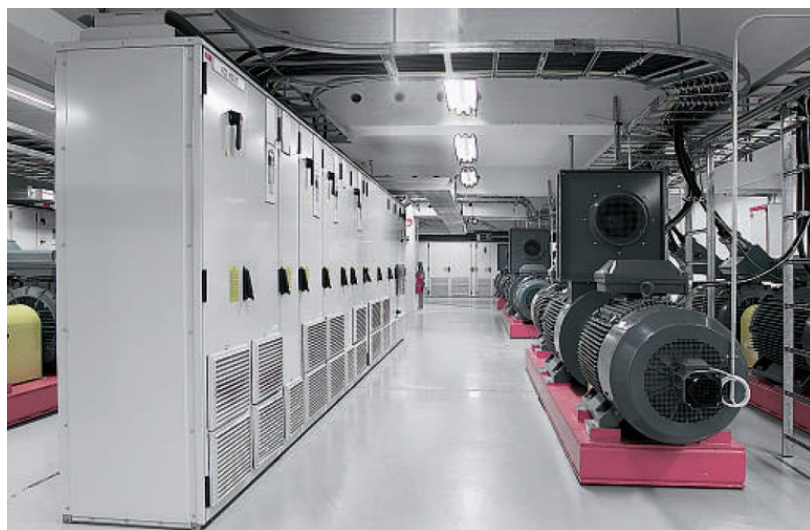


Unidad 1

Conversión de Energía y Control Automático



AUTOMÁTICA y MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Unidades Temáticas:

1. Conversión de Energía y Control Automático

Aplicaciones y Fundamentos. Conversión de energía eléctrica y eléctrica - mecánica. Control.

2. Modelado y Análisis de SD Continuos en el Espacio de Estado

Modelos Lineales y No Lineales. Linealización. Respuesta dinámica. Estabilidad. Discretización. Cambio de base. Realizaciones canónicas. Controlabilidad y Observabilidad.

3. Control Automático de SD Continuos en el Espacio de Estado

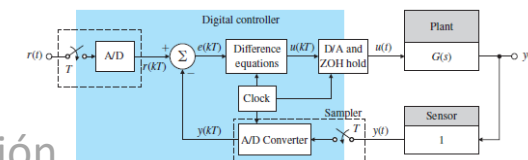
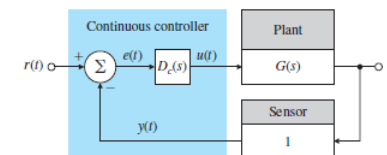
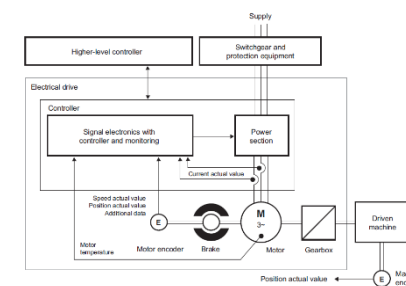
Retroalimentación de Estado. Observadores. Ubicación de Polos. Control Digital. Diseño.

4. Control de Accionamientos de Corriente Continua (CC)

Modelado, simulación. Control de corriente / torque. Control de velocidad / posición.

5. Control de Accionamientos de Corriente Alterna (CA)

Modelado, simulación. Control Vectorial de corriente/torque. Control de velocidad/posición.



AUTOMÁTICA y MÁQUINAS ELÉCTRICAS

1. Conversión de Energía y Control Automático

A. Concepto y Aplicaciones

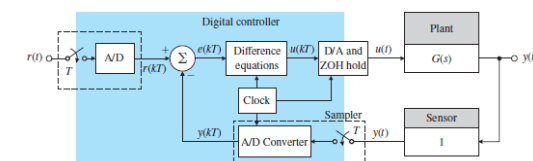
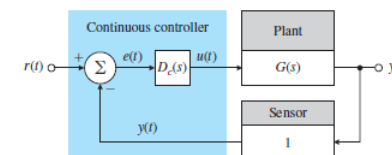
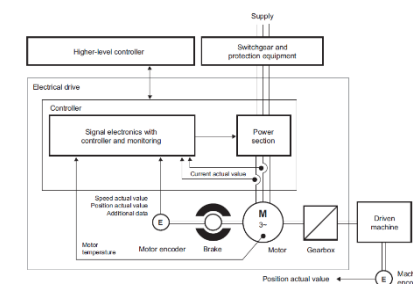
- Control Automático Electrónico de Máquinas Eléctricas: Concepto y esquema general. Componentes y estructura.
- Aplicaciones Mecatrónicas → Control de Movimientos y Eficiencia Energética.

B. Fundamentos de Control de Accionamientos Eléctricos

- Accionamientos Eléctricos.
- Control Automático.
- Control Automático de Accionamientos.

C. Conversión de Energía

- Conversión de energía eléctrica ↔ eléctrica: Convertidores Electrónicos de Potencia.
- Conversión de energía eléctrica ↔ mecánica: Máquinas Eléctricas.



Control Automático de Accionamientos Eléctricos

Ejemplos de Aplicación de **Accionamientos (DRIVES)** modernos

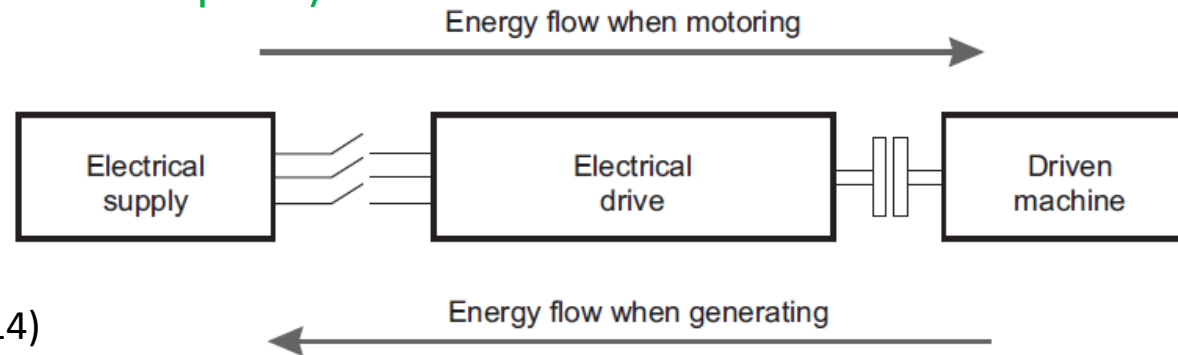
Video (6:11 min) 2016, SEW-EURODRIVE Corporate film: <https://youtu.be/Aju9GJAFAQM>



Fuente: SEW-EURODRIVE <https://www.sew-eurodrive.com/>

Accionamiento Eléctrico: Concepto

Sistema Tecnológico que **convierte Energía Eléctrica** $\leftrightarrow$ **Energía Mecánica (Reversible)** en forma **útil (trabajo)** y **controlada (estabilidad+desempeño)**



Fuente: **Electrical Drives**
(J. Weidauer, R. Messer, 2014)

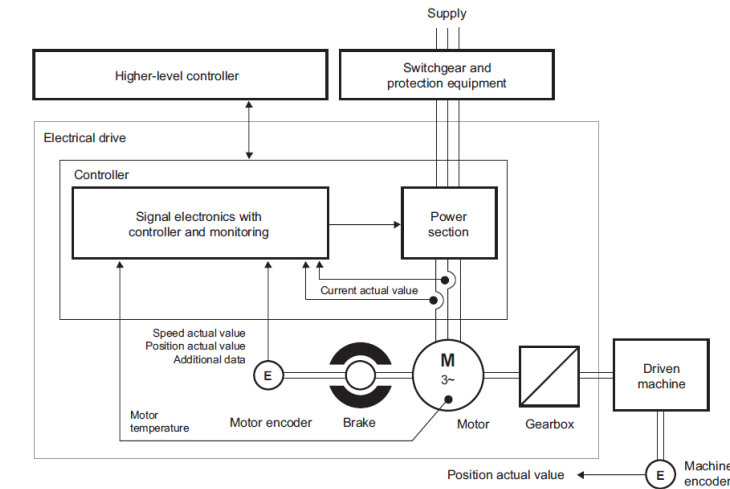
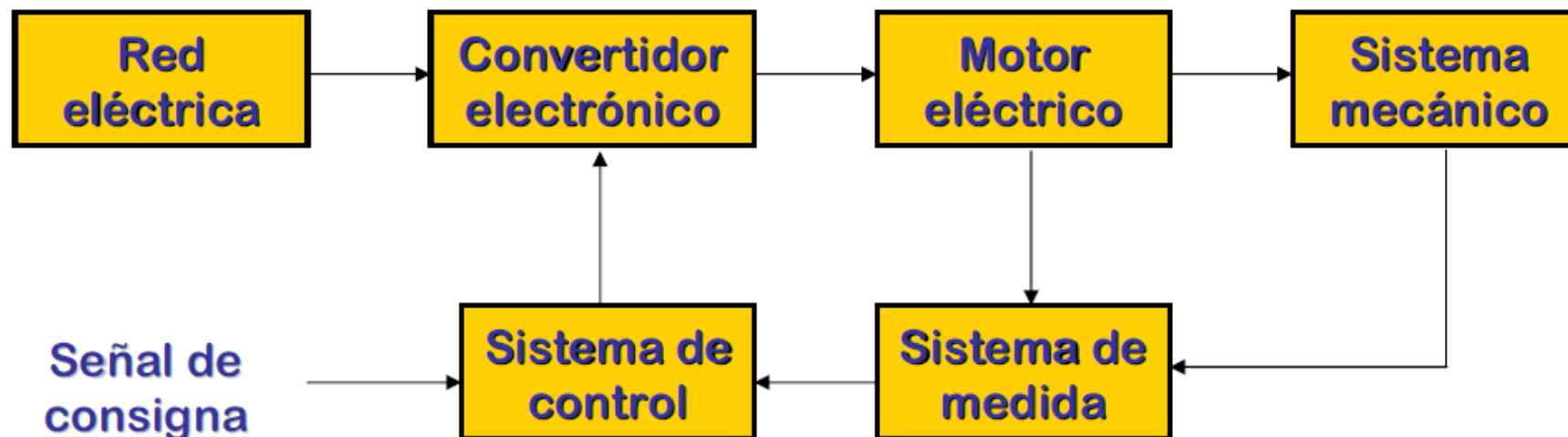


Diagrama de Bloques Conceptual: Subsistemas Componentes



Accionamiento Eléctrico: Concepto

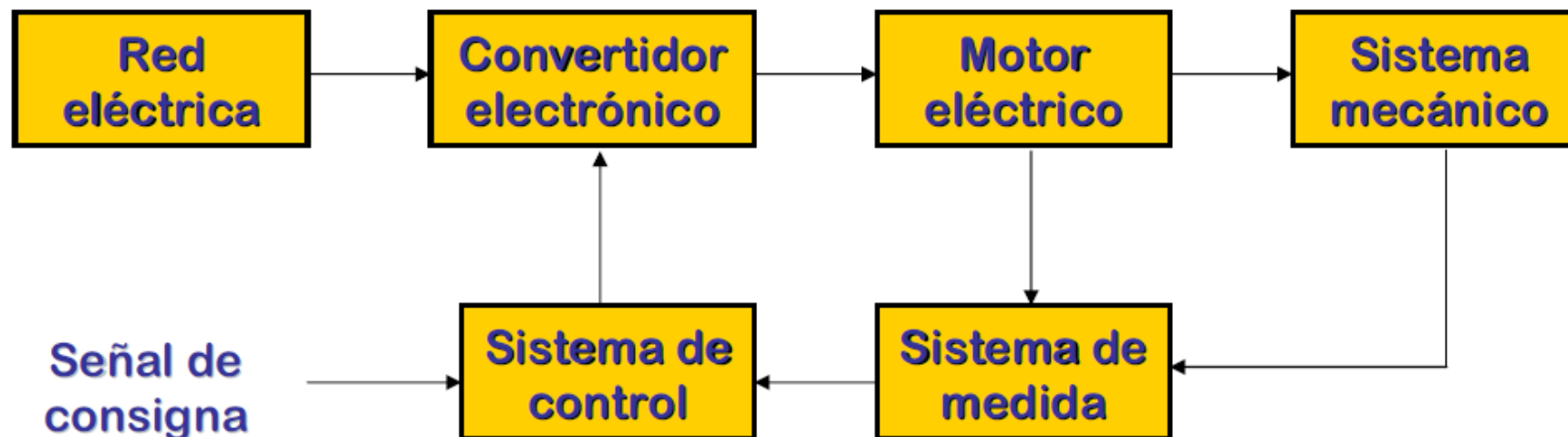
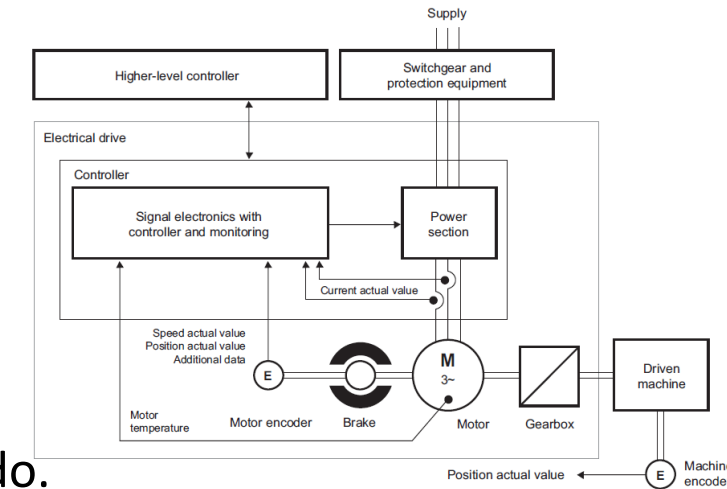
Sistema Tecnológico que **convierte Energía Eléctrica** $\leftrightarrow$ **Energía Mecánica (Reversible)** en forma **útil (trabajo)** y **controlada (estabilidad+desempeño)**

Variables controladas:

(dependiendo de la aplicación; se controla al menos una de ellas)

- **Posición** / **Velocidad** / **Aceleración**
- **Torque** / **Potencia** = Torque x Velocidad
- **Temperatura** (monitoreo y protección / limitación)
- Variables de **Proceso** de interés en la Aplicación (Lazo Externo)

CONTROL AUTOMÁTICO Electrónico: Lazo abierto vs. Lazo cerrado Retroalimentado.



Control de Procesos: Eficiencia Energética

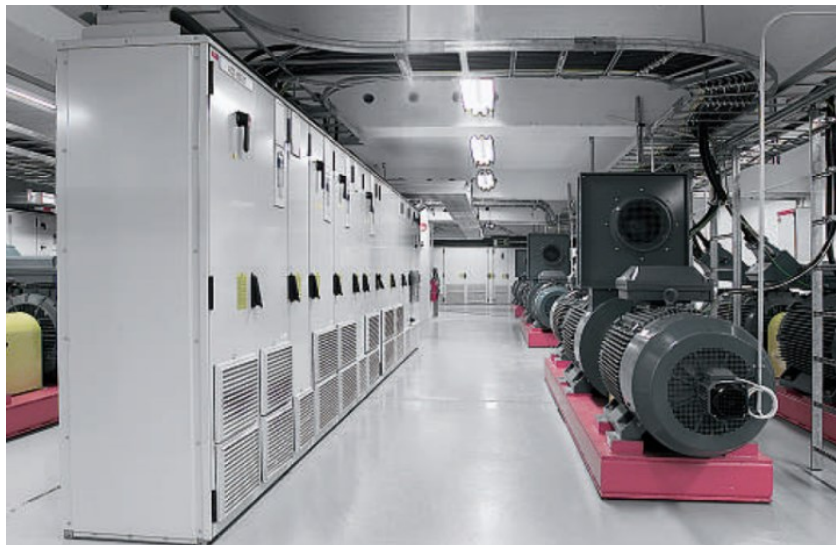
→ Standard VSD Variable Speed Converter Drives or Inverter Multi-Drives.

Industrias de PROCESOS Continuos:

Petróleo y gas, petroquímica, siderurgia y metales, pulpa y papel, alimentos, farmacéuticas, etc.:

- BOMBAS y VENTILADORES de **Velocidad Variable** (más eficiente que velocidad fija).
- Transporte y manipulación de materiales.
- Etc.

→ Velocidad Variable (según las necesidades del Proceso). Eficiencia energética.



Electrodomésticos “INVERTER”: Eficiencia Energética

→ Standard VSD Variable Speed INVERTER Drives & Compressors.

Acondicionadores de Aire “Inverter”

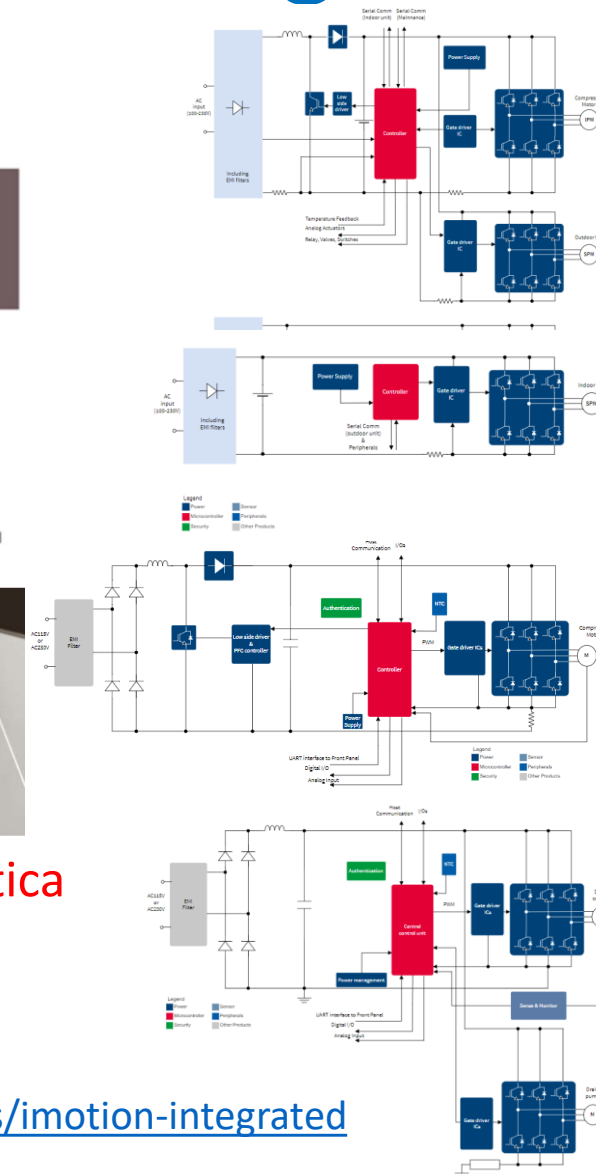
- Compresor.
 - Ventiladores interior y exterior.
- Control Continuo de Velocidad variable (vs. Control Cíclico On-Off).

Heladeras “Inverter”

- Compresor Rotativo o Traslación (“Linear”).
- Control Continuo de Velocidad variable (vs. Control Cíclico On-Off).

Lavasecarropas “Inverter”:

- Motores de Tambor y Bomba desagote.
- Control Continuo de Velocidad variable. Control de Movimientos y Eficiencia energética (vs. Control de Velocidad constante o varias velocidades fijas).



FUENTE: INFINEON Website <https://www.infineon.com/applications/home-appliances>

iMOTION™ Integrated motor control solutions <https://www.infineon.com/products/power/motor-control-ics/imotion-integrated>

Control de MOVIMIENTOS: MOTION Control

High Performance SERVO Drives (Servo-Controlled VSD Variable Speed Converter Drives).

Máquinas-Herramienta y Centros de Mecanizado CNC

- Control de Movimientos: Servo Control de Velocidad, Posicionamiento.
 - Coordinación de Movimientos entre varios ejes.
- Posicionamiento. Precisión y alto desempeño (High Performance) o productividad.

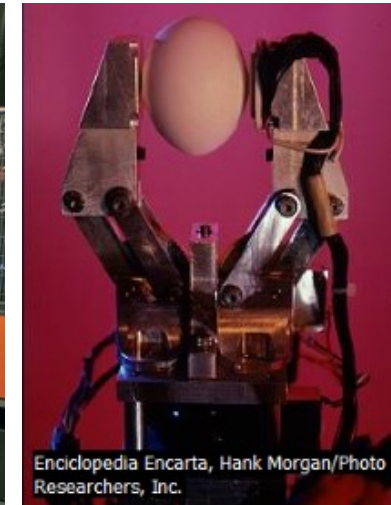
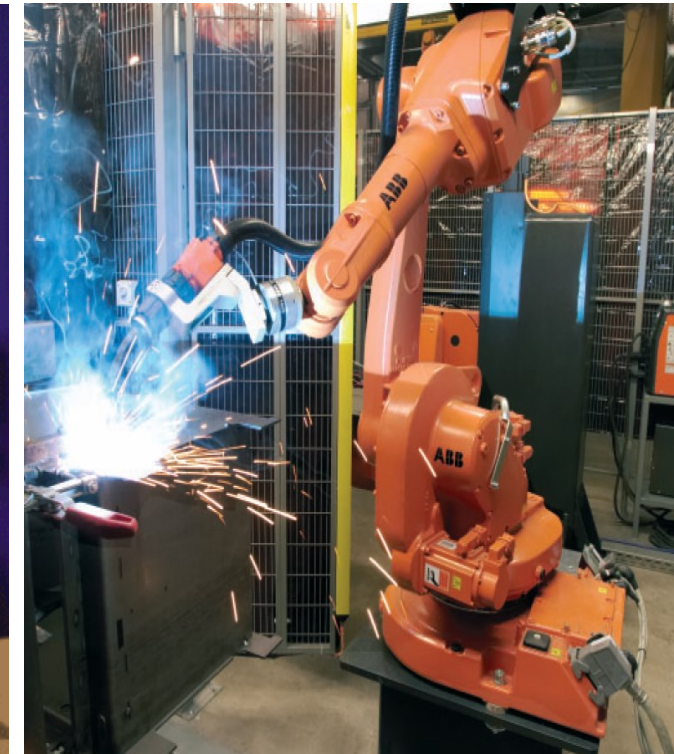
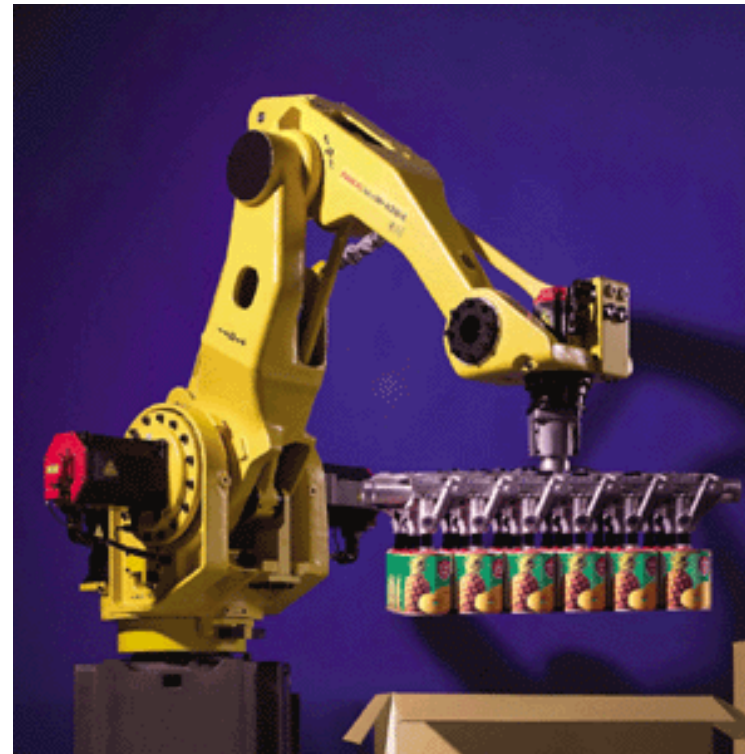


Control de MOVIMIENTOS: MOTION Control

High Performance SERVO Drives (Servo-Controlled VSD Variable Speed Converter Drives).

ROBÓTICA Industrial / Fabricación Flexible

- Control de Movimientos: Servo Control de Velocidad, Posicionamiento, Fuerza (Compliance).
 - Coordinación de Movimientos de articulaciones y Trayectorias de efector, evitar obstáculos.
- Posicionamiento. Precisión y alto desempeño (High Performance) o productividad.



Enciclopedia Encarta, Hank Morgan/Photo Researchers, Inc.

Control de MOVIMIENTOS: MOTION Control

High Performance SERVO Drives (Servo-Controlled VSD Variable Speed Converter Drives).

ROBÓTICA Médica: Cirugía de Precisión por Teleoperación

- Realidad y Control **"Amplificado"** de Micro-Movimientos.
- Force (Compliance) Feedback.

INTUITIVE **Da Vinci** Surgical Robotic System

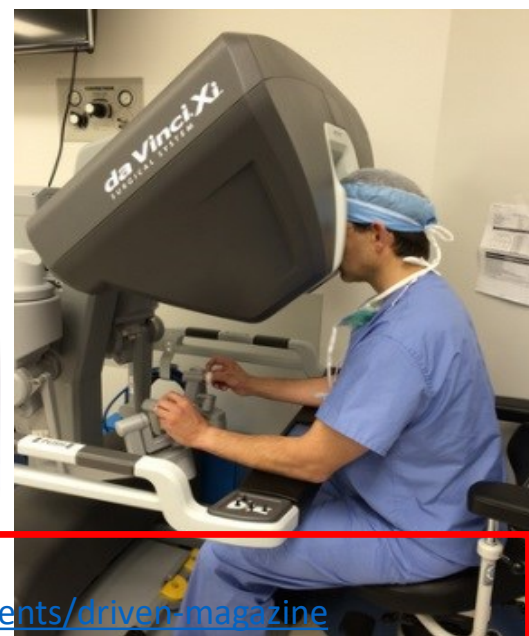
Video (7:20 min) →

<https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci>



Maxon: Driven Issue 2/2024

<https://www.maxongroup.com/en/news-and-events/driven-magazine>



Control de MOVIMIENTOS: MOTION Control

High Performance Rotary-Translational SERVO Drives (Servo-Controlled VSD Drives).

CORAZÓN ARTIFICIAL (Desarrollo): Actuador Rotativo-Traslación 'Linear' PMSM

- Control de Movimientos Coordinados de Precisión.

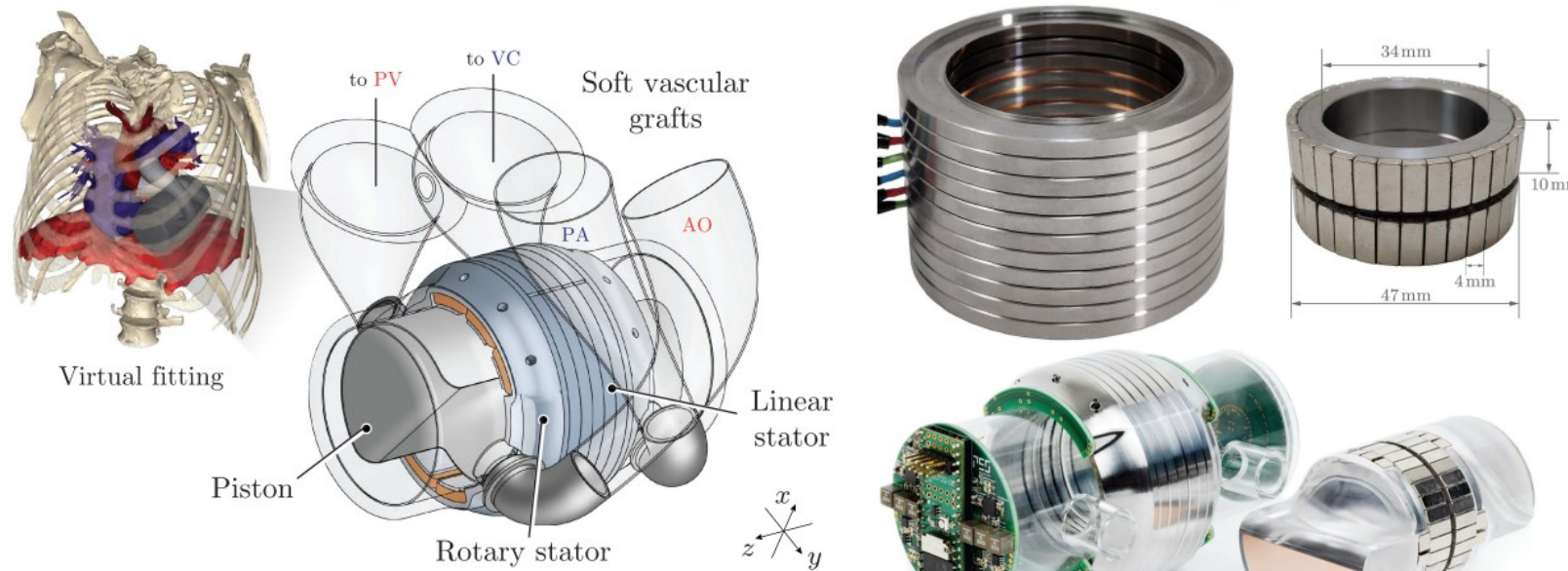


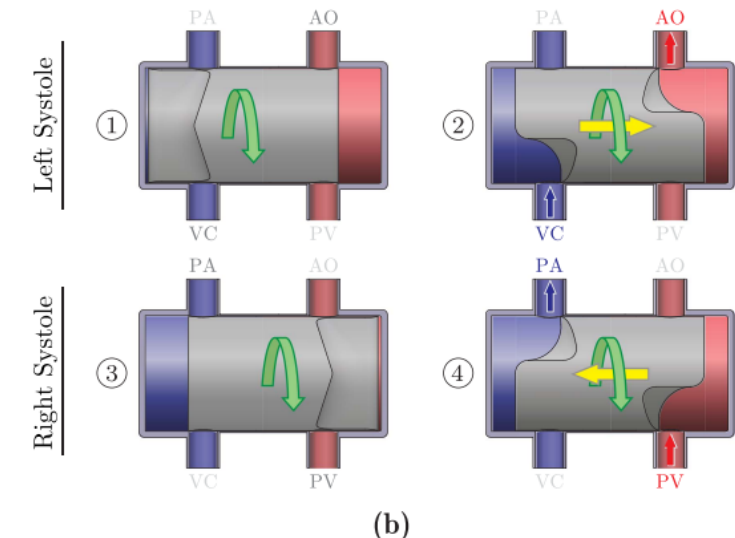
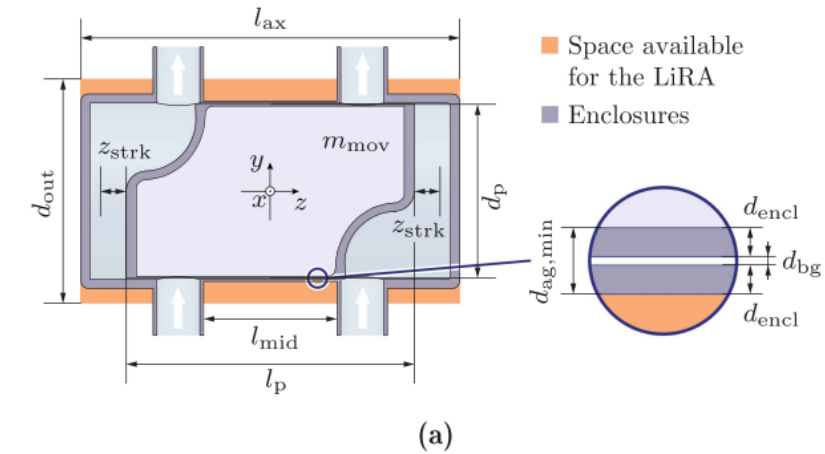
Fig. 1. Implantable TAH ShuttlePump, conceptual illustration with virtual

1010

IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 4, NO. 4, OCTOBER 2023

Design and Realization of a Highly Compact Tubular Linear Actuator for a Novel Total Artificial Heart

Rosario V. Giuffrida ¹, Student Member, IEEE, Raffael Senti, Johann W. Kolar ², Fellow, IEEE, Tim Bierewirtz ³, Krishnaraj Narayanaswamy ⁴, Marcus Granegger ⁵, and Dominik Bortis ⁶, Senior Member, IEEE

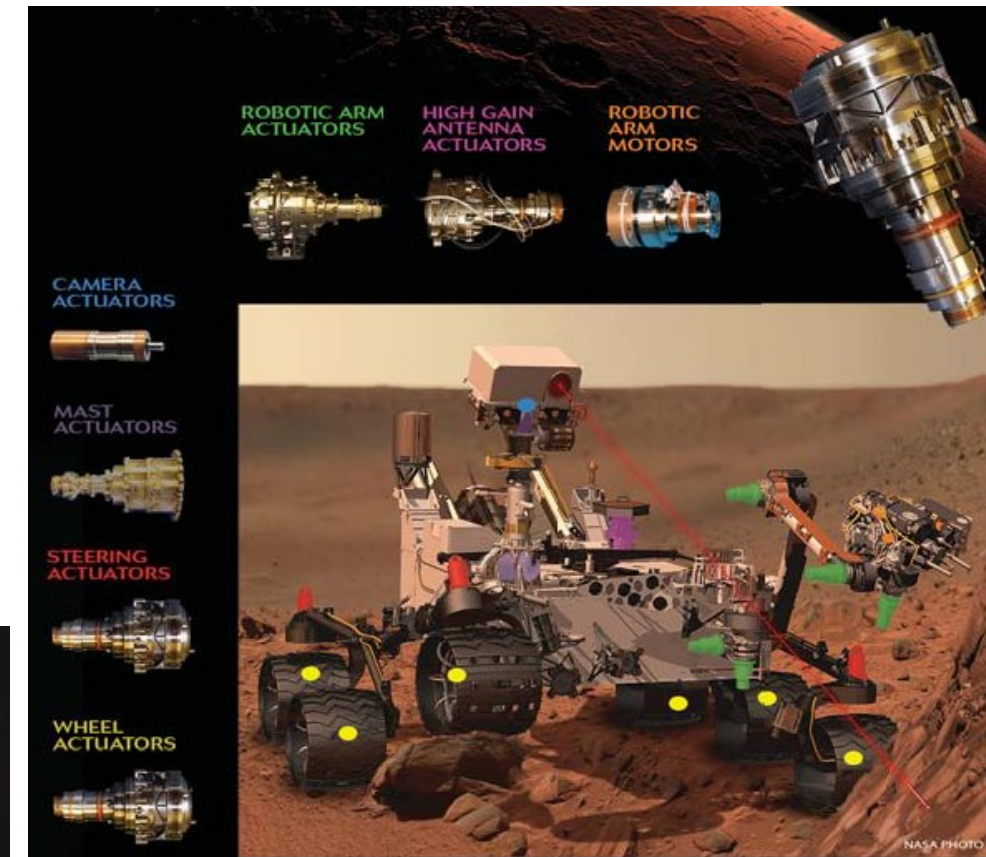


Control de MOVIMIENTOS: MOTION Control

High Performance SERVO Drives (Servo-Controlled VSD Variable Speed Converter Drives).

