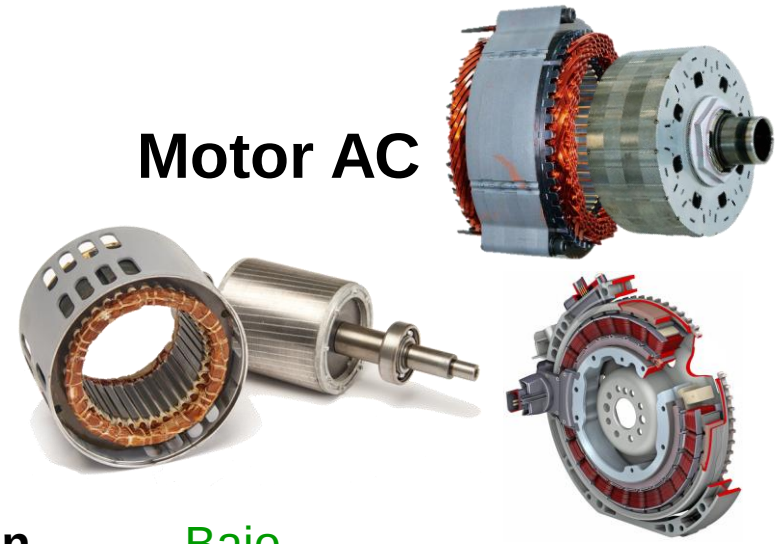
Máquinas Electromecánicas: DC vs AC

Características y Ventajas

Motor DC



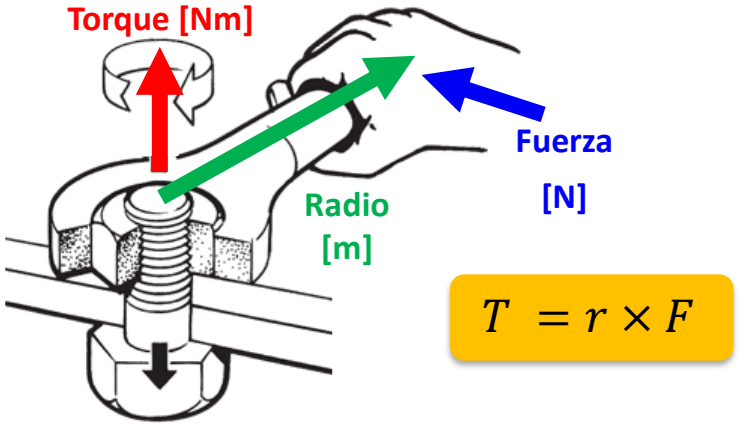
Motor AC



Motor DC		Motor AC
Alto	**Peso y Volumen**	Bajo
No (genera chispas)	**Ambientes explosivos**	Limitado
Limitados por colector	**Velocidad y Voltaje**	Altos
70-80%	**Eficiencia**	90-97%
Menos a 1000m	**Altura de operación**	Muy altas
Alto	**Mantenimiento**	Muy bajo-Nulo
Compleja	**Construcción**	Simple
Alto	**Costo**	Bajo
Simple	**Control**	Complejo

Máquinas Eléctricas

Curva de Torque y Potencia



Torque o par motor (Nm): $T = r \times F$

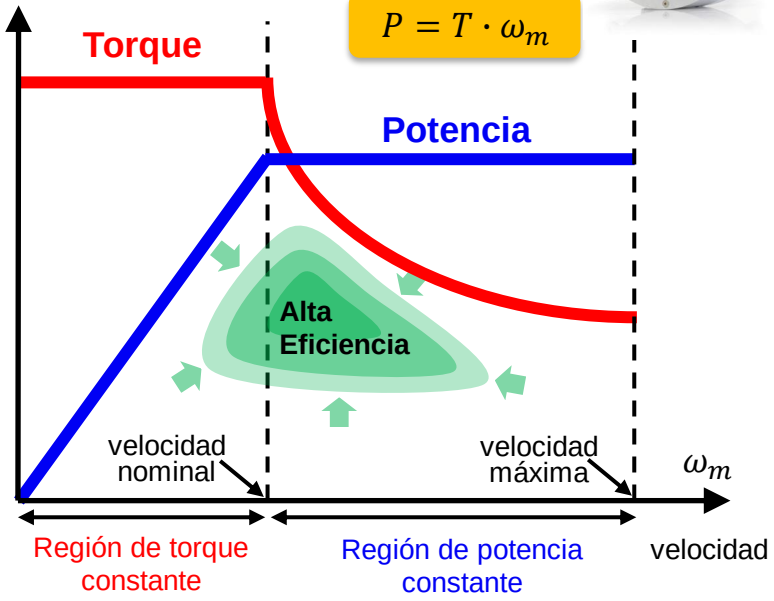
Fuerza aplicada sobre el eje de transmisión

Relación Torque-Potencia: $P = T \cdot \omega_m$

Motor eléctrico (EV)

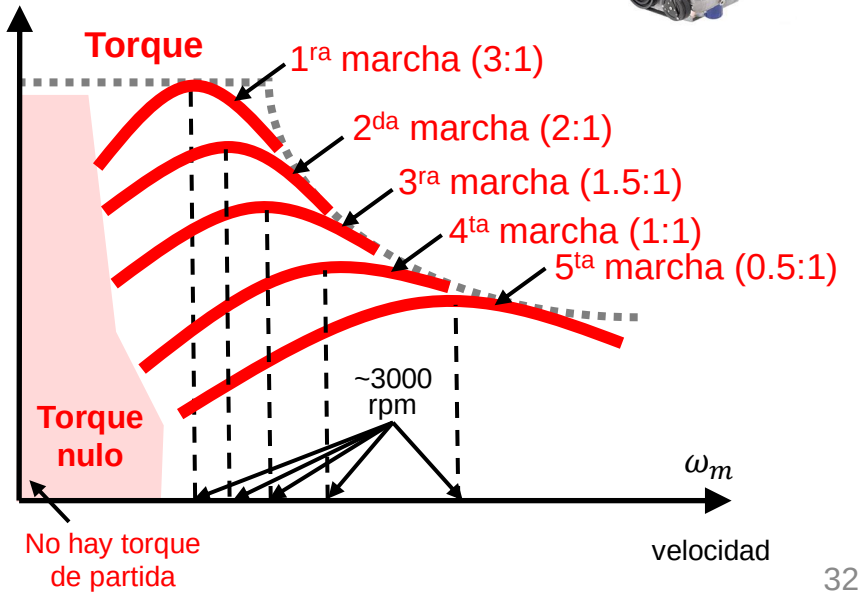


$P = T \cdot \omega_m$



Motor a combustión (ICE)





Torque-Potencia
Vehículo

Engranajes:

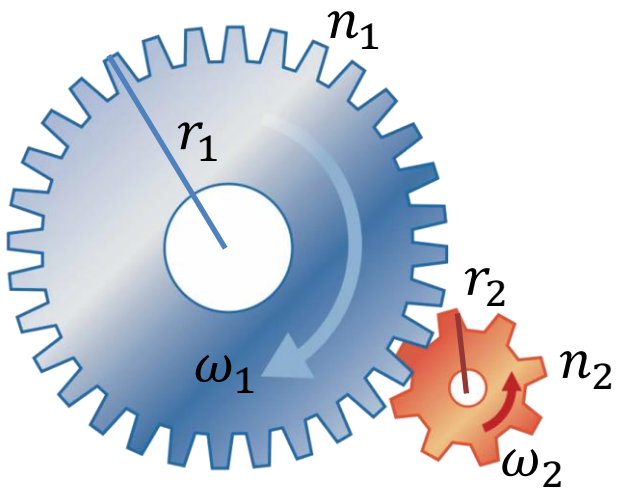
ω_i Velocidad angular del engranaje i

n_i Velocidad en rpm del engranaje i

r_i Radio del engranaje i

T_i Torque del engranaje i

$$\text{Gear Ratio} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{T_2}{T_1}$$



Potencia

La potencia se mantiene si no se consideran las pérdidas:

$$T_1 \cdot \omega_1 = T_2 \cdot \omega_2$$
$$P_1 = P_2$$

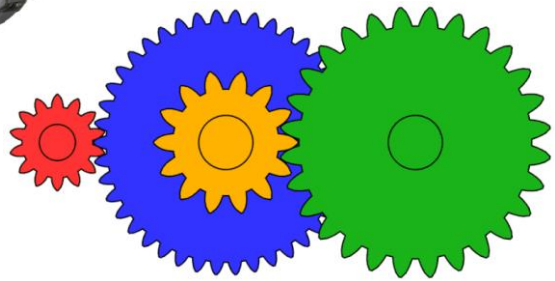
$$\text{Gear Ratio} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{8}{32} = \frac{1}{4}$$

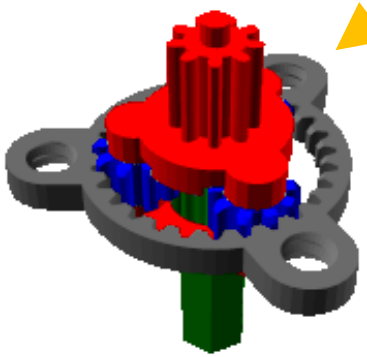
Transmisión

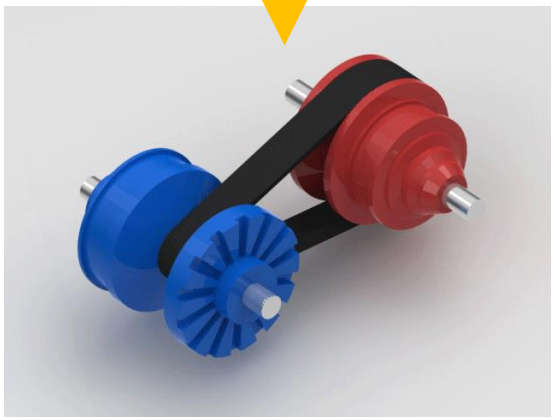
Opciones

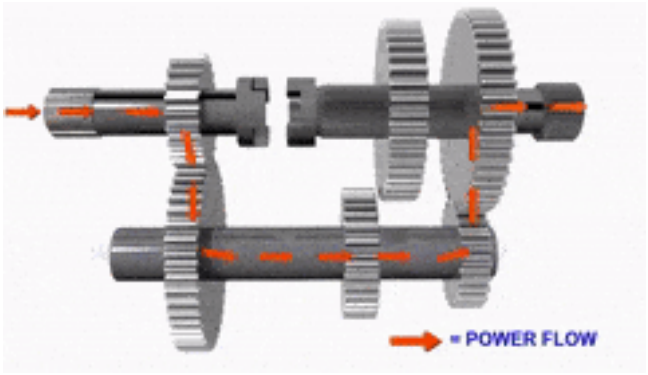
1. Transmisión directa (e.g. motor rueda)
2. Caja de transmisión fija (fixbox o gear: engranaje)
3. Caja de transmisión variable (gearbox)
4. Caja de Transmisión Variable (CVT)
5. Caja planetaria (epicicloidal)







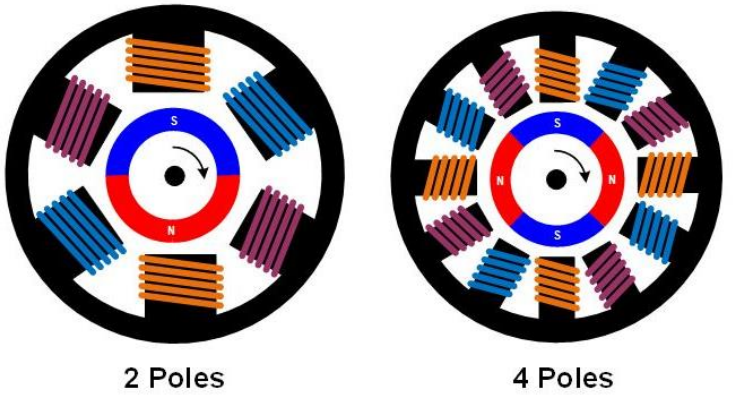




Torque-Potencia

N° de polos del motor

[Ejemplo] frecuencia eléctrica idéntica:
$f = 50Hz$ ➔ 3.000 rpm



Número de polos:

f Frecuencia eléctrica ($\omega = 2\pi f$)

