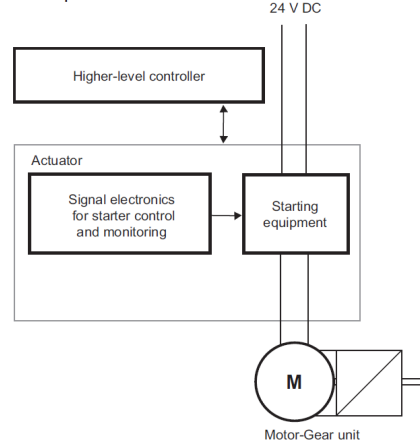


Unidad 4

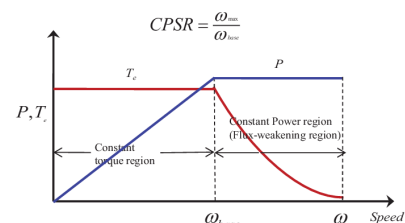
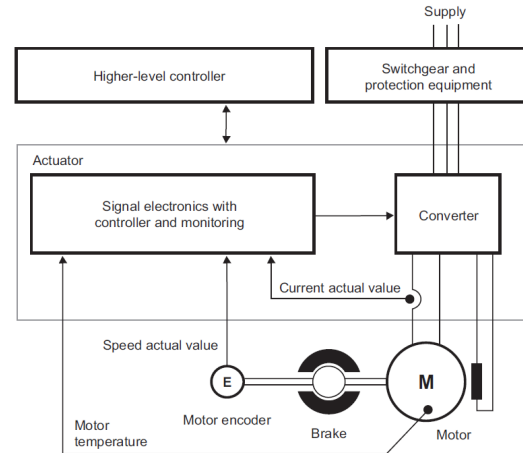
Control de Accionamientos Eléctricos de Corriente Continua (DC Drives)



DC low-power drive



DC drive



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

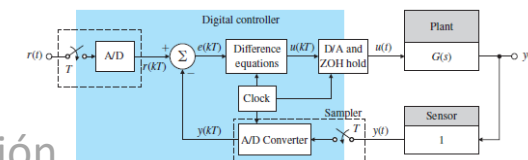
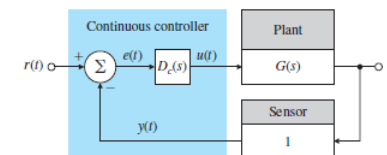
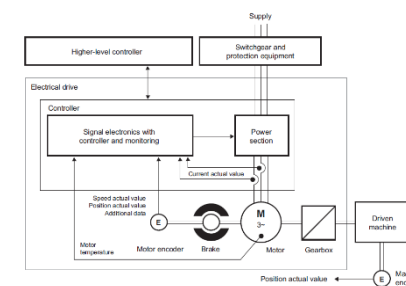
Retroalimentación de Estado. Observadores. Ubicación de Polos. Control Digital. Diseño.

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

4. Control de Accionamientos de Corriente Continua

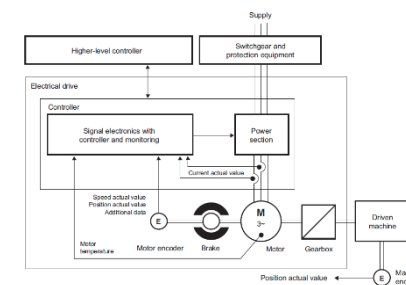
A. Máquina Eléctrica de CC con Conmutador Mecánico (Colector y Escobillas)

- Máquinas de CC con escobillas: Excitación por Imanes Permanentes vs. Excitación Separada.
- Modelado Dinámico: Espacio de Estado en DT – Funciones de Transferencia en DF.
- Análisis y Simulación del Comportamiento Dinámico.



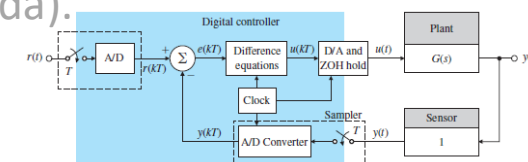
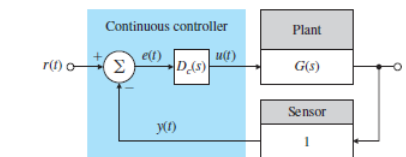
B. Control de Velocidad y Posición por Retroalimentación de Estado

- Control por Tensión de Armadura con Retroalimentación de Estado. Asignación de Polos.
- Observador de Estado.



C. Control en Cascada: Corriente/Torque – Movimiento (Velocidad/Posición)

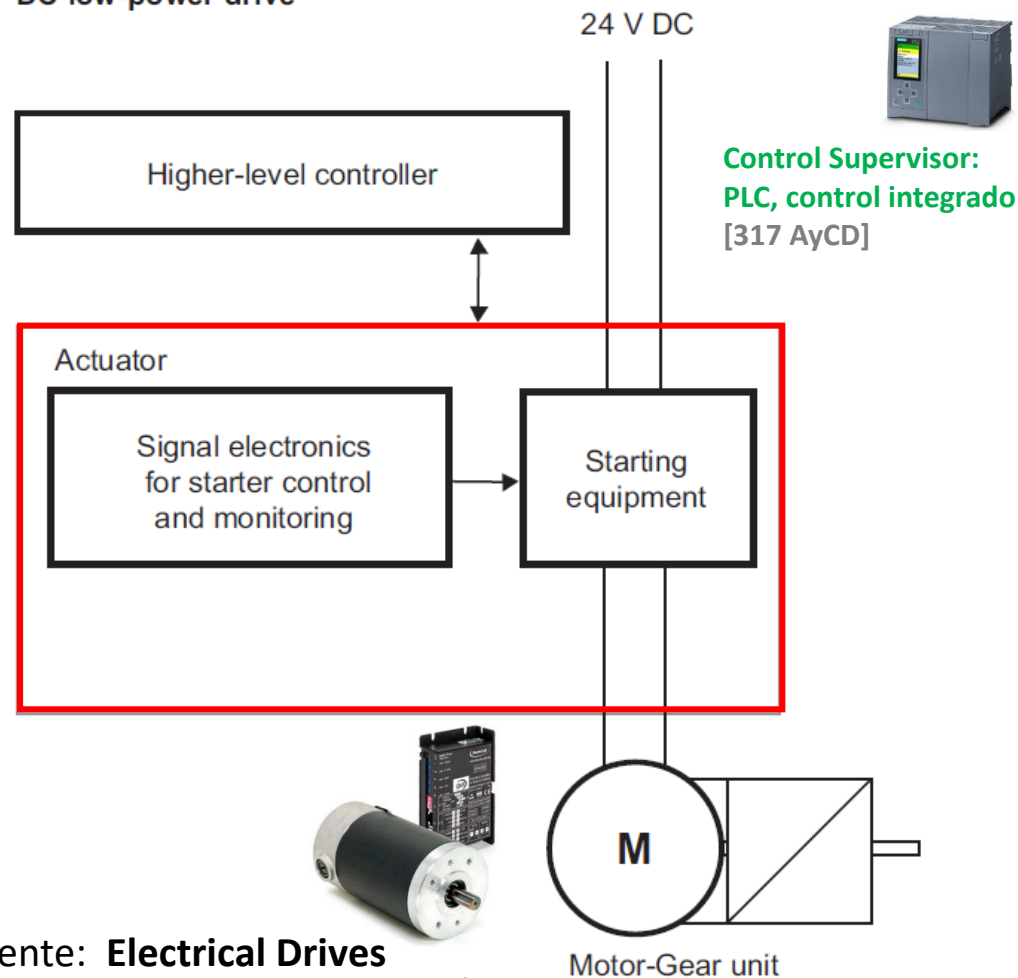
- Desacoplamiento de retroalimentaciones naturales (propia y cruzada).
- Control interno de Torque $\rightarrow$ Modulador de torque ideal (aproximación).
- Control de movimiento (enfoque mecatrónico, con Modulador de torque ideal en cascada).



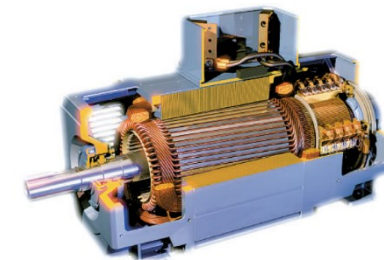
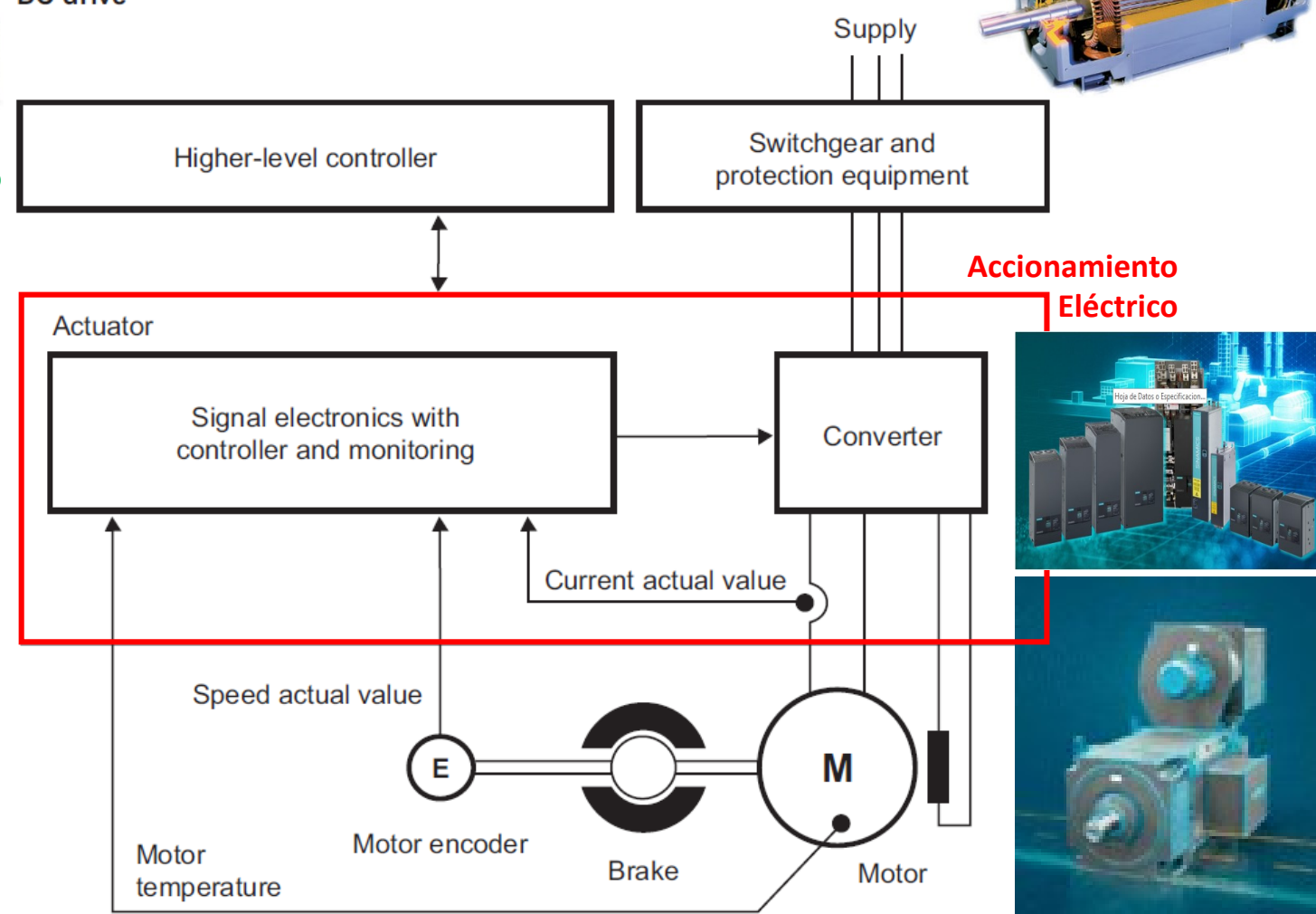
Accionamiento Eléctrico de CC: Componentes

a) Excitación por Imanes Permanentes (PM-BDCM) b) Excitación Separada (SE-BDCM)

DC low-power drive



DC drive



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

Máquinas Eléctricas de CC con Conmutador Mecánico

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:

1. Efecto MOTOR: Fuerza de **Lorenz** (Relativa Rotor $\leftrightarrow$ 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 de Lorenz** (impulsora ó frenante) $\vec{F}$ [N]: $\vec{F} = (\vec{I} \cdot l_w) \times \vec{B} \rightarrow$