ROBÓTICA Móvil en Exploración Espacial - NASA: Curiosity Rover (Marte)

- Servo Control de Movimientos de Precisión: Velocidad, Posicionamiento, Fuerza (Compliance).
- Coordinación de Movimientos y Trayectorias.



[maxon's precision drives on Mars Video 1:44 min](https://online.flippingbook.com/view/1042987/2/)
<https://online.flippingbook.com/view/1042987/2/>

Control de MOVIMIENTOS: MOTION Control

High Performance SERVO Drives (Servo-Controlled VSD Variable Speed Converter Drives).

ROBÓTICA Móvil en Exploración Espacial - NASA: Curiosity Rover (Marte)

- Servo Control de Movimientos de Precisión: Velocidad, Posicionamiento, Fuerza (Compliance).
- Coordinación de Movimientos y Trayectorias.

Mars 2020 Perseverance Rover

What's Different This Time? A Narrated Explanation.

Video (17:30 min), 2020

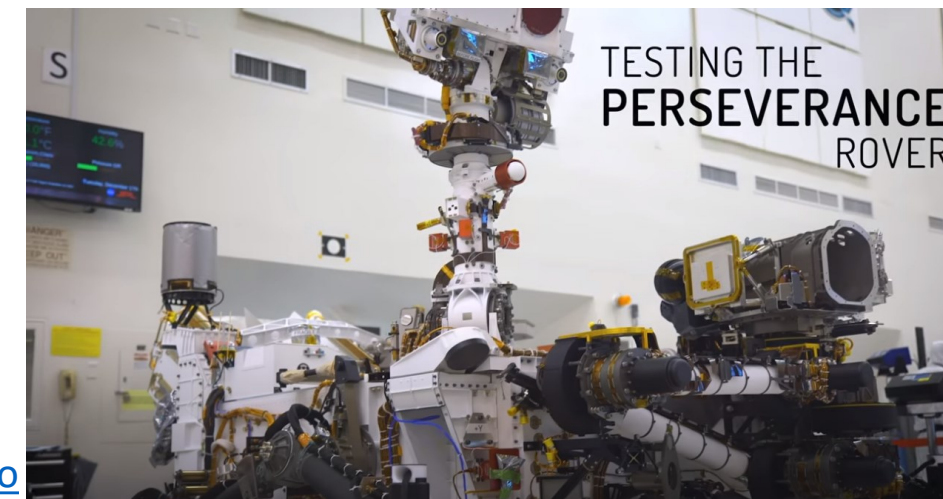
<https://www.youtube.com/watch?v=95hMM2u6Fgw>

Shake, Rattle and Roll:

Testing NASA's Mars 2020 Perseverance Rover

Video (2:28 min), 2020

https://www.youtube.com/watch?time_continue=10&v=1aJra9Wu_U&feature=emb_logo



Control de MOVIMIENTOS: MOTION Control

High Performance SERVO Drives (Servo-Controlled VSD Variable Speed Converter Drives).

ROBÓTICA Móvil: DRONES - 3/4/6/8-Copters

- Sustentación, Desplazamiento, Posicionamiento.
- **Estabilización: Camera Gimbal. Standstill control.**

(ver Artículo en IEEE Spectrum Magazine, 2015 July)

Control de vuelo:

- Retroalimentación con **Sensores**: acelerómetros, giroscopo, etc.;
- Acciones de Control MV con **Motores** en rotores!



DRONES: The Complete **Flight Dynamics**

Video (6:36 min), 2020-10-31-10

<https://www.youtube.com/watch?v=COKBu2ihp-s>

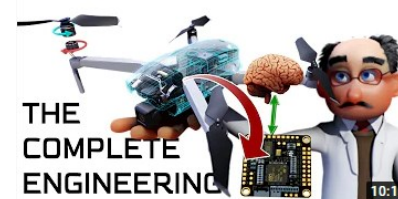
DRONES: **How do they work?**

Video (10:12 min), 2021-05-24

https://www.youtube.com/watch?v=N_XneaFmOmU



Drones | The complete flight dynamics



Control de MOVIMIENTOS: MOTION Control

High Performance SERVO Drives (Servo-Controlled VSD Variable Speed Converter Drives).

ROBÓTICA Móvil: DRONES - 3/4/6/8-Copters

- Sustentación, Desplazamiento, Posicionamiento.
- Estabilización: Camera Gimbal. Standstill control.

(ver Artículo en IEEE Spectrum Magazine, 2015 July)

Control de vuelo:

- Retroalimentación con Sensores: acelerómetros, giróscopo, etc.;
- Acciones de Control MV con Motores en rotores!

Drones for Good: AMBULANCE Drone TU Delft

Video (3:23 min), 2014 https://www.youtube.com/watch?v=y-rEI4bezWc&t=19s&ab_channel=TUDelft



Control de MOVIMIENTOS: MOTION Control

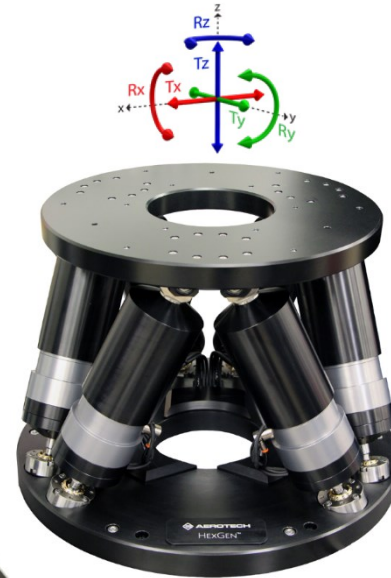
High Performance SERVO Drives (Servo-Controlled VSD Variable Speed Converter Drives).

Steward Platform or HEXAPOD Robotic parallel manipulator

Aerotech HexGen HEX500-350HL Hexapod **6-DOF** Positioning System with **BLDC ELECTRIC Actuator** and **Incremental or Absolute Encoder**

<https://www.aerotech.com/product-catalog/hexapods/hexgen-hex500-350hl.aspx>

Drive System	Precision Ball Screw, Brushless (BLDC) Servomotor
Feedback	Noncontact Incremental or Absolute Encoder



Drone Gimbal Camera Testing: Hexapod 6DOF Motion Platform

Video (1:28 min), 2016 <https://www.youtube.com/watch?v=RPJpNSTX7wA>



Symétrie Positioning vs Motion Hexapods with **BLDC ELECTRIC Actuator** and Absolute Encoder

<https://symetrie.fr/en/>



How **FLIGHT SIMULATORS** Trick your Brain: **TU Delft Flight Simulator**

with **HYDRAULIC** Actuators: Video (16:30 min), 2024-03-14

https://www.youtube.com/watch?v=pfTdJD2OakA&ab_channel=FlyByMax

[00:00](#) – Intro

[01:44](#) - Motion Cueing

[03:23](#) - Orientation Misconceptions

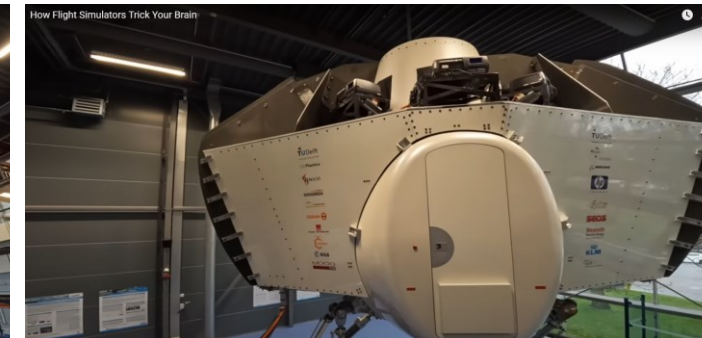
[04:53](#) - Washout Filters

[07:23](#) - Gravity and Acceleration

[11:20](#) - Specific Force

[13:16](#) - Translational Washout

[14:32](#) - Bringing It All Together



Control de MOVIMIENTOS: MOTION Control



High Performance VECTOR Control LARGE Drives (Servo-Controlled VSD Variable Speed Drives).

GRÚAS Portuarias: Sistemas de Izaje de Cargas suspendidas mediante Cables

- Control de Alto Desempeño para Movimientos coordinados: Velocidad y Posición de Izaje y Traslación. Eficiencia y Calidad de Energía.



Control de MOVIMIENTOS: MOTION Control

High Performance VECTOR Control LARGE Drives (Servo-Controlled VSD Variable Speed Converter Drives).

Minería: Grúas de Cangilones

Bucket Wheel Stacker-Reclaimer

para extracción de mineral a cielo abierto

- Control de movimientos coordinados.



Metales: Trenes de Laminación

Laminadores de Acero en caliente o en frío

- Control de movimientos coordinados:
Velocidad y presión para conformado.



‘GENERACIÓN’ Eléctrica: Control Tensión / Frecuencia

CONVERSIÓN de Energía Hidroeléctrica: Turbo-Generadores Hidroeléctricos Turbina Hidráulica y Generador Eléctrico Sincrónico.

- **Turbina Hidráulica y Distribuidor:** Regulación de Velocidad / Frecuencia constante.
- **Generador Eléctrico Sincrónico de Polos Salientes con Excitación Separada:** Regulación de Tensión constante por Control Electrónico de Excitación.

Nuevo Rodete de Turbina Kaplan 155 MW

Rotor de Polos Salientes del Generador Sincrónico

Central
Hidroeléctrica
YACYRETÁ
(Argentina – Paraguay)

2020 rehabilitación
IMPESA

(Fuente: IMPESA)



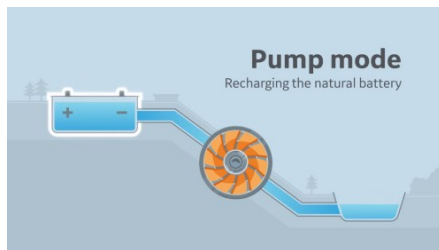
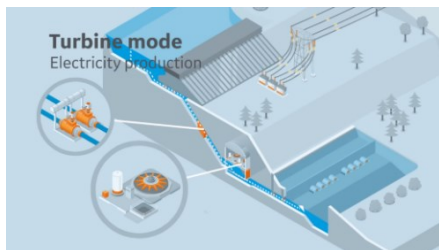
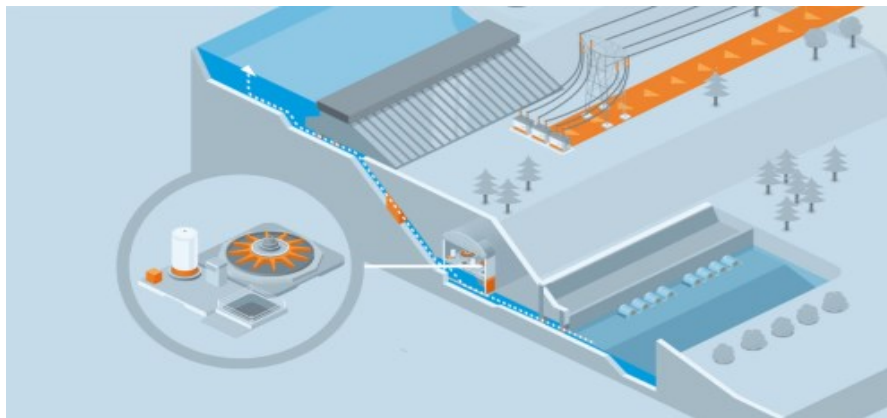
'GENERACIÓN' Eléctrica: Control Tensión / Frecuencia

CONVERSIÓN REVERSIBLE de Energía Hidroeléctrica, con ALMACENAMIENTO:

Turbo-Generadores Hidroeléctricos con

Bombeo de Velocidad Variable DFIG

DFIG: Doubly-Fed (Wound-Rotor) Induction Generator



Video (3:04 min), 2016 GE Renewable Energy

https://www.youtube.com/watch?v=CDlvjkfpX_o

Hydropower Variable Speed Pumped Storage Technology

3-Phase Wound Rotor

Features GE's winding system, including bar roundpacking, that optimizes mechanical and thermal connection while allowing bar dismantling.

Special Bar Insulation

Optimized and tested to withstand high harmonics levels associated with the converter.

SPMAX* Controller

Manages all specific controls related to variable speed units and optimizes the speed and power set points, maximizing the unit global performance.

GE Renewable Energy

Oblique Elements

GE's oblique elements maintain the circular shape of the stator and therefore the concentricity of the air gap.

Rotor Core Pressing System

Patented system that prevents loosening of core components, increasing reliability.

Thrust Bearing Membrane Technology

Self-adjusts and reduces overheating risk.



World Leader in Variable Speed Pumped Storage Power Plants (PSP)

- Developing over 6 GW of PSP projects worldwide including 3 GW with variable speed technology
- GE's variable speed solutions contribute to demand and grid balance

(Fuente: GE Renewable Energy)

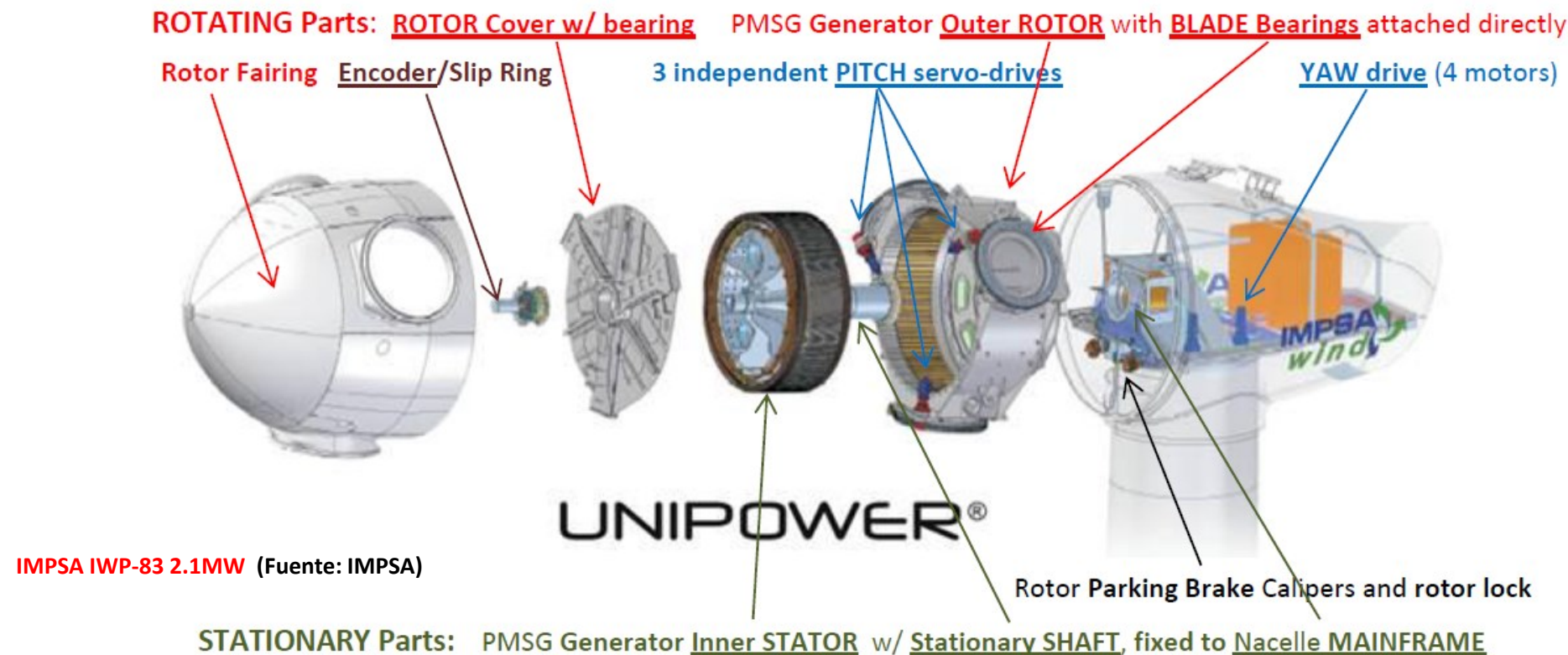
<https://www.ge.com/renewableenergy/hydro-power/large-hydropower-solutions/hydro-turbines/pump-turbine>

*Trademark of General Electric Company

'GENERACIÓN' Eléctrica: Control Tensión / Frecuencia

Turbinas Eólicas

- Generación a **velocidad/frecuencia variable** → Conversión a frecuencia de red
- **Control** por **torque** (modo frenado regenerativo en Generador → **Generación a la Línea**).
- Control por **pitch** (ángulo de palas), **yaw** (orientación de góndola), etc..

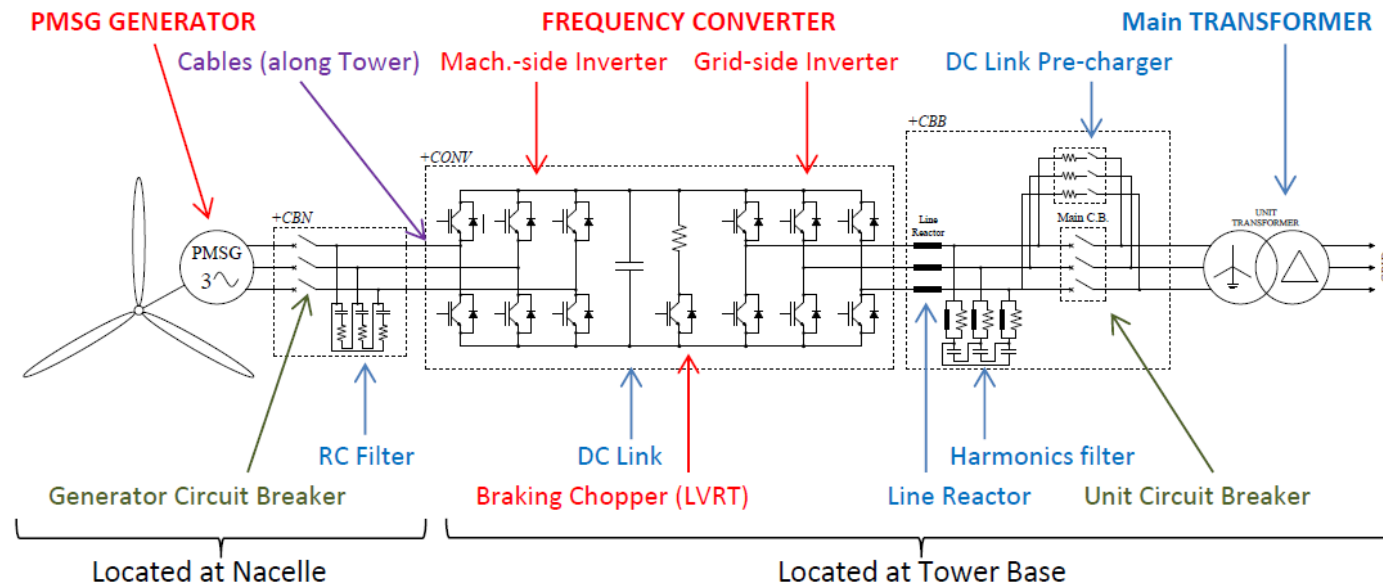


'GENERACIÓN' Eléctrica: Control Tensión / Frecuencia

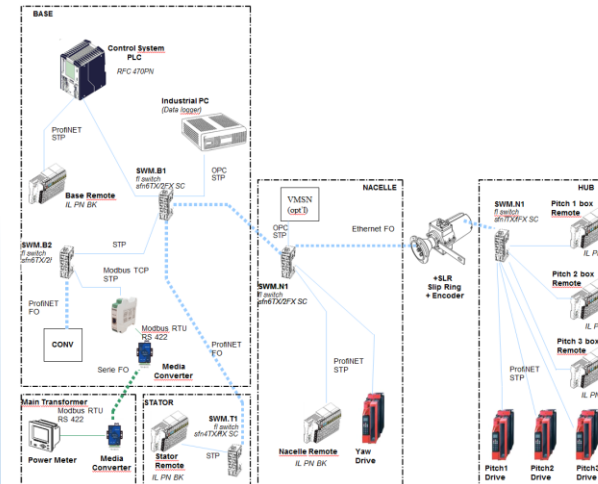
Turbinas Eólicas

- Generación a **velocidad/frecuencia variable** → Conversión a frecuencia de red
- **Control por torque** (modo frenado regenerativo en Generador → **Generación a la Línea**).
- Control por **pitch** (ángulo de palas), **yaw** (orientación de góndola), etc..

Subsistema de Potencia: Generación y Conversión de Energía Eléctrica



Subsistema de Control y Accionamiento



IMPESA IWP-83 2.1MW (Fuente: IMPESA)

Control de MOVIMIENTOS y EMULACION DE CARGAS

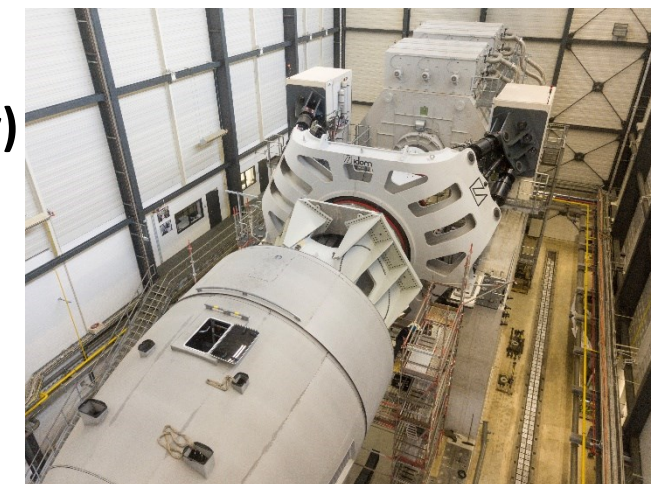
Turbinas Eólicas: Accionamiento Electromecánico para Banco de Ensayos Escala 1:1 DyNaLab Fraunhofer IWES (Germany)

DyNaLab: Dynamic Nacelle Testing Laboratory

Banco Ensayos Dinámicos de Góndola completa de Turbinas (Escala Real):

- **Torque Drive System:** Convertidores + Motores sincrónicos en tandem + transm.
- **Hexapod o Stewart platform** → simulación cargas dinámicas: **flexión y arrastre**.

Video (3 min) ➔

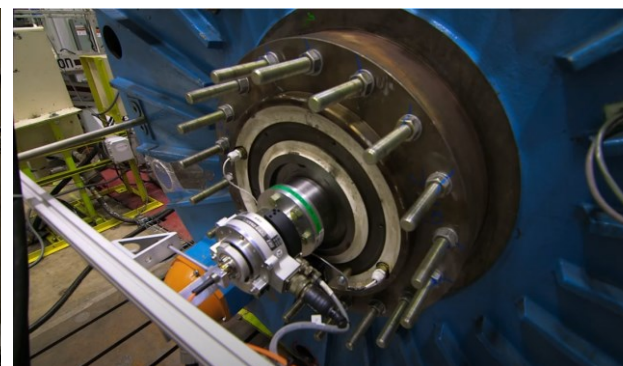
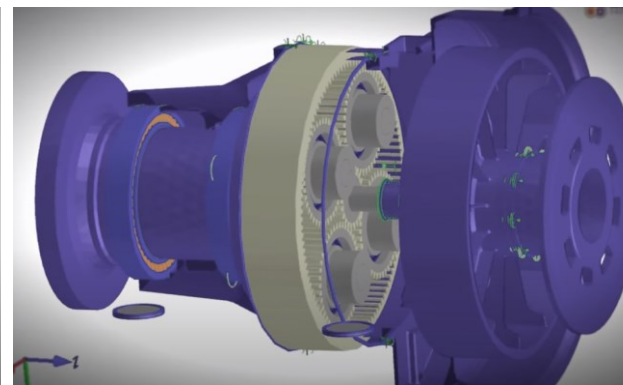


(Fuente: Fraunhofer IWES)

Control de MOVIMIENTOS y EMULACION DE CARGAS

Turbinas Eólicas: Accionamiento Electromecánico para Banco de Ensayos Escala 1:1 NREL (USA Dept. of Energy)

Video (5:15 min.), 2015 NREL: Next Generation Drivetrains
<https://www.youtube.com/watch?v=fwNliYNC1g>



(Fuente: NREL)

Accionamientos de TRACCIÓN para TRENES

TRENES ELÉCTRICOS AC / DC, con alimentación por **Pantógrafo o a Hidrógeno**:
Motores Rotativos AC/DC ej. SIEMENS VECTRON.

<https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/rolling-stock/locomotives/vectron/dual-mode.html>



Components

- | | | |
|--------------------------|--|------------------|
| Dynamic braking resistor | Engine air intake system | Brake rack |
| Train-protection cabinet | Alternator | Fuel tank |
| Engine cooling plant | Electric cabinet with central blower and switching equipment | Main transformer |
| Diesel engine | | Pantograph |
| Particle filter | | |



Hydrogen Train

<https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus.html>

Accionamientos de TRACCIÓN para TRENES

TRENES de Alta Velocidad: Motores de Traslación ('Linear' Motors)

- Accionamiento y Frenado regenerativo. Estabilidad/suspensión o **levitación magnética**. Etc.

The Fastest train ever built | The complete physics of it



Video (11:33 min.), 2021-06-16

<https://www.youtube.com/watch?v=XjwF-STGtfE>

Magnetically levitated trains are common nowadays. However, the **MagLev** train that the Central Japan Railway Company developed is quite unique and superior to the other trains. Running at more than **600 km/h**, it has achieved the status of 'fastest train.'

This train uses **superconducting magnets**, which is why it is called SC MagLev. Once charged with an exciting current, the superconducting magnets of this train produce a circulating DC current and strong magnetic field forever, with zero loss.

Let's understand more about this successfully tested train technology, which is projected to overtake other magnetic levitation technologies by the year 2027. The same technology is poised to connect New York city to Washington DC in just one hour by 2030.



Japan's \$100 Billion World's Fastest Train

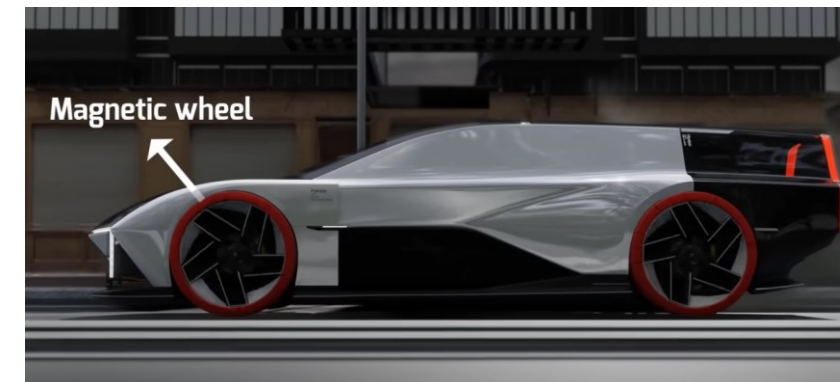
Video (6:38 min.), 2021-05-05 https://www.youtube.com/watch?v=Wkgpxprl_5c

1,000 km/h Train, Levitating Car...