ω_m Velocidad mecánica ($\text{rpm} = 60 \cdot f_m$)

pp Pares de polos

T Torque

P Potencia

$$\omega_m = \frac{\omega}{pp}$$

Pares de polos	$pp = \mathbf{1}$	$pp = \mathbf{2}$
Velocidad mecánica (rpm)	3.000	1.500
Suponiendo igual potencia	P	P
Torque ($P = T \cdot \omega_m$)	T_1	$T_2 = 2 \cdot T_1$

Máquinas Eléctricas

Aplicaciones





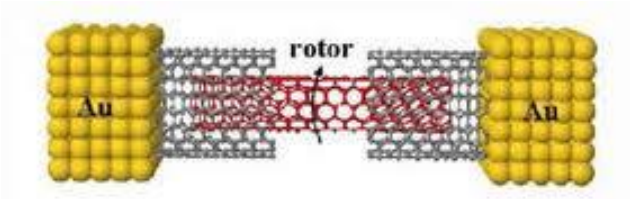










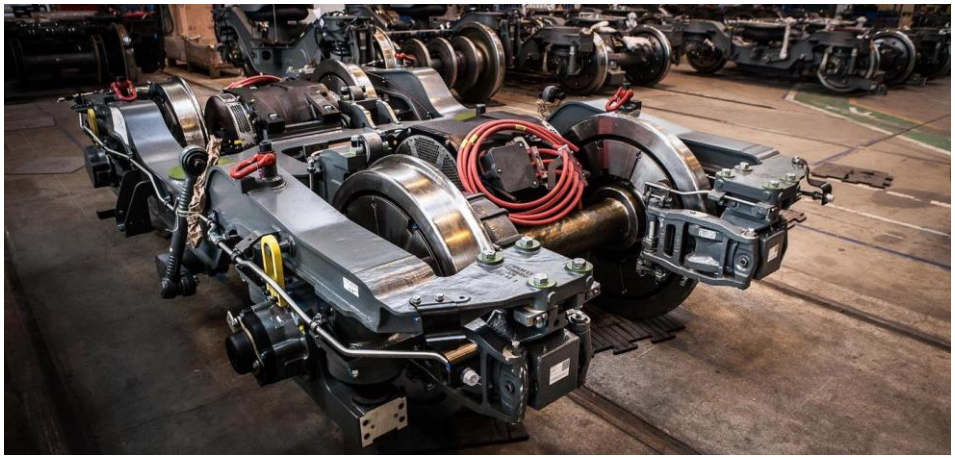




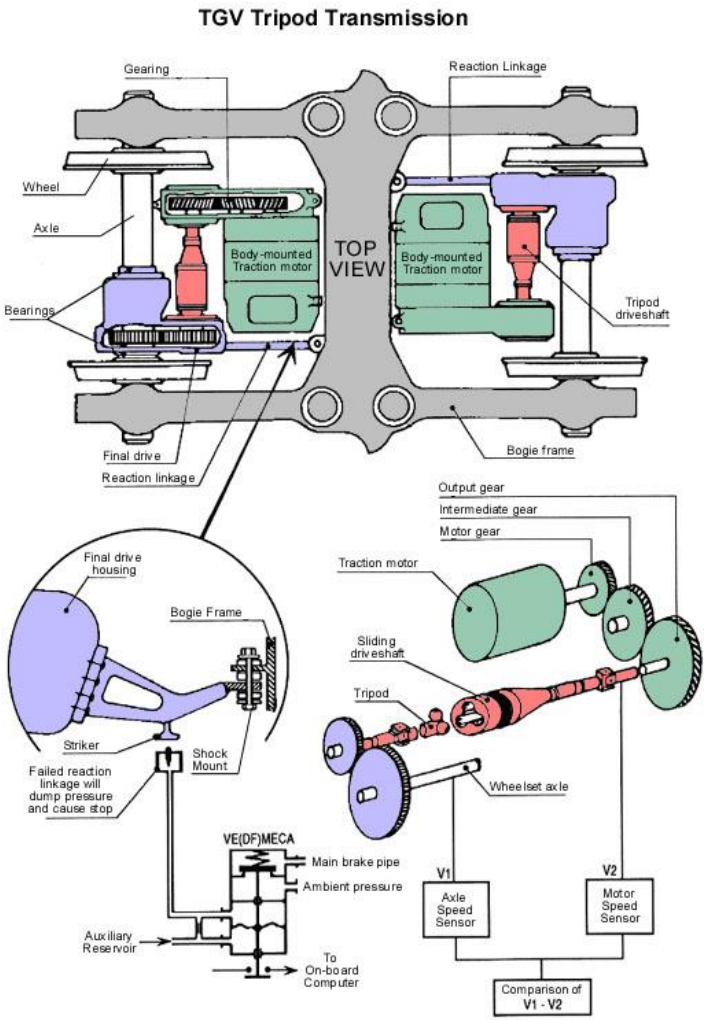




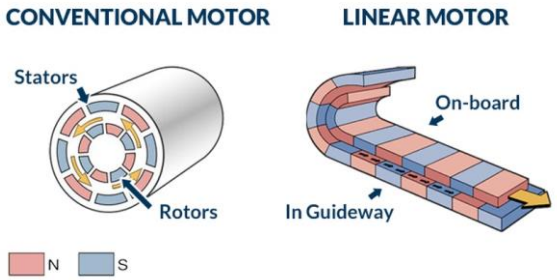

Electromovilidad ferroviaria

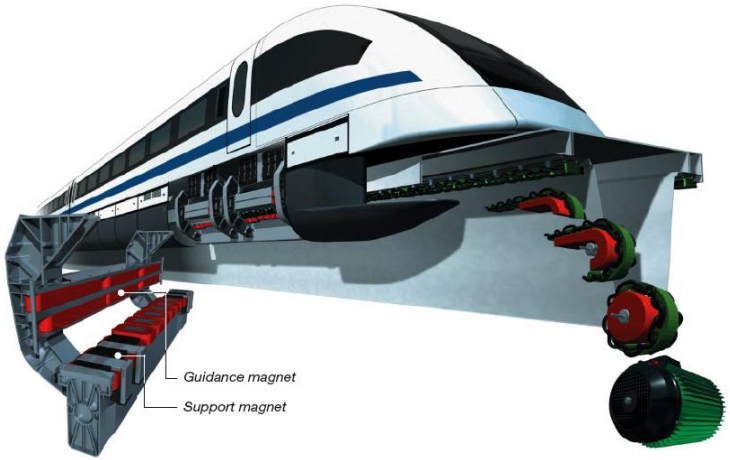


TGV bogie



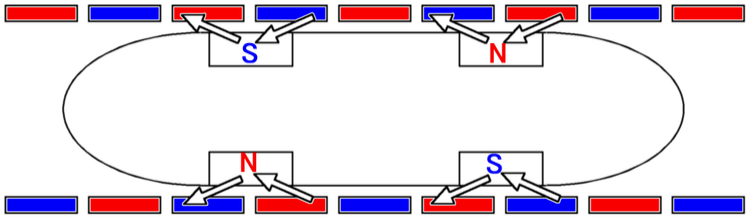
Electromovilidad
Maglev

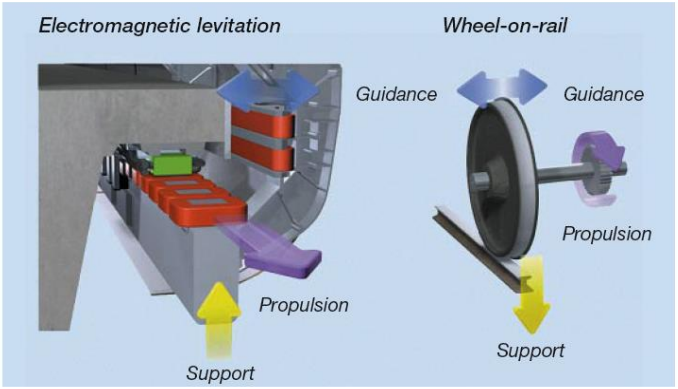


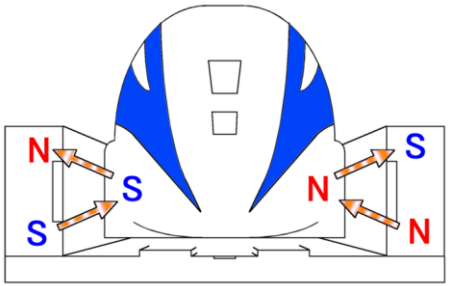


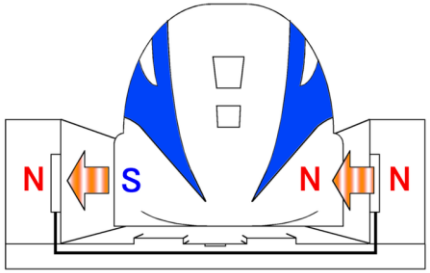












Máquinas Eléctricas

Aplicaciones



Configuraciones

ICE (Internal Combustion Engine)

Hybrid Electric Vehicle (HEV)

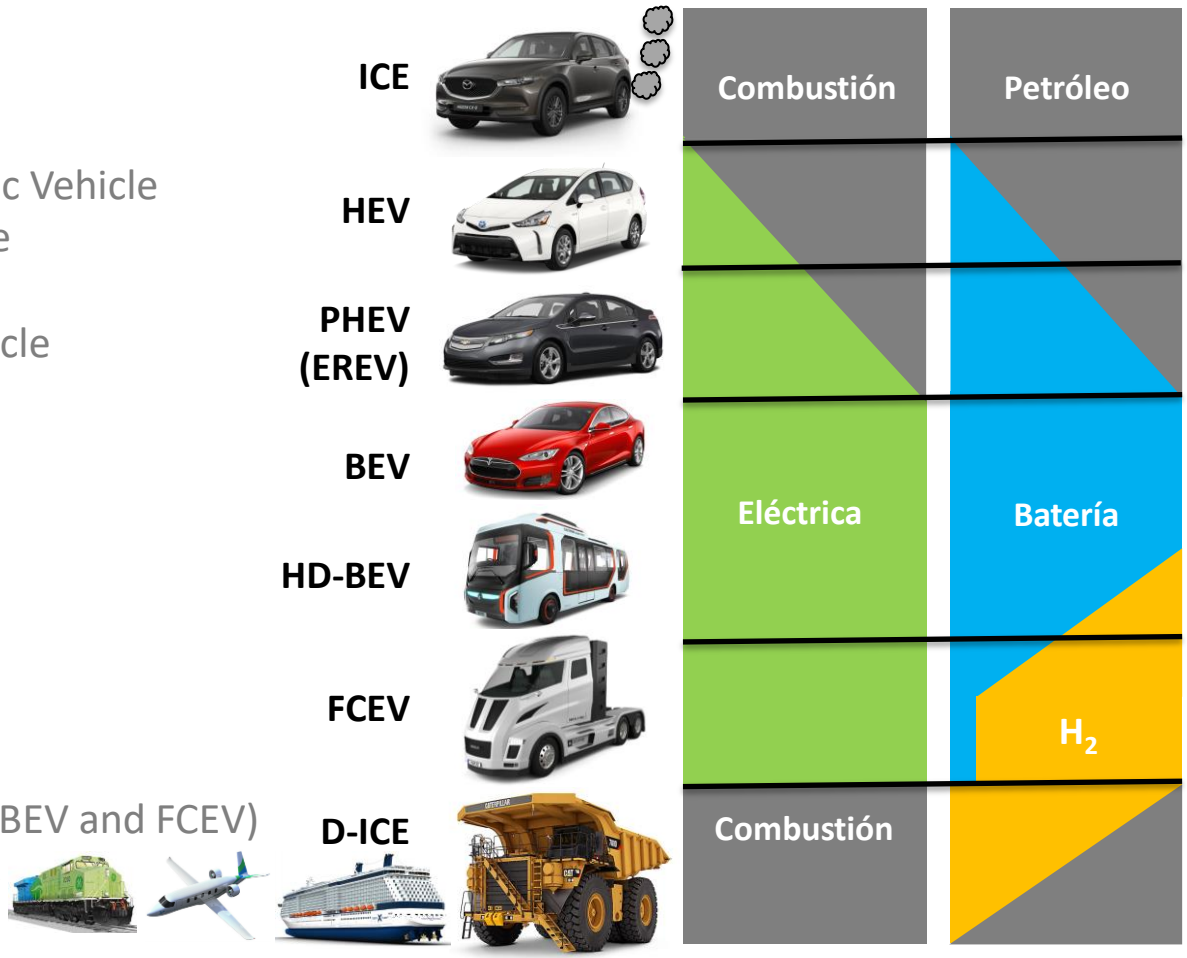
- PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle
- BEV: Battery Electric Vehicle
- HD-BEV: Heavy-duty BEV
- FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle