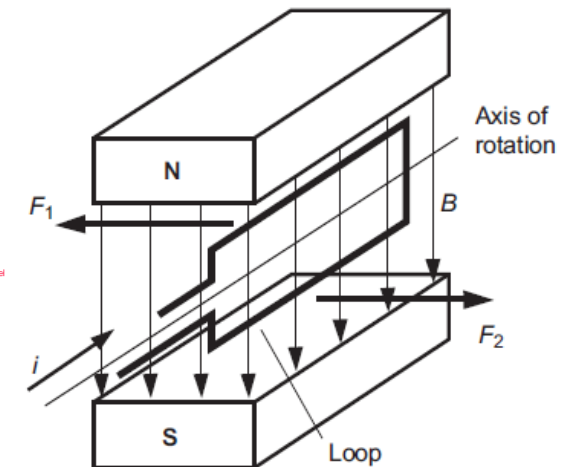
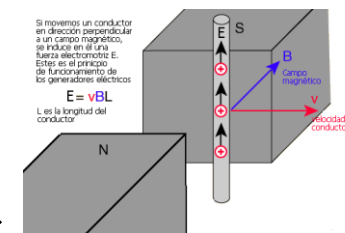
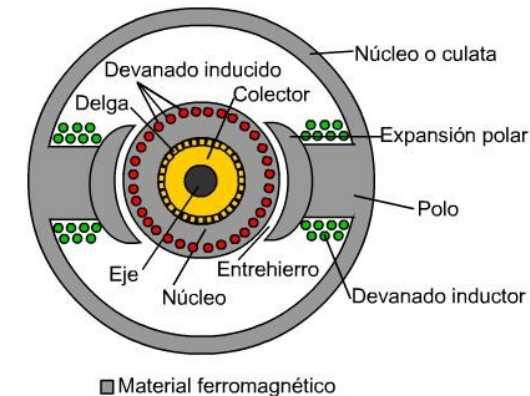
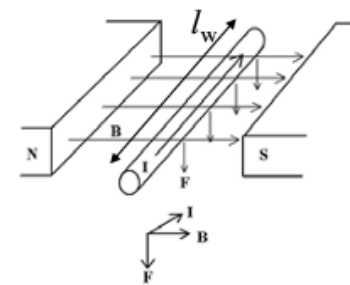
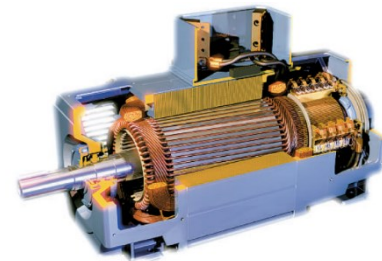
$\rightarrow$ **aceleración (Newton):** $\vec{a} = \vec{F}/m \rightarrow$ velocidad $\vec{v}$ [$\frac{m}{s}$] (**movimiento**)
 (+ **Fuerza de Reluctancia** en núcleo ferromagnético móvil desalineado en $\vec{B}$).

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

Conductor de long. l_w [m] en **movimiento** $\vec{v}$ [$\frac{m}{s}$]
 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 el circuito).



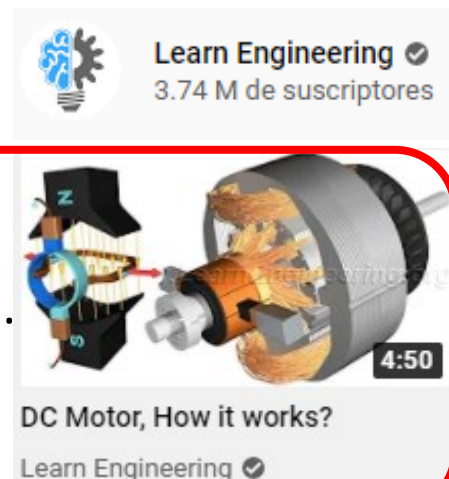
Máquinas Eléctricas de CC

BDCM = Brushed DC Machine: ¿Cómo funciona?

- **Conmutador Mecánico = Escobillas + Colector** en Rotor.
- **Excitación:** a) **fija: PM** (Imanes Permanentes) en **Estator** (normalmente, máquinas **pequeñas**).
b) **If** (campo): **Shunt / Series / SE** en **Estator** (normalmente, máquinas **grandes**).

(Video 22-9-2014, 4:50 min)

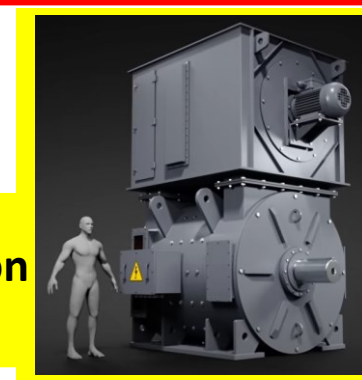
<https://www.youtube.com/watch?v=LAatPHANefQo>



Caso particular: Motor DC – **3 Bobinas:** ¿Cómo funciona?

(Video 25-7-2017, 4:32 min)

https://www.youtube.com/watch?v=SV2IJwu6J_E



How does a large industrial DC Motor Work? | Full Breakdown with 3D Animation

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



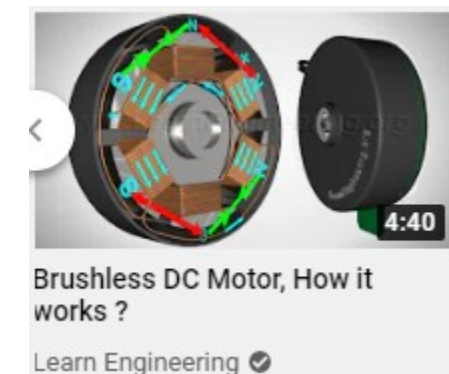
BLDC = Brushless DC Motor o **EC: Electronically Commutated:** ¿Cómo Funciona?

- **Conmutador Electrónico = Inverter CA** en Estator.
- **Excitación: PM** en Rotor.

En realidad, es máquina de CA similar a PMSM, pero con **tensión inducida trapezoidal** (en vez de tensión inducida senoidal, en PMSM)

(Video 13-10-2014, 4:40 min)

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



Máquinas Eléctricas y Drives CC pequeños: PM-BDCM

a) Excitación Fija por IMANES PERMANENTES: Campo Constante Fijo Chopper CC-CC para Control por Tensión de Armadura (V_a) (potencias y tamaños reducidos)

Ejemplos comerciales:

- MABUCHI Motors: Technical Guide**

<https://www.mabuchi-motor.com/product/knowledge/>

- IGNIS Motores**

<http://www.ignismotor.com/DESKTOP/AR/>

- ElectroCraft**

<https://www.electrocraft.com/>
<https://www.electrocraft.com/products/pmdc/>

Catálogo DC03EN (PMDC Motors & Drives) ➔
Catálogo de Productos
(Engineered Motor Solutions) ➔

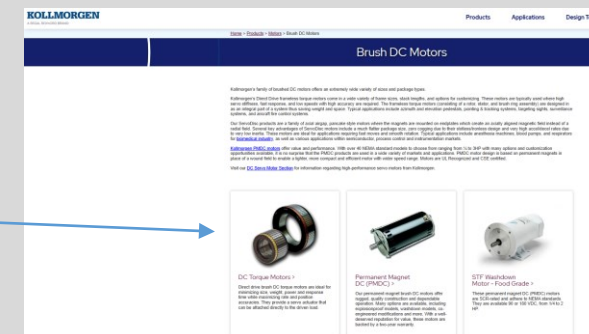
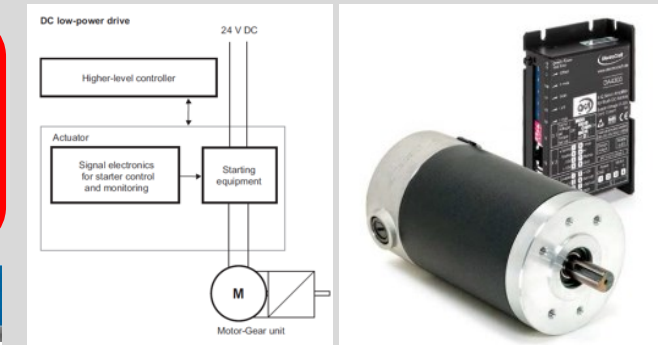
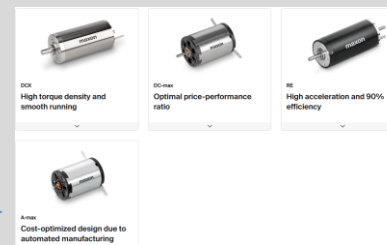
- Maxon Motors**

<https://www.maxongroup.com/en/drives-and-systems/brushed-dc-motors>

- KOLLMORGEN**

<https://www.kollmorgen.com/en-us/products/motors/brush-dc>

Etc..



Especificaciones de Datos PMBDCM: Ej. ElectroCraft G360

Hojas de Datos del Fabricante (no todos los fabricantes dan tanta información)

ElectroCraft G360 Series



G360 Series

Features and Benefits

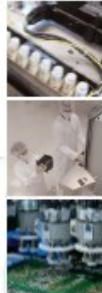
- Dynamically balanced armatures insure smooth performance at any speed
- Rugged TEM construction for long life and reliability
- Non-contact sealed ball bearings for improved efficiency and smooth operation
- Replaceable brushes extend product life cycle
- 2 Pole construction to support high speed applications

ElectroCraft G360 Series

The 360 series offers high performance in a small package for your low voltage, high torque applications. This series utilizes high energy rare earth magnets to achieve high torque to size ratios. When space is at a premium the 360 series is the product for you.

Typical Applications

- XY Plotters
- Printers
- Semiconductor Processing
- Robotics
- Pick and Place Machines
- Coordinate Measuring Devices
- Medical Pumps



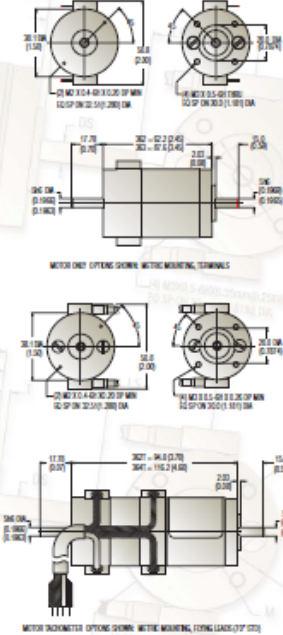
ElectroCraft
engineered solutions

A Rockwell Automation Solution

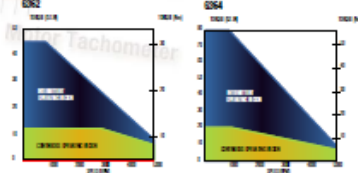
ElectroCraft G360 SERIES

G360 Series Performance Specifications

	362	364
Motor Ratings		
Continuous Rated Torque (Nm)	8.5	14.1
Continuous Rated Torque (oz-in)	12	20
Peak Torque (Nm)	21.8	36.5
Peak Torque (oz-in)	45	80
Maximum Terminal Voltage (V)	30	30
Maximum Operating Speed (rpm)	5000	5000
Mechanical Data		
Polar Inertia (kg cm ²)	0.021	0.048
Polar Inertia (oz-in sec ²)	0.0003	0.0007
Damping Constant (Ncm/krpm)	0.141	0.141
Damping Constant (oz-in/krpm)	0.2	0.2
Thermal Resistance (°C/Watt)	7.8	7.5
Maximum Armature Temperature (°C)	155	155
Maximum Friction Torque (Nm)	1.1	1.1
Maximum Friction Torque (oz-in)	1.5	1.6
Maximum Radial Load (25mm from bearing) (N)	2.3	2.3
Maximum Radial Load (25mm from bearing) (lb)	5	5
Weight (kg)	0.3	0.5
Weight (lb)	0.7	1.1
Electrical Data		
K _t Torque Constant +10% (Nm/Amp)	4.73	5.65
K _t Torque Constant +10% (oz-in/Amp)	6.7	8.0
K _v Voltage Constant +10% (V/Krpm)	4.9	5.9
Terminal Resistance (ohms)	3.5	3.2
Maximum Continuous Current (A)	1.8	1.8
Maximum Peak Current (A)	7	10
Armature Inductance (mH)	1.1	1.3
Tachometer Specifications - (optional)		
K _t Voltage Constant +10% (V/Krpm)	3	
Terminal Resistance (ohms)	42	
Typical Peak-to-Peak at 1000 rpm (V)	5	
Increase Motor Inertia by (kg cm ²)	0.007	
Increase Motor Inertia by (oz-in sec ²)	0.0001	



ElectroCraft G360 Series Performance Graphs



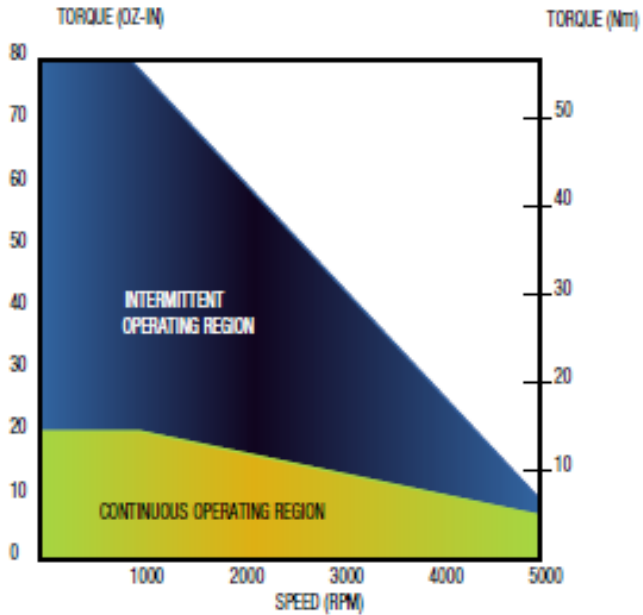
Especificaciones de Datos PMBDCM: Ej. ElectroCraft G360