4 new Magnetic Vehicles to Revolutionize Travel

Video (6:22 min.), 2024-05-05

https://www.youtube.com/watch?v=c9agb_WpBU&ab_channel=FutureLab

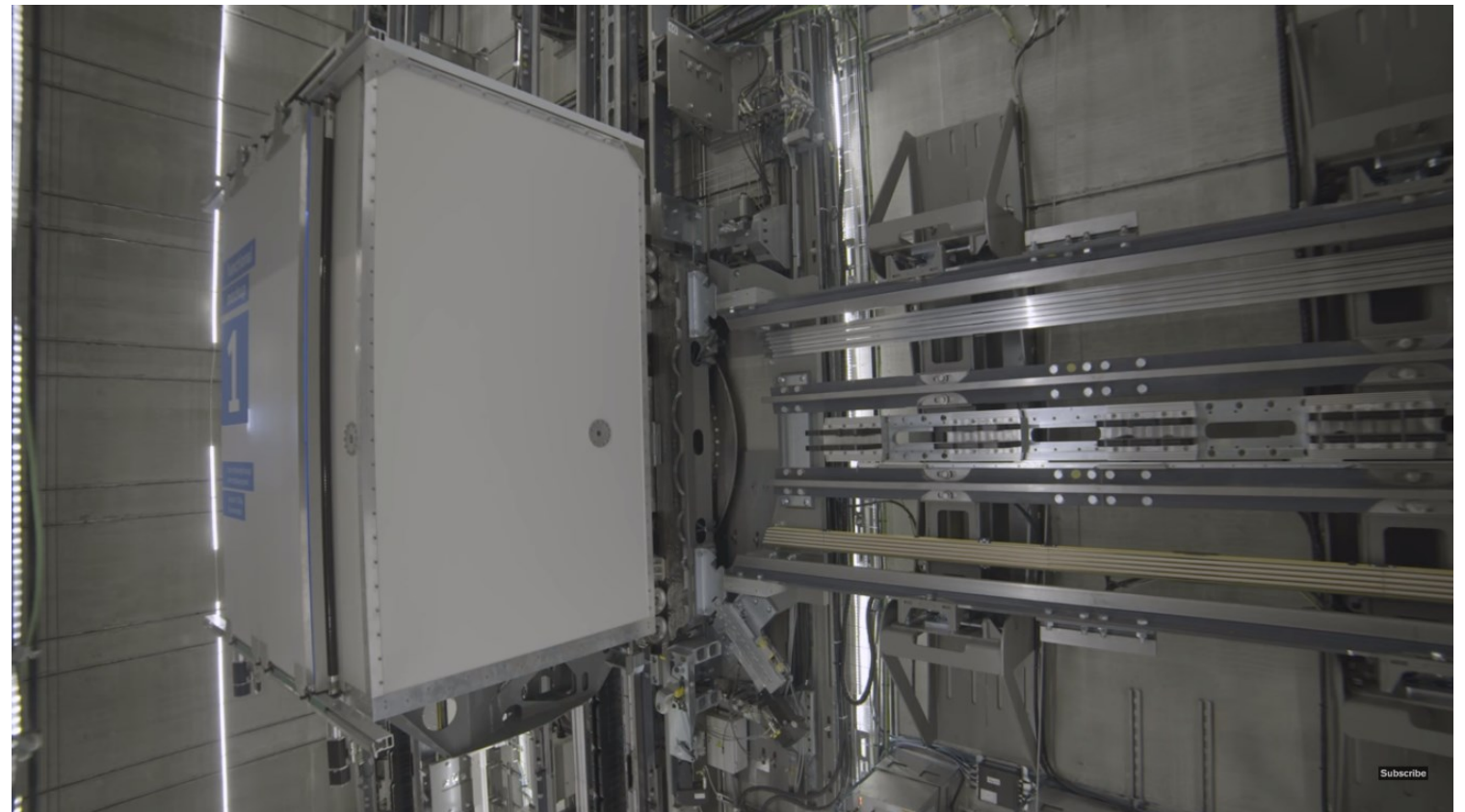


Accionamientos de TRACCIÓN para ASCENSORES

Ascensores sin cable: ThyssenKrupp MULTI elevator, tecnología con Motores de Traslación ('Linear Motors') reconfigurables.

Video (6:58 min.), 2024-05-05: Multi Elevator System video brochure <https://www.youtube.com/watch?v=NBv1bkuj0Ac>

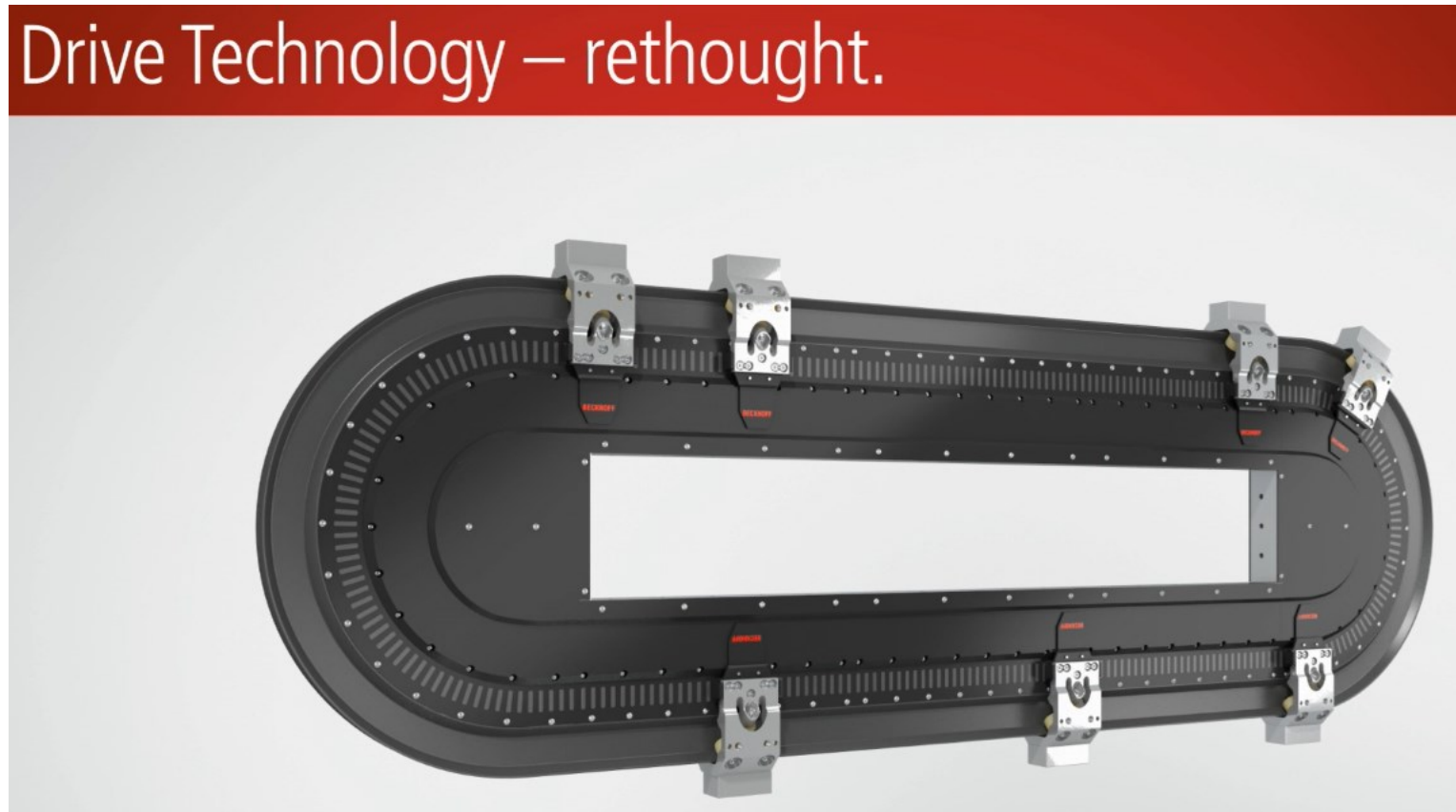
Video (6:22 min.), 2024-05-05: Mockup Test <https://www.youtube.com/watch?v=8OBHUZetYIU&t=258s>



Accionamientos de TRACCIÓN para Transporte Industrial

Tecnología de **Motores de Traslación:**

Ejemplo: Beckhoff XTS: eXtended Transport System ➡



Accionamientos de TRACCIÓN para Movilidad Eléctrica Urbana

Bicicletas Eléctricas con BLDC Motor y Batería

(ej. E-mov, Gi Fly [Arg.], etc.)

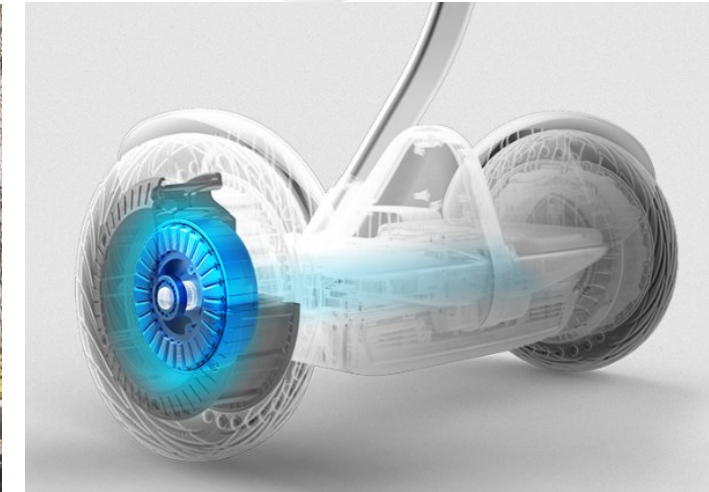
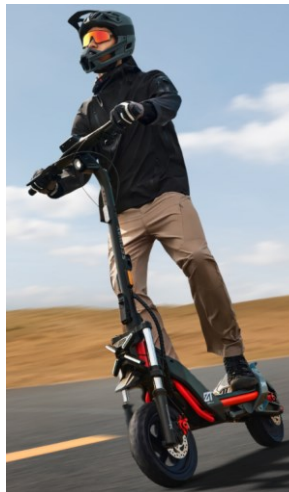
<https://www.electricbike.com/>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Pedelec>

Balance Scooters y Monopatines Eléctricos

(ej. Segway, Eable Bike Co.)

<https://www.segway.com/>



Accionamientos de TRACCIÓN para Movilidad Eléctrica Urbana

City Car con prestaciones *básicas*: **CORADIR Movilidad Eléctrica** (San Luis, **Argentina**)
Motor **ACIM** (asíncrono Jaula Ardilla) 4,5 kW SIN Frenado Regenerativo <https://movilidad.coradir.com.ar/>

Parámetros básicos	Tipo de Batería	Litio LFP 8kwh 2000 ciclos
	Carga	Enchufe 220V 50hz - Ficha 2073
	Autonomía	100 km
	Tiempo de carga máxima	8 horas / Admite recarga parciales
	Capacidad	4 personas
	Pantalla	LED HD Táctil 10" - Reproductor multimedia
	Radio	Si
	Bluetooth	Si
	Cámara de retroceso	Si
	Cierre Centralizado	Si / Mando a distancia
Sistema y potencia	Levanta vidrios eléctricos	Si
	Asiento trasero rebatible	Si
	Dimensiones	2830x1500x1565 mm
	Tipo de motor	Asíncrono
	Potencia Nominal	4.5 KW
Seguridad y confort	Indicador de fallas en tablero	Si
	Velocidad máxima	65 km/h
	Tablero Digital	Si
	Faros de LED	Si
	Frenos Disco	En ruedas delanteras
	Frenos a tambor	En ruedas traseras
	Calefacción / Aire Acondicionado	Si / Opcional
	Vidrios Eléctricos	Si
	Sistema de cargado inteligente	Si
	Conexión Bluetooth	Si
	Radio (MP3)	Si



Accionamientos de TRACCIÓN para Movilidad Eléctrica Outdoor

Bicicletas Eléctricas de Montaña con BLDC Motor y Batería (pedaleo asistido o motorización completa) <https://www.cycmotor.com/>

CYC X1 Pro **3000W**: extreme electric bike mid drive conversion kit in the world 70 km/h

Video (2:11 min.), 2018 <https://www.youtube.com/watch?v=4l7unymRrYo&feature=youtu.be>



GENERAL SPECIFICATIONS:

Rated Voltage: 30-60 V
Max. rpm: 180
Rated Power: 3000 W
Max Torque: 180 N.m
Overall efficiency: More than 80%
Bottom bracket: ISIS Splined interface
Total Weight: 3 kg
Bracket Materials: 7075-T6
Crank Arm: 7075-T6 170mm
Q Factor: 170mm
Compatibility: Bike with standard bottom bracket thread and width of 68/73/83/100/120mm.
Accessories: E-Brake Cut-off, water proof Wiring, Color Display, Thumb Throttle, PAS sensor
Overall reduction ratio: [1:36](#)



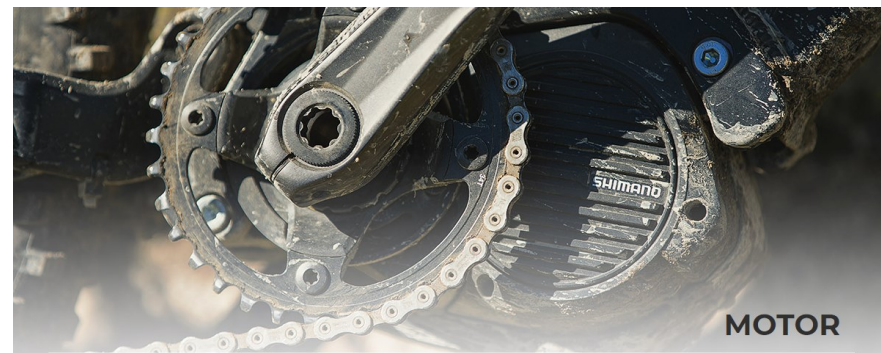
SPINTROL Drone Tech Chips
Ultra-Quiet FOC Sinewave Controller
30 - 60V 65A Input
9-Axis Gyroscope



Accionamientos de TRACCIÓN para Movilidad Eléctrica Outdoor

Bicicletas Eléctricas de Montaña con BLDC Motor y Batería (pedaleo asistido o motorización completa)

Vairo e-bikes (Argentina) <https://www.vairo.com/bikes/ebikes/>



MOTOR

El motor es el corazón de las E-bikes teniendo una **fuerza de 200 a 500W** y un **Torque entre 50 hasta 110Nm**. El motor es acompañado por un sensor que mide la fuerza del pedaleo y la velocidad del viaje. Esta información es utilizada por una computadora interna que distribuye sistemáticamente el uso de la batería para la comodidad y ergonomía y que a su vez alarga el tiempo de vida de los componentes sin necesidad de un servicio de mantenimiento.



DISPLAY

DP C230.CAN

Pantalla LCD informativa con indicaciones sobre velocidad, niveles, carga de batería, distancia recorrida, distancia restante, entre otras cosas.



MOTOR

MID MOTOR / M500

Motor eléctrico con capacidad de fuerza de hasta 250W y una asistencia con un Torque de 80Nm y un peso de 3.3kg y 5 niveles de potencia.



BATERÍA

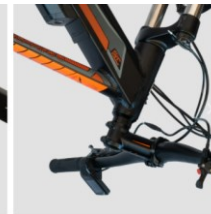
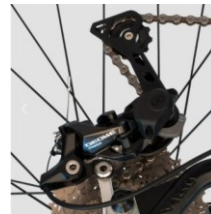
BT F03.450

Batería SAMSUNG de celdas de litio de 36V 10-4A 2600MAH con capacidad de 100km de asistencia moderada. Tiempo de carga de 4 horas al 100%.



BATERÍA

Hecha con **celdas de lithium** que provee al motor de asistencia hasta 100km en un nivel moderado en condiciones normales con solo una carga de 3 a 5 horas dependiendo del modelo de la bicicleta. Por ejemplo la bicicleta SK1 puede recorrer hasta 60km en un modo regular con solo el 80% de la carga.



TECNOLOGÍA

La tecnología de las e-bikes sorprende a cualquiera. Capacita al ciclista para lograr cosas que parecían impensables. Su motor provee el torque perfecto para llegar a cualquier lugar y su batería parece nunca acabarse. ¿Quieres conocer más sobre su tecnología?

VER MÁS



Accionamientos de TRACCIÓN para Autos Eléctricos BEVs

Autos totalmente Eléctricos: con Motor Eléctrico, Batería y Cargador Eléctrico

- How Do **All-Electric Cars** Work? <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>
- Electric Vehicle Charging Stations: <https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations>

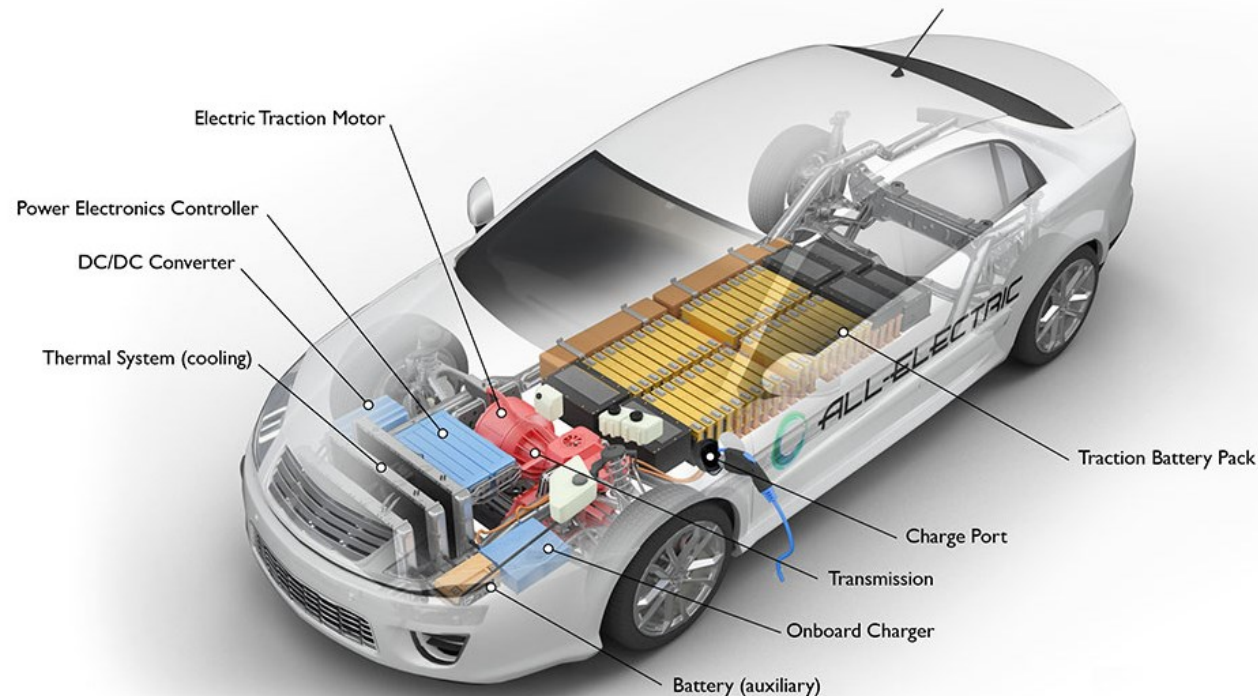
Components of an All-Electric Vehicle



U.S. DEPARTMENT
of ENERGY

Office of Energy Efficiency
and Renewable Energy

All-Electric Vehicle



afdc.energy.gov

AC Level 1 Charging

Approximately 5 miles of range per 1 hour of charging¹



J1772 connector

Alternating Current (AC) Level 1 equipment (often referred to simply as Level 1) provides charging through a 120 volt (V) AC plug. Most EVs will come with a portable Level 1 cordset, so no additional charging equipment is required. On one end of the cord is a standard NEMA connector (for example, a NEMA 5-15, which is a common three-prong household plug), and on the other end is an SAE J1772 standard connector (often referred to simply as J1772, shown in the above image). The J1772

AC Level 2 Charging

Approximately 25 miles of range per 1 hour of charging¹



J1772 connector



J3400 (NACS) connector

AC Level 2 equipment (often referred to simply as Level 2) offers charging through 240 V (typical in residential applications) or 208 V (typical in commercial applications) electrical service. Most homes have 240 V service available, and because Level 2 equipment can charge a typical EV battery overnight, EV owners commonly install it for home charging. Level 2 equipment is also commonly used for public and workplace charging and can operate at 40 to 80

DC Fast Charging

Approximately 100 to 200+ miles of range per 30 minutes of charging¹



CCS connector



CHAdeMO connector



J3400 (NACS) connector

Direct-current (DC) fast charging equipment (typically a three-phase AC input) enables rapid charging along heavy traffic corridors at installed stations at power outputs up to 500 kW. This is also referred to as Level 3 charging. As of 2023, more than 20% of public EV charging ports in the United States were DC fast chargers. The availability of DC fast charging is expected to increase as a result of federal funding to



The Combined Charging System (CCS), also known as the SAE J1772 combo, charge port on a vehicle can be used to accept charge with Level 1, Level 2, or DC fast charging equipment.

COMPARE WITH

Plug-in Hybrid



Hybrid Electric



Hydrogen Fuel Cell



Gasoline



Accionamientos de TRACCIÓN para Autos Eléctricos BEVs

Autos totalmente Eléctricos: con Motor Eléctrico, Batería y Cargador Eléctrico
 ej. 2WD c/motor **PMSM** Battery Electric Vehicle (BEV): **Renault Zoe**

Fuente:
<https://project-panda.eu/concept/>

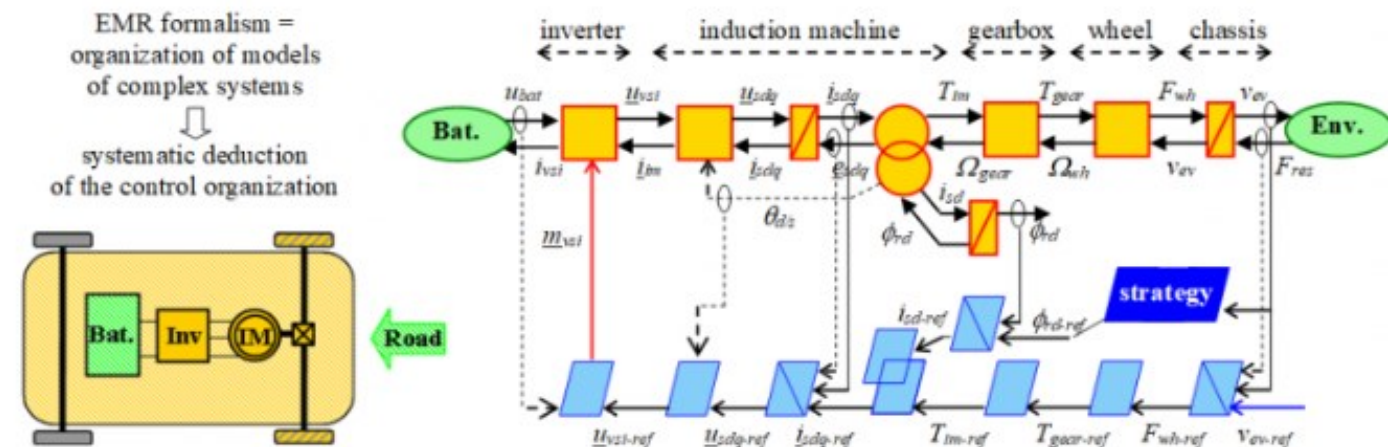


Figure 3: Energetic Macroscopic Representation (EMR)

Autos totalmente Eléctricos: con Motor Eléctrico, Batería y Cargador Eléctrico

Volkswagen's MEB (Modular Electric Drive Matrix)

Sandy and the Munro Live Team disassemble and Analyze **Volkswagen's ID.4 Electric Motor!**



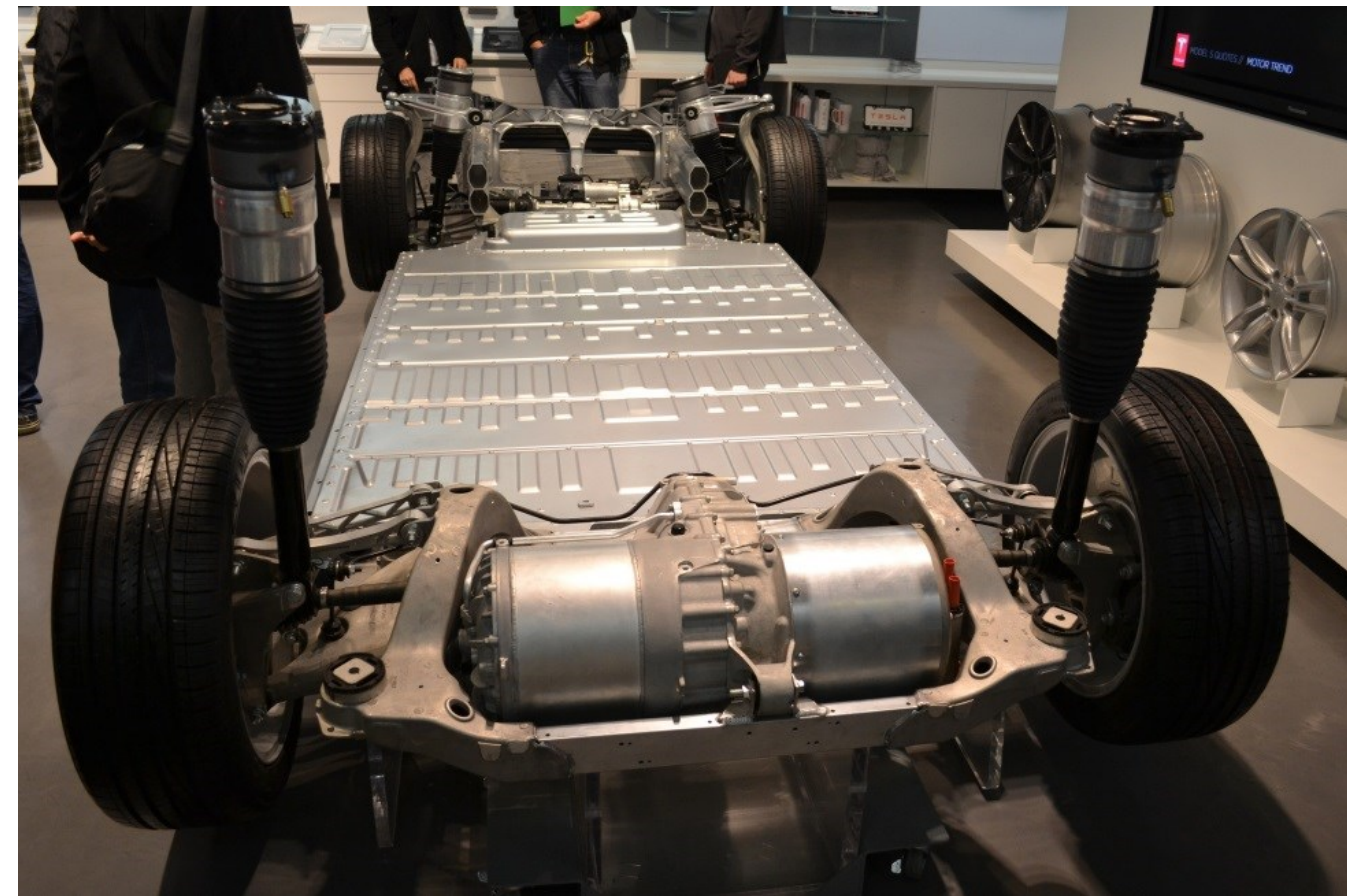
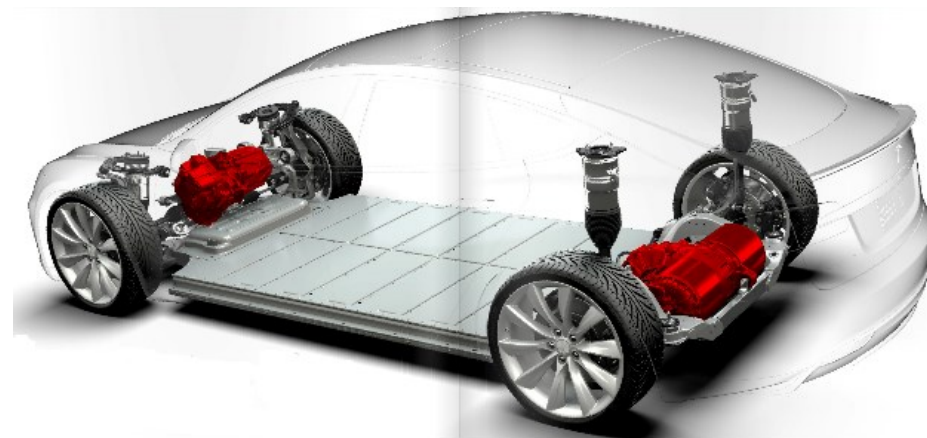
Accionamientos de TRACCIÓN para Autos Eléctricos BEVs

Autos totalmente Eléctricos: con Motor Eléctrico, Batería y Cargador Eléctrico

ej. 4WD c/ 2 motores AC Battery Electric Vehicle (BEV): **Tesla Model S**

All-electric powertrain, acelera de 0 a 100 km/h en menos de 5 s. Autonomía 500 km.

<https://chargedevs.com/features/qa-with-teslas-lead-motor-engineer-full-interview/>



Tesla Model S



Accionamientos de TRACCIÓN para Autos Eléctricos BEVs

Autos totalmente Eléctricos: con Motor Eléctrico, Batería y Cargador Eléctrico

ej. 4WD c/ 2 motores AC Battery Electric Vehicle (BEV): **Tesla Model S**
All-electric powertrain, acelera de 0 a 100 km/h en menos de 5 s. Autonomía 500 km.

Mega Fábricas y Super coches: Fabricación Robotizada

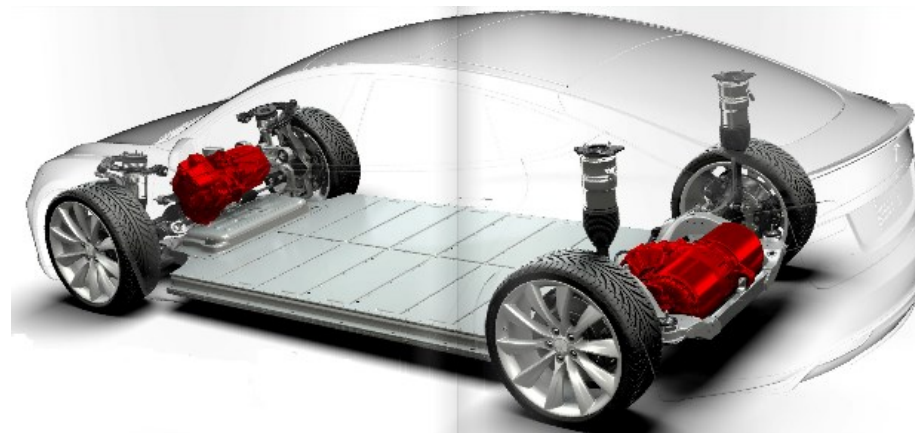
Video (50 min.) 2017-03 (English) /2019-02 (Español) **NATIONAL GEOGRAPHIC**

https://www.youtube.com/watch?v=KA18tusTgE4&ab_channel=TeslaModel

https://www.youtube.com/watch?v=8jeGvoeHO48&ab_channel=DocumentalesenEspa%C3%B1ol

TESLA MOTORS

<https://www.teslamotors.com/support> (*videos, etc.*)



Accionamientos de TRACCIÓN para Autos Eléctricos BEVs

Autos totalmente Eléctricos: con **Motor Eléctrico, Batería y Cargador Eléctrico**

Videos **HOW IT'S MADE:** **Fabricación Robotizada**
Motores Eléctricos y Baterías para BEVs

BMW i3 and BMW i8 Electric Drive:

Flexible architectures for all drive trains.