HEV configurations:

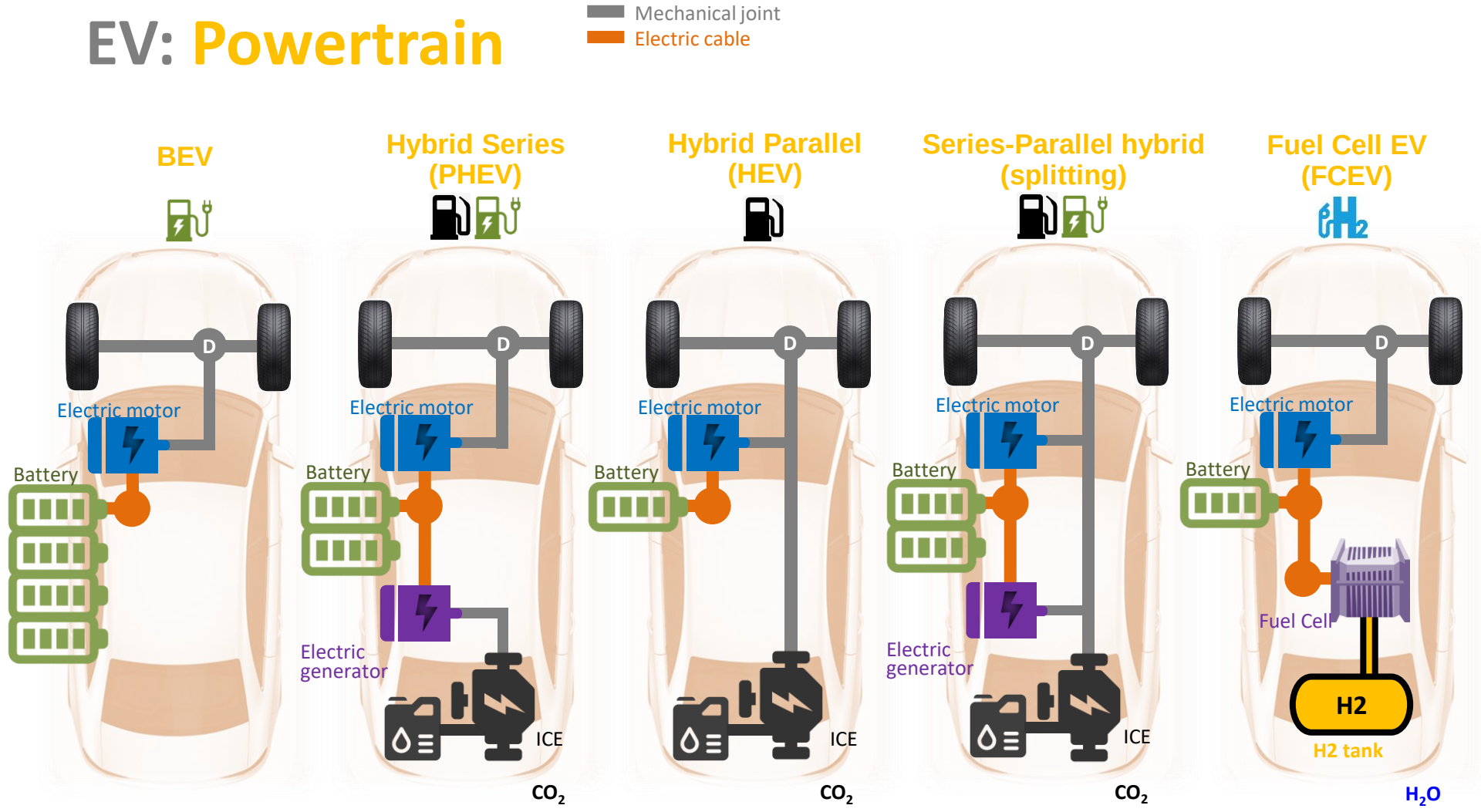
- Series
- Parallel
- Series-Parallel (split)
- Extended Range (EREV)

Other names used in regulation:

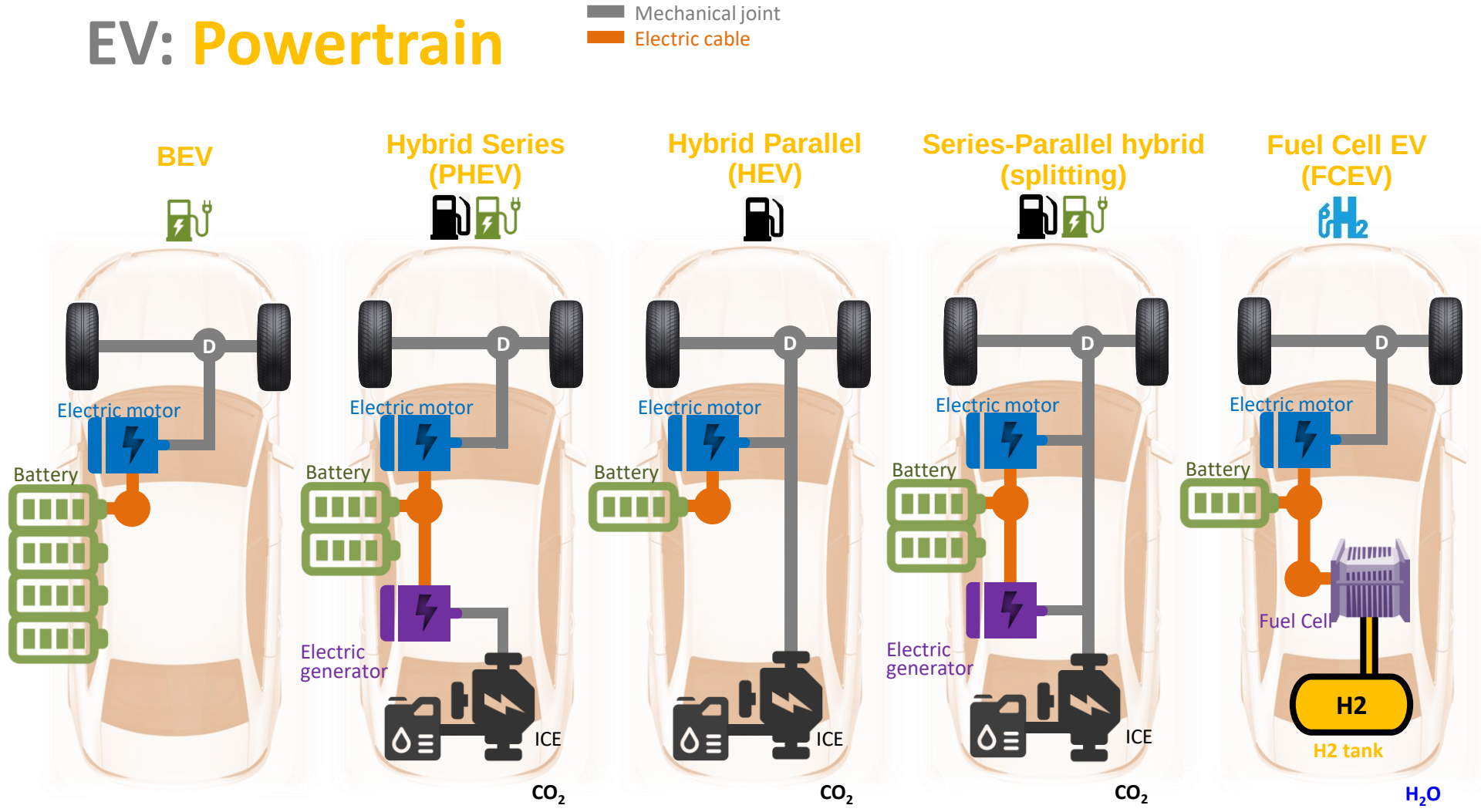
- NEV: New Energy Vehicles (BEV and FCEV)
- ZEV: Zero Emission Vehicles
- Full Hybrid vs Mild Hybrid
- D-ICE: Dual Combustion Engine (diesel-H2)