G360 Series Performance Specifications

Motor Ratings	362	364
Continuous Stall Torque (Ncm)	8.5	14.1
Continuous Stall Torque (oz-in)	12	20
Peak Torque (Ncm)	31.8	56.5
Peak Torque (oz-in)	45	80
Maximum Terminal Voltage (V)	30	30
Maximum Operating Speed (rpm)	5000	5000
Mechanical Data		
Rotor Inertia (kg cm^2)	0.021	0.049
Rotor Inertia (oz-in-sec^2)	0.0003	0.0007
Damping Constant (Ncm/krpm)	0.141	0.141
Damping Constant (oz-in/krpm)	0.2	0.2
Thermal Resistance (C/watt)	7.8	7.5
Maximum Armature Temperature (C)	155	155
Maximum Friction Torque (Ncm)	1.1	1.1
Maximum Friction Torque (oz-in)	1.5	1.6
Maximum Radial Load (25mm from bearing) (Kg)	2.3	2.3
Maximum Radial Load (25mm from bearing) (lbs)	5	5
Weight (Kg)	0.3	0.5
Weight (lbs)	0.7	1.1



G364



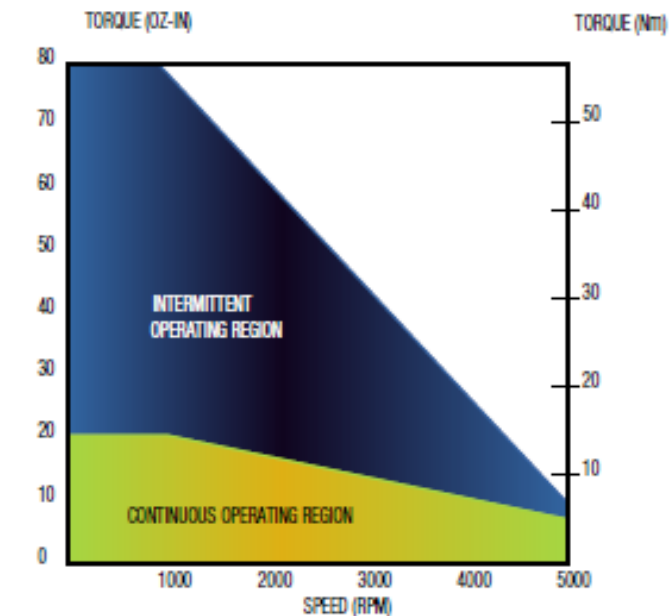
Especificaciones de Datos PMBDCM: Ej. ElectroCraft G360

G360 Series Performance Specifications

Electrical Data	A	A
Kt Torque Constant $\pm 10\%$ (Ncm/amp)	4.73	5.65
Kt Torque Constant $\pm 10\%$ (oz-in/amp)	6.7	8.0
Ke Voltage Constant $\pm 10\%$ (V/Krpm)	4.9	5.9
Terminal Resistance (ohms)	3.5	3.2
Maximum Continuous Current (A)	1.8	1.8
Maximum Peak Current (A)	7	10
Armature Inductance (mH)	1.1	1.3
Tachometer Specifications - (optional)		
Ke Voltage Constant $\pm 10\%$ (V/Krpm)	3	
Terminal Resistance (ohms)	42	
Ripple Peak-to-Peak at 1000 rpm (%)	5	
Increase Motor Inertia by: (kg cm ²)	0.007	
Increase Motor Inertia by: (oz-in-sec ²)	0.0001	



G364



Máquinas Eléctricas y Drives CC grandes: SE-BDCM

b) **EXCITACIÓN SEPARADA por Corriente de Campo I_f : Constante o Variable**
Chopper vs Rectificador SCR para Control por **Tensión de Armadura**
+ Chopper vs Rectificador de Campo para Control por Campo (I_f)
(potencias y tamaños mayores, aplicaciones industriales)

Ejemplos comerciales: actual, ej. para **modernizar instalaciones existentes en CC**

SIEMENS Sinamics DCM drive technology

<https://new.siemens.com/us/en/products/drives/sinamics-electric-drives/dc-drive-technology.html>

[AyME_04a_SIEMENS Sinamics DCM_DC Drives_Brochure_2019.pdf](#)



ABB DCS550, DCS800 Drives

<https://new.abb.com/drives/dc>

Etc..

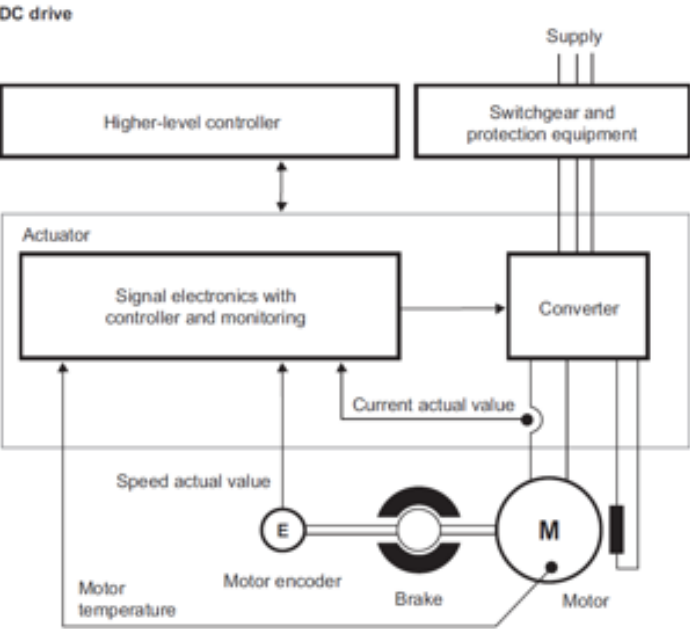
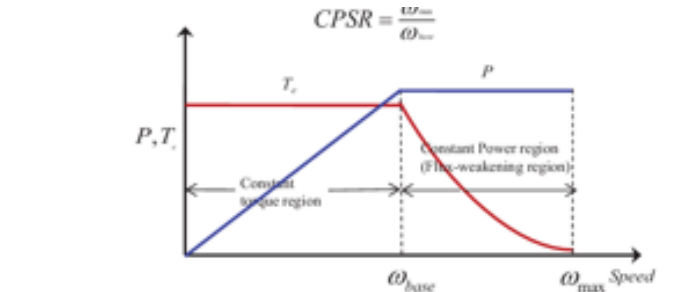


Máquina Eléctrica CC Excitación Separada: SE-BDCM

Accionamiento CC/CC (Chopper) Tracción p/Trenes 4 cuadrantes **INVESTIGAR!**

https://en.wikipedia.org/wiki/Siemens%E2%80%93Duewag_U2 Siemens–Duewag U2

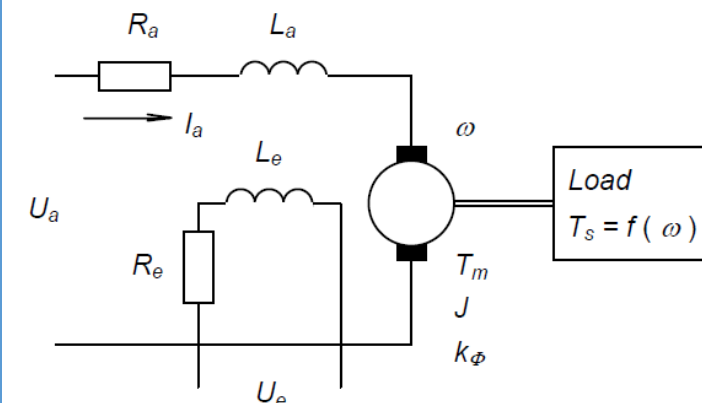
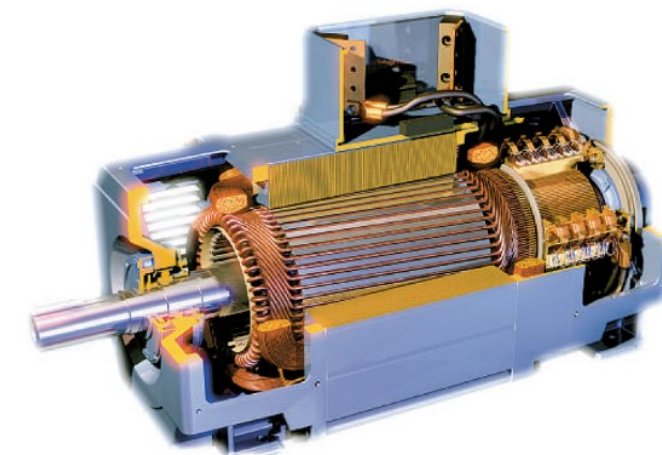
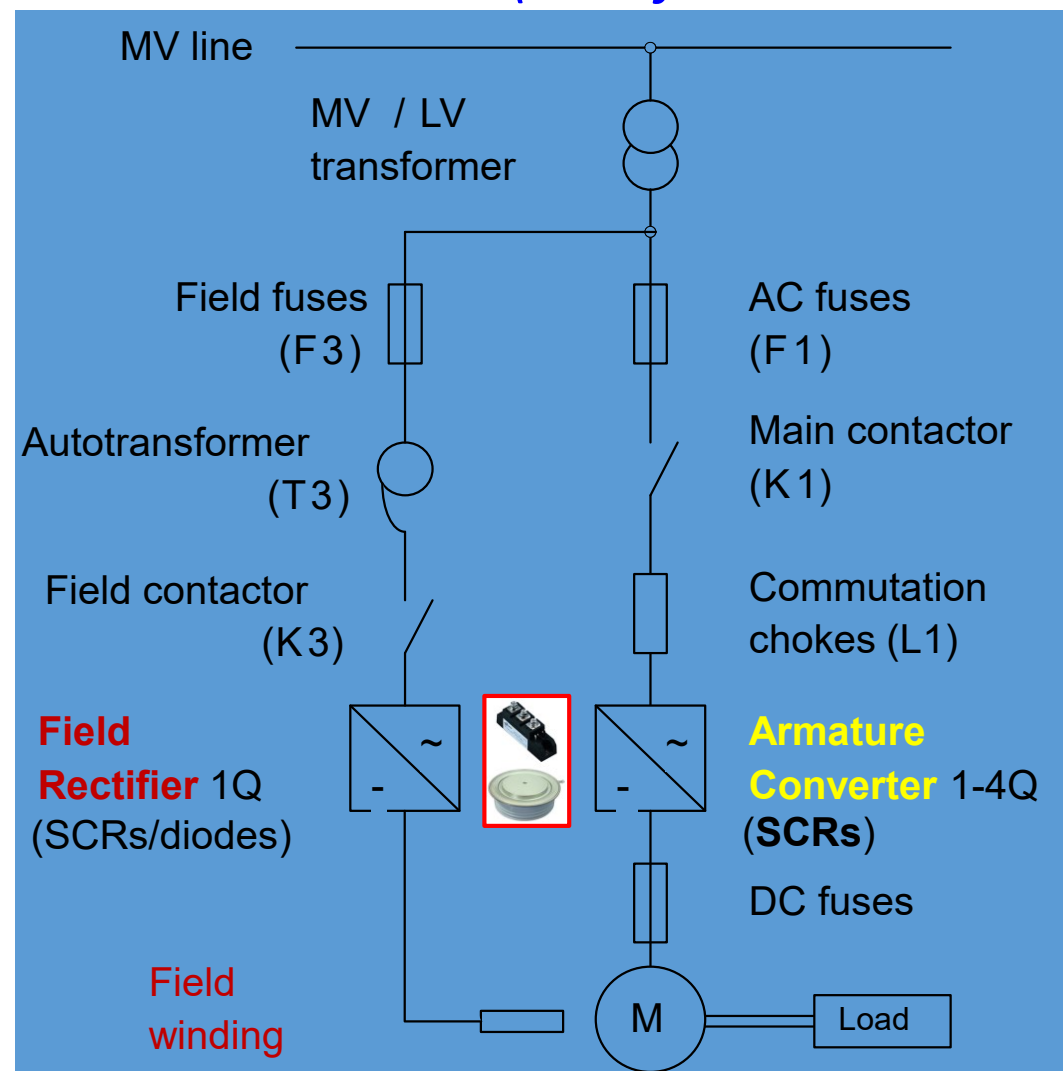
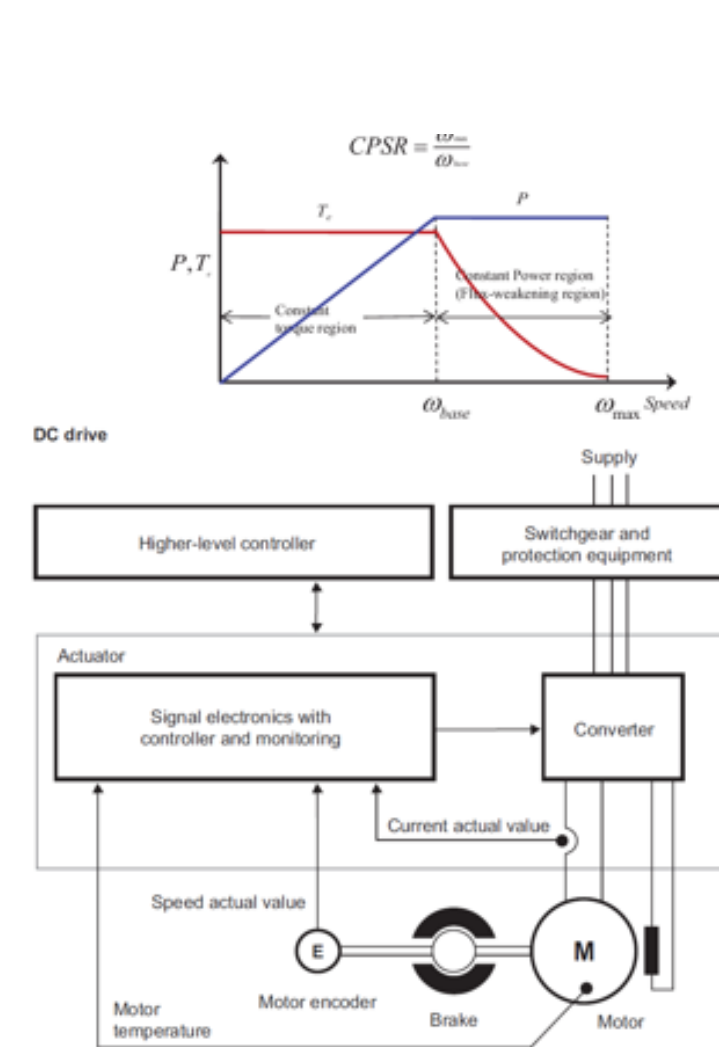
https://en.wikipedia.org/wiki/Metrotranv%C3%ADa_Mendoza **Metrotranvía Mendoza**