Interior BATTERY CELLS Production Assembly Line

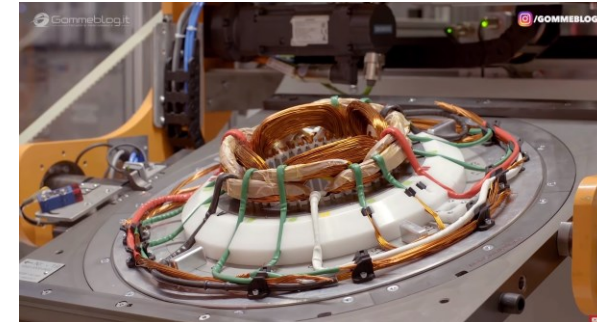
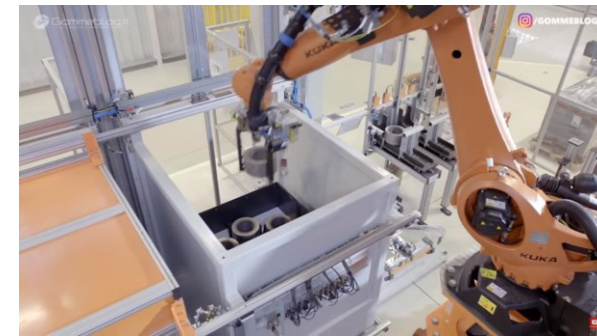
Video (20 min.) 2017-11 <https://www.youtube.com/watch?v=xvaQMTcckSg>

AUDI Electric Motor Engine FACTORY

Video (18:35 min.) 2018-07 <https://www.youtube.com/watch?v=rq6z1hShFcE>

RENAULT Electric Motor Engine FACTORY

Video (13 min.) 2017-03 <https://www.youtube.com/watch?v=WSH983zUNIo>



Accionamientos de TRACCIÓN para Autos Eléctricos BEVs

FIA Formula E – Futuro de la Movilidad Eléctrica <https://www.fiaformulae.com/>

Video (1:35 min.) 2024-01 **What is Formula E?** <https://fiaformulae.com/en/video/487298>

Formula E Race Cars History: Gen1-2-3 – to Gen3 Evo <https://www.fiaformulae.com/en/news/753954>

CARS & TECHNOLOGY: Forging the future of electric mobility

<https://www.fiaformulae.com/en/championship/cars-and-technology>

Generation 3 Documentary – REGENERATIVE Braking

Video (26:15 min.) 2023-07 **The story of Gen3** <https://fiaformulae.com/en/video/421531>

“Street Level”

Video (1:30 min.) 2019-06 ➔



Accionamientos de TRACCIÓN para Autos Eléctricos BEVs

Autos totalmente Eléctricos: con Motor Eléctrico, Batería y Cargador Eléctrico

APTERA Solar-Battery Electric Vehicle (SBEV):

3WD In-Wheel Motor <https://aptera.us/>

Aptera has launched

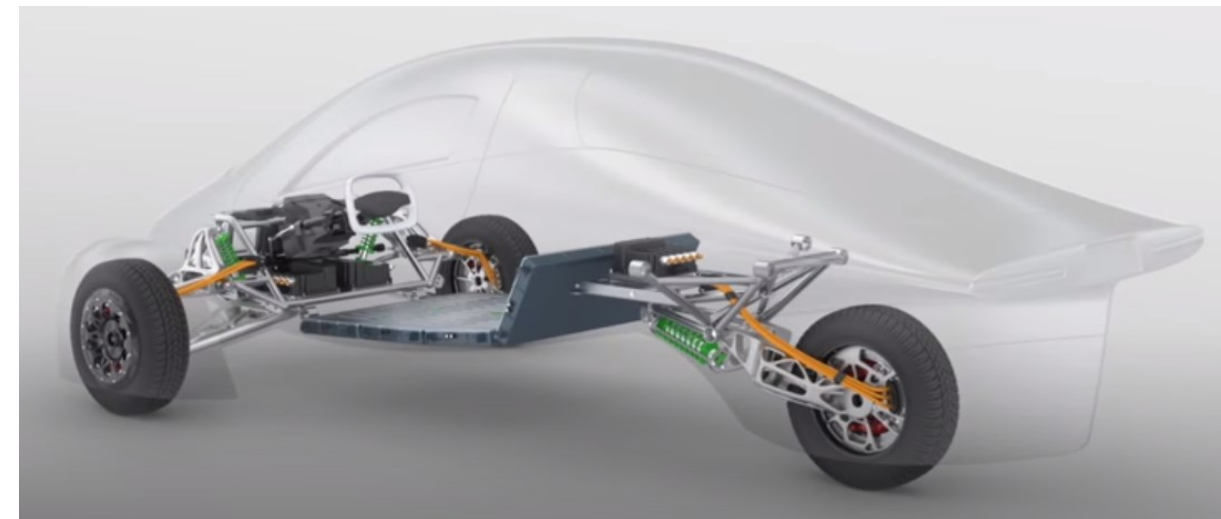
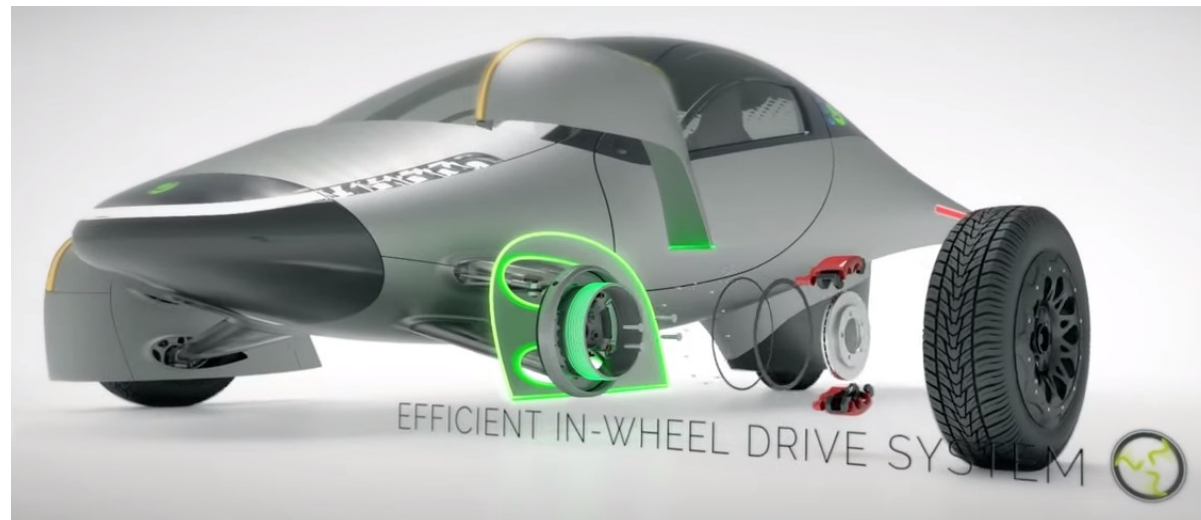
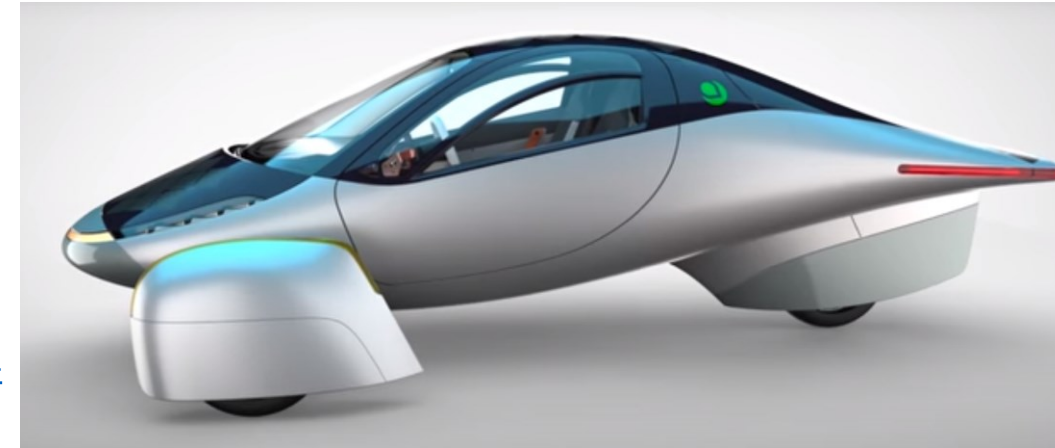
Video (9:32 min.) 2020-12 <https://www.youtube.com/watch?v=HNjUdTJjiNk>

Aptera and Elaphe Propulsion's **In-Wheel Motor Technology**

Video (1:23 min.) 2019-10 <https://www.youtube.com/watch?v=SIGKZe4EYj4>

Why is Aptera using In-Wheel Motors? (featuring Elaphe)

Video (7:30 min.) 2022-11 https://www.youtube.com/watch?v=RjISvISOW5Q&ab_channel=InstantTorque



Accionamientos de TRACCIÓN para Autos Eléctricos BEVs

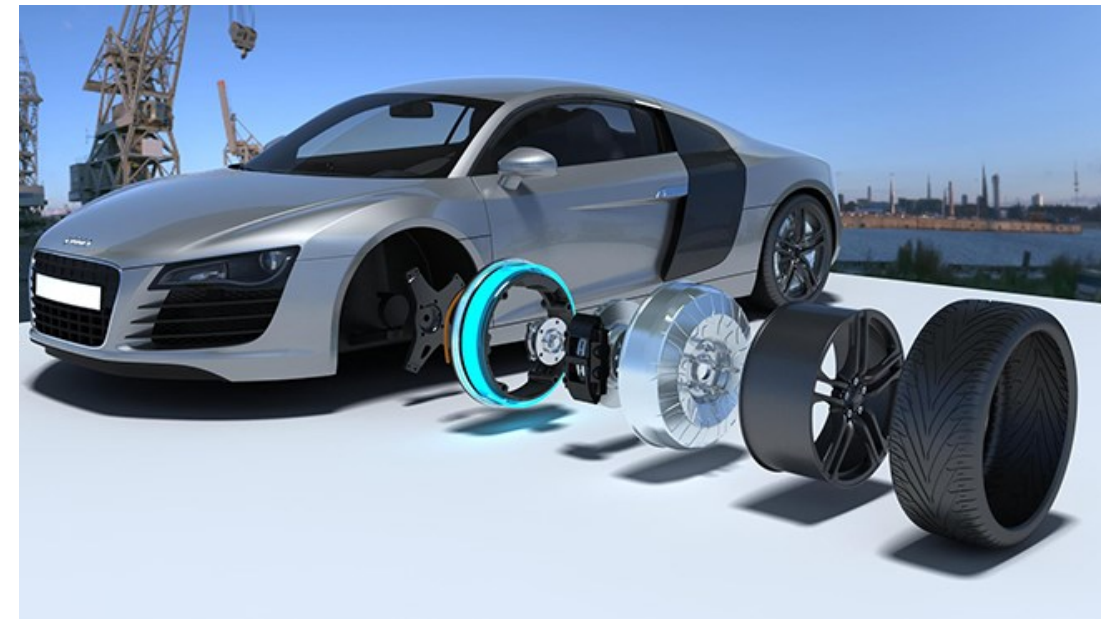
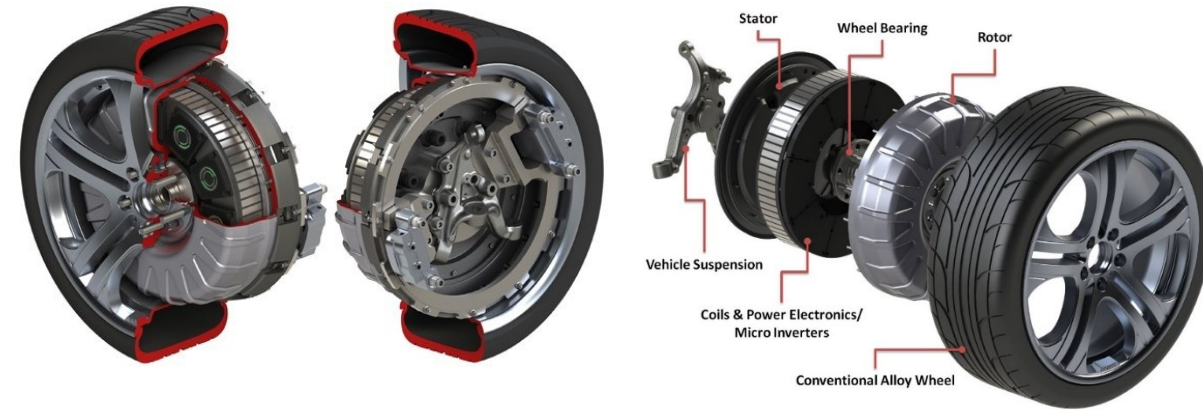
IN-WHEEL Electric Motor DIRECT Drives:

Protean In-wheel Drives <https://www.proteanelectric.com/>

Video (1:50 min.) →

In-wheel motors roll again (IEEE Spectrum July 2018) →

Elaphe PMSM In-wheel Drives <http://in-wheel.com/en/>



Elaphe EV has **no motors, gearboxes, or transmission onboard**
(Charged EVs 2018) <https://chargedevs.com/newswire/elaphe-ev-has-no-motors-gearboxes-or-transmission-onboard/>

Accionamientos de TRACCIÓN para Autos Eléctricos BEVs

LUCID Motors Tech Talks: Conceptos de Ingeniería y Diseño

<https://lucidmotors.com/tech-talks>

EPISODE 1: BATTERY Pack 36:47 min.
Keys to achieving revolutionary **range**.



EPISODE 2: SPACE Concept 31:52 min.
Minimizing components for maximum interior space and **handling dynamics** of a sports car.



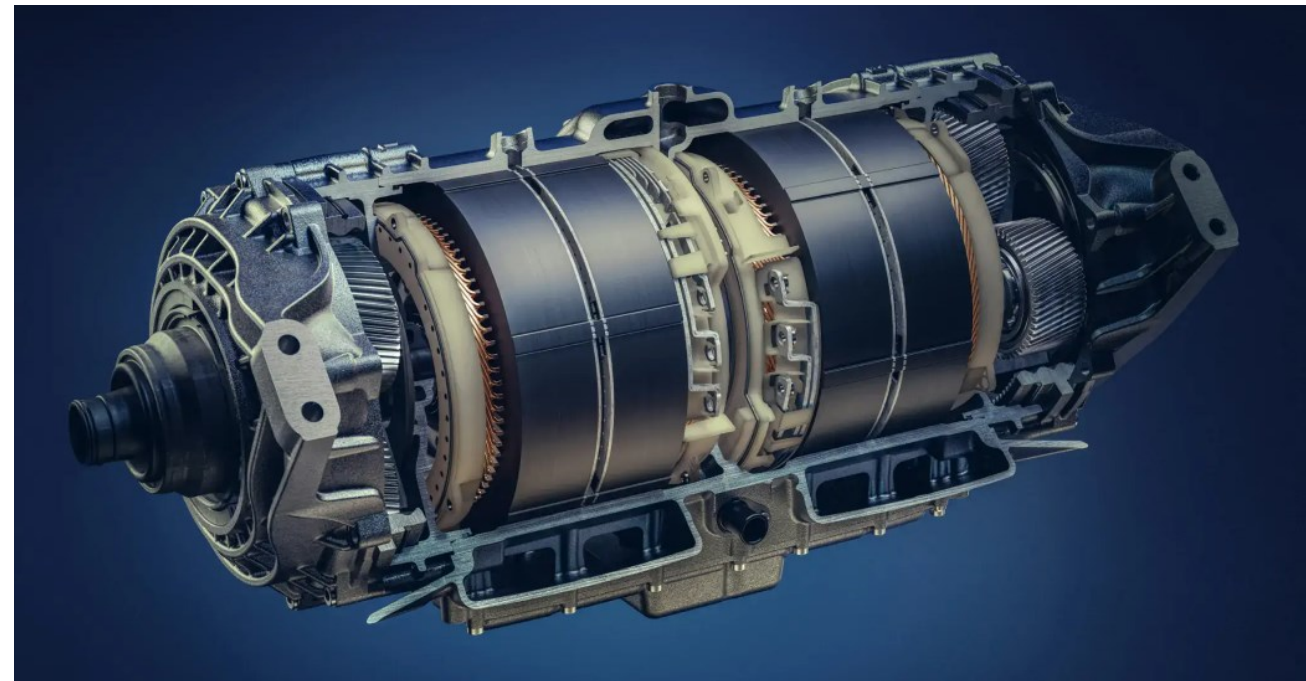
EPISODE 3: CHARGING 26:29 min.
Wonderbox: Fast. Compatible. Bi-directional.



EPISODE 4: Drive Unit: MOTOR 1:12 h
Focus on **Efficiency** above all else.
Engineering and building of the **Electric Motor**.



EPISODE 5: Drive Unit: INVERTER
29:24 min.
Efficiency of the SiC Inverter / Motor Controller.



Accionamientos de TRACCIÓN para Autos Eléctricos HEVs

VEHÍCULOS Eléctricos HÍBRIDOS

– Configuración en SERIE:

El Motor de combustión solo sirve para generar energía eléctrica y Cargar la Batería.
La Batería alimenta al/los motores eléctricos que impulsan las ruedas.

NISSAN X-TRAIL e-Power:

2 Motores Eléctricos + Batería (= Tracción Eléctrica)

+ Generador Eléctrico impulsado por Motor Térmico (para cargar batería, desconectado mecánicamente de ruedas)

Nissan e-POWER: A gateway to the electrified future

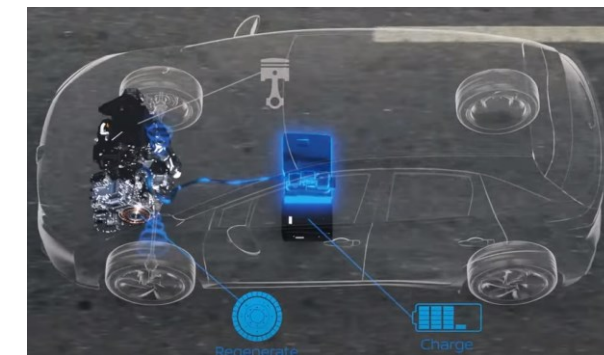
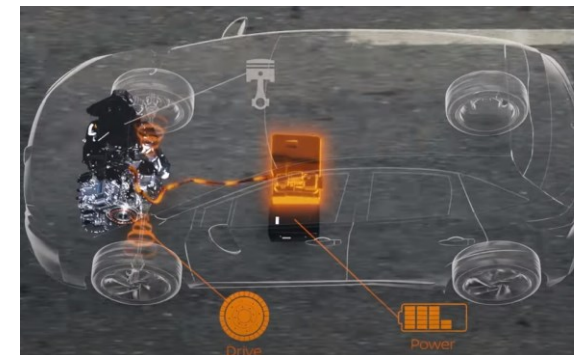
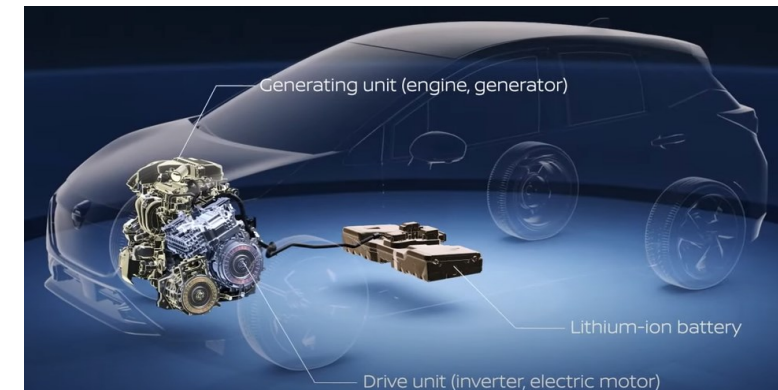
Video (4:04 min.) 2022-07

https://www.youtube.com/watch?v=4i8_74QREDc&ab_channel=Nissan

Nissan NOTE e-POWER System Explained

Video (2:46 min.) 2018-02

https://www.youtube.com/watch?v=4hLTsaMBHoY&ab_channel=DPCcars



Autos Eléctricos: Competencias Universitarias

Formula SAE / Formula HYBRID+Electric / Formula Student

Formula HYBRID+Electric

<https://www.formula-hybrid.org/>

Video (12:17 min.) 2010 IEEEtv Formula Hybrid

<https://ieeetv.ieee.org/ieeetv-specials/formula-hybrid>

Formula Student Electric - Assembly Animation

Video (2:40 min.) 2014 <https://www.youtube.com/watch?v=ITCft4dbjuM>

How Students Made Something More Advanced Than F1

Video (16:40 min.) 2024-08

https://www.youtube.com/watch?v=SYxwbJKv3yA&ab_channel=Driver61

Formula Student Germany (FSG)

<https://www.formulastudent.de/>

What is FSG?

Video (1:39 min.) 2017-08 <https://www.youtube.com/watch?v=IHjTE8Rxulk&t=83s>

EVs In Motorsport:

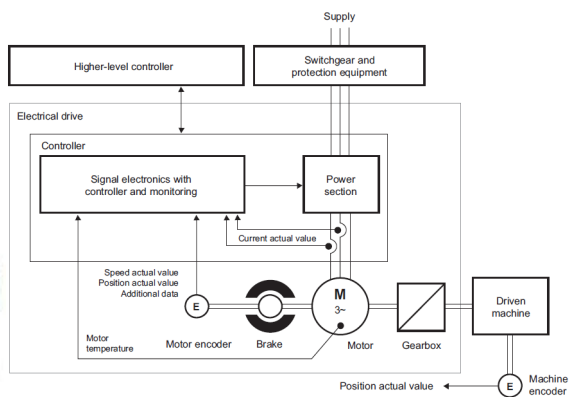
Formula SAE Electric Single Seater [TECH TALK]

Video (6:24 min.) <https://www.youtube.com/watch?v=PK5v5gQq9pc>



Unidad 1

Conversión de Energía y Control Automático



AUTOMÁTICA y MÁQUINAS ELÉCTRICAS

1. Conversión de Energía y Control Automático

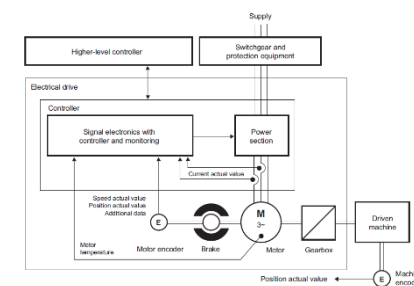
A. Concepto y Aplicaciones

- Control Automático Electrónico de Máquinas Eléctricas: Concepto y esquema general. Componentes y estructura.
- Aplicaciones Mecatrónicas → Control de Movimientos y Eficiencia Energética.



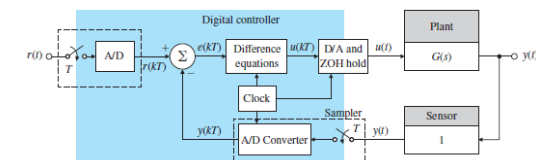
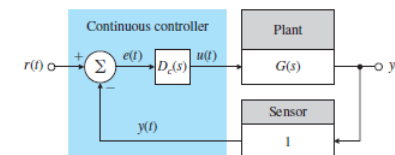
B. Fundamentos de Control de Accionamientos Eléctricos

- Accionamientos Eléctricos.
- Control Automático.
- Control Automático de Accionamientos.



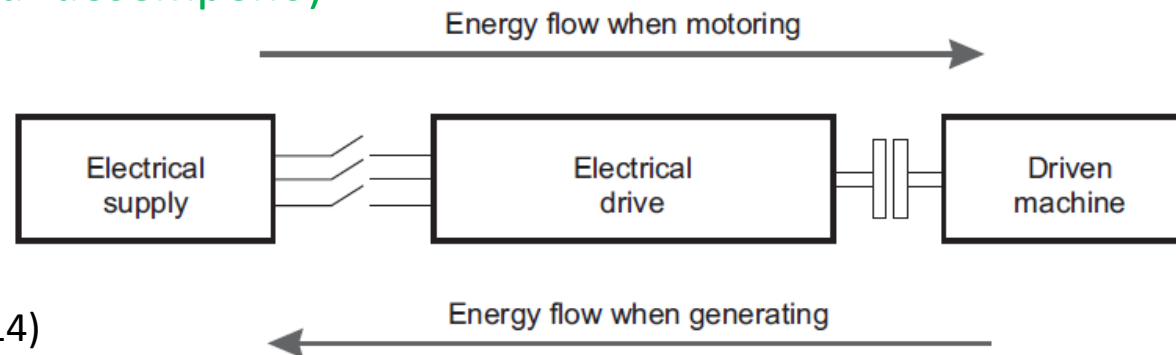
C. Conversión de Energía

- Conversión de energía eléctrica ↔ eléctrica: Convertidores Electrónicos de Potencia.
- Conversión de energía eléctrica ↔ mecánica: Máquinas Eléctricas.



Accionamiento Eléctrico: Concepto

Sistema Tecnológico que **convierte Energía Eléctrica** $\leftrightarrow$ **Energía Mecánica (Reversible)** en forma **útil (trabajo)** y **controlada (estabilidad+desempeño)**



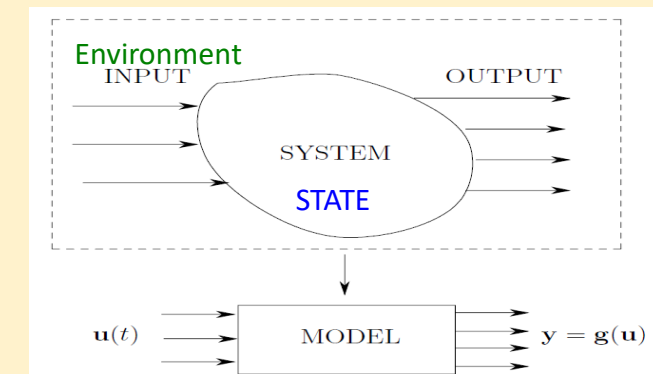
Fuente: **Electrical Drives**
(J. Weidauer, R. Messer, 2014)

SISTEMA: Conjunto de **Elementos interrelacionados**, considerado como **un Todo** en contexto definido, y **separado** de su **Entorno o Ambiente**, con intercambio de variables o señales físicas y/o lógicas (Energía y/o Información).

SYSTEM: Set of **interrelated Elements** considered as a **Whole** in a defined context and **separated** from their **Environment**.

- A system is generally defined with the view of **achieving a given objective**, for example by **performing a definite function**.
- Elements of a system may be natural or man-made material objects, as well as modes of thinking and the results thereof (for example forms of organization, mathematical methods, programming languages).
- The system is considered to be **separated** from the **environment** and the other external systems **by an imaginary surface**, through which pass the links (i.e. signals or variables) between them and the considered system.
- The term "system" should be qualified when it is not clear from the context to what it refers, for example control system, calorimetric system, system of units, transmission system.

MODEL: mathematical or physical **Representation** of a **System** or a process, based with **sufficient precision** upon **known laws**, **identification**, or specified suppositions.