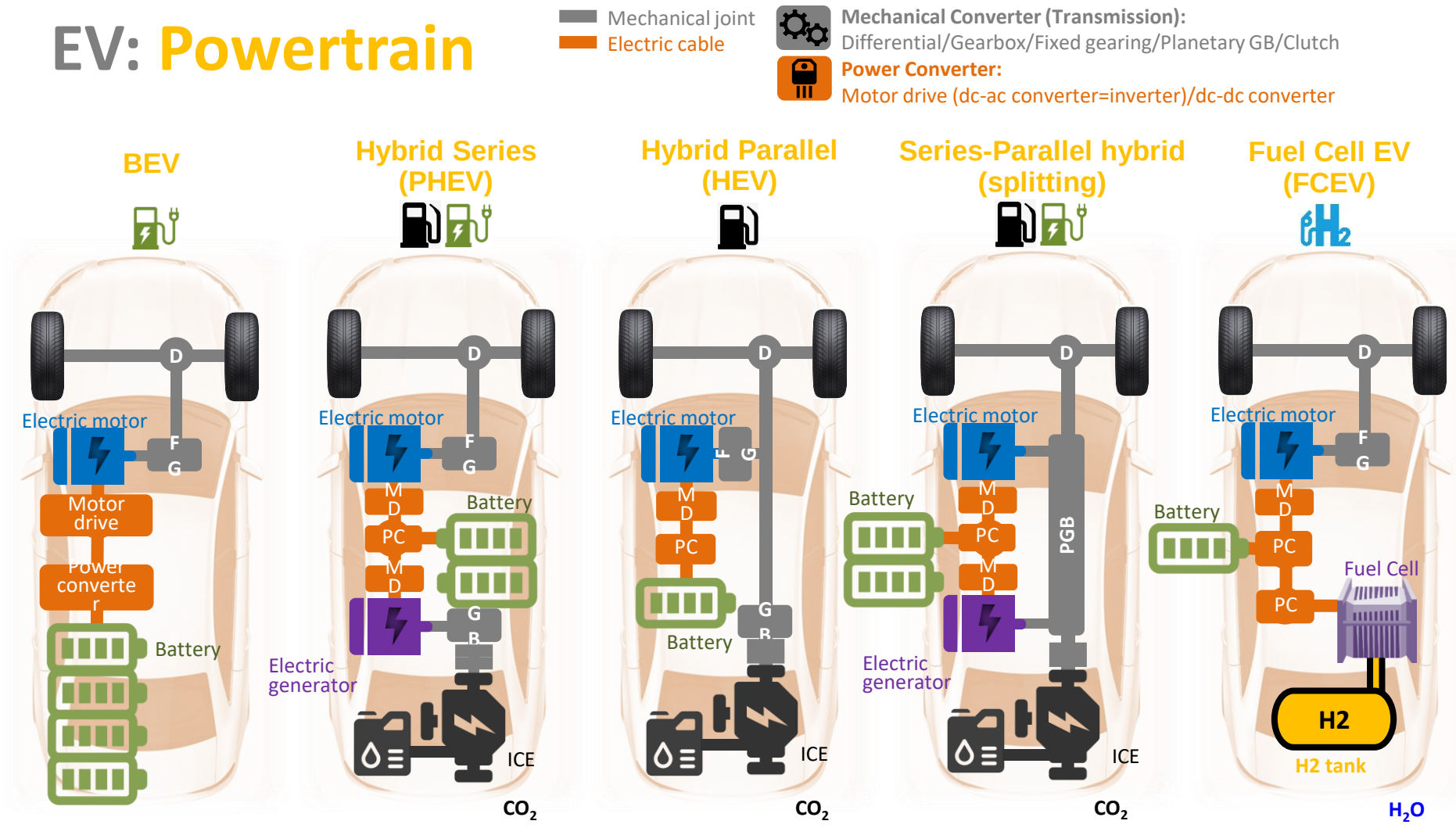
EV: Powertrain



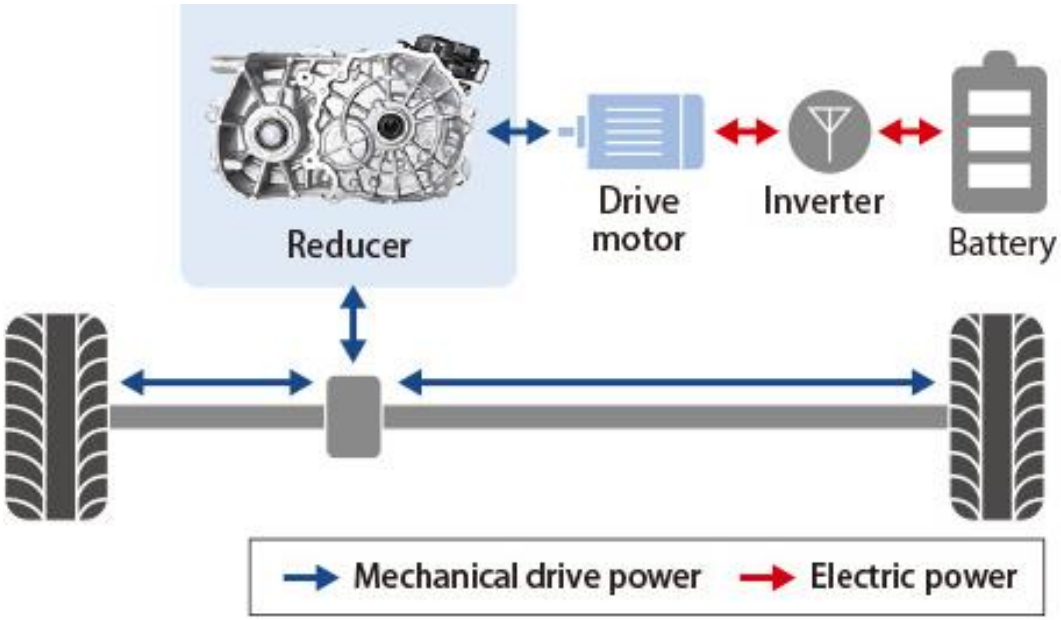
EV: Powertrain



EV: Powertrain

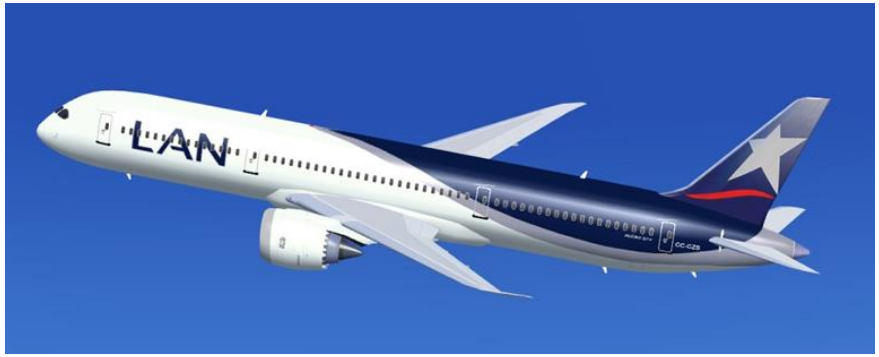


Tren de Potencia EV

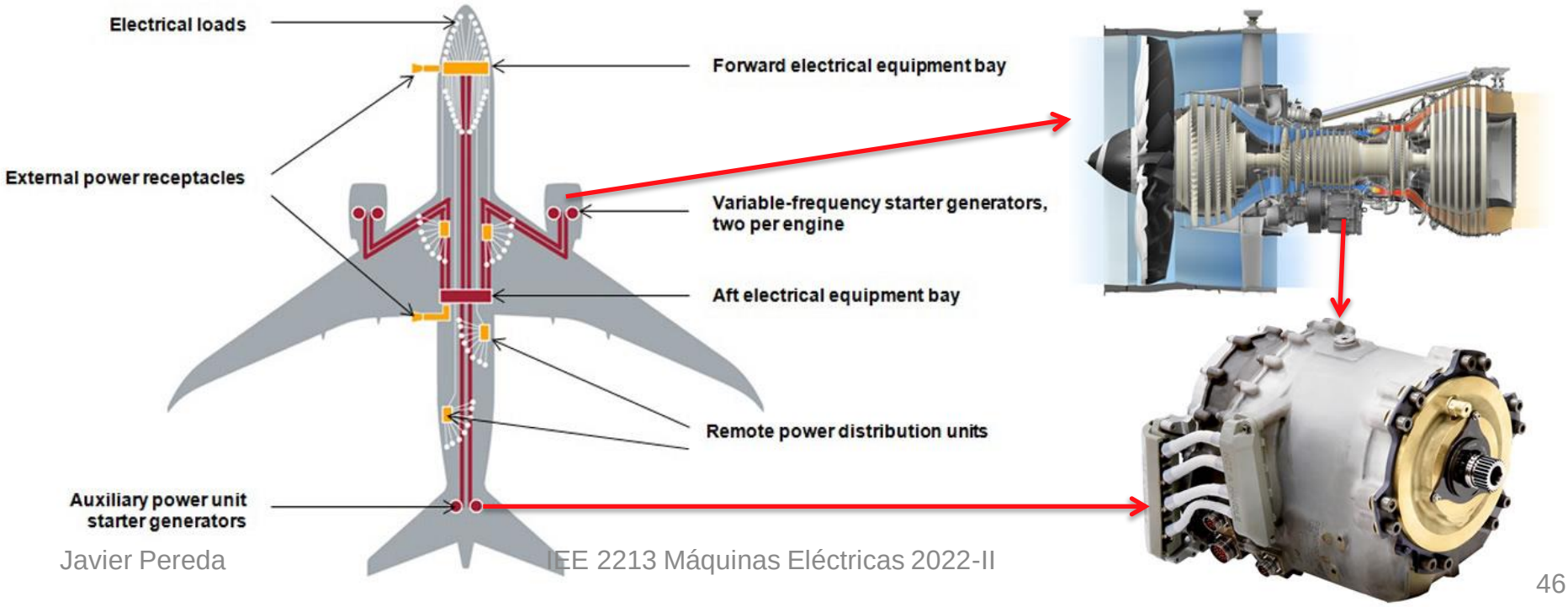




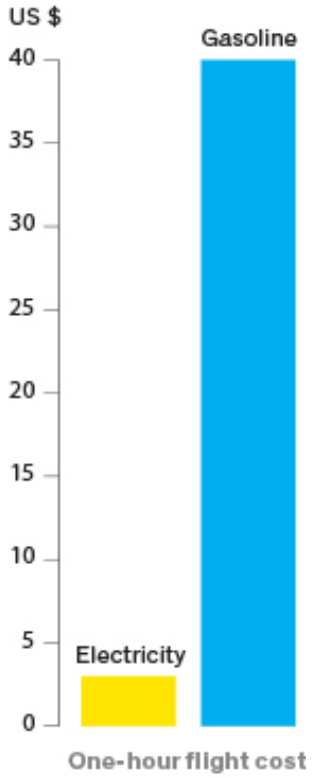
Ejemplo aplicación: Turbinas Generadoras *Variable-frequency Starter & Generator*



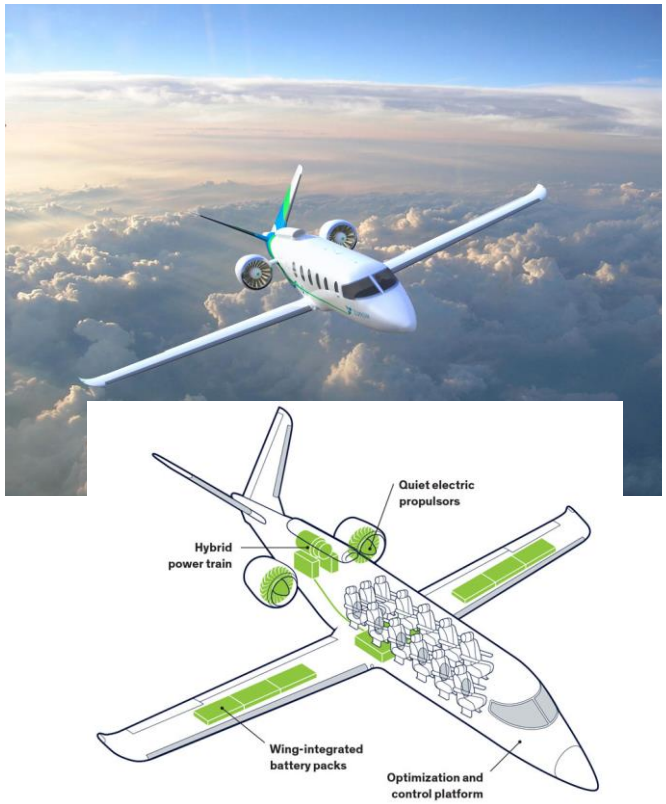
Boeing 787



Electromovilidad aérea







Electromovilidad aérea

Eviation Alice (805 km/hr)
1.646 km (900 kWh Li-ion)
3 motores, 9 pasajeros
10x más barato





EL MERCURIO
THE WALL STREET JOURNAL.

MARTES 13 DE AGOSTO DE 2019

wsj.com

Reconversión de aeronaves ya existentes podría ayudar a la incipiente aviación eléctrica:

Los aviones eléctricos empiezan a despegar antes de lo previsto

Uber Technologies Inc. planea lanzar un servicio de transporte utilizando un vehículo de despegue vertical en 2023.

MIKE CHERNEY

Un avión para cinco pasajeros alzó el vuelo cerca de Los Angeles hace poco con una modificación importante: un motor eléctrico.

El avión de casi 50 años, el que fue readaptado por el emprendimiento Ampaire con sede en California, todavía utilizaba un motor de combustión normal para hacer girar una hélice en la nariz en el vuelo de prueba. Pero los ingenieros reemplazaron un segundo motor por uno eléctrico, el que activó una hélice en la cola del aparato.