Siemens-Duewag U2	Specifications	
	Car body construction	Fibreglass (cabs), Steel (body)
	Car length	24 m (78 ft 8 7/8 in)
	Width	2,562 mm (8 ft 4 7/8 in)
	Height	3,780 mm (12 ft 4 7/8 in)
	Doors	8
	Articulated sections	1
	Maximum speed	80 km/h (50 mph)
	Weight	35,000 kg (77,000 lb)
	Power output	300 kW (400 hp)
	Electric system(s)	600-750 V DC OHLE
	Current collector(s)	Pantograph
	Braking system(s)	Dynamic Air
	Safety system(s)	CBTC
	Coupling system	Scharfenberg
	Multiple working	up to 5 cars
	Track gauge	1,435 mm (4 ft 8 1/2 in) standard gauge
	Seating	upholstered neoprene foam
Manufacturer Siemens		
Built at Düsseldorf, West Germany (Duewag) Florin, California (Siemens California)		
Constructed 1968-1990		
Entered service 1968 (Frankfurt U-Bahn) 1978 (Edmonton LRT) 1981 (Calgary C-Train) 1981 (San Diego MTS)		
Number built 297		
Number preserved 6		
Successor Siemens SD660, Siemens S70 and S200		
Capacity 264 people (including standees)		
Operator(s) Frankfurt U-Bahn (formerly) Metrotranvía Mendoza Edmonton Light Rail Transit Calgary Transit San Diego MTS (formerly)		

Máquina Eléctrica CC Excitación Separada: SE-BDCM

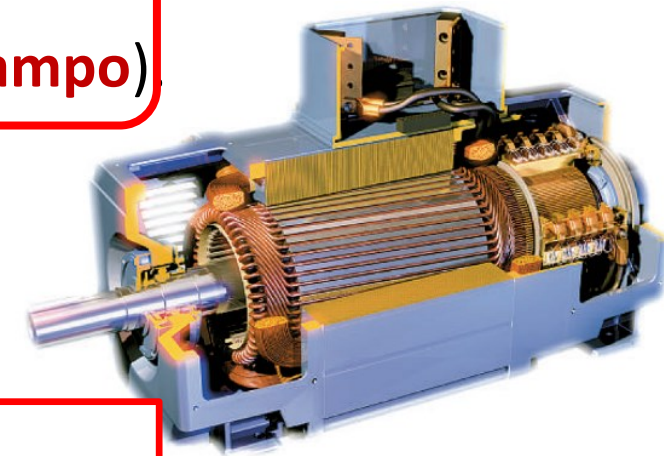
Accionamiento CC con Convertidor dual CA-CC (Rectificador con Tiristores o SCRs)



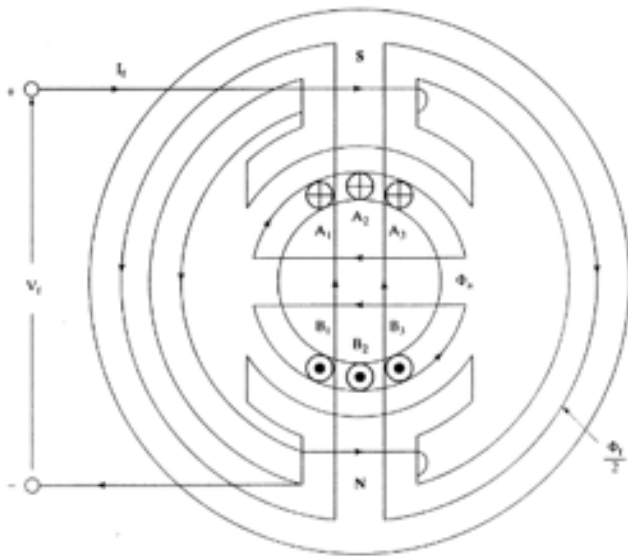
Máquina Eléctrica CC Excitación Separada: SE-BDCM

Construcción:

- **Conmutador Mecánico: Escobillas + Colector** en Rotor (**Armadura**).
- **Excitación Separada:** corriente de Campo I_f en Estator (circuito de **Campo**)



Principio de Funcionamiento



Excitación o "Campo" i_f : campo (flujo) magnético principal $\phi_f \uparrow$

Armatura i_a : campo (flujo) magnético armadura $\leftarrow \phi_a$

2 campos (flujos) magnéticos (tienden a alinearse, gira en sentido horario); pero **Conmutador mecánico:** bobina Armadura activa

$\leftarrow \phi_a$ **siempre** en cuadratura $\perp \phi_f \uparrow \rightarrow$ **máximo Torque** unidirecc.:

$$T_{em} = k_t \cdot \phi_f \cdot i_a \cdot \sin(90^\circ) = k_t \cdot \phi_f \cdot i_a$$

Inversión de polaridad i_f ó i_a (una sola) $\rightarrow$ invierte sentido de T_{em} .

Tensión inducida: $e_a = k_e \cdot \phi_f \cdot \omega_m$

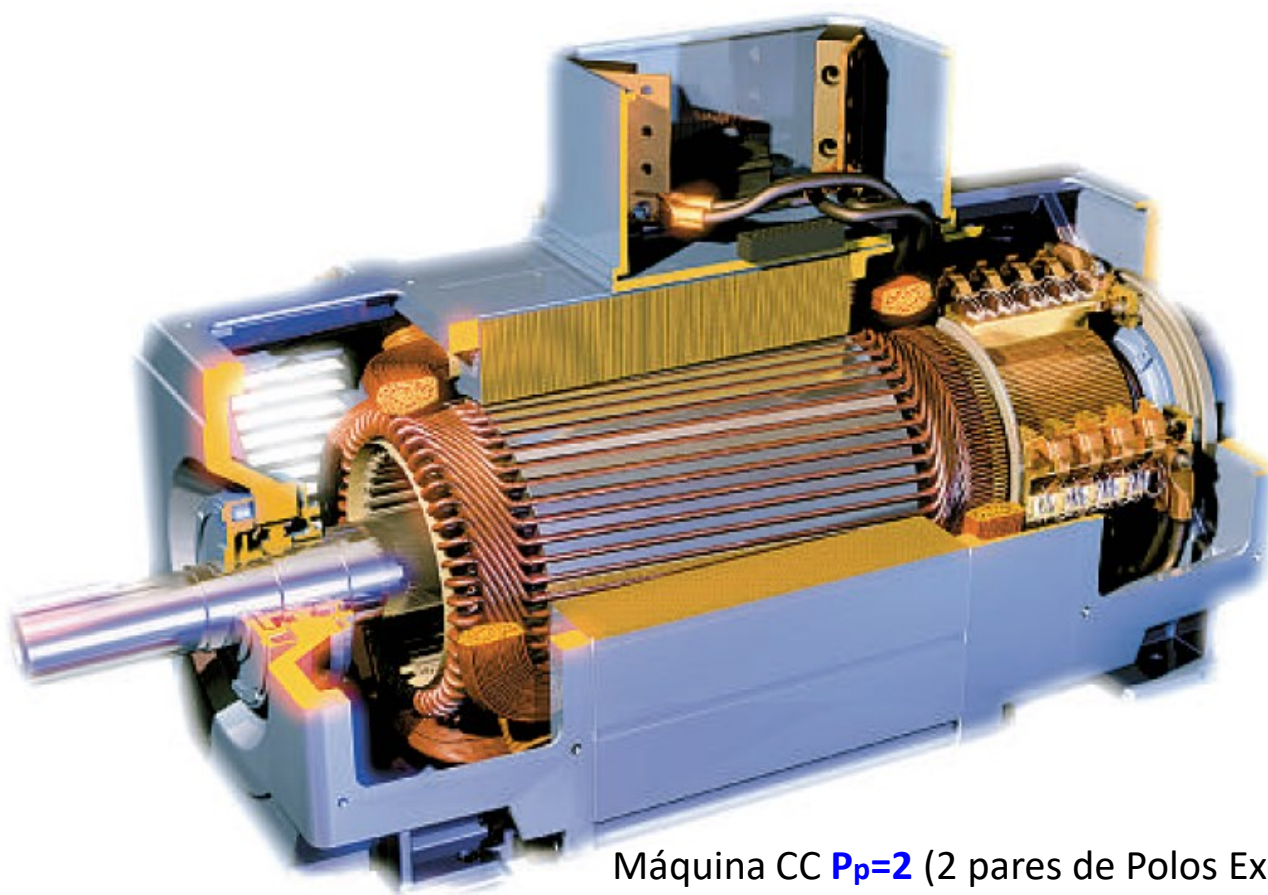
$$k_e = k \cdot P_p$$

Máq. 2 pares de Polos
Excit. / 2 pares Escobillas

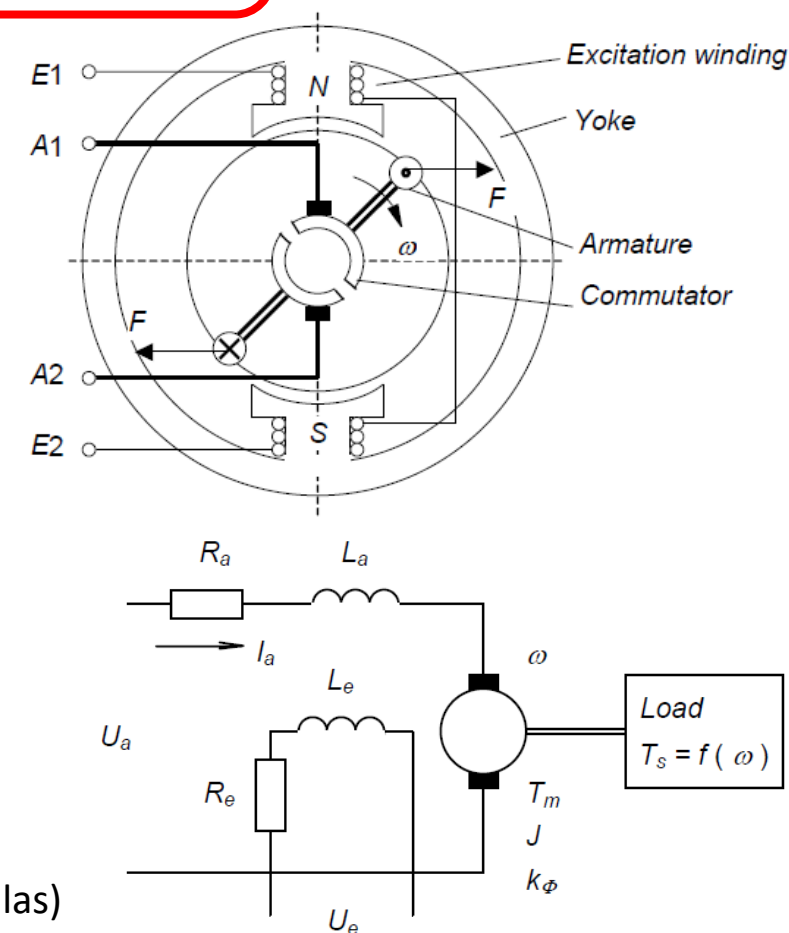
Máquina Eléctrica CC Excitación Separada: SE-BDCM