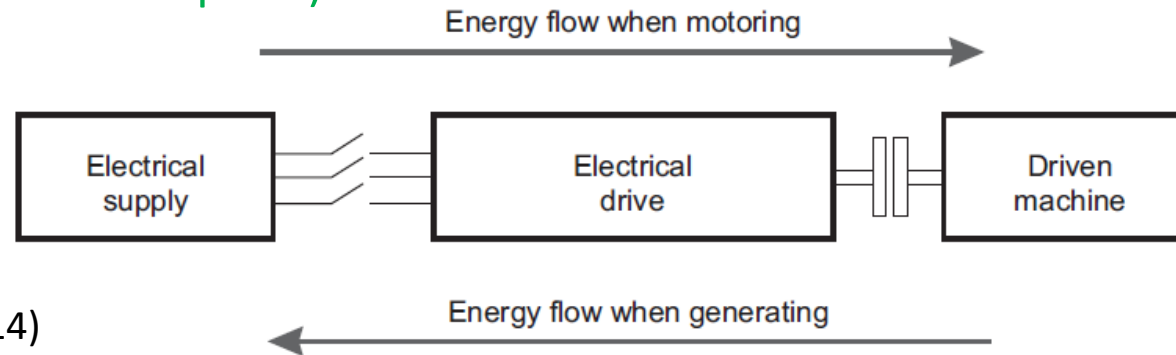


Fuente: **IEC 60050 Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary**

<https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=351-42-08> / <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=351-42-26>

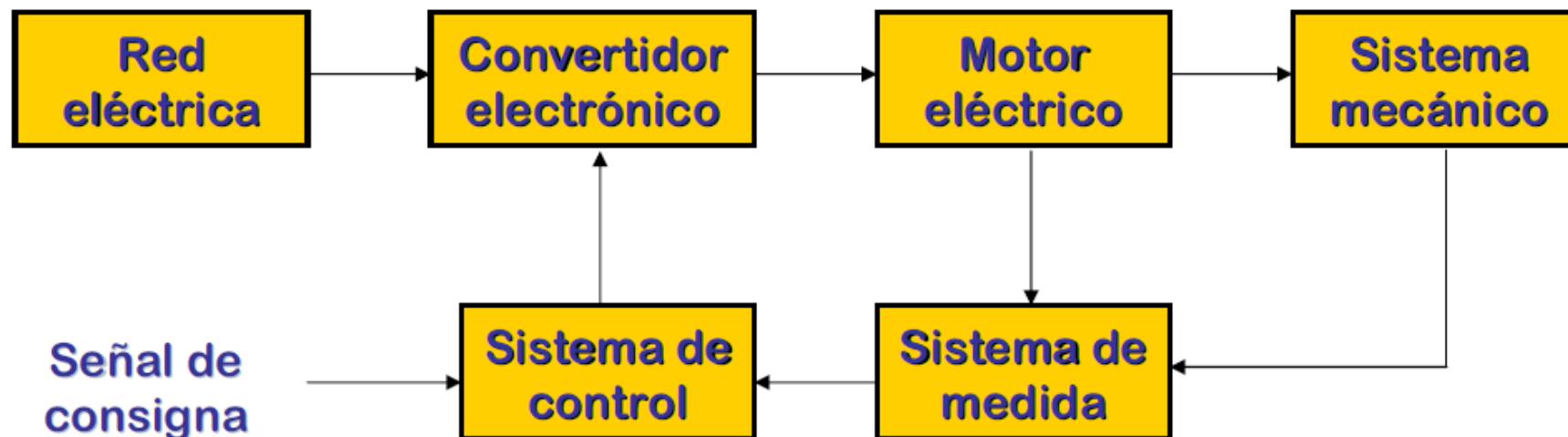
Accionamiento Eléctrico: Concepto

Sistema Tecnológico que **convierte Energía Eléctrica** $\leftrightarrow$ **Energía Mecánica (Reversible)** en forma **útil (trabajo)** y **controlada (estabilidad+desempeño)**



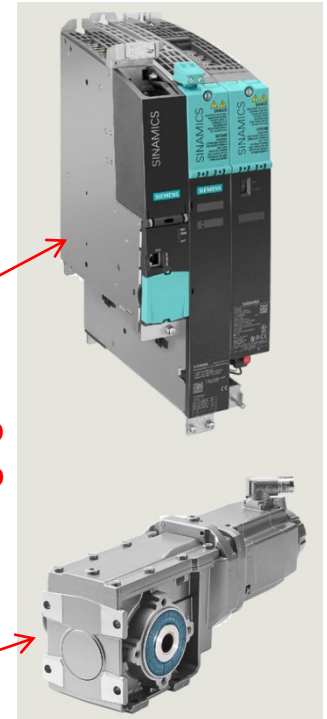
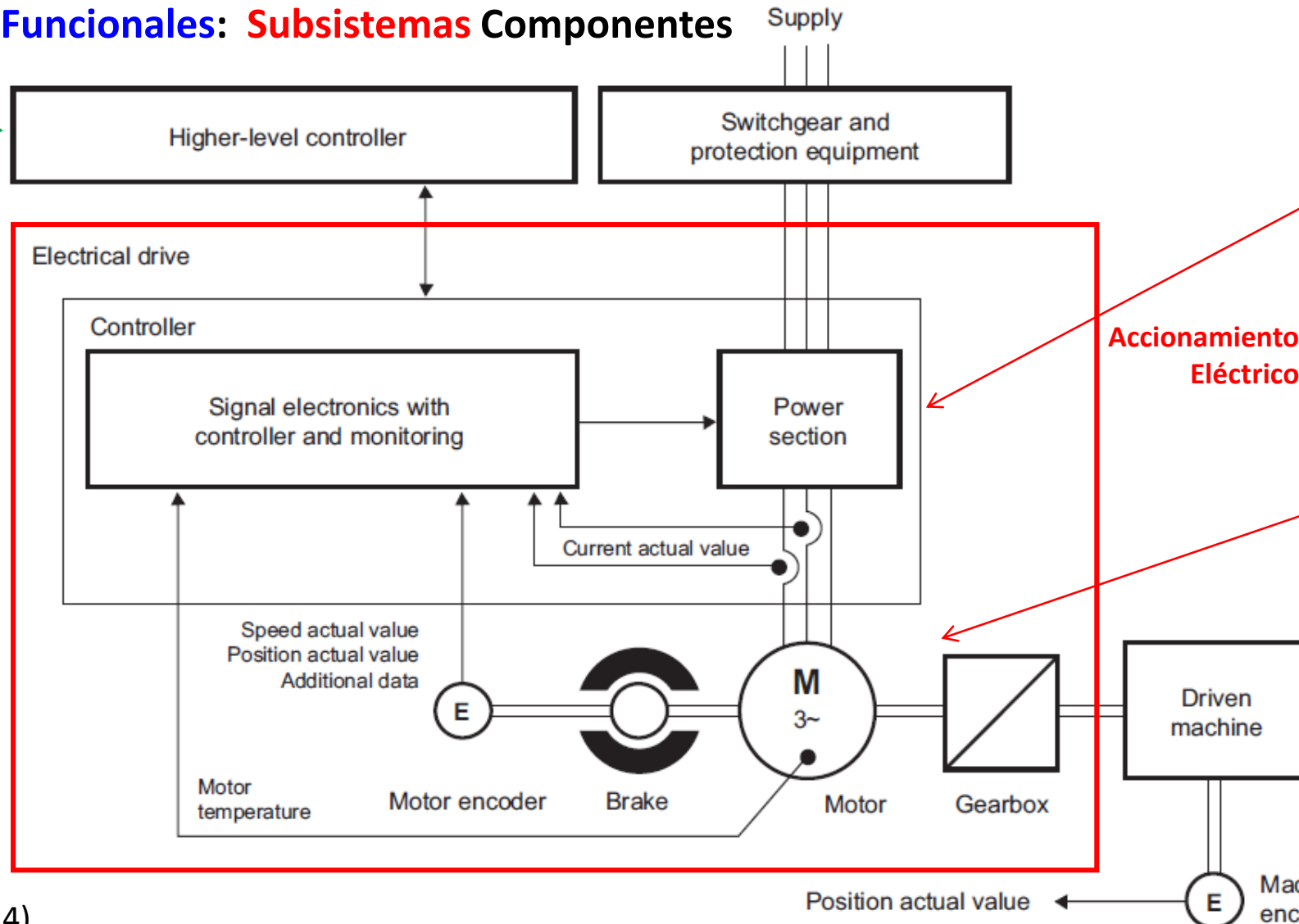
Fuente: **Electrical Drives**
(J. Weidauer, R. Messer, 2014)

Diagrama de Bloques Conceptual: Subsistemas Componentes



Accionamiento Eléctrico Moderno: Componentes

Diagrama de Bloques Funcionales: **Subsistemas** Componentes



Fuente: **Electrical Drives**
(J. Weidauer, R. Messer, 2014)

Accionamiento Eléctrico Moderno

Ejemplo: SIEMENS Simotics S-1FK2 motor with Sinamics S210 converter

<https://new.siemens.com/us/en/products/drives/sinamics-electric-drives/low-voltage-drives/servo-drives/sinamics-s210.html>

- Controlador de Nivel Supervisor:
PLC – PAC – Industrial PC (→ 317 AyCD)
- Controlador Electrónico de Accionamiento:
Power Electronics Drive
- Máquina Eléctrica: **Servomotor**



Accionamiento Eléctrico: Concepto

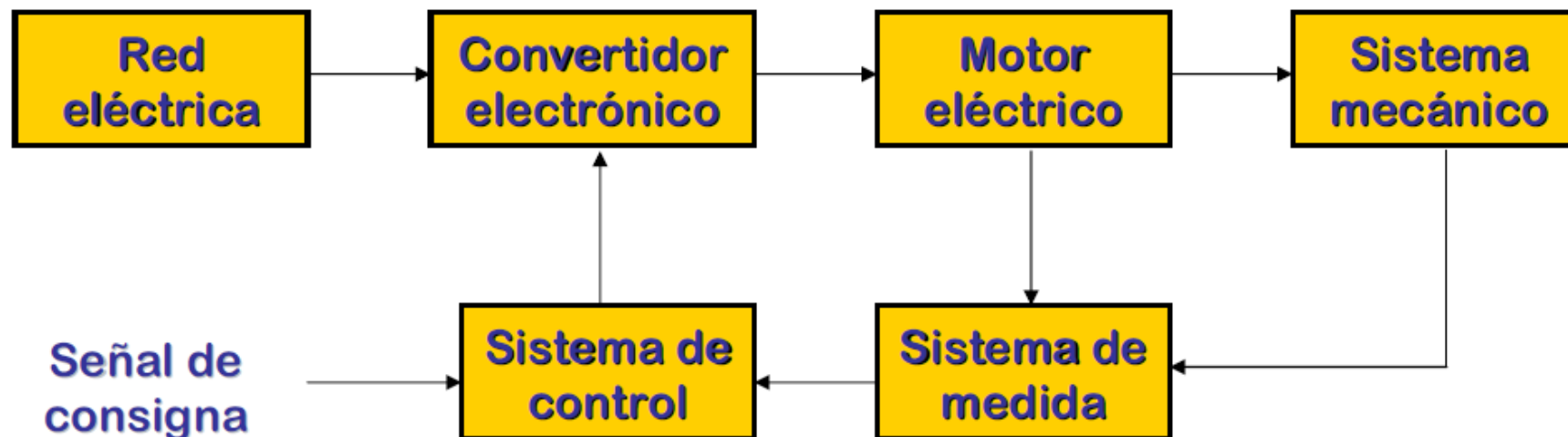
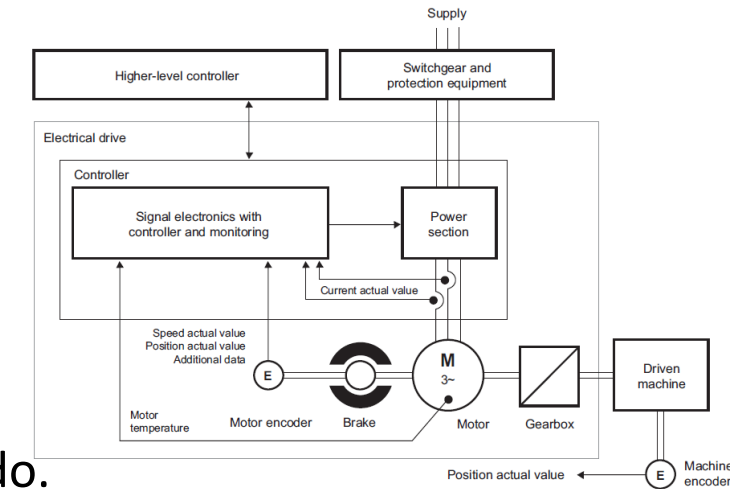
Sistema Tecnológico que **convierte Energía Eléctrica** $\leftrightarrow$ **Energía Mecánica (Reversible)** en forma **útil (trabajo)** y **controlada (estabilidad+desempeño)**

Variables controladas:

(dependiendo de la aplicación; se controla al menos una de ellas)

- **Posición** / **Velocidad** / **Aceleración**
- **Torque** / **Potencia** = Torque x Velocidad
- **Temperatura** (monitoreo y protección / limitación)
- Variables de **Proceso** de interés en la Aplicación (Lazo Externo)

CONTROL AUTOMÁTICO Electrónico: Lazo abierto vs. Lazo cerrado Retroalimentado.



Sistema Mecánico: Carga o Impulsor Mecánico

Máquina impulsada: realiza trabajo mecánico, consumiendo energía del motor (**Motorización**); ó **Impulsor (Prime Mover)**: turbina, motor térmico, etc., devolviendo energía (**Regeneración**).

Aplicaciones con distintas Características **Torque (o Fuerza) resistente** vs. **Velocidad**:

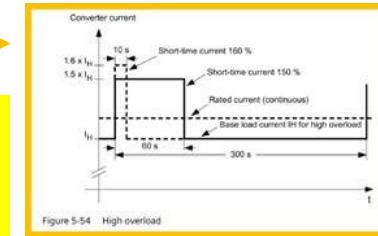
- **Torque 'constante'**, independiente de velocidad (**Izajes** en Grúas, Guinches; Robots: efecto de gravedad constante).
- **Torque 'variable'**, dependiente de velocidad (**Ventiladores y Bombas**: efecto de fricción fluidodinámica).

Tipos de Servicio o Utilización (DUTY): Continuo, Periódico, Intermitente, etc. →

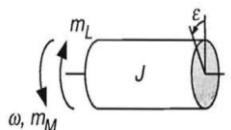
POTENCIA Mecánica instantánea (en cada instante de Tiempo t [s]):

Rotación: Potencia (t) [W] = **Torque** (t) [N.m] . **Velocidad angular** (t) [rad/s]

Traslación: Potencia (t) [W] = **Fuerza** (t) [N] . **Velocidad traslación** (t) [m/s]



Modelo Físico
Idealizado 1 d.o.f.



$$P(t) = \vec{T}(t) \cdot \vec{\omega}(t)$$

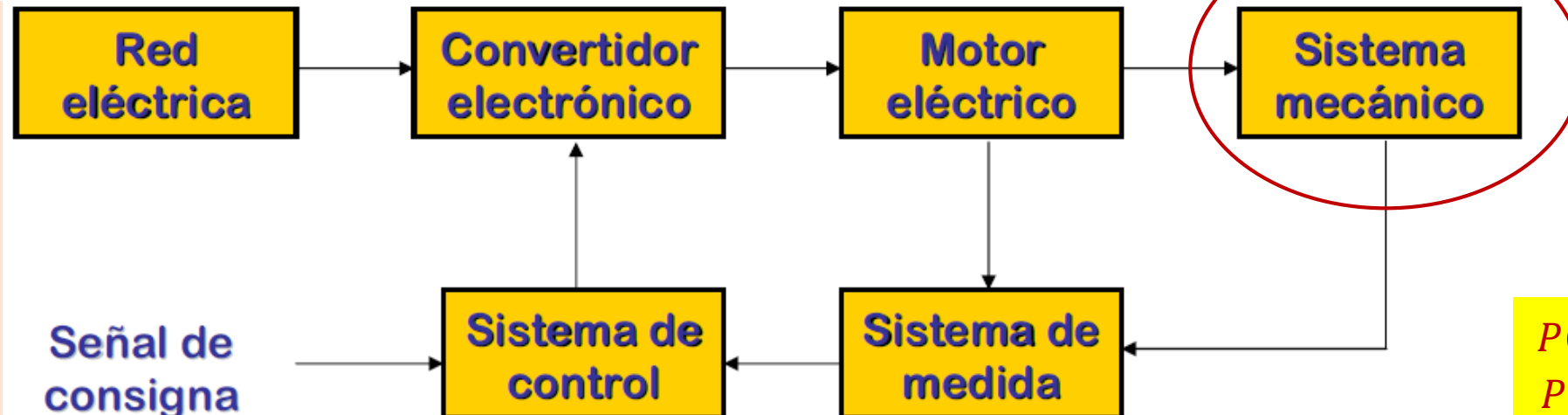
$$P(t) = \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t)$$

Magnitudes Físicas:

Escalares ($\mathbb{R}$):
Tiempo.

Masa, Inercia.
Energía, Trabajo,
Potencia.

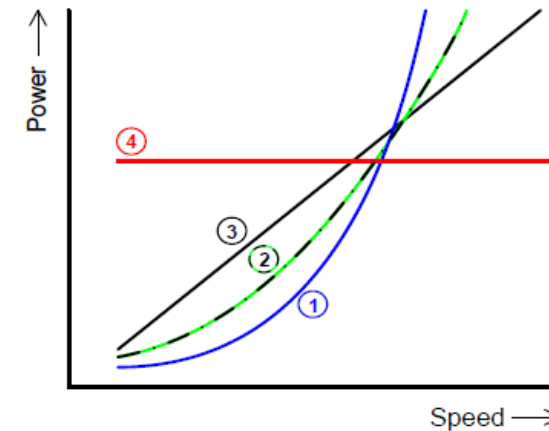
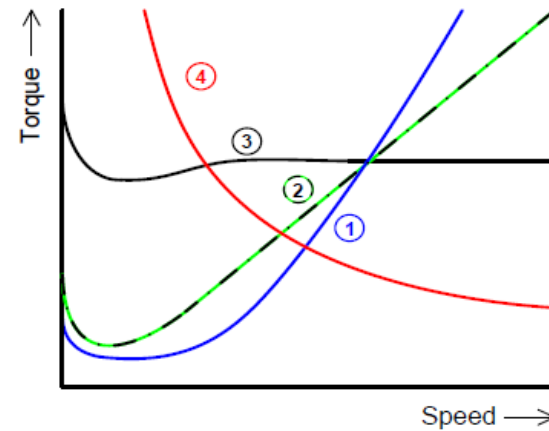
Vectoriales ($\mathbb{R}^3$):
Posición, Velocidad,
Aceleración,
Torque, Fuerza.



Sistema Mecánico: Carga o Impulsor Mecánico

Características Típicas: TORQUE DEMANDADO o DE CARGA T_l en función de Velocidad rotación

- Torque CUADRÁTICO** (trabajo por fricción líquida o gaseosa, i.e. fluido-dinámica).
- Torque Proporcional** (trabajo por deformación o fricción viscosa).
- Torque virtualmente CONSTANTE** (trabajo por compresión, cizallado o corte, fricción por deslizamiento o rodadura, izaje contra fuerza de gravedad).
- Torque hiperbólico** = Inversamente Proporcional $\rightarrow$ **Potencia Constante** (trabajo por bobinado, fuerza de tracción).



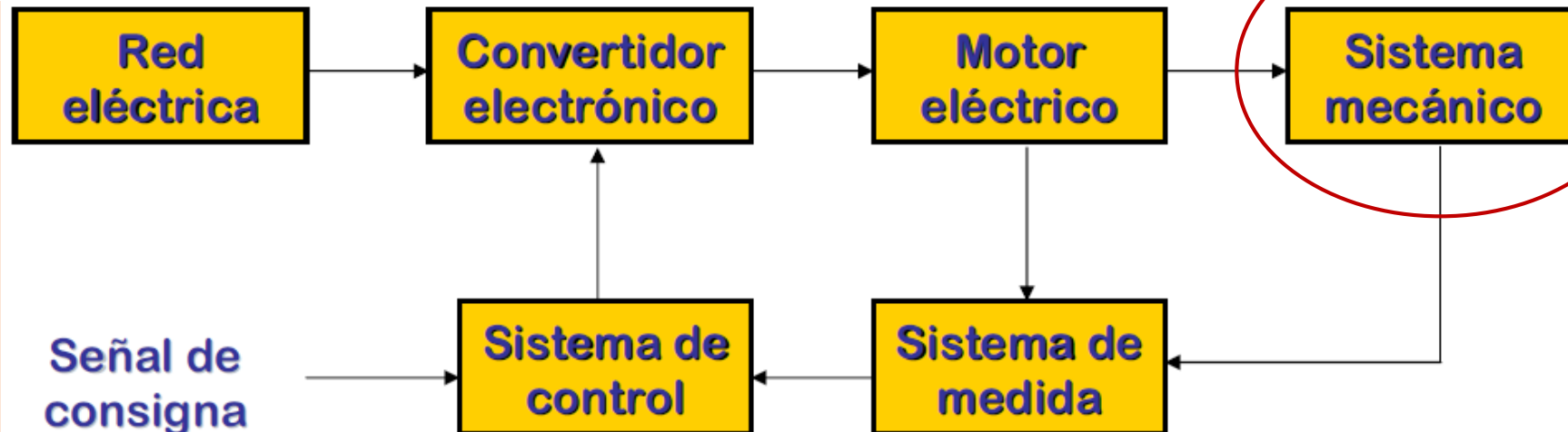
$\rightarrow$ Condiciona el DIMENSIONAMIENTO (Tipo, Capacidad y Tamaño) del Accionamiento.

Magnitudes Físicas:

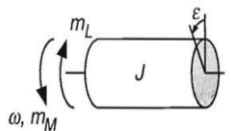
Escalares ($\mathbb{R}$):
Tiempo.

Masa, Inercia.
Energía, Trabajo,
Potencia.

Vectoriales ($\mathbb{R}^3$):
Posición, Velocidad,
Aceleración,
Torque, Fuerza.



Modelo Físico
Idealizado 1 d.o.f.



$$P(t) = \vec{T}(t) \cdot \vec{\omega}(t)$$

$$P(t) = \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t)$$

Máquina Eléctrica: Convertidor de Energía Reversible

Motorización / Frenado Regenerativo (Conversión Electro-Mecánica Reversible o Bidireccional).

Máquinas Eléctricas:

- **Máquinas de CC:** Más **simples de controlar**, pero más complejas, pesadas y caras.
Excitación: **Imanes Permanentes** (Fija) vs. **Excitación Separada**; serie, paralelo (Variable).
- **Máquinas de CA:** Más **robustas**, menor mantenimiento y costo, mejor **respuesta dinámica** y dens. Potencia.
 - **SINCRÓNICA:** Excitación con **Imanes Permanentes** / Excitación **Separada** / de **Reluctancia**.
 - **ASINCRÓNICA o de INDUCCIÓN:** Rotor Bobinado / **DFIM** vs. Rotor **Jaula de Ardilla** (en Cortocircuito).

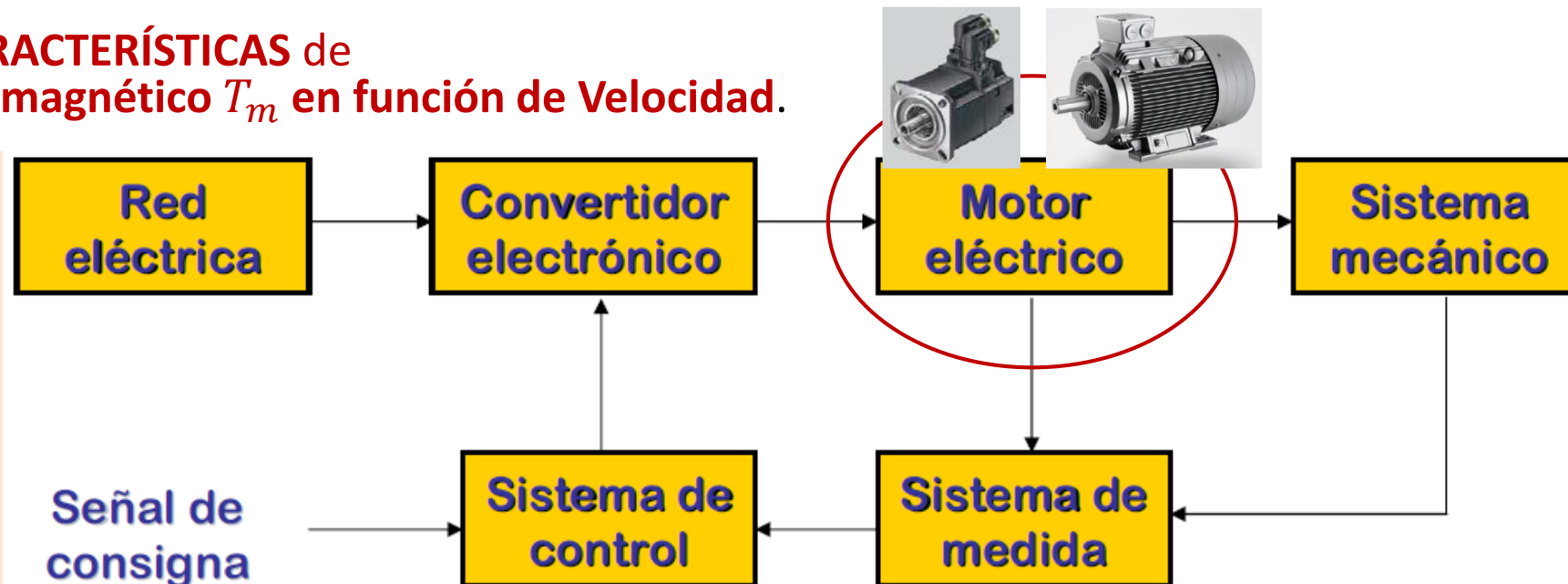
→ Diferentes **CARACTERÍSTICAS** de **Torque electromagnético T_m en función de Velocidad.**

Magnitudes Físicas:

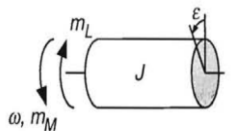
Escalares ($\mathbb{R}$):
Tiempo.

Masa, Inercia.
Energía, Trabajo,
Potencia.

Vectoriales ($\mathbb{R}^3$):
Posición, Velocidad,
Aceleración,
Torque, Fuerza.



Modelo Físico
Idealizado 1 d.o.f.



$$P(t) = \vec{T}(t) \cdot \vec{\omega}(t)$$

$$P(t) = \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t)$$

Máquina Eléctrica: Convertidor de Energía Reversible

Principios Físicos de **Conversión Reversible** de Energía Eléctrica $\leftrightarrow$ Mecánica:

Interacción entre Campos Electromagnéticos de Rotor y Estator $\rightarrow$
 $\rightarrow$ Acoplamiento y Fuerzas **Relativas** $\rightarrow$ intercambio de energía eléctrica-mecánica.

2 efectos **simultáneos y complementarios**:

Efecto MOTOR: Fuerza de **Lorenz** (Relativo Rotor – Estator)

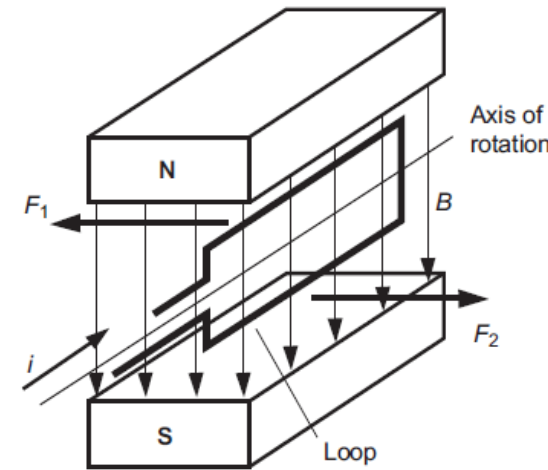
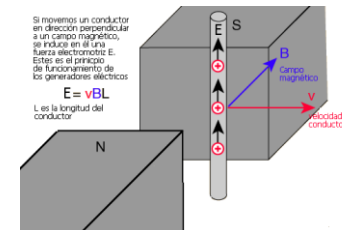
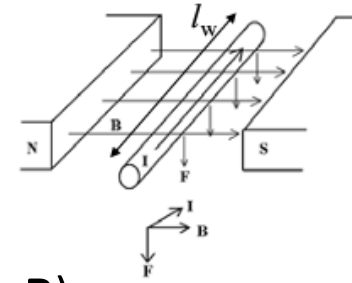
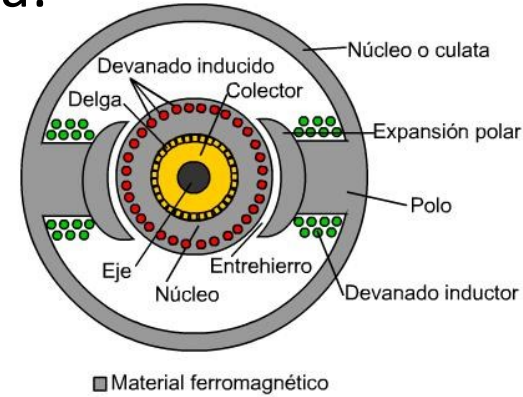
Corriente eléctrica $\vec{I}$ [A] en conductor de longitud l_w [m]
 inmerso en campo magnético con Densidad de Flujo $\vec{B}$ [T] $\rightarrow$

$\rightarrow$ **Fuerza impulsora ó frenante (Lorenz)** $\vec{F}$ [N]: $\vec{F} = (\vec{I} \cdot l_w) \times \vec{B} \rightarrow$
 $\rightarrow$ **aceleración (Newton)**: $\vec{a} = \vec{F}/m \rightarrow$ velocidad $\vec{v} \left[\frac{m}{s} \right]$ (**movimiento**)
 (+ **Fuerza de Reluctancia** en núcleo ferromagnético móvil desalineado en $\vec{B}$).

Efecto GENERADOR: Tensión inducida de **Faraday-Lenz**

Conductor de long. l_w [m] en **movimiento** $\vec{v} \left[\frac{m}{s} \right]$
 inmerso en campo magnético con densidad de flujo $\vec{B}$ [T] $\rightarrow$

$\rightarrow$ **Tensión inducida (Faraday-Lenz)** $\vec{E}$ [V] = $-N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$: $\vec{E} = (\vec{v} \cdot l_w) \times \vec{B} \rightarrow$
“f.e.m.” $\rightarrow$ corriente eléctrica (si se cierra circuito).



Máquina Eléctrica: Dinámica, Equilibrios y Estabilidad

CARACTERÍSTICAS de Torque T_m vs T_l en función de Velocidad:

Motor [ej. ACIM] vs. Carga [ej. $T_l = \text{const.}$]

→ Régimen Transitorio / Permanente (Arranque **DOL**):
(DOL=Direct On Line)

Puntos de “Equilibrio” Dinámico: $T_m(t) = T_l(t)$

→ condición de **ESTABILIDAD**: $\frac{\partial T_m}{\partial \Omega} < \frac{\partial T_l}{\partial \Omega}$

Equilibrio **Estable** → Punto **A** (perturb. → restituye)

Equilibrio **Inestable** → Punto **B** (perturb. → diverge)

Equilibrio **Indiferente** (no en este ejemplo)

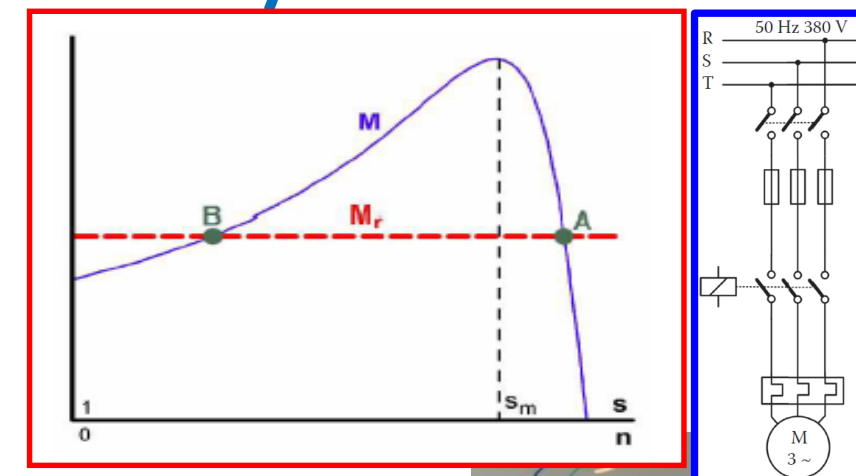
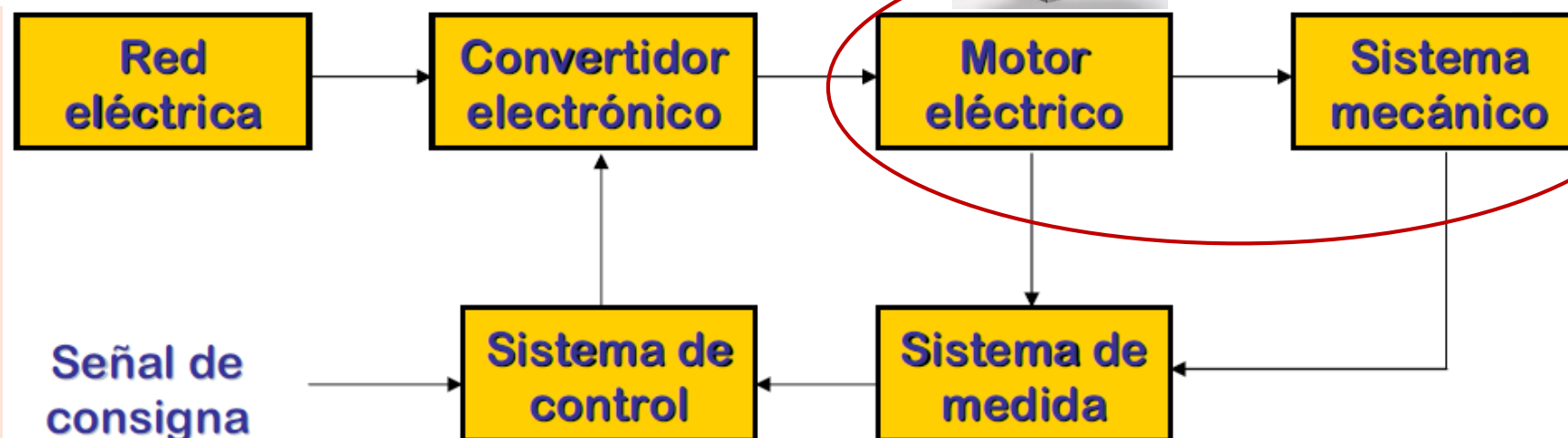
Proceso DINÁMICO de Arranque (aceleración): $T_m(t) > T_l(t)$

Magnitudes Físicas:

Escalares ($\mathbb{R}$):
Tiempo.

Masa, Inercia.
Energía, Trabajo,
Potencia.