"En cierto modo es como un auto híbrido que se carga", indicó Kevin Noertker, uno de los fundadores y jefe ejecutivo de Ampaire, el que utilizó algunas piezas diseñadas en un principio para automóviles con el fin de modificar el avión. "En realidad nos estamos aprovechando del éxito de los vehículos eléctricos terrestres aquí".

Los gigantes aeroespaciales y los emprendimientos están desa-



Los gigantes aeroespaciales y los emprendimientos están desarrollando un avión eléctrico que pueda navegar en forma autónoma y despegar y aterrizar verticalmente. En la imagen, un diseño de Uber Technologies.

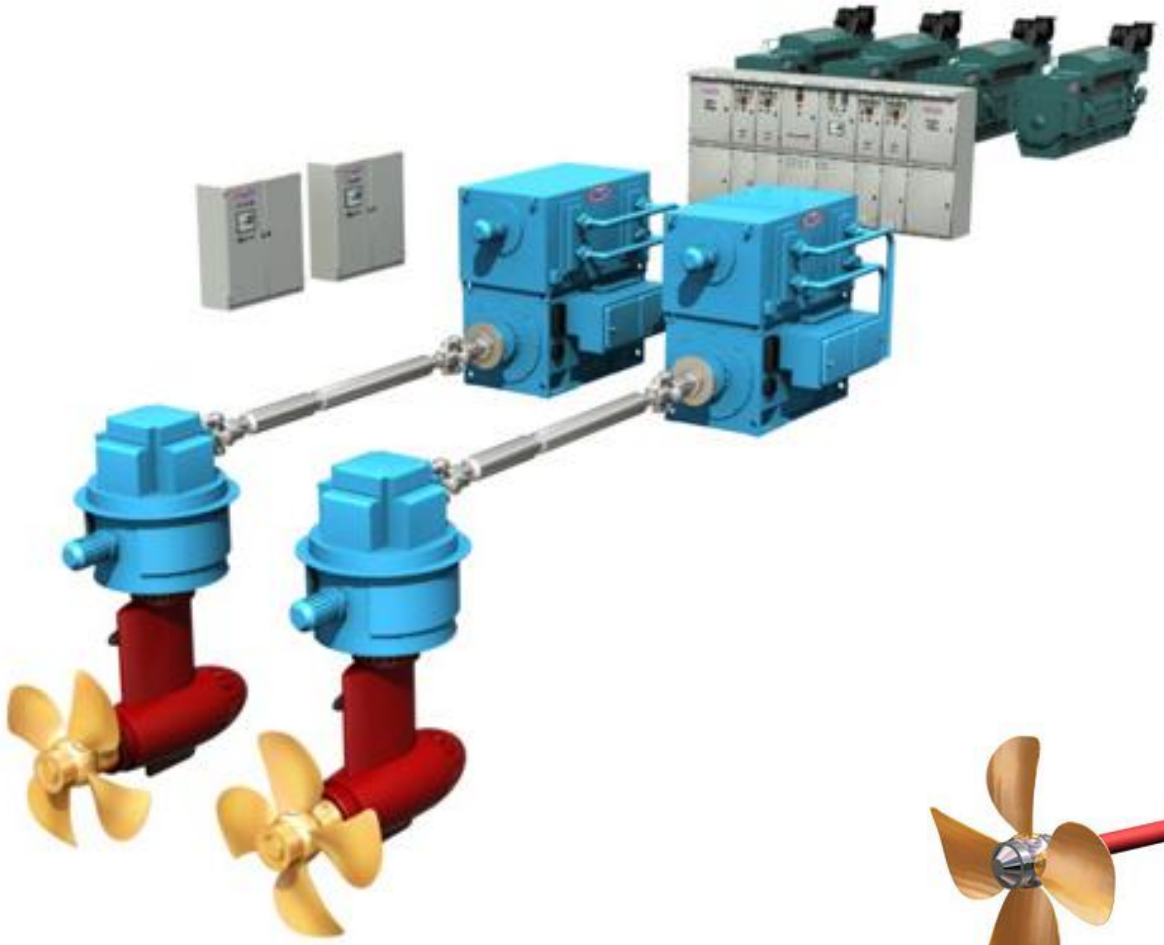
Electric, otro emprendimiento que cuenta con el apoyo de capital de riesgo en California, quiere readaptar un avión de nueve pasajeros con un motor híbrido que el jefe ejecutivo Jeff Engler aseguró que sería apropiado para vuelos de paracaidismo. El ejecutivo estima que habrá un ahorro de combustible de hasta el 20%.

Los grandes fabricantes también están estudiando las reconversiones. Airbus SE anunció que reemplazaría uno de los cuatro turboventiladores en un avión de pasajeros de corta distancia por un motor eléctrico, y planea hacer vuelos de prueba con este en 2021. El objetivo es probar la nueva tecnología, y Airbus no planea producir comercialmente ese modelo en particular.

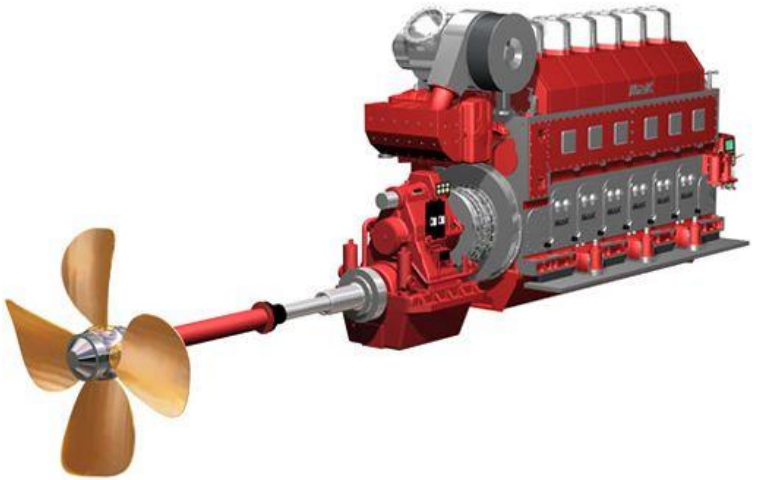
Readecuación de flotas

No obstante, algunas aerolíneas pequeñas ya están readaptando sus flotas. En Vancouver, Harbour Air Seaplanes sacó uno de sus aviones del depósito para instalarle un motor eléctrico de 750 caballos de fuerza que fue desarrollado por magniX, compañía que trasladó su sede desde Aus-