Construcción:

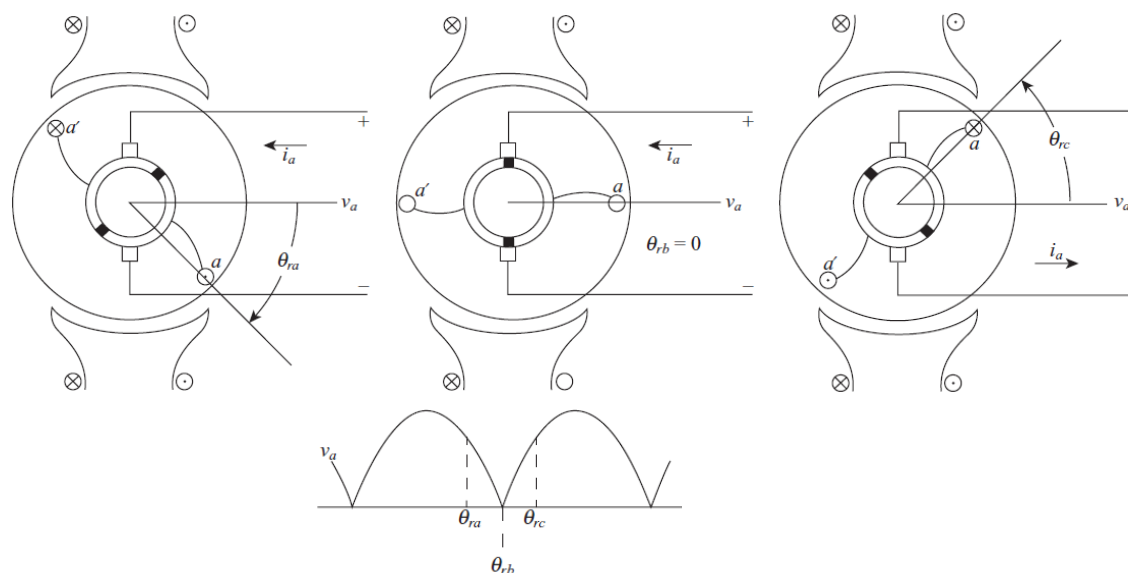
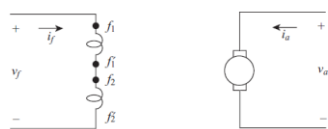
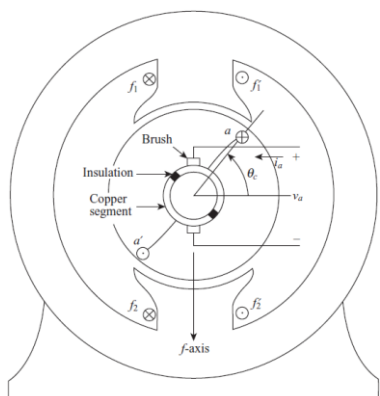
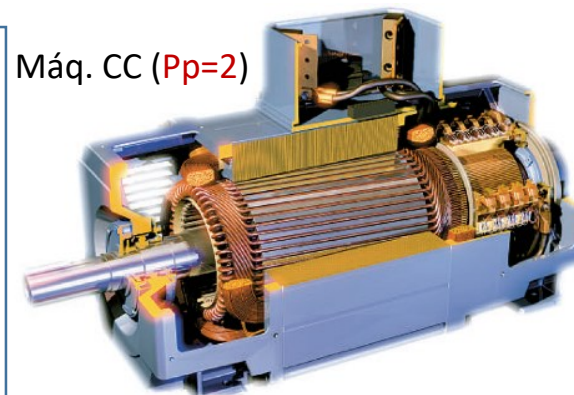
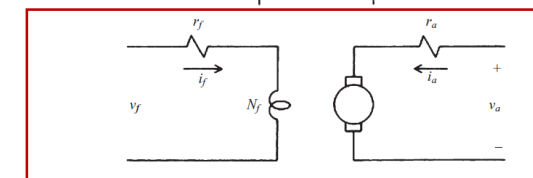
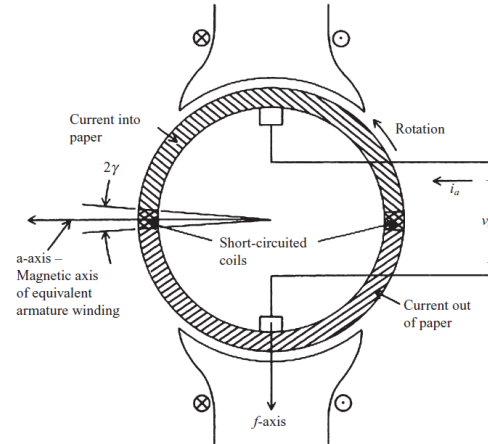
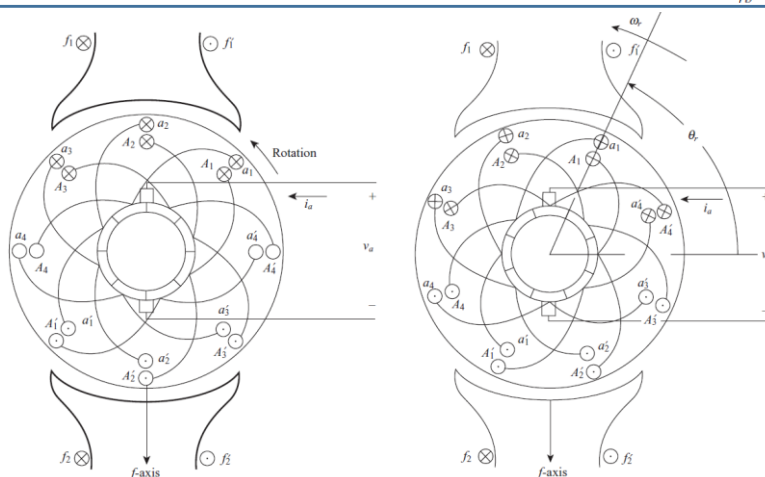
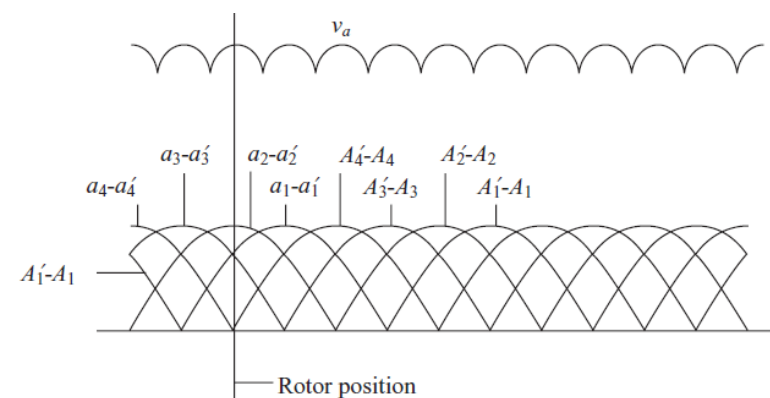
- **Conmutador Mecánico: Escobillas + Colector** en Rotor (**Armadura**).
- **Excitación Separada:** corriente de Campo I_f en Estator (circuito de **Campo**)



Máquina CC $P_p=2$ (2 pares de Polos Excit. / 2 pares Escobillas)



Máquina Eléctrica CC Excitación Separada: SE-BDCM

Máquina CC ($P_p=1$) **ELEMENTAL**
Conmutación elemental (giro anti-horario, visto desde conmutador mecánico, NDE)

Máq. CC ($P_p=2$)

Máquina CC ($P_p=1$) práctica
idealizada: Armadura con Bobinado distribuido uniforme

Máquina CC ($P_p=1$)
Armadura (rotor) con
Bobinado paralelo
(múltiples espiras)

Conmutación (tensión inducida v_a a circuito abierto)


Máquina Eléctrica SE-BDCM: Modelo Dinámico NL

Modelo Dinámico

Conversión de energía electro-mecánica (reversible), idealizada (sin pérdidas ni almacenamiento):

$$e_a(t) = k_e \cdot i_f(t) \cdot \omega_m(t), \quad k_e \left[\frac{\text{V}}{\text{A} \cdot \text{rad/s}} \right]$$

$$T_{em}(t) = k_t \cdot i_f(t) \cdot i_a(t), \quad k_t \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}^2} \right]$$

$$p_e(t) = e_a(t) \cdot i_a(t) = k_e \cdot i_f(t) \cdot \omega_m(t) \cdot i_a(t)$$

$$p_m(t) = T_{em}(t) \cdot \omega_m(t) = k_t \cdot i_f(t) \cdot i_a(t) \cdot \omega_m(t)$$

$$p_e(t) = p_m(t) \Rightarrow k_e \equiv k_t$$

Ecuaciones dinámicas: Subsistemas acoplados Mecánico, Eléctrico (Armadura y Excitación), Térmico

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

Rotor: 2° Ley Newton rotacional

$$v_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t)$$

Circuito Armadura: KVL (Kirchhoff Voltage Law)

$$v_f(t) = R_f \cdot i_f(t) + L_f \cdot \frac{di_f(t)}{dt}$$

Circuito Excitación: KVL (Kirchhoff Voltage Law)

$$p_{\text{Joule}}(t) = R_a \cdot i_a^2(t) + R_f \cdot i_f^2(t)$$

Pérdidas de potencia (Efecto Joule)

$$p_{\text{Joule}}(t) = C_{Tm} \cdot \frac{dT_m(t)}{dt} + \frac{1}{R_{Tm-amb}} \cdot (T_m(t) - T_{amb}^{\circ}(t))$$

Transferencia y acumulación de Calor

$$R_a(T_m^{\circ}(t)) = R_{aREF} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_m^{\circ}(t) - T_{mREF}^{\circ}))$$

Resistencia eléctrica de bobinados:

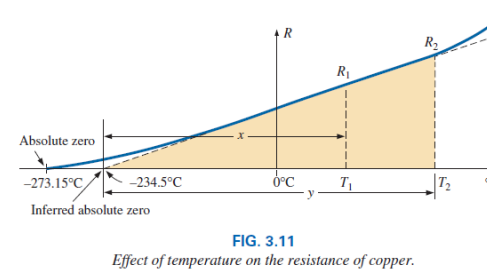
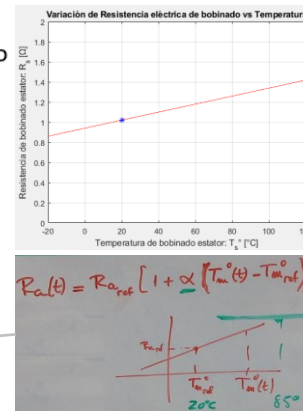
$$R_f(T_m^{\circ}(t)) = R_{fREF} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_m^{\circ}(t) - T_{mREF}^{\circ}))$$