Vectoriales ($\mathbb{R}^3$):
Posición, Velocidad,
Aceleración,
Torque, Fuerza.

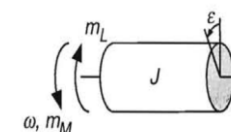


$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_m} \sum T = \frac{1}{J_m} (T_m(t) - T_l(t)) - b \omega_m$$

$$J_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_m(t) - T_l(t)$$

$$\frac{d\Theta_m}{dt} = \omega_m(t)$$

Modelo Físico
Idealizado 1 d.o.f.



$$P(t) = \vec{T}(t) \cdot \vec{\omega}(t)$$

$$P(t) = \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t)$$

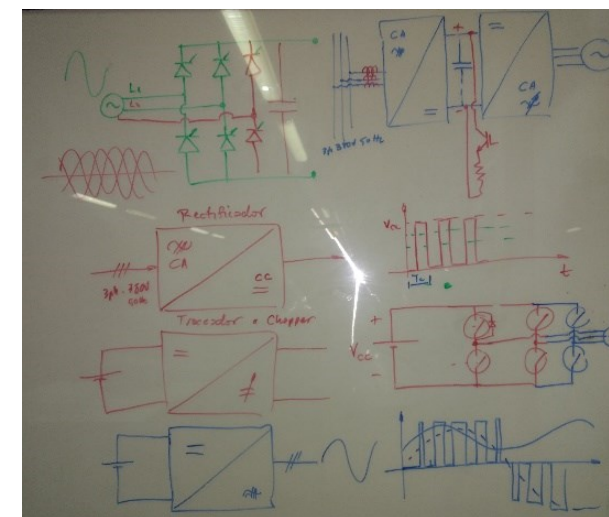
Convertidor Electrónico de Potencia:

Conversión de energía eléctrica desde red o fuente (fija) $\leftrightarrow$ **eléctrica** hacia la Máquina Eléctrica (variable):
Proceso **REVERSIBLE**: ambos sentidos vs. **UNIDIRECCIONAL**: un solo sentido (depende de Topología y Llaves).

Distintos tipos:

- **CA/CC**: **Rectificador** (conmutación natural [diodos] / controlado [SCRs/IGBTs, etc.]).
- **CC/CC**: **Troceador o Chopper** (controlado [MOSFETs/IGBTs, etc.]).
- **CC/CA**: **Inversor** (controlado [MOSFETs/IGBTs, etc.]).
- **CA/CA**: **Cicloconvertidor** (1 etapa [SCRs]) vs. **Convertidor** (c/ bus CC intermedio).

→ Diferentes **CUADRANTES de Operación** posibles.

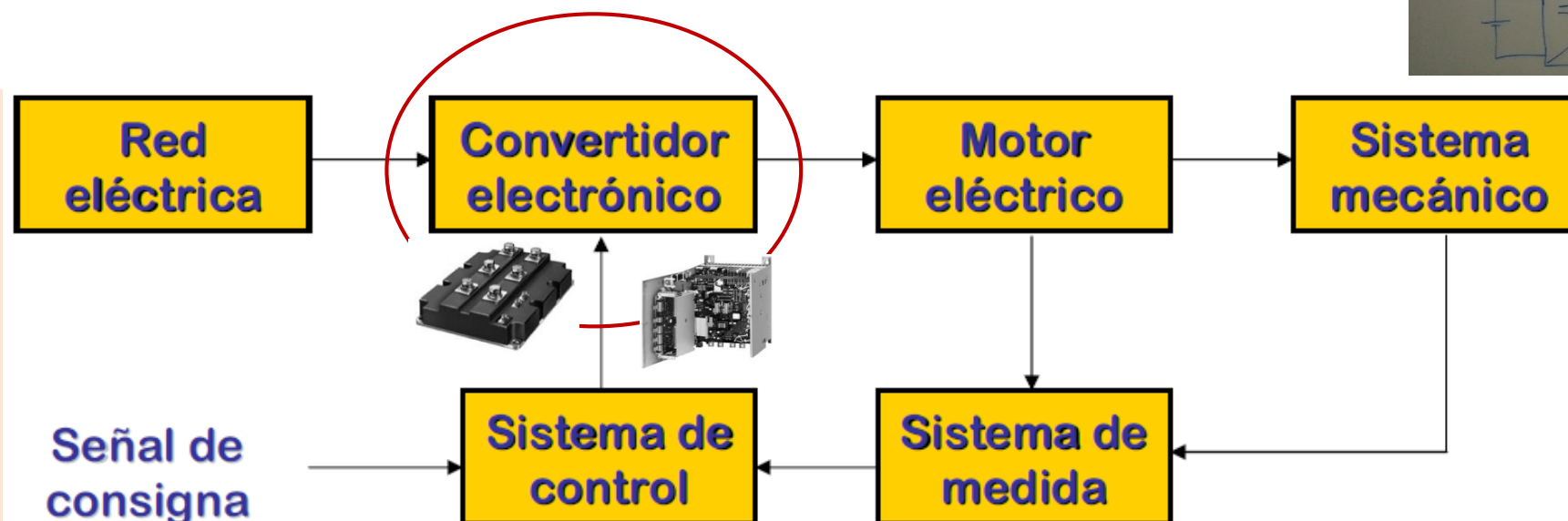


Magnitudes Físicas:

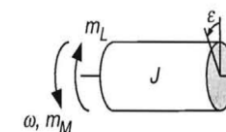
Escalares ($\mathbb{R}$):
Tiempo.

Masa, Inercia.
Energía, Trabajo,
Potencia.

Vectoriales ($\mathbb{R}^3$):
Posición, Velocidad,
Aceleración,
Torque, Fuerza.



Modelo Físico
Idealizado 1 d.o.f.

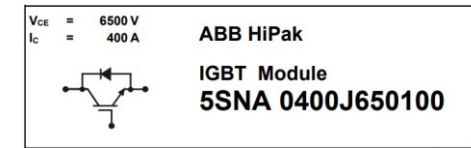
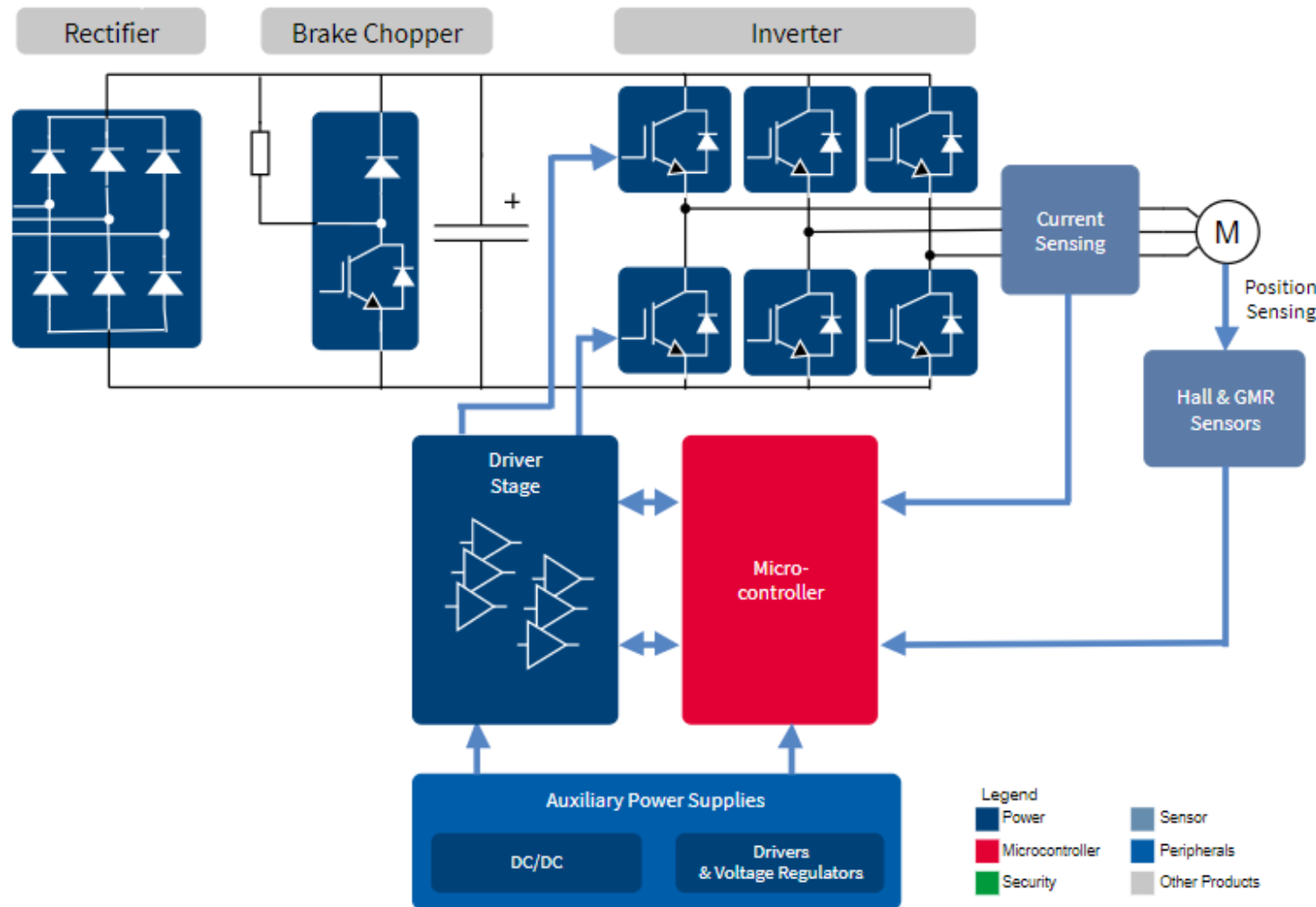


$$P(t) = \vec{T}(t) \cdot \vec{\omega}(t)$$

$$P(t) = \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t)$$

Convertidor Electrónico de Potencia:

Convertidor Típico **CA** → **CC (DC Link)** ↔ **CA** en Aplicaciones Industriales de Baja Tensión



- Low-loss, rugged SPT chip-set
- Smooth switching SPT chip-set for good EMC
- High insulation package
- AISIC base-plate for high power cycling capability
- AlN substrate for low thermal resistance
- Improved high reliability package
- Recognized under UL1557, File E196689



Convertidor Electrónico de Potencia:

Qué es un **IGBT**: Insulated-Gate Bipolar Transistor (Video 2019-07, 17 min.)

<https://www.youtube.com/watch?v=vuphekTdZGU>

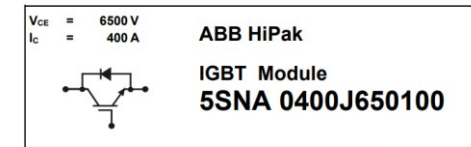
Ej. ABB 5SNA 0400J650100 HMFk13

https://library.e.abb.com/public/1eda3a30244c484fa0adc56d1d24af5c/5SNA%200400J650100_5SYA%201592-04%2005-2016.pdf

Applying IGBTs (ABB Application Note 5SYA 2053-04):

ABB Semiconductor Simulation tool: **SEMIS**

<https://www.hitachiabb-powergrids.com/offering/product-and-system/semiconductors/semis>



- Low-loss, rugged SPT chip-set
- Smooth switching SPT chip-set for good EMC
- High insulation package
- AISiC base-plate for high power cycling capability
- AlN substrate for low thermal resistance
- Improved high reliability package
- Recognized under UL1557, File E196689



Cómo funciona un Convertidor Electrónico de Potencia (ej. Inversor c/ fuente tensión VSI 2 niveles PWM c/IGBTs)

Infineon Technologies Austria:

<https://www.youtube.com/watch?v=clpEw69-7jk>

Magnitudes Físicas:

Escalares ($\mathbb{R}$):

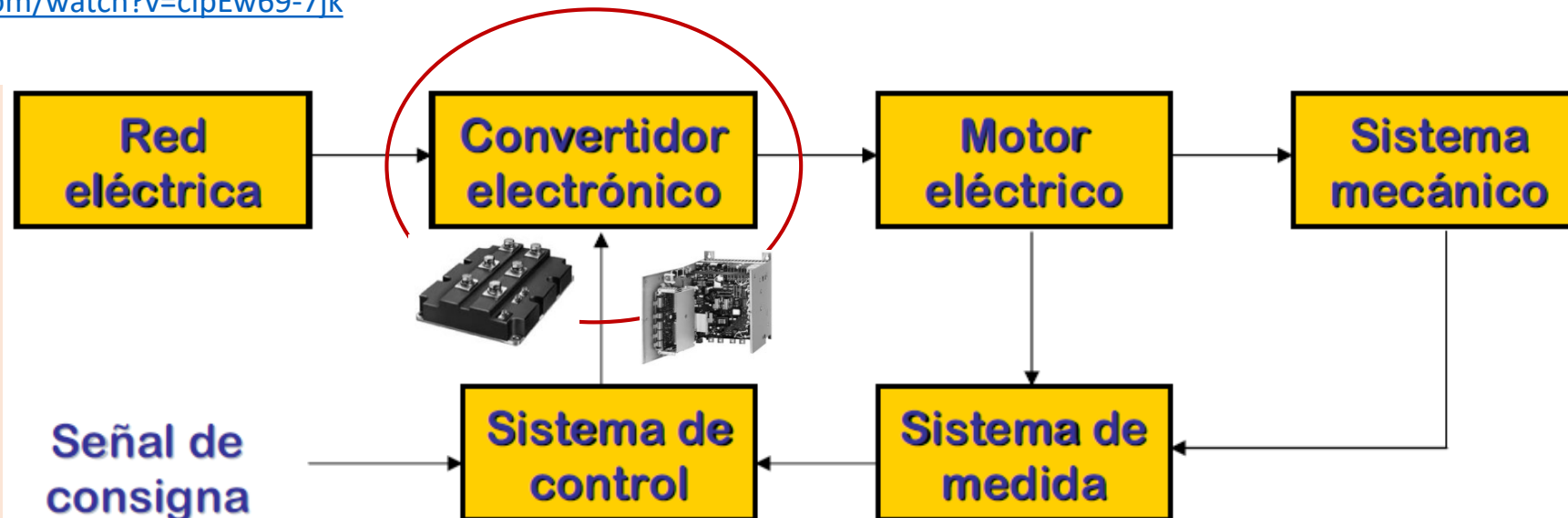
Tiempo.

Masa, Inercia.

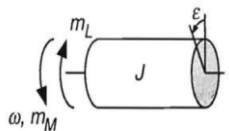
Energía, Trabajo,
Potencia.

Vectoriales ($\mathbb{R}^3$):

Posición, Velocidad,
Aceleración,
Torque, Fuerza.



Modelo Físico
Idealizado 1 d.o.f.



$$P(t) = \vec{T}(t) \cdot \vec{\omega}(t)$$

$$P(t) = \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t)$$

Conversión de POTENCIA: Cuadrantes

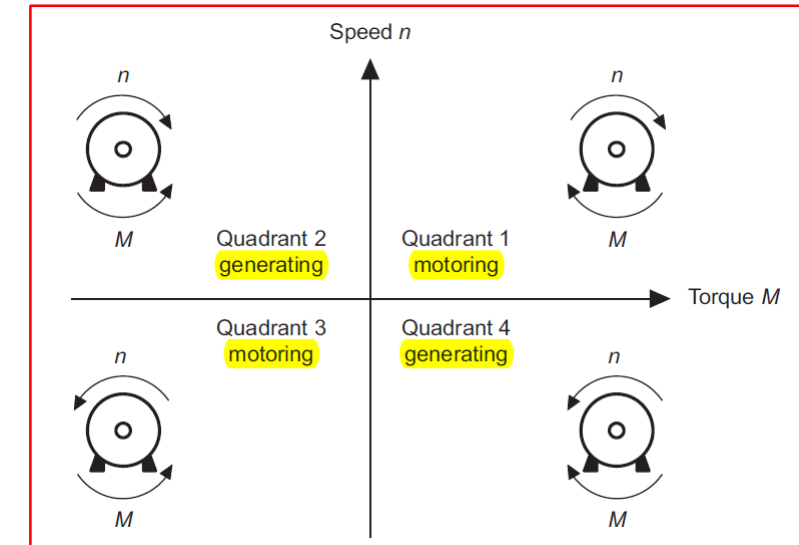
Cuadrantes de Operación: Según la capacidad del Convertidor en transferencia bidireccional de energía:

Máquina eléctrica: reversible.

Convertidor electrónico: reversible o no, según configuración.

Accionamiento electromecánico:

- **1 cuadrante:** motorización directa
- **2 cuadrantes:** motorización directa/inversa ó motorización / frenado directo
- **4 cuadrantes**

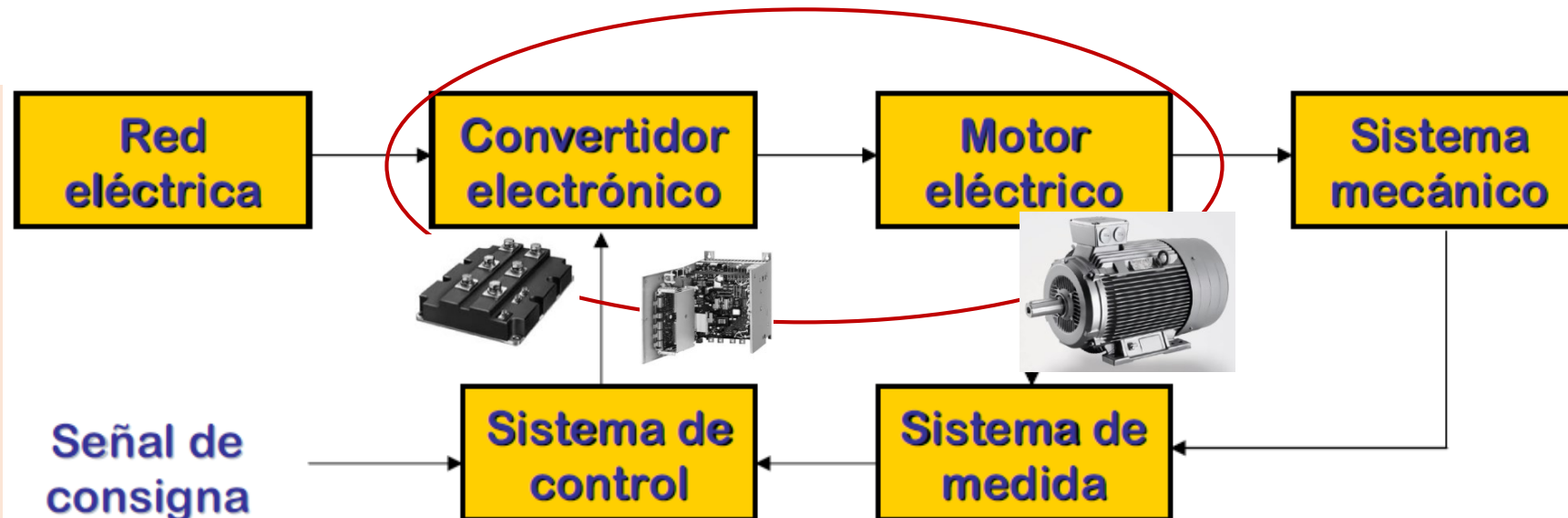


Magnitudes Físicas:

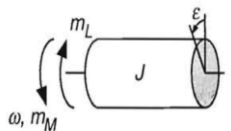
Escalares ($\mathbb{R}$):
Tiempo.

Masa, Inercia.
Energía, Trabajo,
Potencia.

Vectoriales ($\mathbb{R}^3$):
Posición, Velocidad,
Aceleración,
Torque, Fuerza.



Modelo Físico
Idealizado 1 d.o.f.



$$P(t) = \vec{T}(t) \cdot \vec{\omega}(t)$$

$$P(t) = \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t)$$

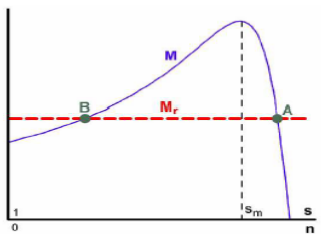
Conversión de POTENCIA: Característica T-P-n

Características o Curvas de Torque y Potencia vs. Velocidad:
(ej.: Accionamiento **VSD** c/ máquina inducción **ACIM**)

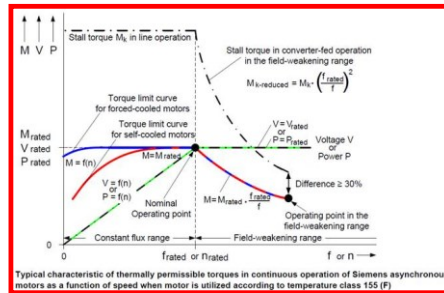
Torque constante: $n < n_{base}$

Potencia constante: $n_{base} < n < n_{reduced}$

Potencia reducida: $n_{reduced} < n$

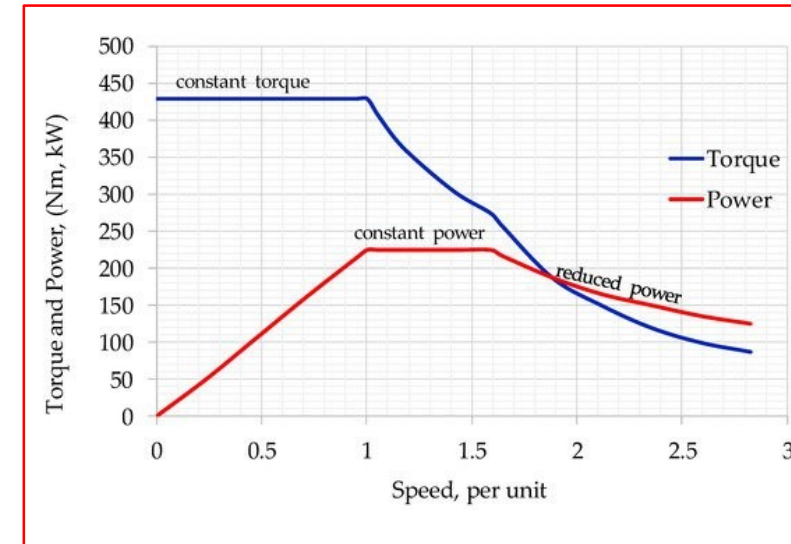


DOL → VSD



DOL: Direct-On-Line

VSD: Variable Speed Drive



Magnitudes Físicas:

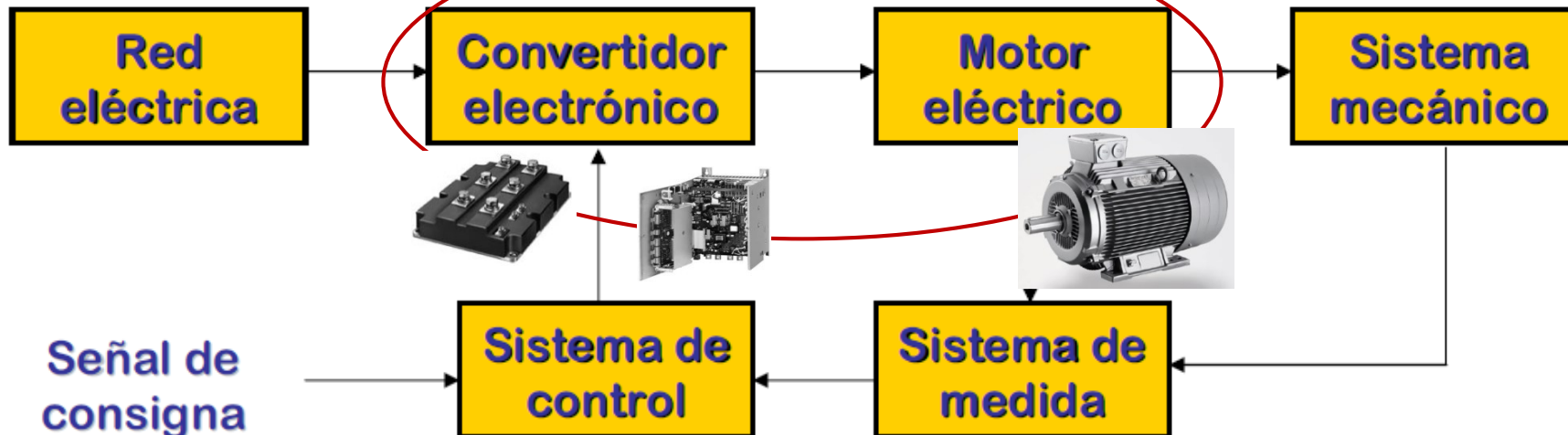
Escalares ($\mathbb{R}$):
Tiempo.

Masa, Inercia.

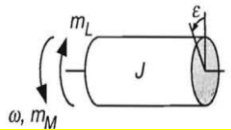
Energía, Trabajo,
Potencia.

Vectoriales ($\mathbb{R}^3$):

Posición, Velocidad,
Aceleración,
Torque, Fuerza.



Modelo Físico
Idealizado 1 d.o.f.



$$P(t) = \vec{T}(t) \cdot \vec{\omega}(t)$$

$$P(t) = \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t)$$

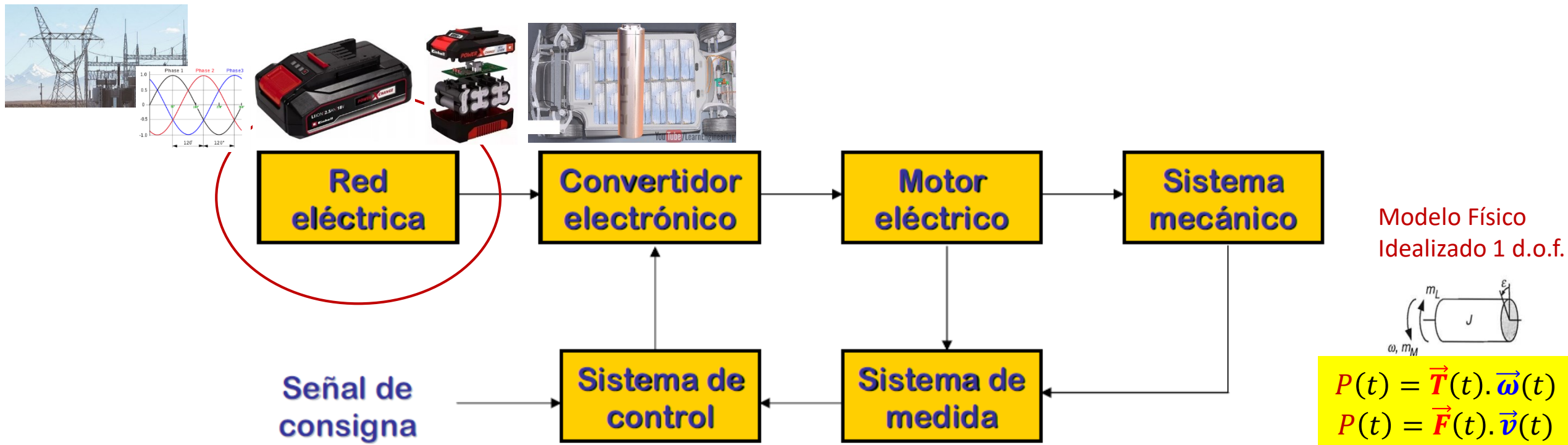
Sistema Eléctrico: Fuente o Consumidor Eléctrico

- Provee la **energía eléctrica** necesaria para convertir en energía mecánica de accionamiento.
- En ciertos casos puede **recibir energía recuperada o regenerada de la carga mecánica** (frenado regenerativo, generación eléctrica, etc.)

Sus **características** determinan el **tipo de interface eléctrica** requerida en el Convertidor Electrónico.

CC (ej. Batería) vs. **CA** trifásica o monofásica, etc.

Tensión / frecuencia. Calidad de energía eléctrica (armónicos, perturbaciones, estabilidad), Etc.

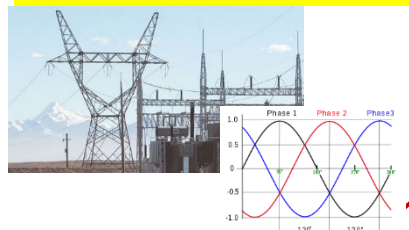


Sistema Eléctrico: Fuente o Consumidor Eléctrico

- Provee la **energía eléctrica** necesaria para convertir en energía mecánica de accionamiento.
- En ciertos casos puede **recibir energía recuperada o regenerada de la carga mecánica** (frenado regenerativo, generación eléctrica, etc.)

POTENCIA Eléctrica *instantánea* (en cada **instante** de Tiempo t [s]):

Circuito CC: Potencia (t) [W] = Voltaje o Tensión (t) [V] . Corriente (t) [A]
Circuito CA (cada fase): Potencia (t) [W] = Voltaje o Tensión (t) [V] . Corriente (t) [A]



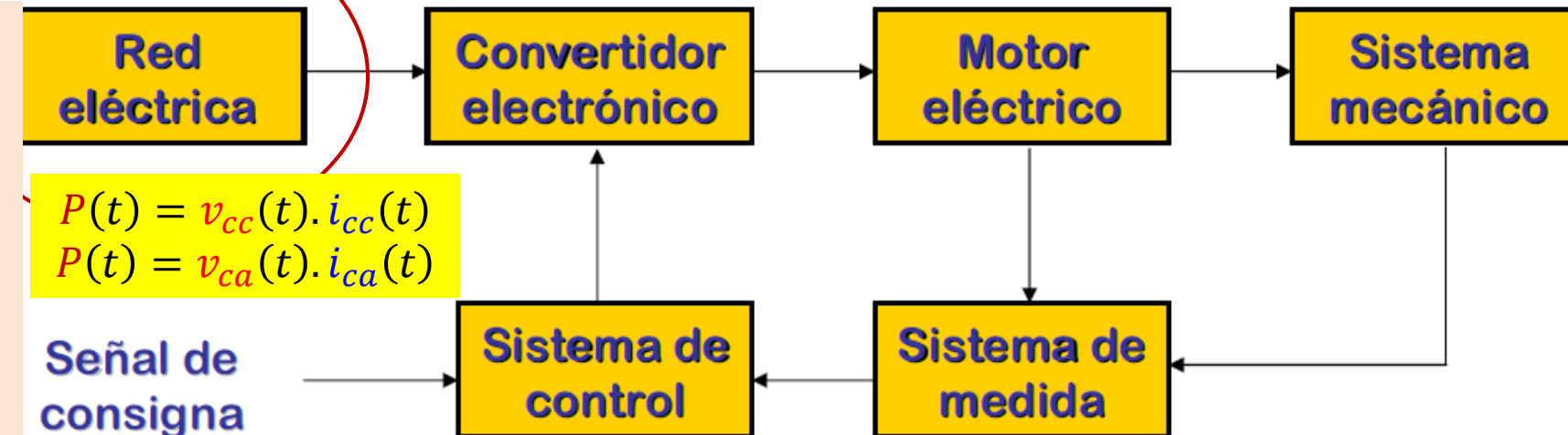
Potencia, Voltaje o Tensión, y Corriente, todos **instantáneos** (en **cada instante** de tiempo t);
 Vale para cualquier forma de onda no sinusoidal y cualquier variabilidad transitoria!

Magnitudes Físicas:

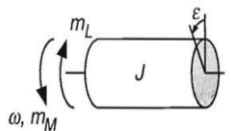
Escalares ($\mathbb{R}$):
 Tiempo.

Masa, Inercia, R, L, C.
 Energía, Trabajo,
 Potencia.