Ejemplo aplicación: Vehículos Eléctricos *Low Speed Variable-frequency Drives*



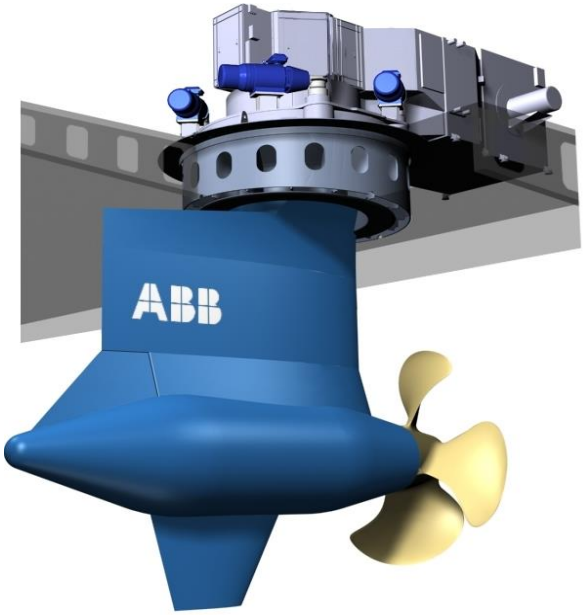




Ejemplo aplicación: Vehículos Eléctricos

Low Speed Variable-frequency Drives





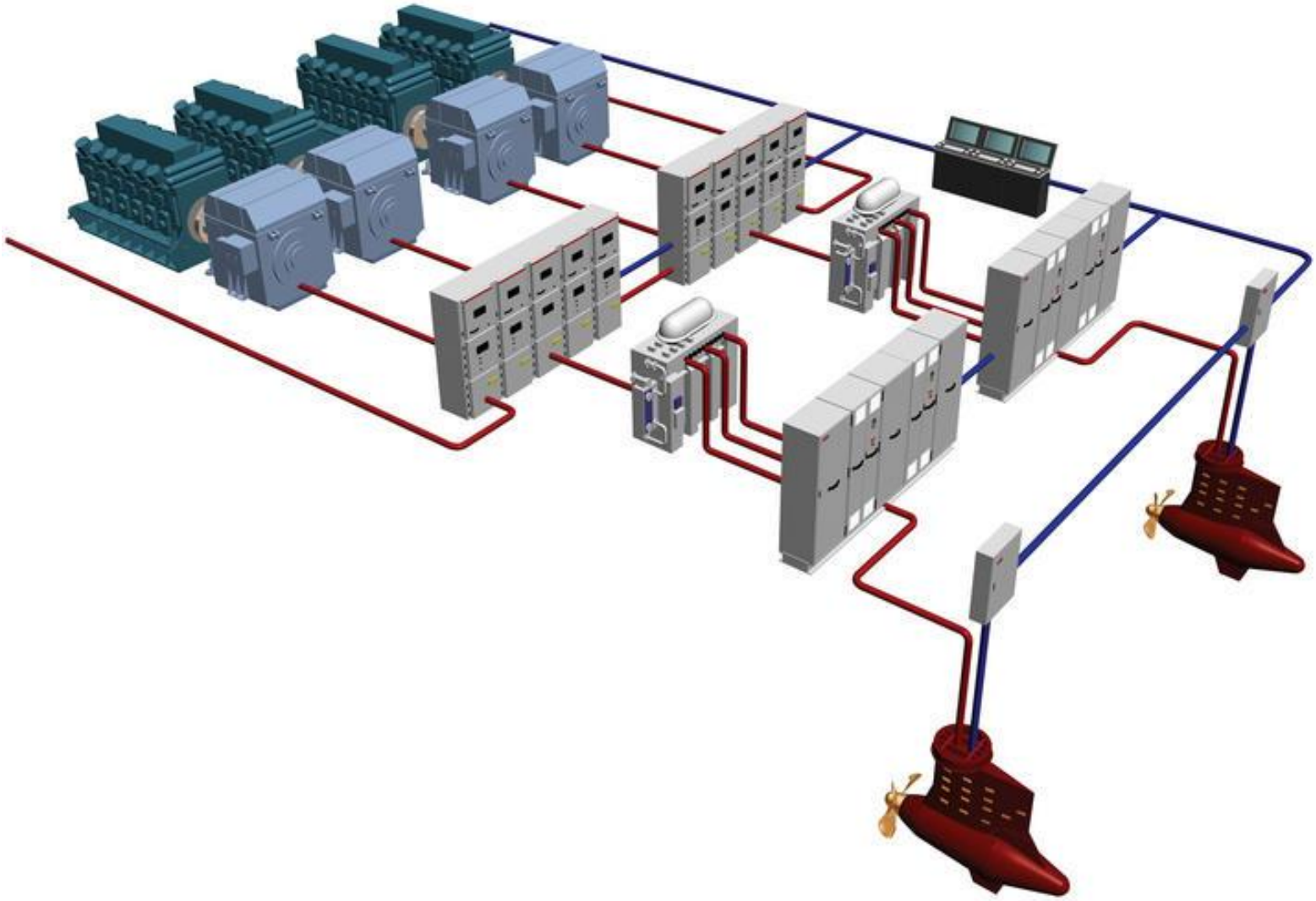






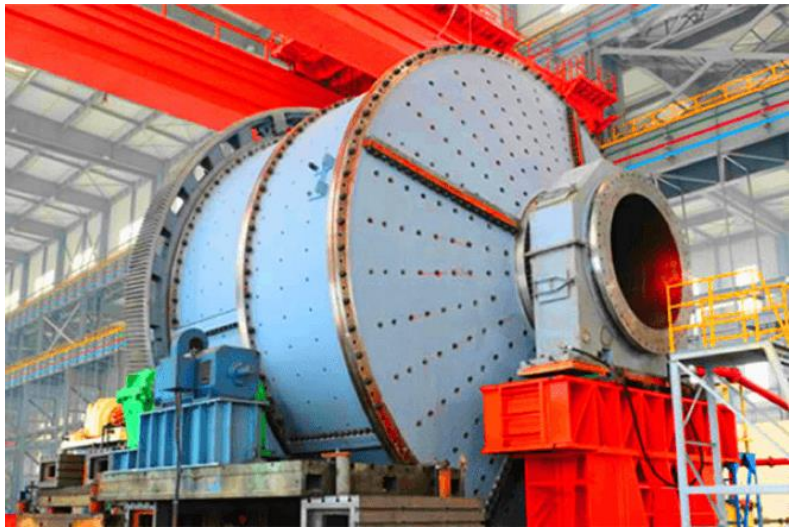
Máquinas Eléctricas

Aplicaciones

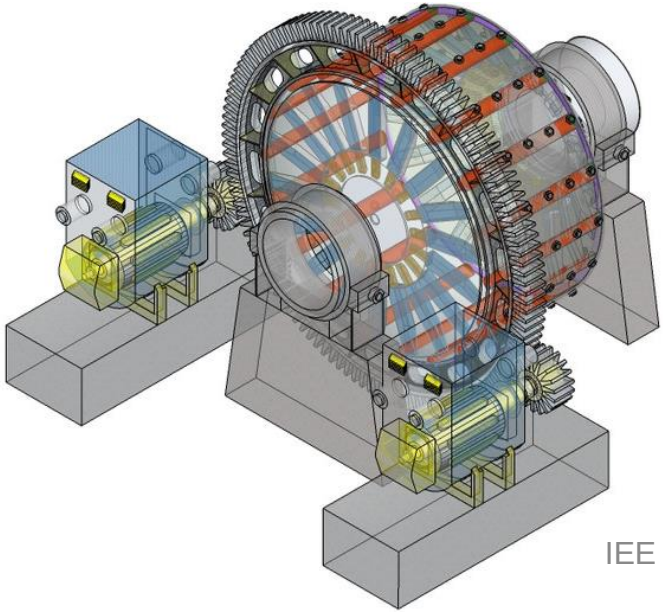


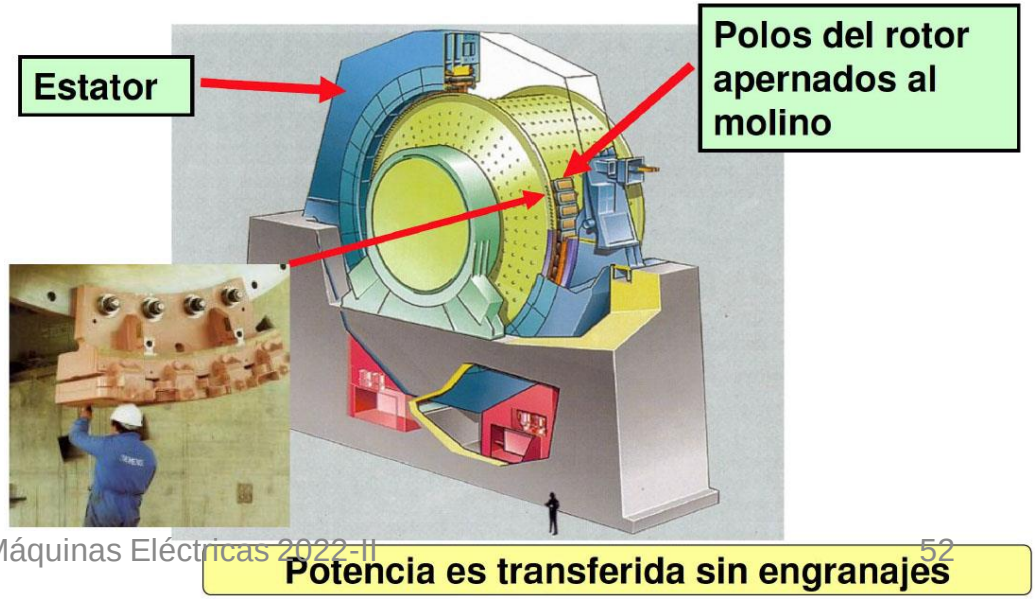
Máquinas Eléctricas

Aplicaciones









Máquinas Eléctricas

Aplicaciones











Komatsu 930E

2701 HP (2 MW) 2.6kV
64 kph / Frenado resistivo (radial grid)
502 Ton. (320 Ton. capacidad)
PMSG y 2 motores de inducción

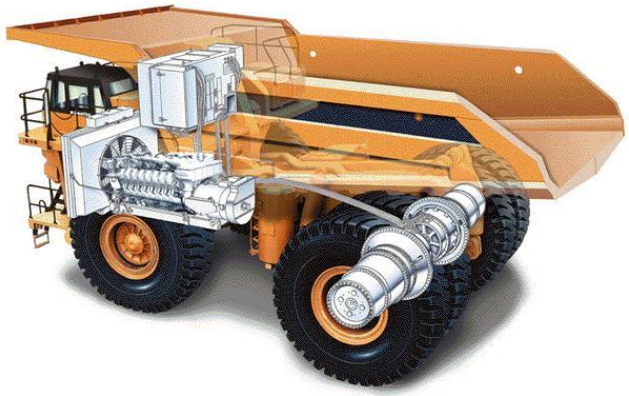


CAT 795F AC

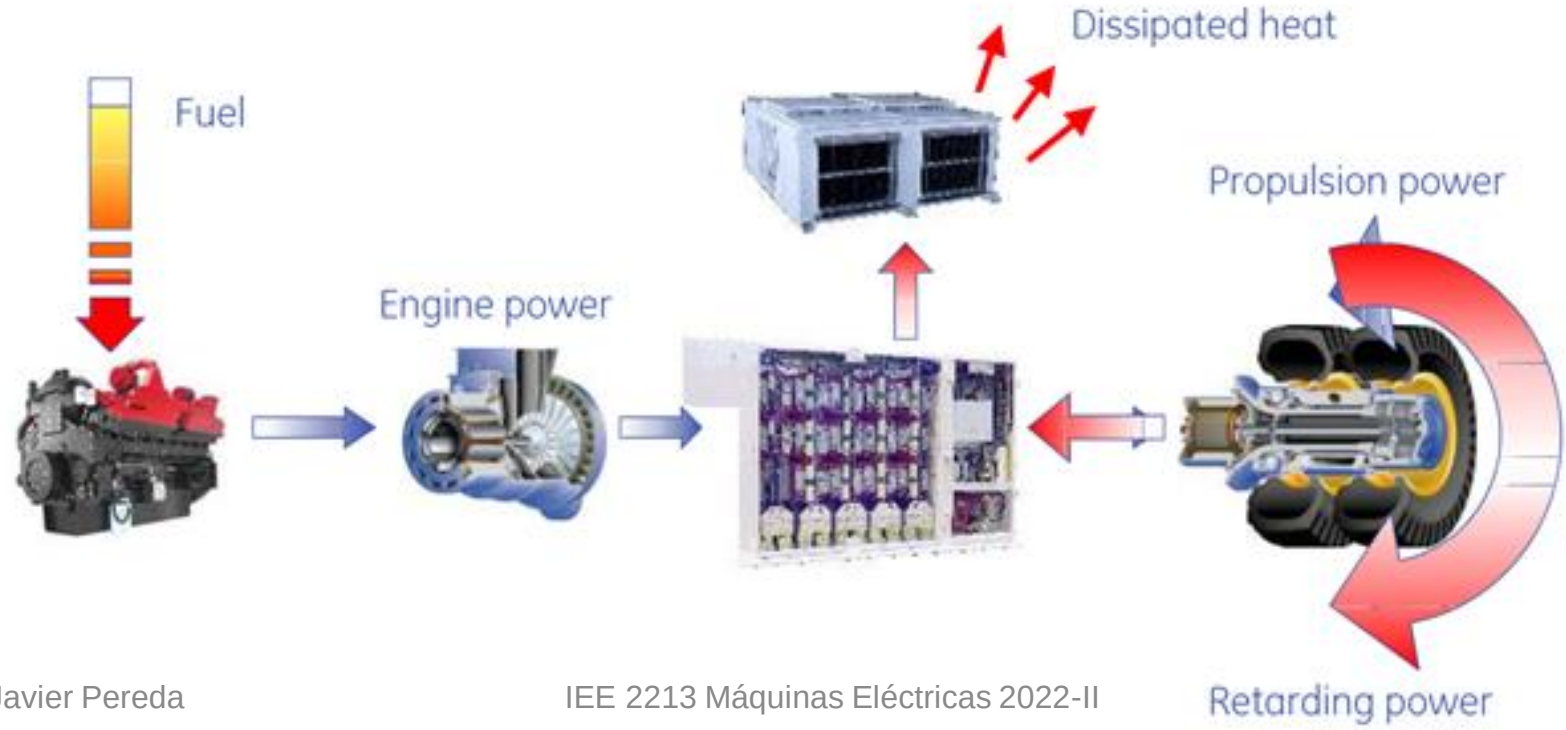
3400 HP (2.5 MW)
64 kph / Frenado resistivo
570 Ton. (345 Ton. capacidad)
WRSG y 2 motores de inducción