aumenta con temperatura

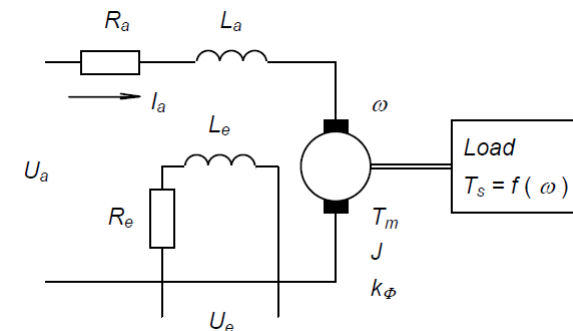
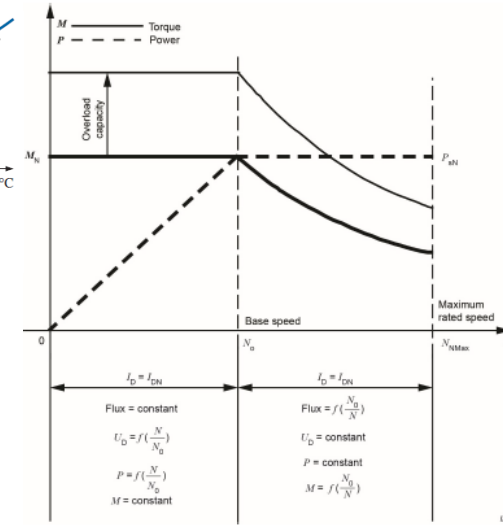
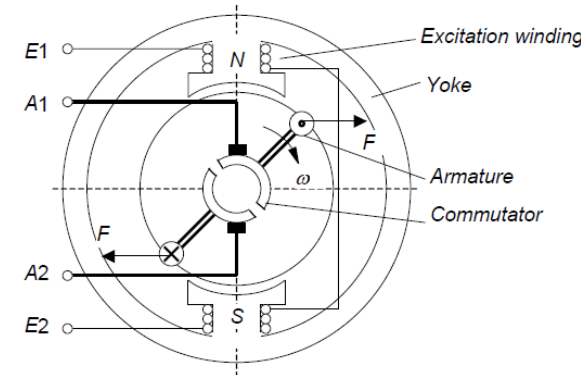
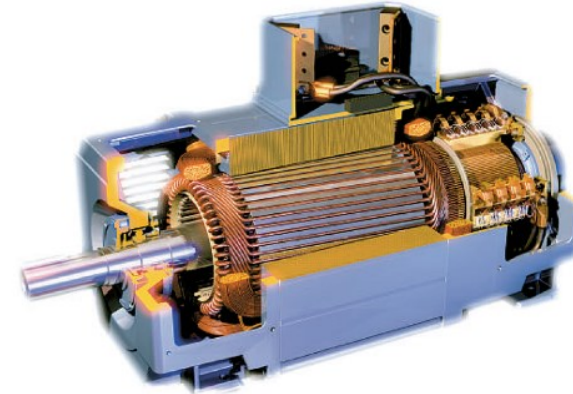
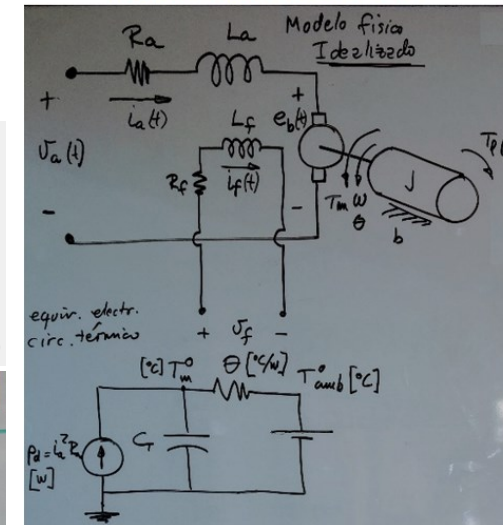
Ecuación de Estado (NO Lineal: NLDS)

$$\text{NLDS}_5 \begin{cases} \frac{d\theta_m(t)}{dt} \equiv \omega_m(t) \\ J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = k_t \cdot i_f(t) \cdot i_a(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_l(t) \\ L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = -R_a \cdot i_a(t) - k_e \cdot i_f(t) \cdot \omega_m(t) + v_a(t) \\ L_f \cdot \frac{di_f(t)}{dt} = -R_f \cdot i_f(t) + v_f(t) \\ C_{Tm} \cdot \frac{dT_m^{\circ}(t)}{dt} = R_a \cdot i_a^2(t) + R_f \cdot i_f^2(t) - \frac{1}{R_{Tm-amb}} \cdot (T_m^{\circ}(t) - T_{amb}^{\circ}(t)) \end{cases}$$

$$\mathbf{x}(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \\ i_f(t) \\ T_m^{\circ}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_c(t) \equiv \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_f(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_d(t) \equiv \begin{bmatrix} T_l(t) \\ T_{amb}^{\circ}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \end{bmatrix}$$



Modelo Físico Idealizado

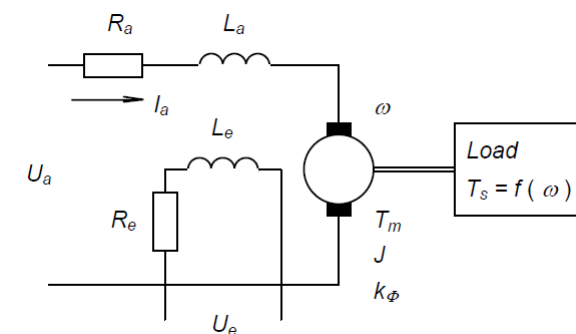
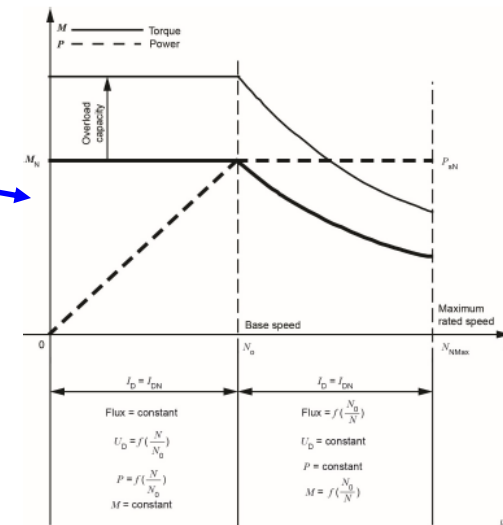
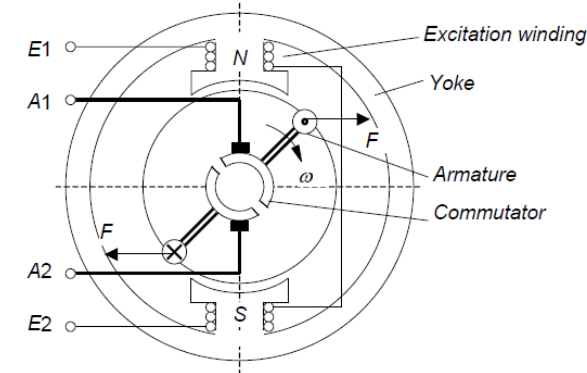
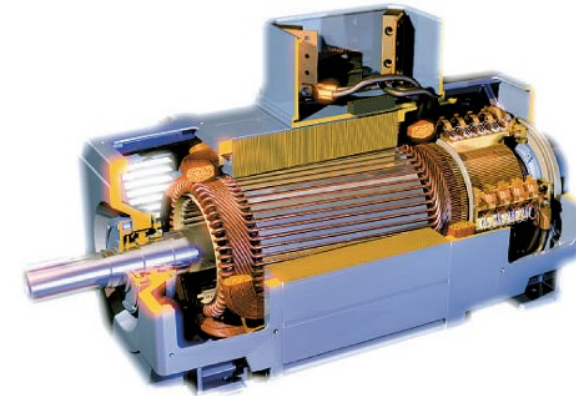
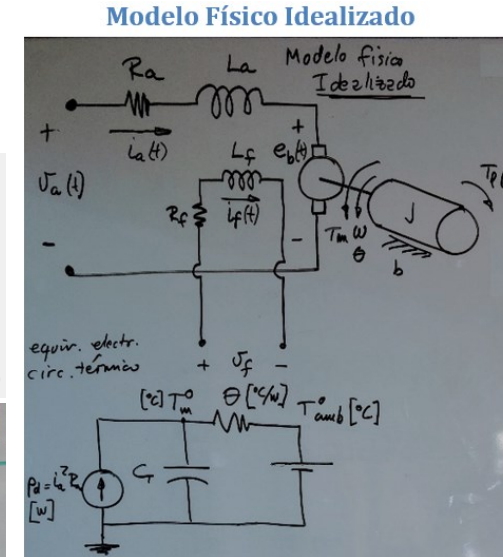
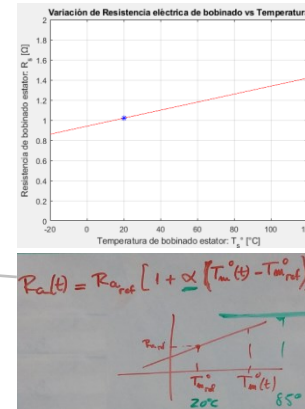


Máquina Eléctrica SE-BDCM: Modelo Dinámico NL

Ecuación de Estado **[NO Lineal: NLDS]**

$$\begin{aligned}
 \text{NLDS}_5 \left\{ \begin{aligned} \frac{d\theta_m(t)}{dt} &\equiv \omega_m(t) \\ J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} &= k_t \cdot i_f(t) \cdot i_a(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_l(t) \\ L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} &= -R_a \cdot i_a(t) - k_e \cdot i_f(t) \cdot \omega_m(t) + v_a(t) \\ L_f \cdot \frac{di_f(t)}{dt} &= -R_f \cdot i_f(t) + v_f(t) \\ C_{Tm} \cdot \frac{dT_m^\circ(t)}{dt} &= R_a \cdot i_a^2(t) + R_f \cdot i_f^2(t) - \frac{1}{R_{Tm-amb}} \cdot (T_m^\circ(t) - T_{amb}^\circ(t)) \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

$$x(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \\ i_f(t) \\ T_m^\circ(t) \end{bmatrix}, \quad u_c(t) \equiv \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_f(t) \end{bmatrix}, \quad u_d(t) \equiv \begin{bmatrix} T_l(t) \\ T_{amb}^\circ(t) \end{bmatrix}, \quad y(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \end{bmatrix}$$



Variables manipuladas (acciones de Control):

$v_a(t)$: Tensión de Armadura

$v_f(t)$: Tensión de Campo → Field Weakening / Field Forcing
Hacer!!

Linealización Global Jacobiana:

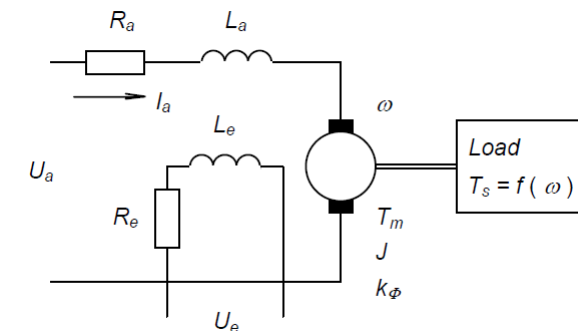
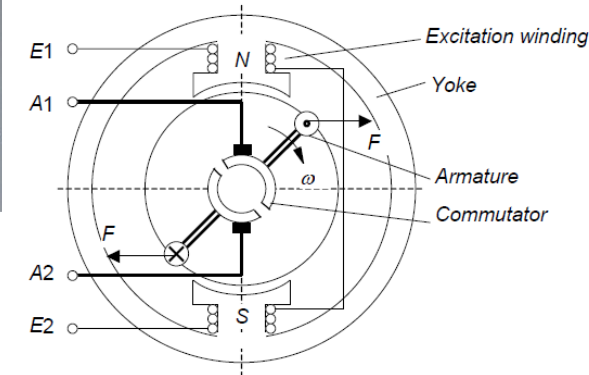
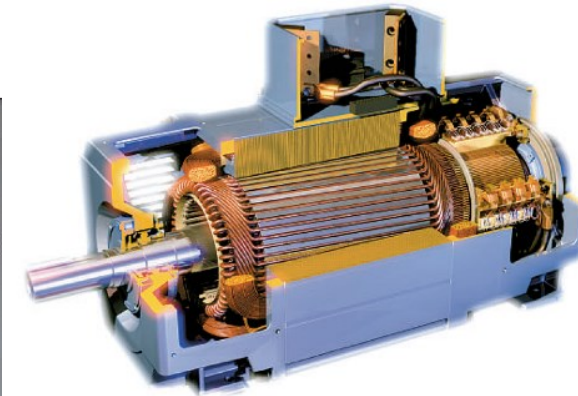
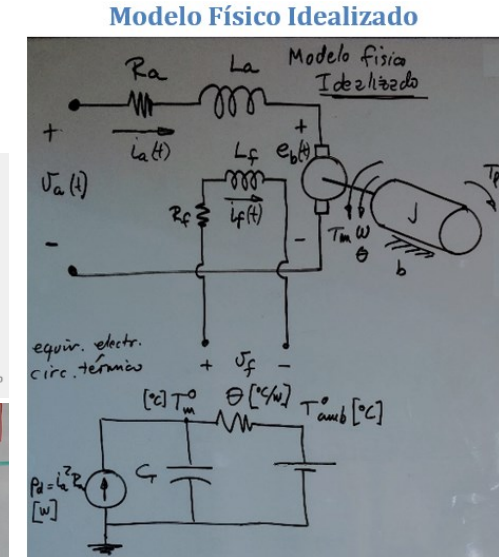
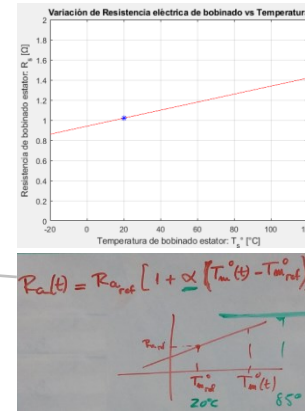
→ Espacio Operación NL + modelo LPV
HACER!