Vectoriales ($\mathbb{R}^3$):
 Posición, Velocidad,
 Aceleración,
 Torque, Fuerza.



Modelo Físico
 Idealizado 1 d.o.f.



$$P(t) = \vec{T}(t) \cdot \vec{\omega}(t)$$

$$P(t) = \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t)$$

Sistema de Medición: Sensores (Adquisición Señales)

Retroalimentación (FEEDBACK) de Estado (Variable Controlada y/o Estado interno).

Variable Controlada: Sensores externos acoplados mecánicamente: **Encoder / Resolver, Tacogenerador, Torque, etc.**

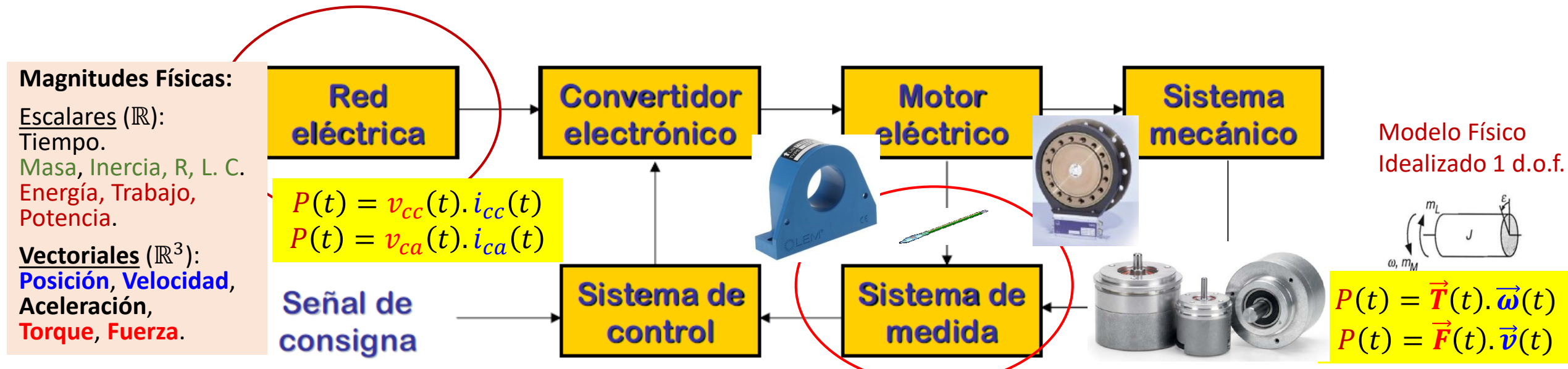
Variables de Estado: Sensores internos de **tensión, corriente, potencia eléctrica, Temperatura.**

Necesario para el **Control a Lazo Cerrado** y para **Protección.**

Ej. Hübner Giessen Heavy duty Encoders Overview (optical, magnetic, safety)

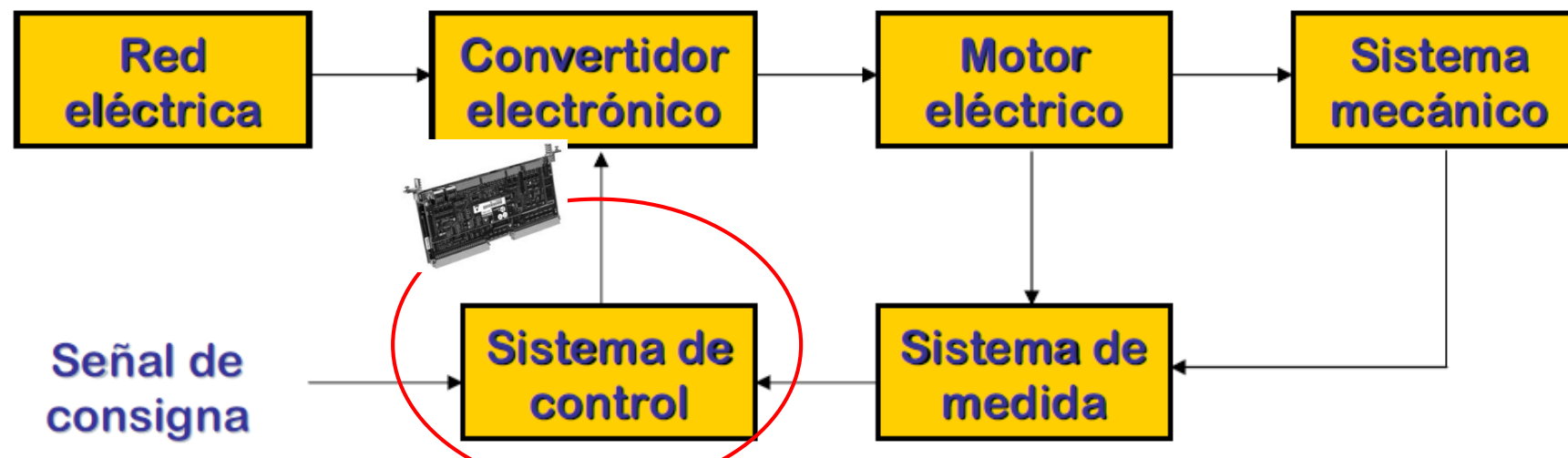
<https://www.youtube.com/watch?v=hx8TV945C0w> (2:35 min)

Baumer Bearingless encoders: <https://www.youtube.com/watch?v=FOoru-ib6hk> (3:47 min)



Sistema de CONTROL:

- Electrónica de **Señal** (Bajas tensiones y corrientes, aislado eléctricamente del Subsistema de Electrónica de Potencia).
- **Lazo abierto** (sin retroalimentación, **FFW**) vs. **Lazo cerrado** (retroalimentado, **FBK**) → Combinación **FFW + FBK**.
- Control **Analógico** (originalmente, basado en OpAmps con redes RC, etc.): Tiempo Continuo.
- Control Digital (actual, basado en Microprocesadores, DSPs, Microcontroladores o DSCs): Tiempo Discreto (**Muestreo T_s**) y **Cuantización** (A/D, D/A: discretización de amplitud de señales).



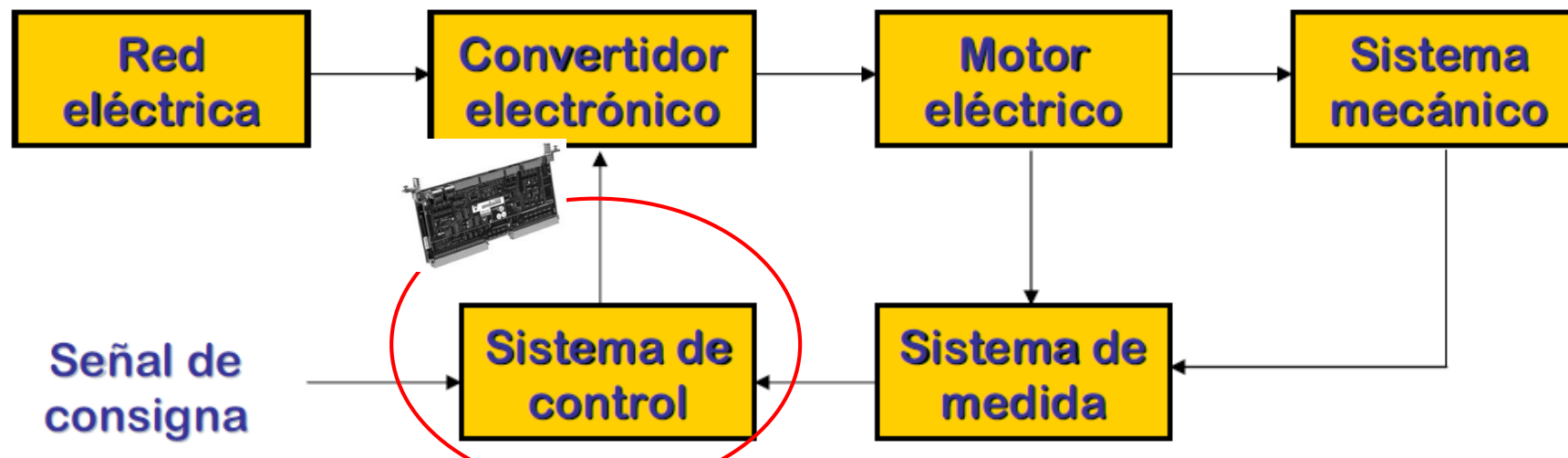
Sistema de CONTROL: Objetivos y Especificaciones

1. **ESTABILIDAD** → Seguridad y Disponibilidad para operación.
2. **ROBUSTEZ** frente a Incertidumbre de Modelo o Perturbaciones externas.
3. **DESEMPEÑO (Performance)** → Optimización (índices o especificaciones)

Rechazo a Perturbaciones o Cargas

Seguimiento de Consignas o Comandos de Referencia

Esfuerzos o acciones de Control razonables



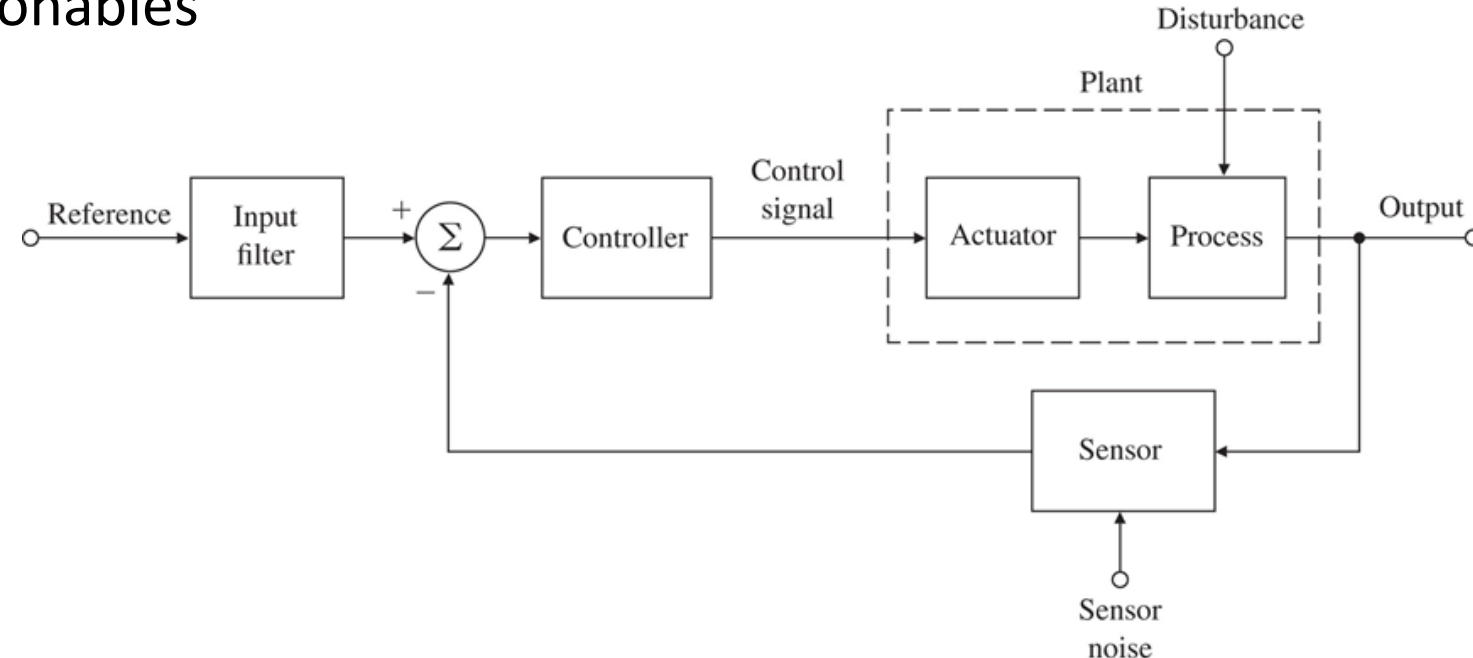
Sistema de CONTROL: Objetivos y Especificaciones

1. **ESTABILIDAD** → Seguridad y Disponibilidad para operación.
2. **ROBUSTEZ** frente a Incertidumbre de Modelo o Perturbaciones externas.
3. **DESEMPEÑO (Performance)** → Optimización (índices o especificaciones)

Rechazo a Perturbaciones o Cargas

Seguimiento de Consignas o Comandos de Referencia

Esfuerzos o acciones de Control razonables



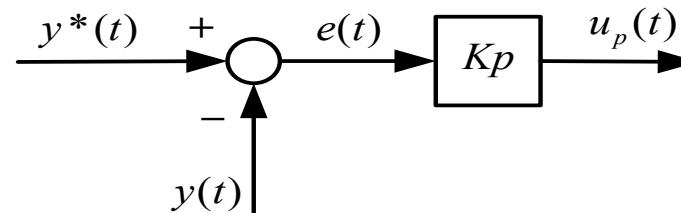
FEEDBACK CONTROL: Acciones de Control Básicas PID

(**P**) Acción de Control **Proporcional** $u_P(t)$:

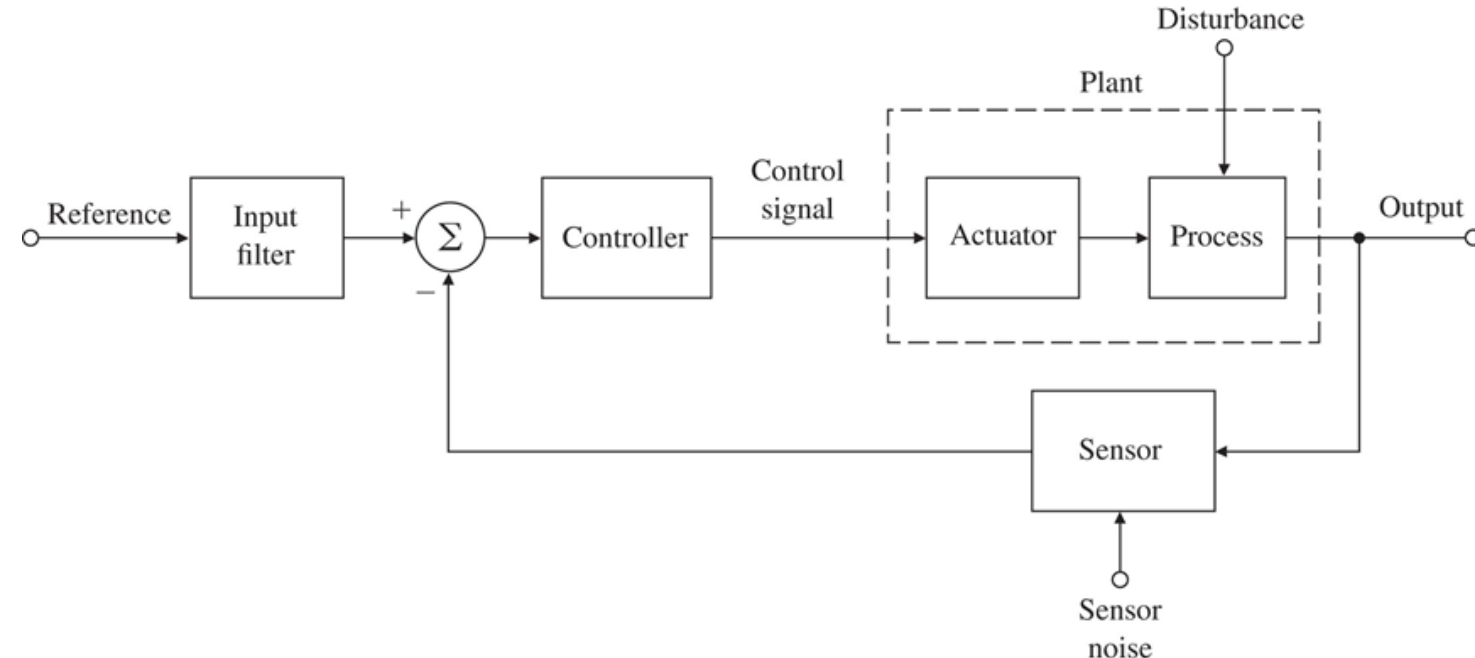
$u_P(t)$ proporcional al error o desviación $e(t)$ **[PRESENTE]**

$$e(t) \equiv y^*(t) - y(t)$$

$$u_P(t) \equiv K_P \cdot e(t)$$



K_P : **Ganancia Proporcional**



FEEDBACK CONTROL: Acciones de Control Básicas PID

(**I**) Acción de Control **Integral** $u_I(t)$:

$u_I(t)$ proporcional a la integral del error o desviación $e(t)$ [**PASADO**]

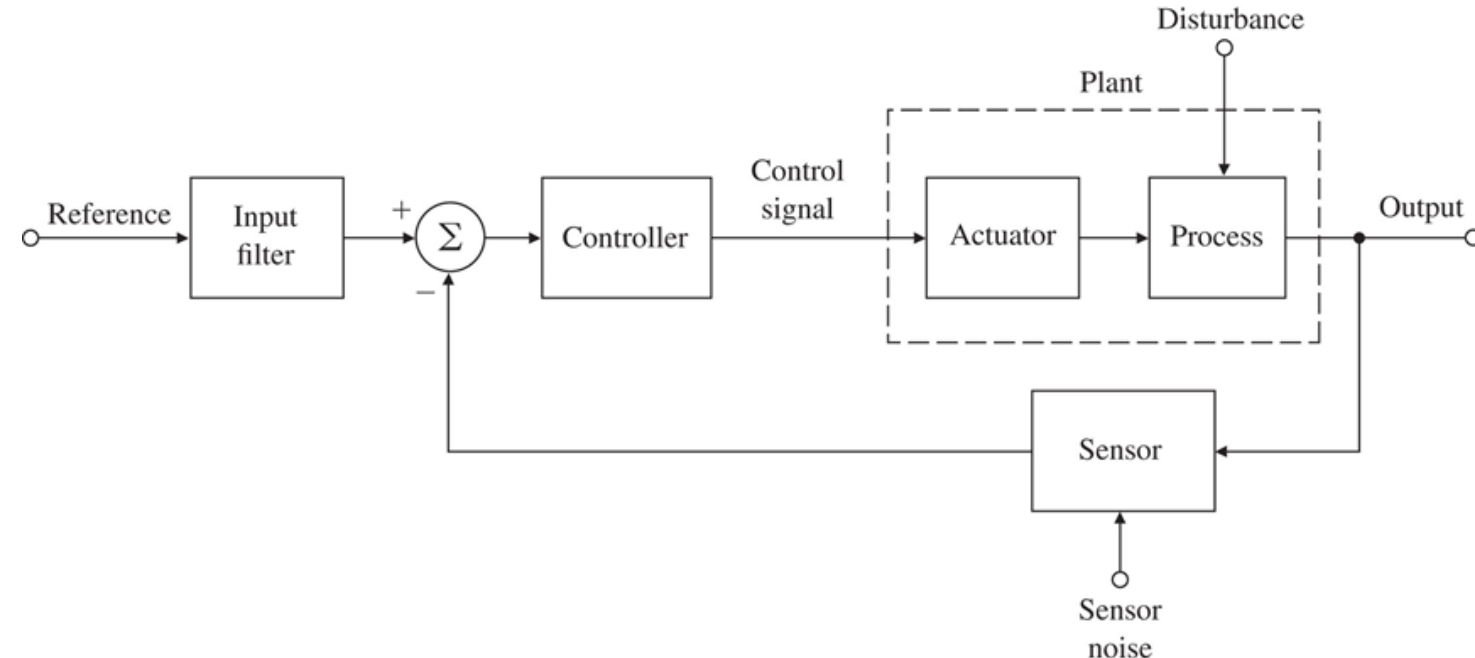
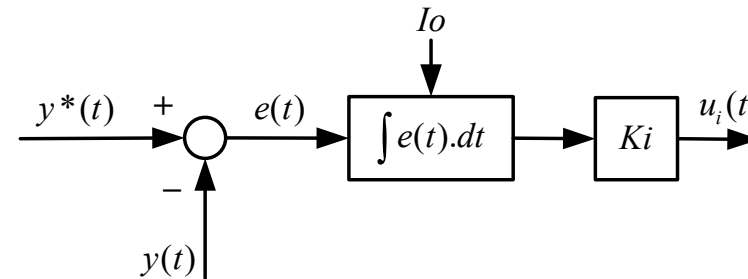
$$e(t) \equiv y^*(t) - y(t)$$

$$u_I(t) \equiv K_I \cdot \left(\int_{t_0}^t e(\tau) \cdot d\tau + I_e(t_0) \right)$$

K_I : **Ganancia Integral**

T_I [s]: **Tiempo Integral o de Reset**

tal que $K_I \equiv \frac{K_P}{T_I}$



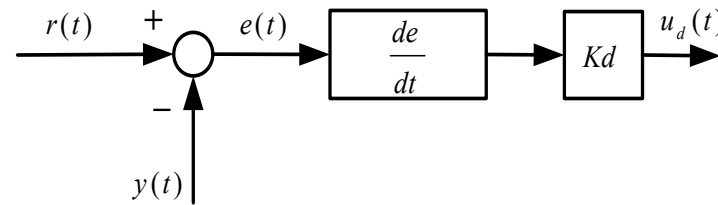
FEEDBACK CONTROL: Acciones Básicas PID

(**D**) Acción de Control **Derivativa** $u_D(t)$:

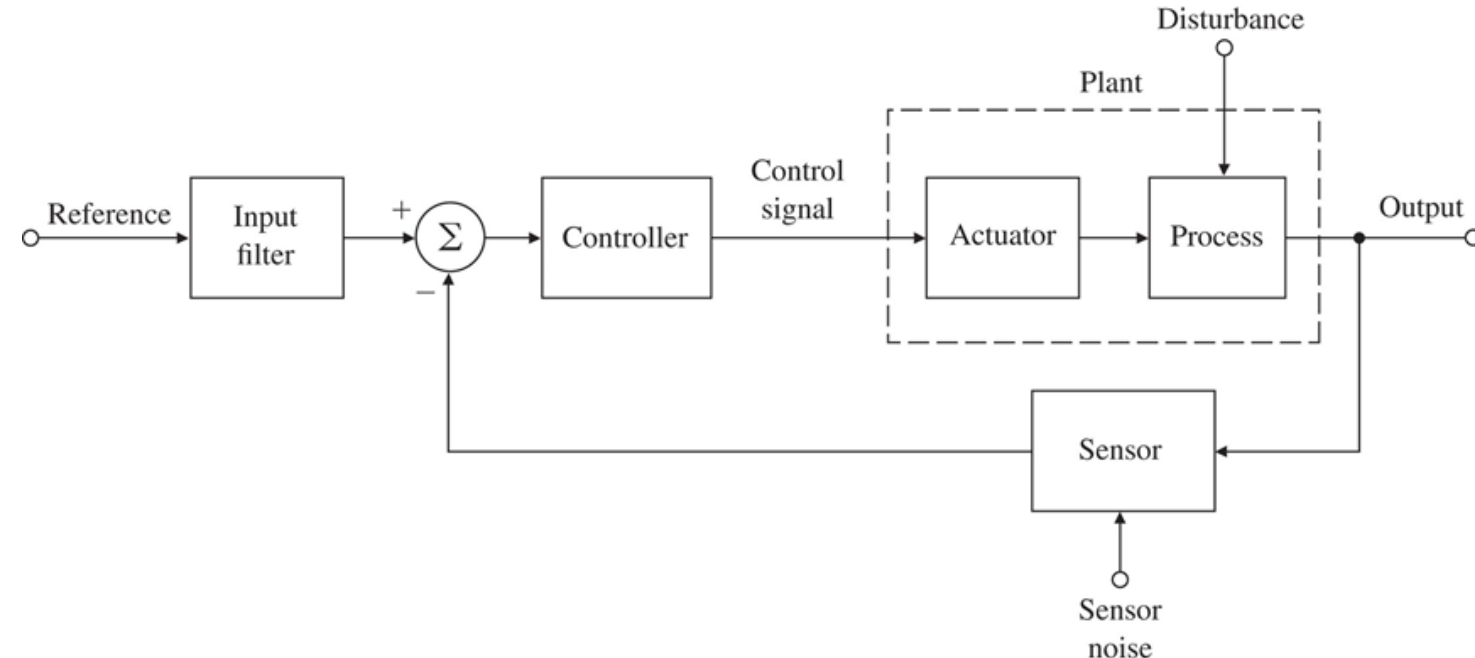
$u_D(t)$ proporcional a la derivada del error o desviación $e(t)$ **[FUTURO]**

$$e(t) \equiv y^*(t) - y(t)$$

$$u_D(t) \equiv K_D \cdot \frac{de(t)}{dT}$$



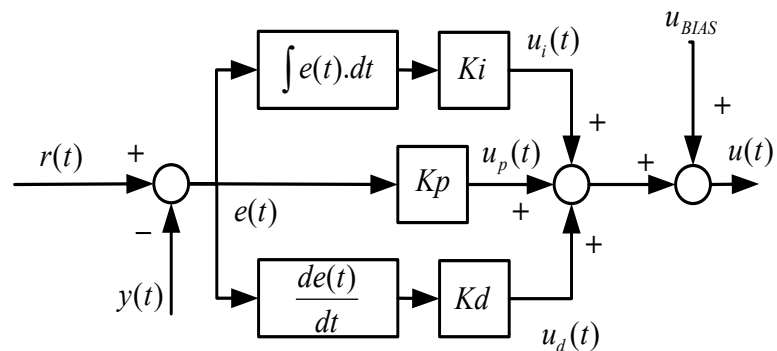
K_D : **Ganancia Derivativa**
 T_D [s]: **Tiempo Derivativo**
 tal que $K_D \equiv K_P \cdot T_D$



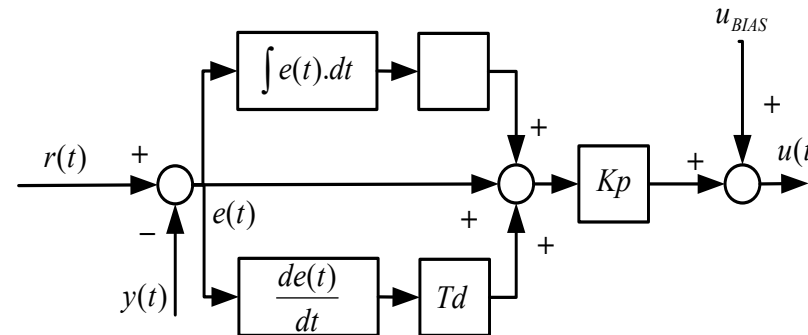
FEEDBACK CONTROL: Acciones Básicas PID

Controlador **Proporcional + Integral + Derivativo (PID)** + **BIAS** (general)

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t).dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} = K_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t).dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right]$$



a) Forma Paralelo



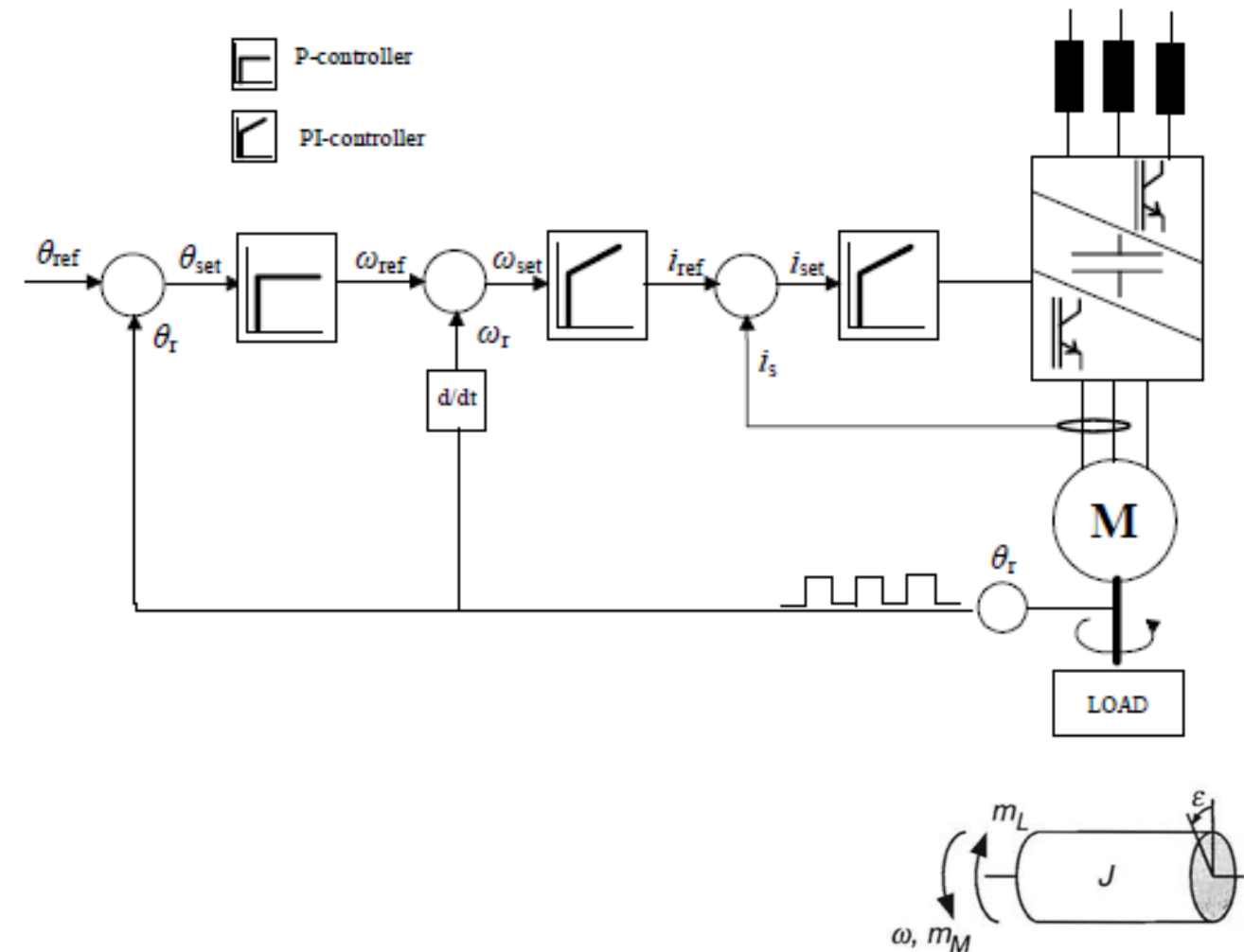
b) Forma Ideal

(son equivalentes pero tienen diferentes parámetros: K_i vs. T_i , K_d vs. T_d)