Minería



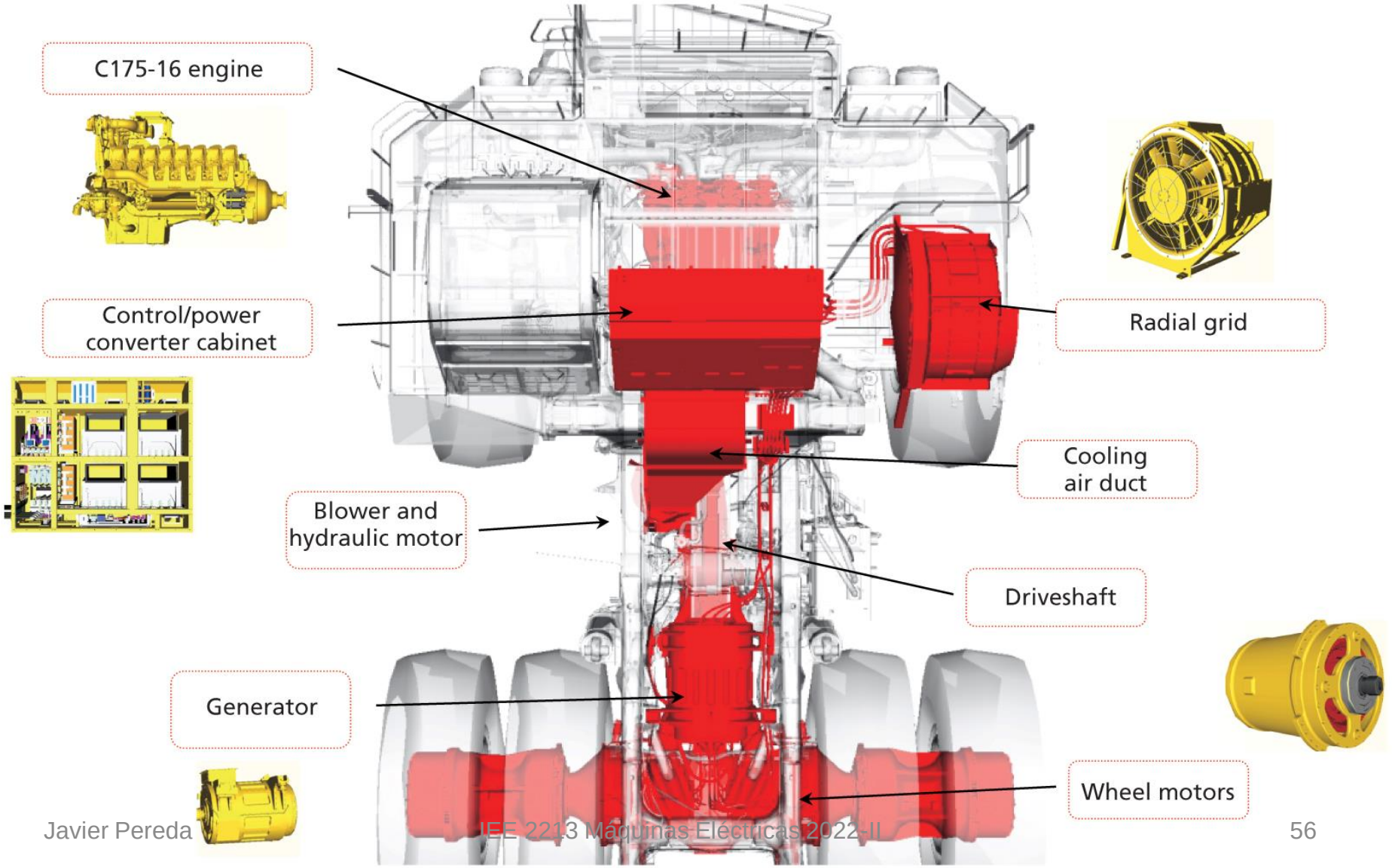

474


Dissipated heat
Fuel
Propulsion power
Engine power
Retarding power

Máquinas Eléctricas

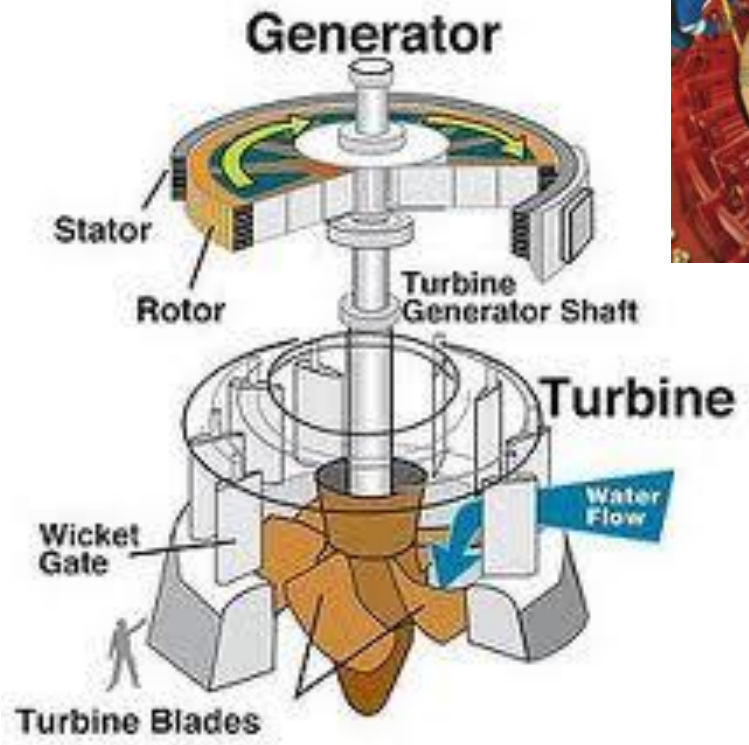
Aplicaciones

3400 HP / 2536kW / 2.6kV
64 kph / Frenado resistivo (radial grid)
570 Ton. (345 Ton. capacidad)
PMSG y 2 motores de inducción

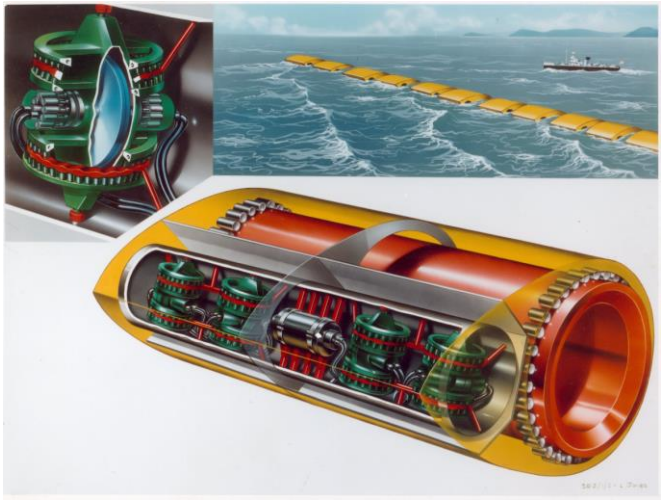


Máquinas Eléctricas

Aplicaciones













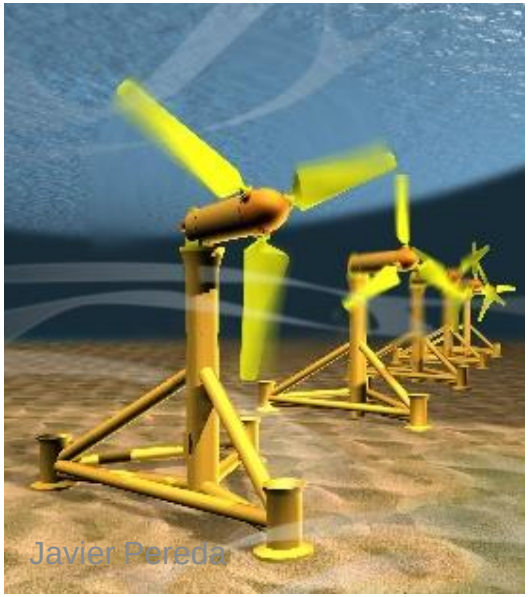




Energía del Mar

Integración, Optimización y Control



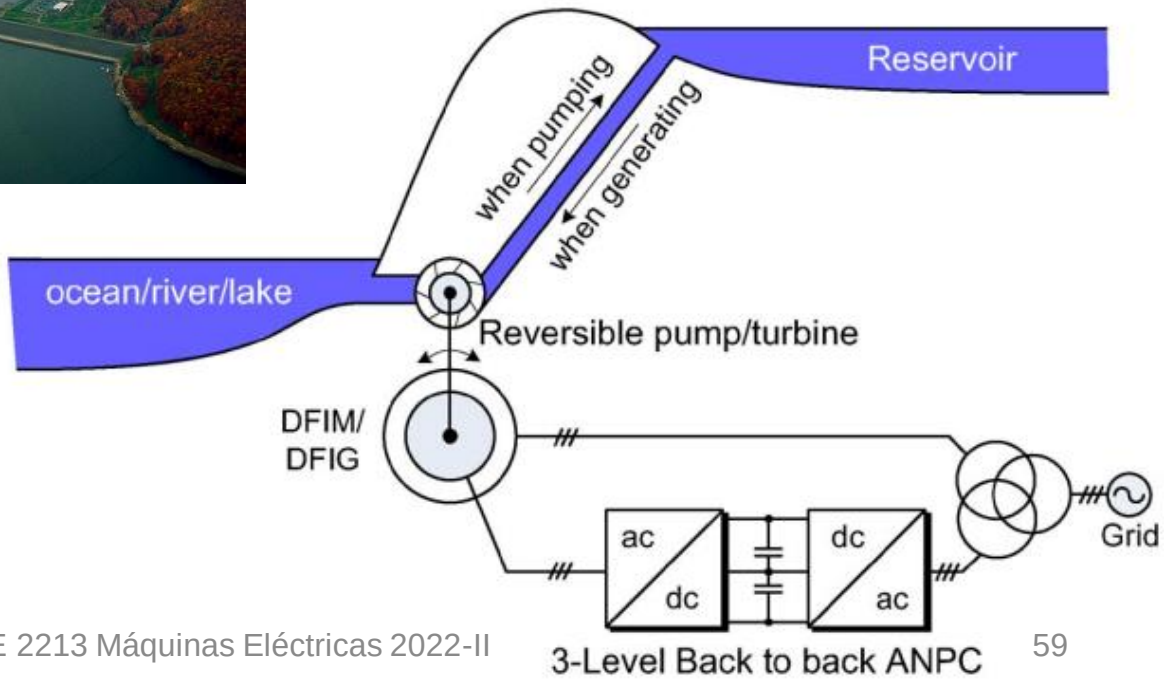




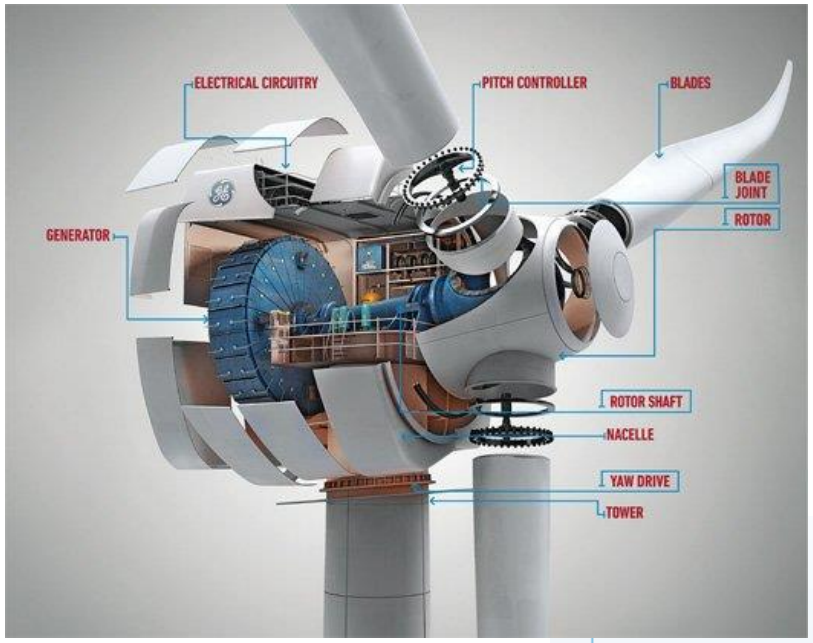


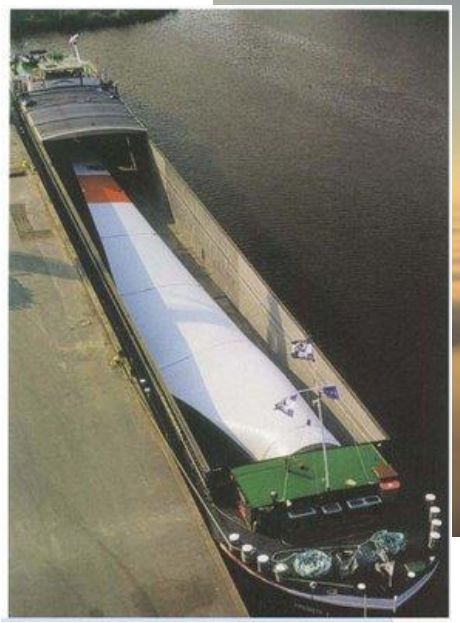
Almacenamiento
Administración de la Energía