Ver pág. Siguiete: Curvas Características (Espacio de Operación)

Máquina Eléctrica SE-BDCM: Modelo Dinámico NL

Ecuación de Estado [NO Lineal: NLDS]

$$\begin{aligned}
 \text{NLDS}_5 \quad & \begin{cases} \frac{d\theta_m(t)}{dt} \equiv \omega_m(t) \\ J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = k_t \cdot i_f(t) \cdot i_a(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_l(t) \\ L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = -R_a \cdot i_a(t) - k_e \cdot i_f(t) \cdot \omega_m(t) + v_a(t) \\ L_f \cdot \frac{di_f(t)}{dt} = -R_f \cdot i_f(t) + v_f(t) \\ C_{Tm} \cdot \frac{dT_m^\circ(t)}{dt} = R_a \cdot i_a^2(t) + R_f \cdot i_f^2(t) - \frac{1}{R_{Tm-amb}} \cdot (T_m^\circ(t) - T_{amb}^\circ(t)) \end{cases} \\
 x(t) & \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \\ i_f(t) \\ T_m^\circ(t) \end{bmatrix}, \quad u_c(t) \equiv \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_f(t) \end{bmatrix}, \quad u_d(t) \equiv \begin{bmatrix} T_l(t) \\ T_{amb}^\circ(t) \end{bmatrix}, \quad y(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

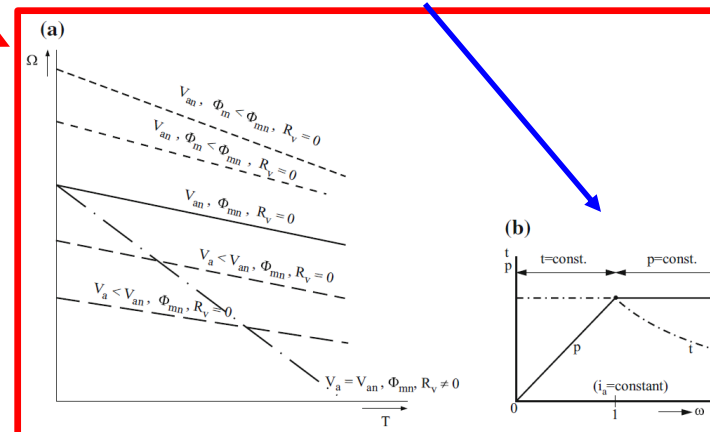


Curvas Características T-Ω Estacionarias (Steady State)

Equilibrio Dinámico → Espacio de Puntos de Operación (Cuasi-Estacionario NL)

$$\begin{aligned}
 \text{const} & \equiv \Omega_{m_o} \\
 T_{em_o} & \equiv k_t \cdot I_{f_o} \cdot I_{a_o} \equiv b_m \cdot \Omega_{m_o} + T_{l_o} \\
 R_f \cdot I_{f_o} & \equiv V_{f_o} \\
 V_{a_o} & \equiv R_a \cdot I_{a_o} + k_e \cdot I_{f_o} \cdot \Omega_{m_o} \\
 R_a \cdot I_{a_o}^2 + R_f \cdot I_{f_o}^2 & \equiv \frac{1}{R_{Ta-amb}} \cdot (T_{a_o}^\circ - T_{amb_o}^\circ) \\
 \text{const} & \equiv \Omega_{m_o} \equiv \frac{V_{a_o} - R_a \cdot I_{a_o}}{k_e \cdot I_{f_o}} \equiv \frac{V_{a_o} - R_a \cdot \frac{T_{em_o}}{k_t \cdot I_{f_o}}}{\frac{k_e}{R_f} \cdot V_{f_o}} \equiv \frac{V_{a_o} - R_a \cdot \frac{(b_m \cdot \Omega_{m_o} + T_{l_o})}{k_t \cdot I_{f_o}}}{\frac{k_e}{R_f} \cdot V_{f_o}}
 \end{aligned}$$

Control Velocidad: $V_a \rightarrow I_f$



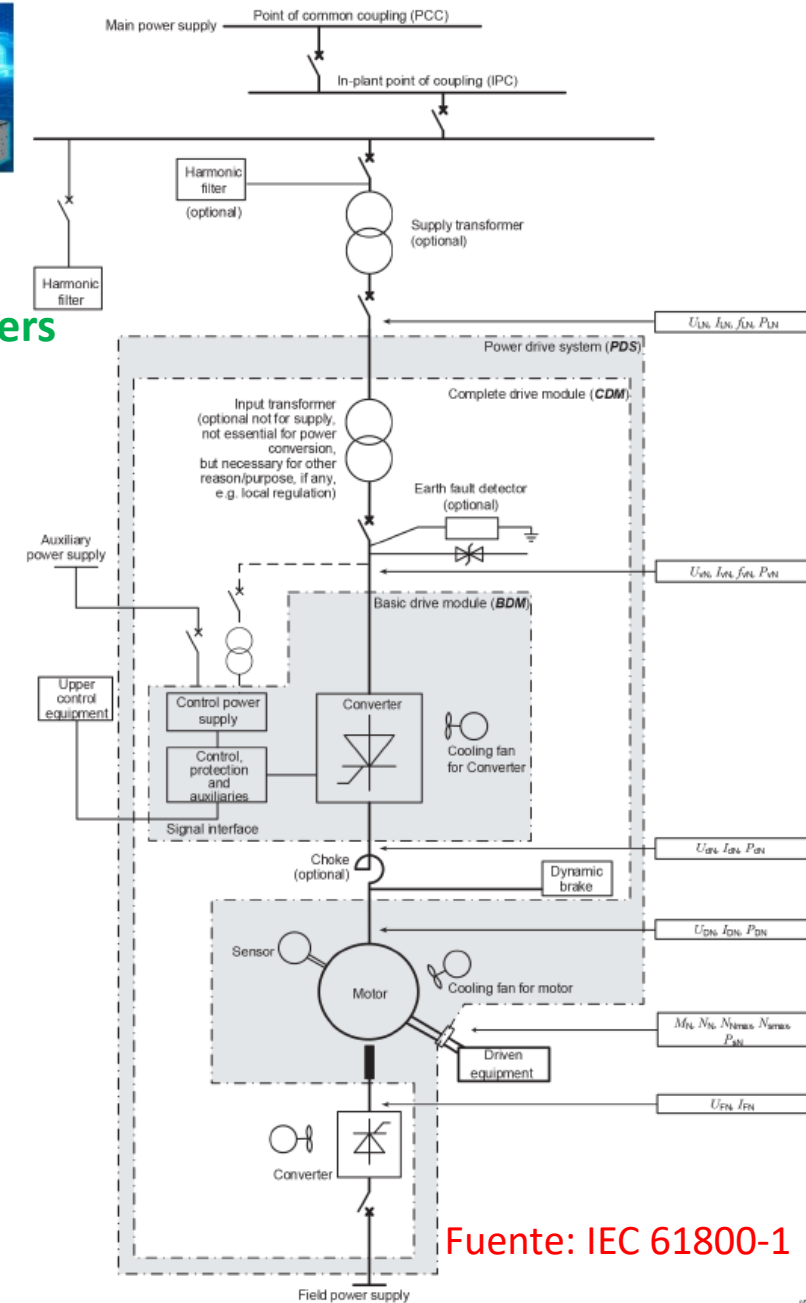
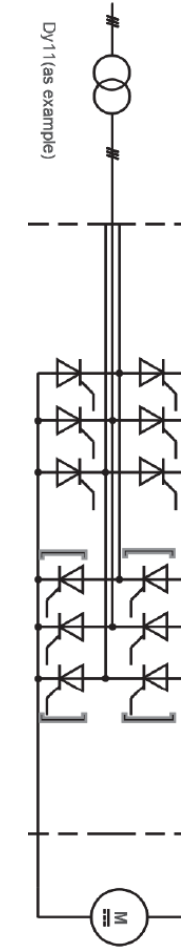
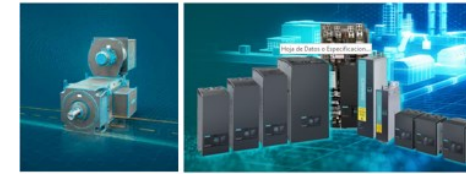
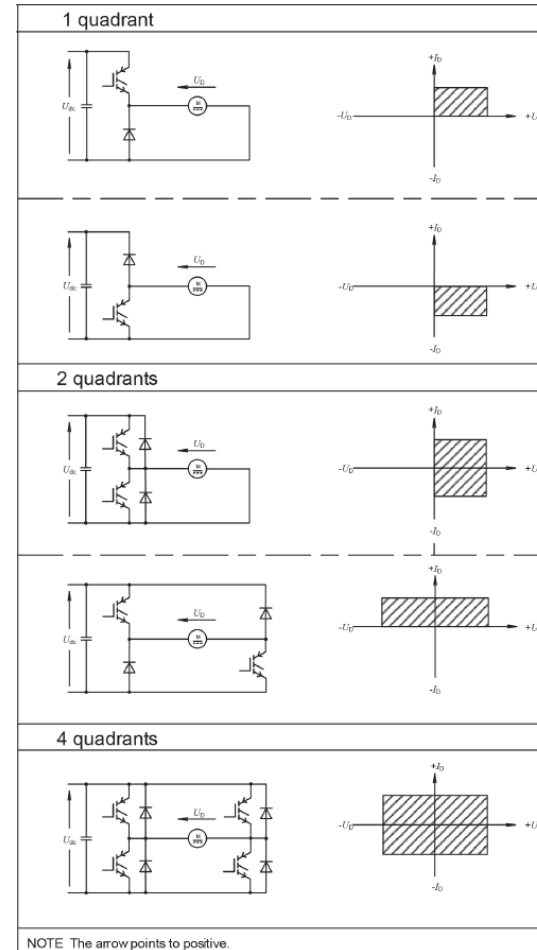
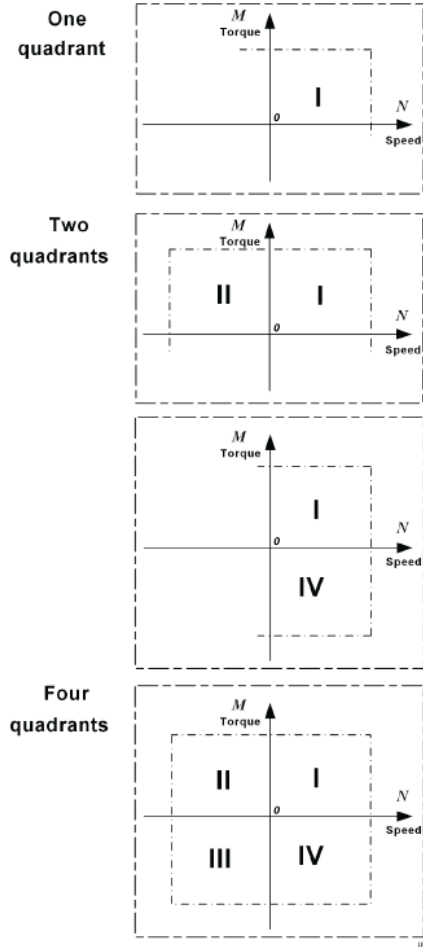
IEC 61800-1: DC Drives

Cuadrantes de Operación y Diagrama Funcional

Cuadrantes de Operación

Self-commutated IGBT converters
(DC Choppers)