FEEDBACK CONTROL: Doble o Triple Lazo en CASCADA

Lazos de Control de **Posición / Velocidad** → **Corriente / Torque**

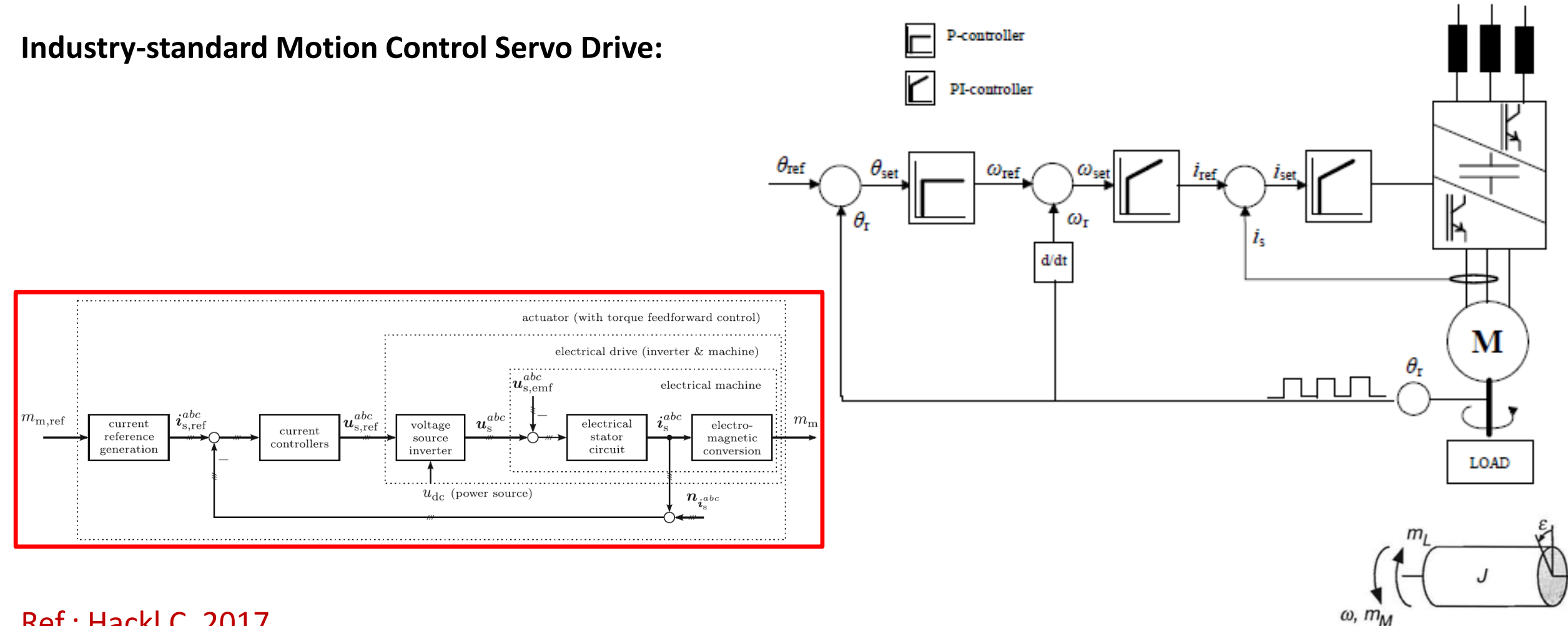
Industry-standard Motion Control Servo Drive:



Control de posición-velocidad-torque

Lazos de Control de **Posición / Velocidad** → **Corriente / Torque**

Industry-standard Motion Control Servo Drive:



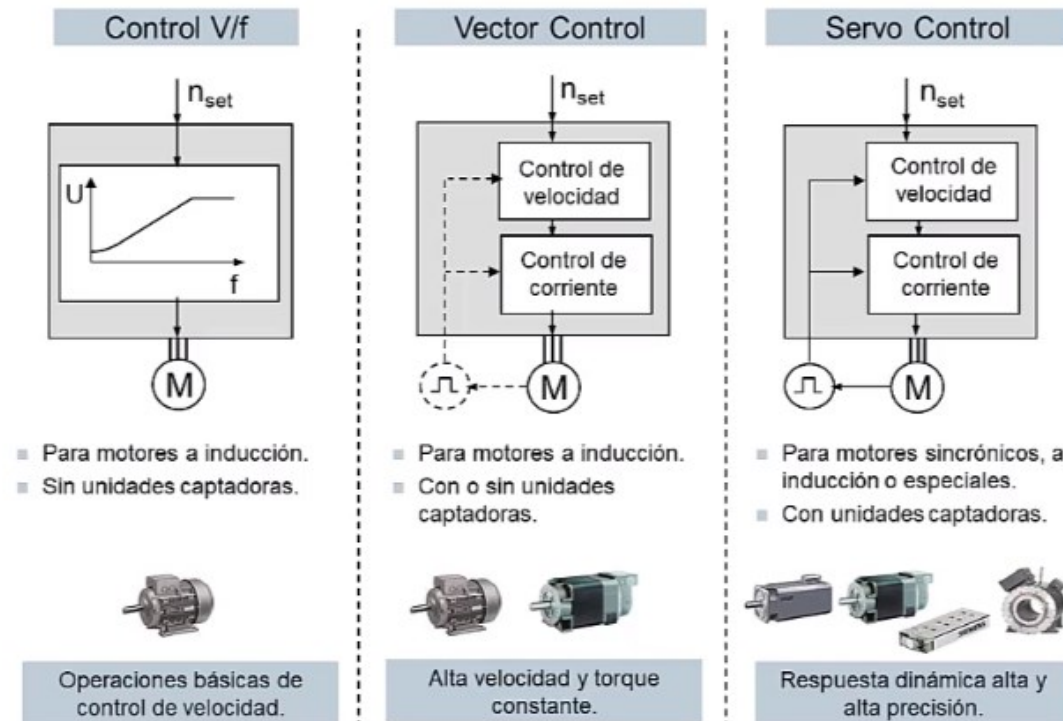
Ref.: Hackl C. 2017

Accionamiento Eléctrico Moderno

Ejemplo: SIEMENS Sinamics S120 Drives Estrategias de CONTROL

SINAMICS S120:
Estrategias de control.

SIEMENS
Ingenuity for life



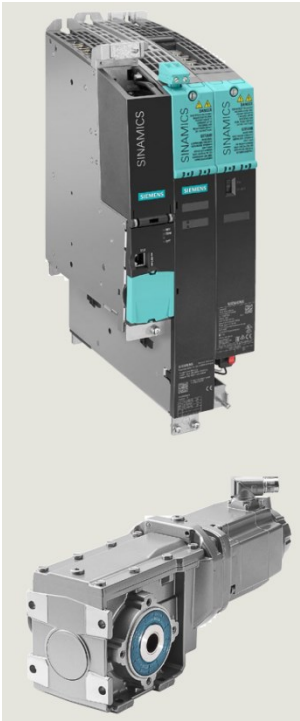
Accionamiento Eléctrico Moderno

REQUERIMIENTOS de Ingeniería:

- Altos niveles de **EFICIENCIA** de Conversión de Energía
- Alta **DENSIDAD DE POTENCIA** / ENERGÍA / TORQUE
- Operación con **CONFIABILIDAD**
- Todo lo anterior a un **COSTO ACCESIBLE**

→ DISEÑO y Desarrollo: OPTIMIZACIÓN Multi-objetivo (GOSET, etc.)

- Diseño integrado (mecatrónico), como parte de un Sistema completo
- Aspectos: **Eléctrico**, **Electromagnético**, **Térmico**, **Mecánico-Estructural** (movimiento, vibraciones), **CONTROL**
- Implementación: Fabricación, Integración, Puesta en Marcha y Ensayos, Operación
- Herramientas de diseño Ref.: **Ansys Motor-CAD** <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-motor-cad>



IEC: International Electrotechnical Commission



- **The world of IEC:**

An animated video that shows the **breadth and scope of IEC work**.

The crucial role of International standards and Conformity assessment in making the world **safer and more efficient**.

<https://youtu.be/mrh3gnHBo9Y> (Video 1:27 min - 2020-08)

- **The importance of IEC International Standards:**

A look at the importance of IEC standards throughout "The Electric Century".

<https://www.youtube.com/watch?v=0Byh7VLHGDY> (Video 6:38 min)

[IEC 60050 - ELECTROPEDIA: Electrotechnical Vocabulary](https://www.electropedia.org/)

<https://www.electropedia.org/>

Algunas Normas IEC (IEC Standards) de **aplicación en AyME:**

IEC 60034: Rotating electrical machines

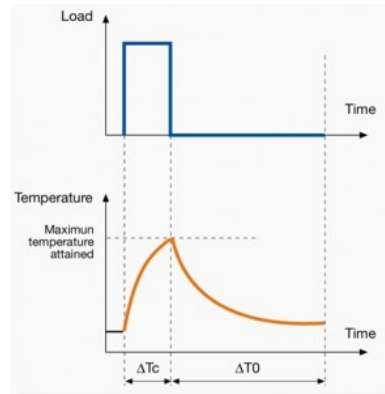
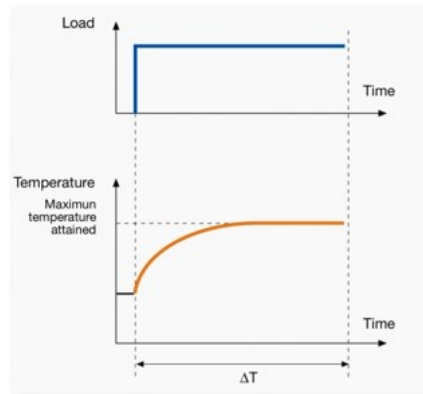
ej. IEC **60034-1:2017** - Part 1: **Rating and performance; etc.**

IEC 61800: Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems

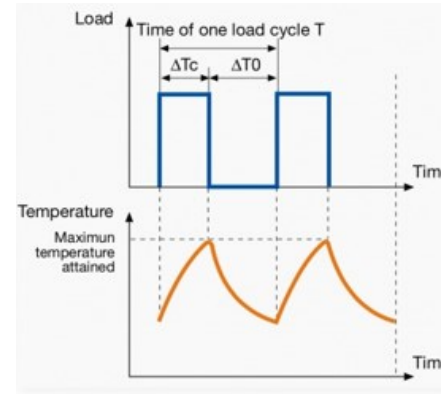
Etc....

Ej.: IEC 60034-1: Motor Duty Ratings

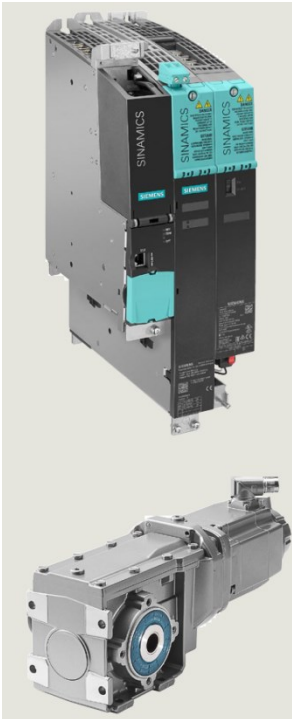
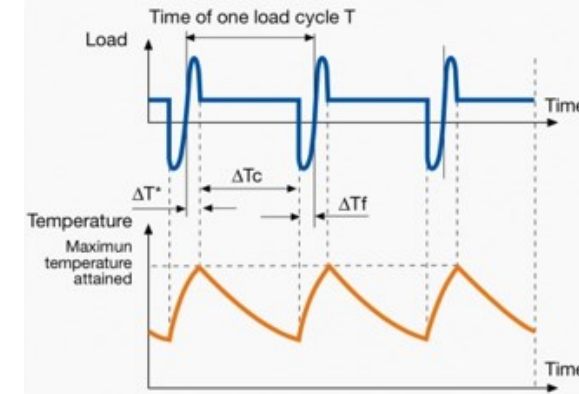
S1: Continuous Running Duty **S2:** Short Time Duty



S3: Intermittent Periodic Duty



S7: Continuous-Operation Periodic Duty with Electric Braking



Diferentes **CONDICIONES DE OPERACIÓN** típicas, **S1..10** → efectos **TÉRMICOS** (Variaciones de Carga)
 → **Pérdidas variables** → ciclos Calentamiento-Enfriamiento
 (afecta al **DIMENSIONAMIENTO**, junto con **requerimientos de Torque/Velocidad**)

→ AyME_01c_IEC 60034-1 Ed13.0 (2017) PREVIEW_Rotating electrical machines_Part 1 - Rating and Performance.pdf / AyME_01c_IEC 60034-1_Electric Motor Duty Ratings_Resumen.pdf

KEB: Education - 4 Types of Motor Duty Cycles Every Engineer Should Know

<https://www.kebamerica.com/blog/4-types-of-motor-duty-cycles-every-engineer-should-know/>

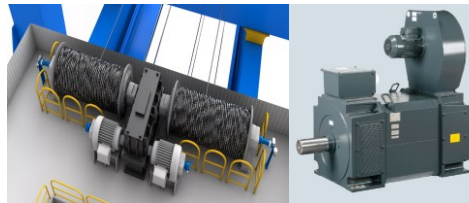
Video: What are Motor Duty Cycles (4 min)

<https://www.youtube.com/watch?v=O-ODHlWzDj8>



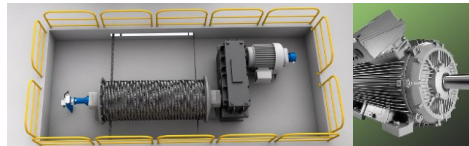
DIMENSIONAMIENTO de Accionamientos Eléctricos

Ej.: DIMENSIONAMIENTO de MOTORES y DRIVES para GRÚAS STS - DUTY CYCLES

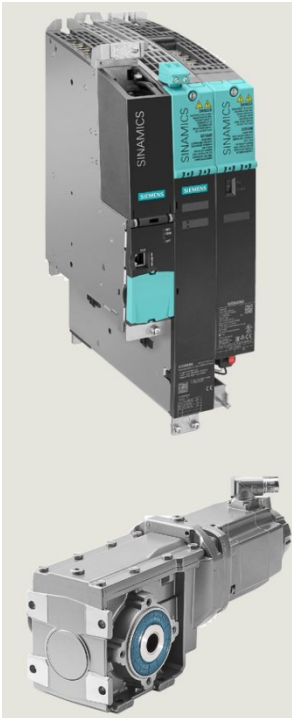
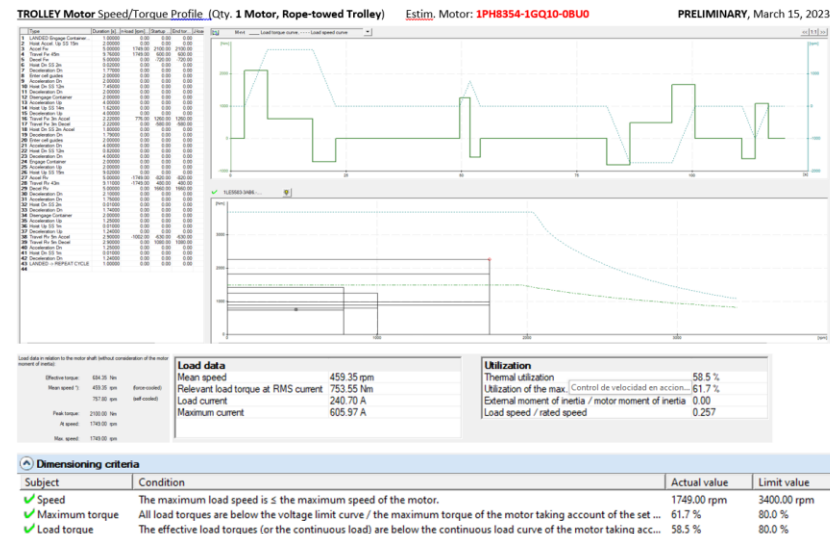
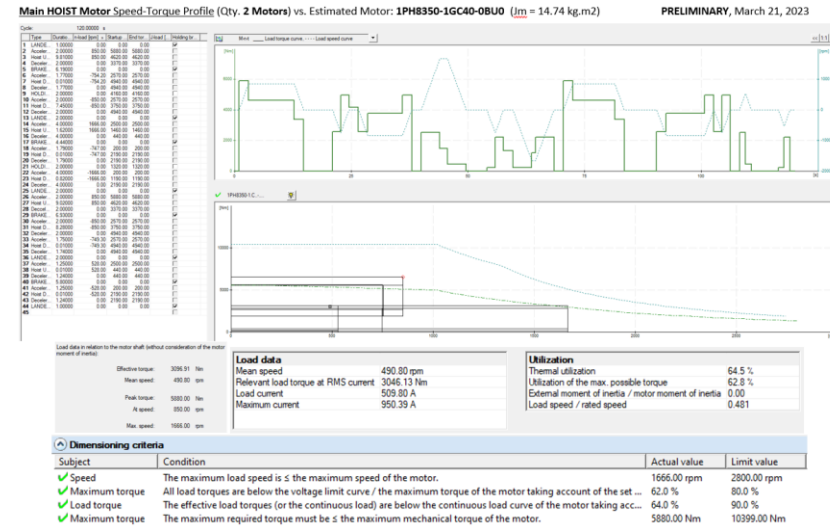
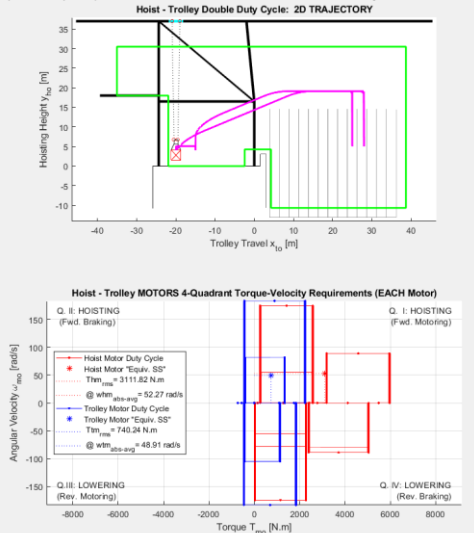
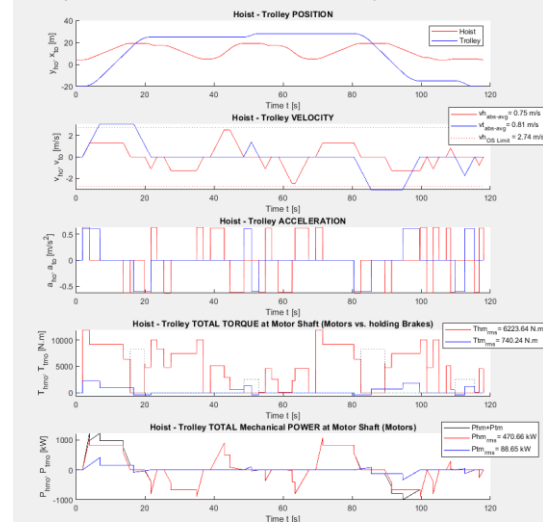


Izaje Principal (Main Hoist)

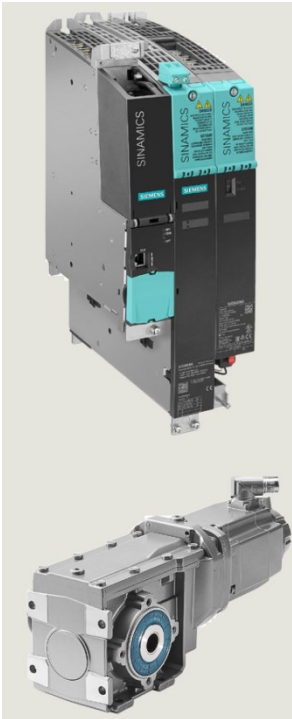
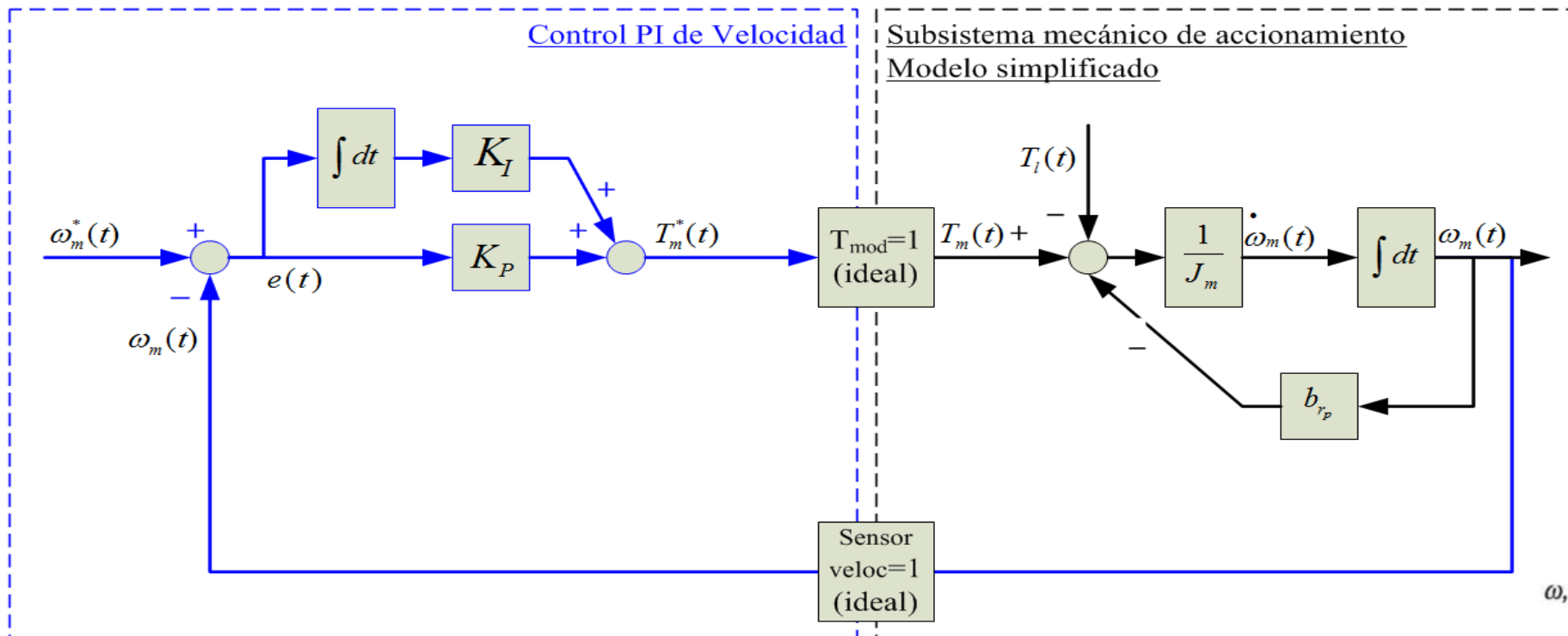
Traslación de Carro (Trolley Travel)



1 M.P.S.A. P0843 MOTCO STS Container Cranes: Main Hoist - Trolley Theoretical Double (Load + Unload) Duty Cycle Prep.: G. Julián
Mendoza - Argentina Cycle PERIOD = 118.01 s. PRODUCTIVITY = 30.51 Double (Load + Unload) Moves per hour 15-Aug-2024 - Rev. PRELIMINARY



Control de velocidad en accionamiento



Subsistema Mecánico: Modelo Físico Idealizado →

Sistema conceptual idealizado: compuesto por algunos subsistemas más simples interconectados entre sí.

Salidas de un subsistema actúan como **entradas** a otros subsistemas en forma directa o mediante operaciones algebraicas.

Conjunto de **variables de estado** del sistema global = unión de conjuntos de variables de estado de los subsistemas.

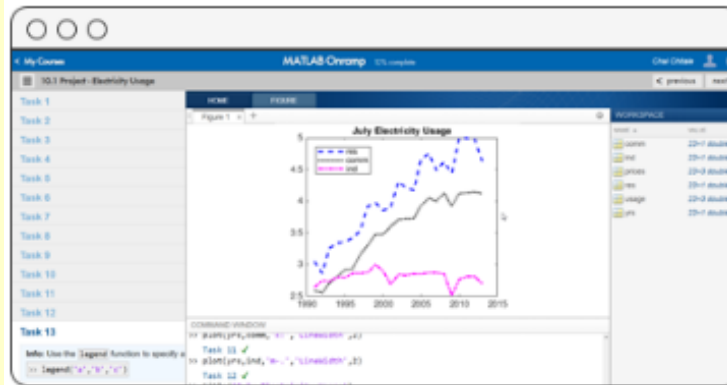
Ecuación de estado del sistema global: eliminar variables intermedias.

→ plantear un **modelo matemático equivalente (Hacer!)**

Introducción a MATLAB / Simulink

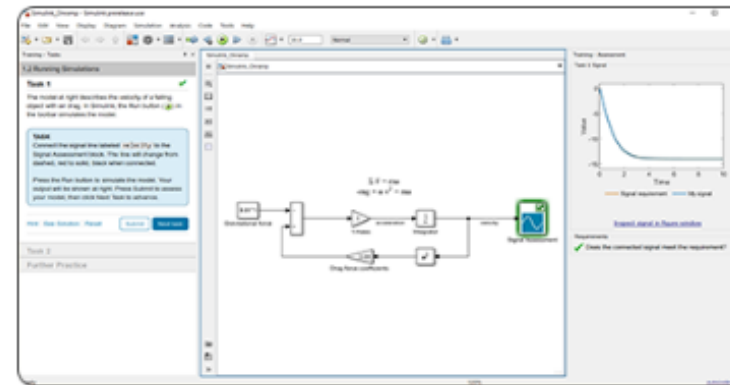
MATLAB and Simulink *free* online **Tutorials** (requiere registrar cuenta propia libre)

<https://www.mathworks.com/support/learn-with-matlab-tutorials.html>



MATLAB Onramp

Quickly learn the essentials of MATLAB®.



Simulink Onramp

Learn to create, edit, and troubleshoot Simulink® models.

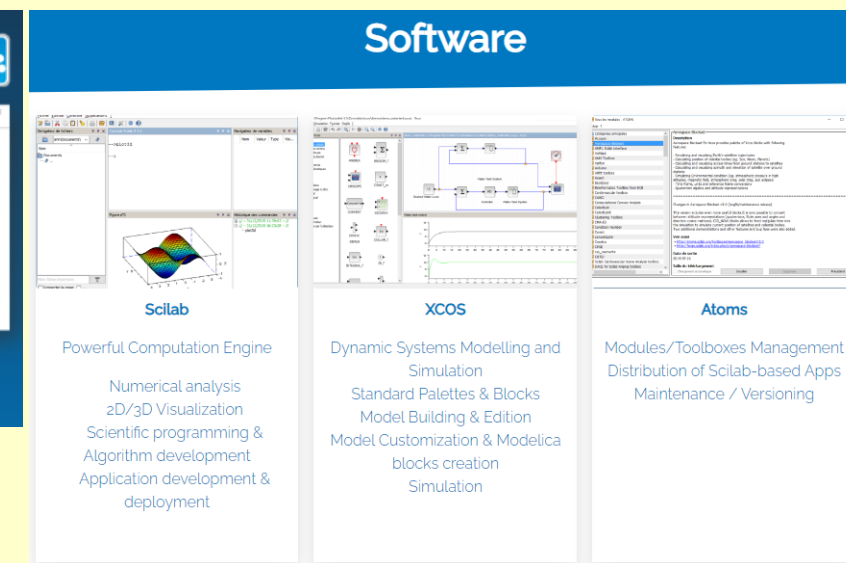
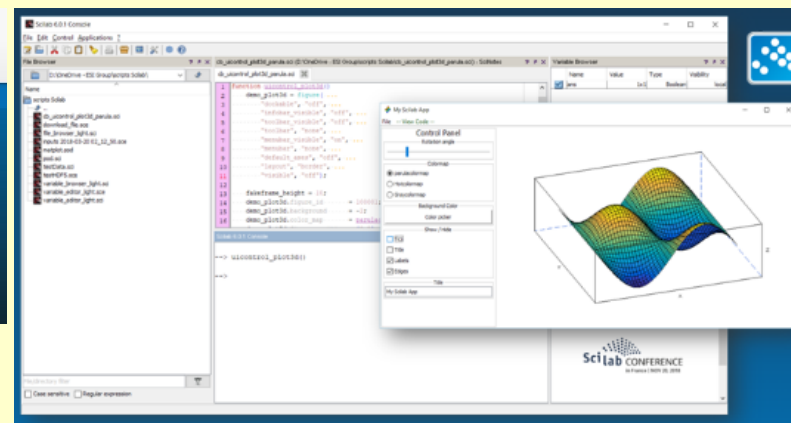
1. MATLAB Onramp (ver video introd.: 1:18 min. → **tutorial: 2 hs.**, a ritmo propio)

<https://www.mathworks.com/learn/tutorials/matlab-onramp.html>

2. Simulink Onramp (ver video introd.: 1:41 min. → **tutorial: 3 hs.**, a ritmo propio)

<https://www.mathworks.com/learn/tutorials/simulink-onramp.html>

Introducción a SCILAB / XCOS

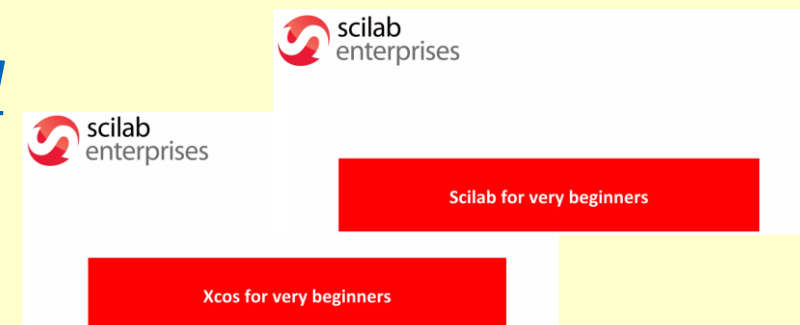


<https://www.scilab.org/>

<https://www.scilab.org/software>

<https://www.scilab.org/scilab-for-beginners-tutorial>

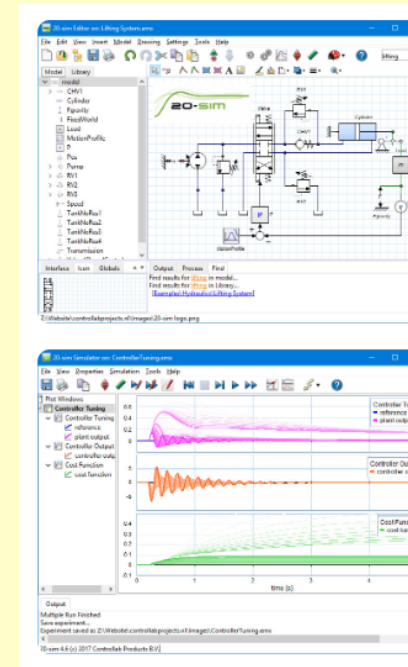
<https://www.scilab.org/xcos-for-beginners-tutorial>



Introducción a 20-sim

<https://www.20sim.com/>

<https://www.controllab.nl/>



20-SIM

20-sim is a modeling and simulation program for mechatronic systems. With 20-sim you can enter model graphically, similar to drawing an engineering scheme. With these models you can simulate and analyze the behavior of multi-domain dynamic systems and create control systems. You can even generate C-code and run this code on hardware for rapid prototyping and HIL-simulation.

20-sim provides you with tools that allow you to create models very quickly and intuitively. You can create models using equations, block diagrams, physical components and bond graphs. Various tool boxes help you to build your models, simulate them and analyze their performance. You will find that the package has some outstanding capabilities that will help you on numerous applications in many industries.

Models are built in the 20-sim Editor. This Editor contains a large Model Library with building blocks to help you to construct models using Block Diagrams, Iconic Diagrams, Bond Graphs or a combination of these. Various tool boxes will help you to create special models.

In the Simulator you can run models and show the results in plots and 3D Animations. Various tools are provided to help you analyze your system and export it as C-code. To find more information, please visit the [20-sim website](https://www.20sim.com/).