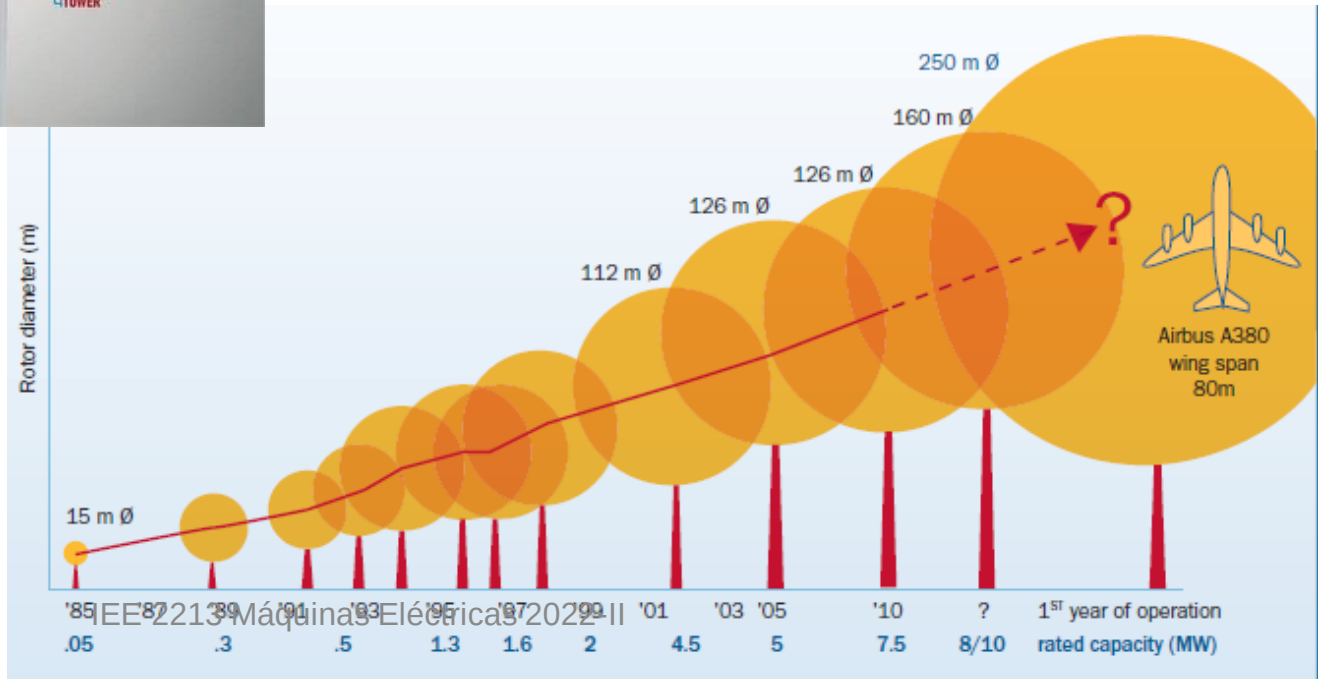
Energía Eólica



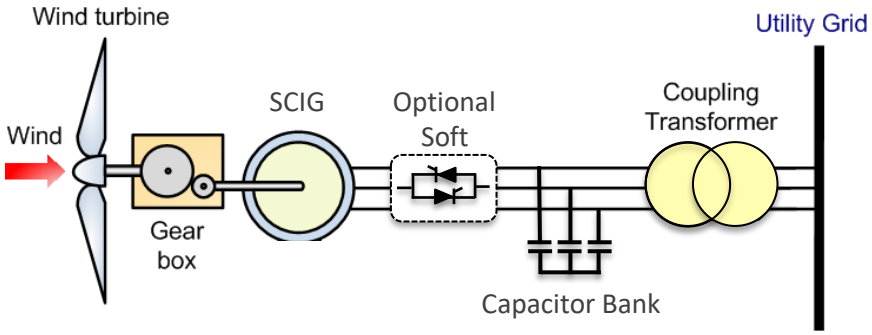


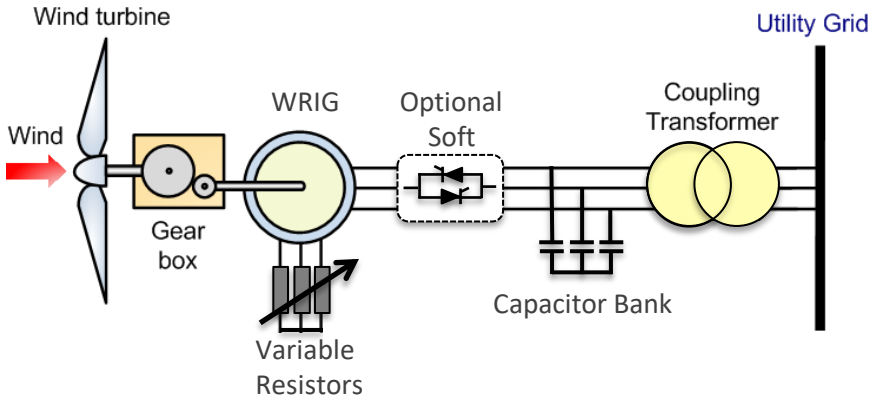


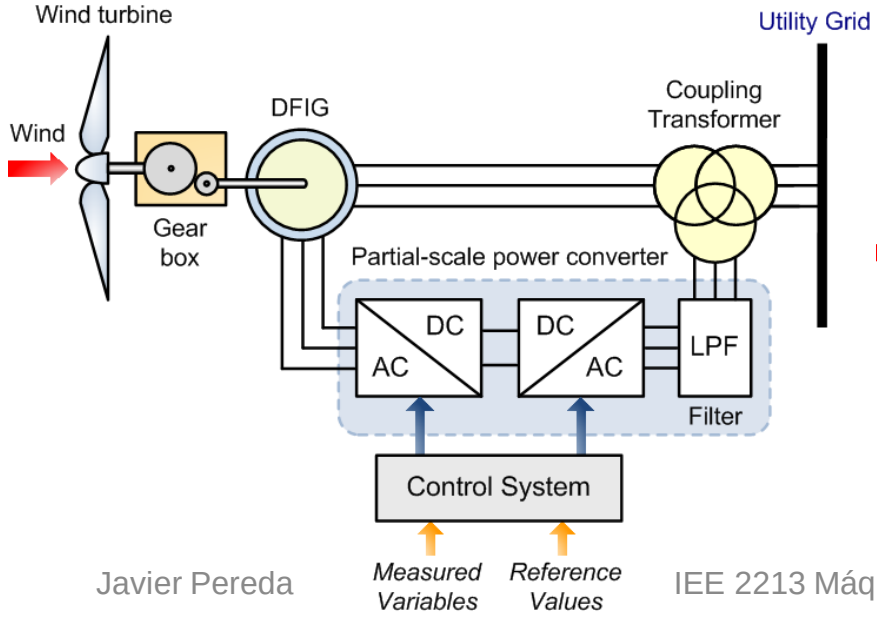
Enercon E-126

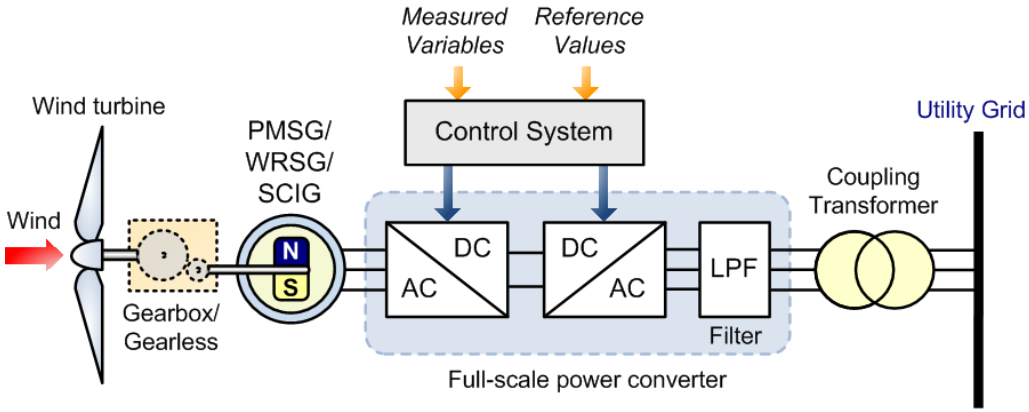


Energía Eólica
Configuraciones

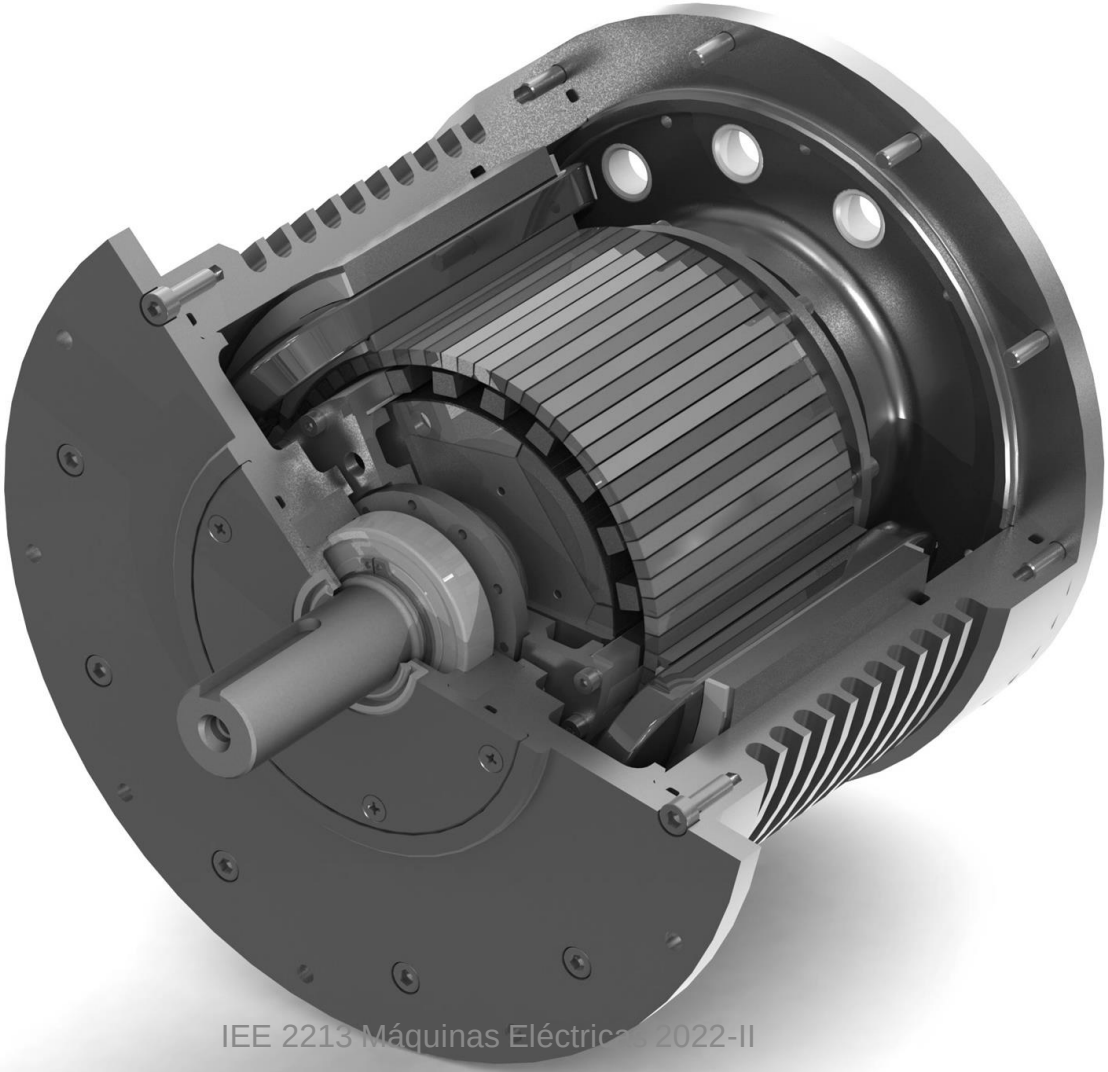








Fin Lectura 1



Próxima Lectura

Lectura 2

Electromagnetismo