Line-commutated
SCR AC/DC converters

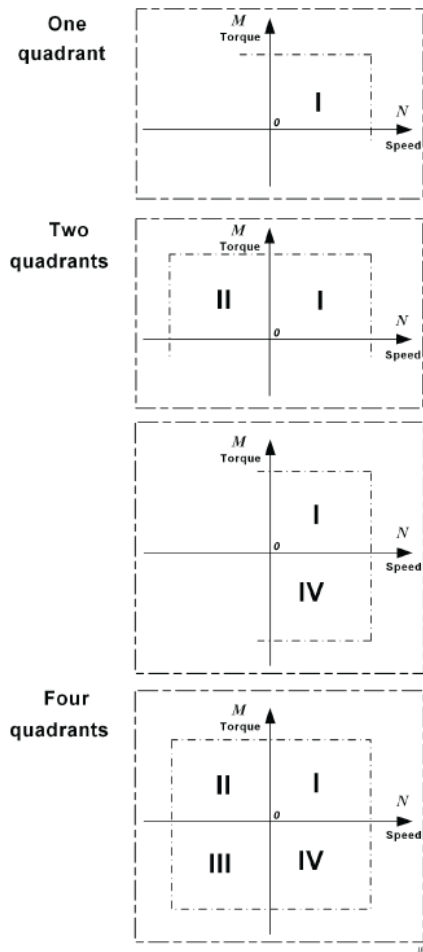


Fuente: IEC 61800-1

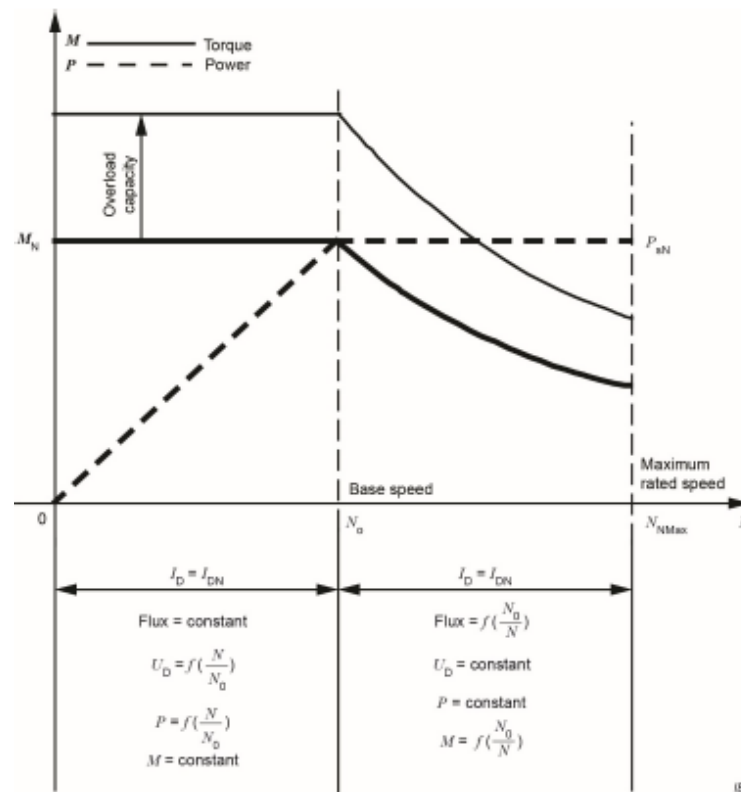
IEC 61800-1: DC Drives

Cuadrantes de Operación y Regiones de Operación

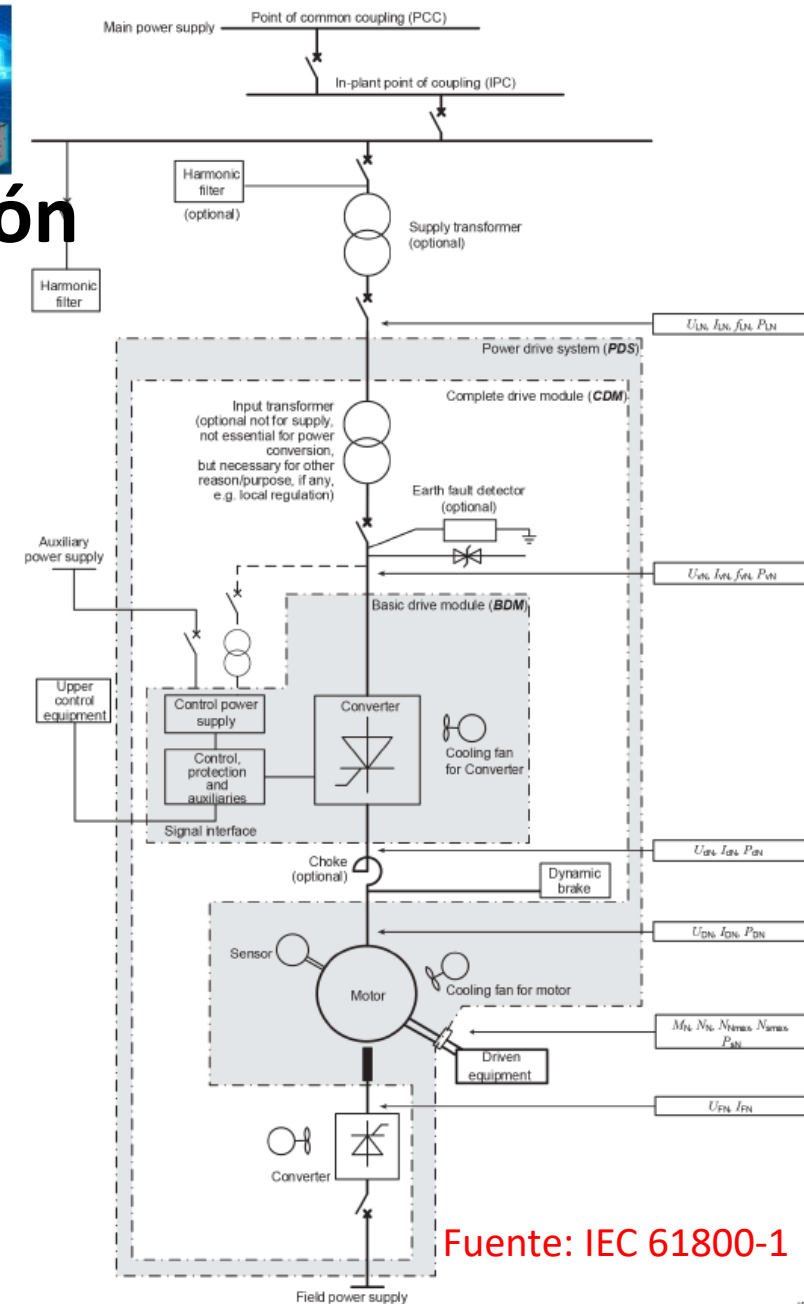
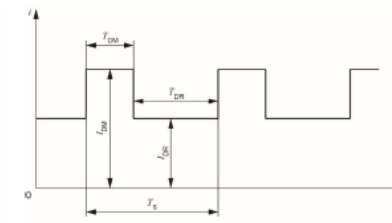
Cuadrantes de Operación



Regiones de Operación (I) Torque y Potencia vs Veloc.



Ciclos de Sobrecarga



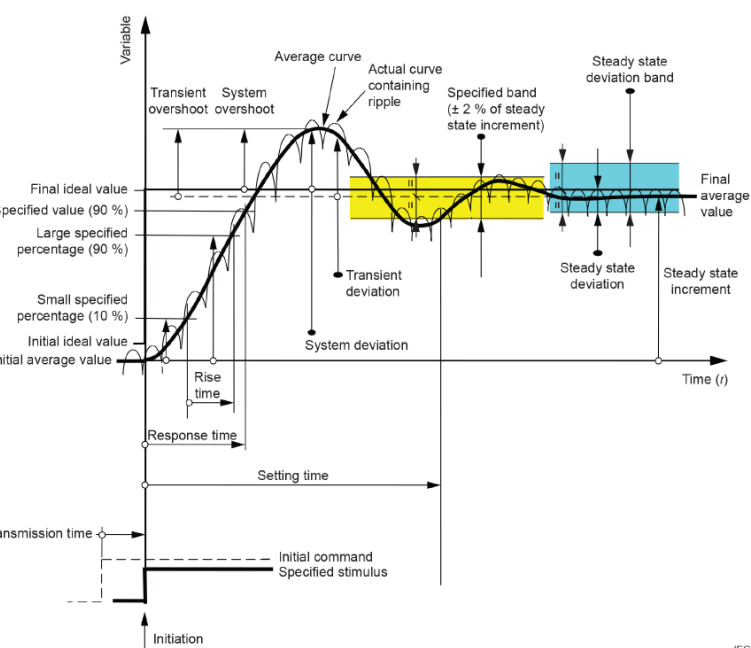
Fuente: IEC 61800-1

IEC 61800-1: DC Drives

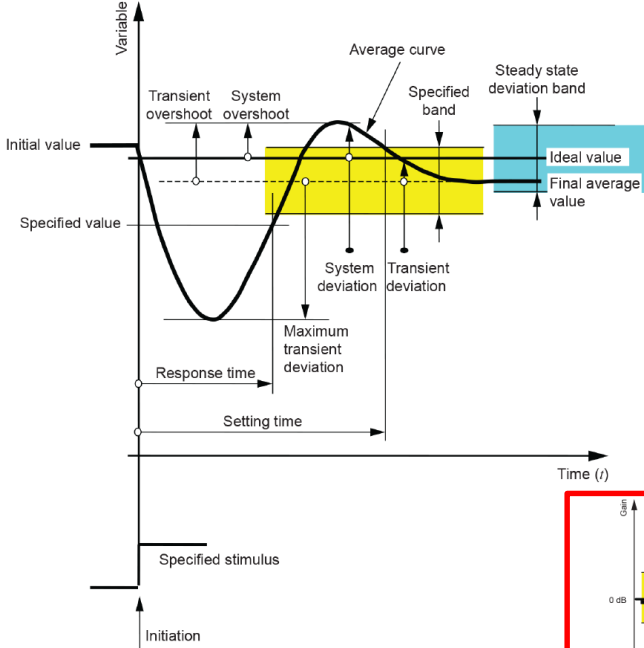
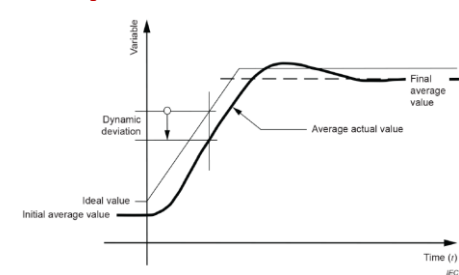
Respuesta Dinámica a Cambios de Ref. y Carga

Escalón de Referencia de Velocidad

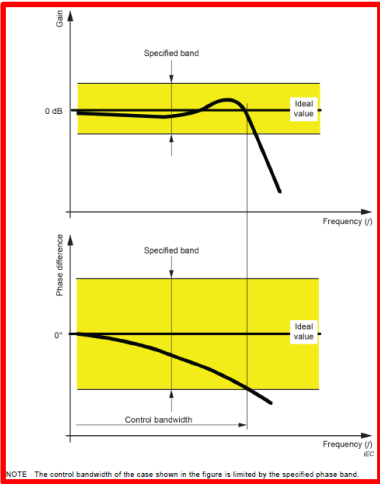
Escalón de Carga o variable operativa



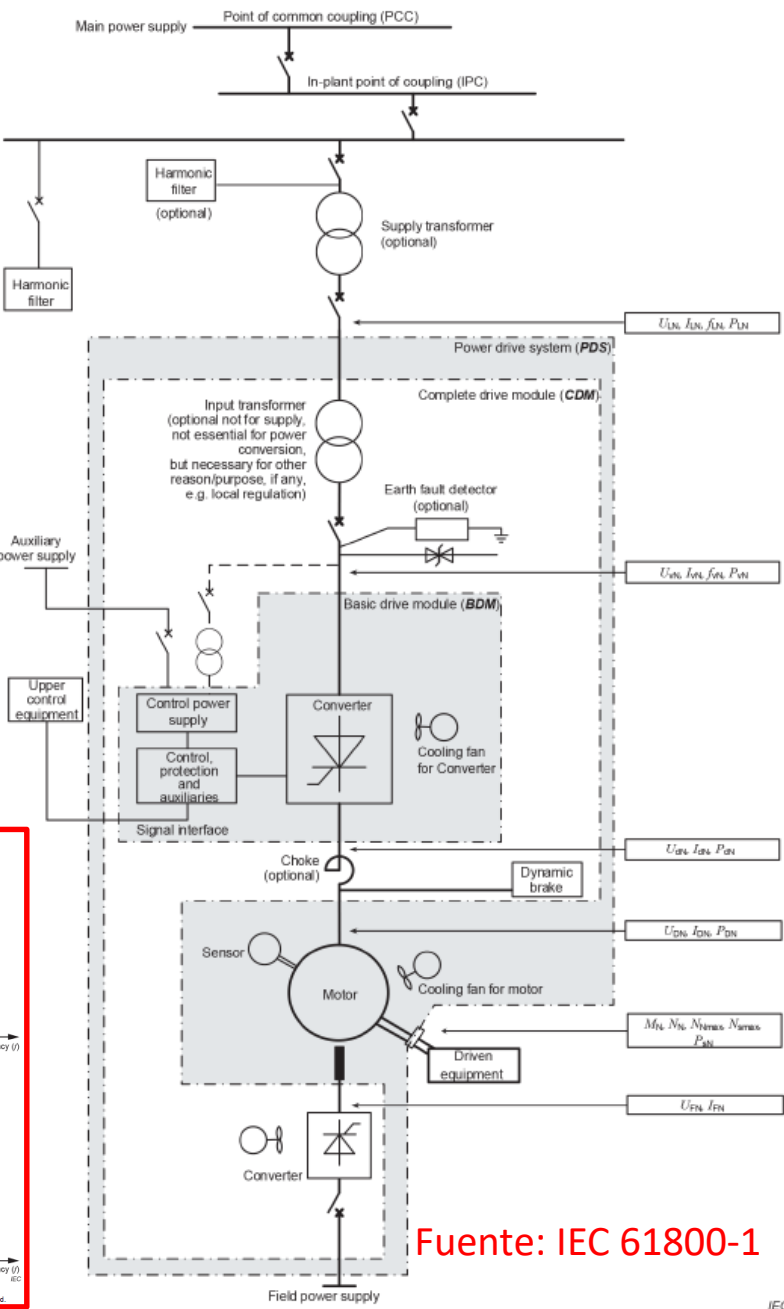
Rampa de referencia de Velocidad



Respuesta en Frecuencia (Bode a Ref. Velocidad)



NOTE: The control bandwidth of the case shown in the figure is limited by the specified phase band.



Fuente: IEC 61800-1

Aplicación: STS Crane Main Hoist (2 Motores SE-BDCM)

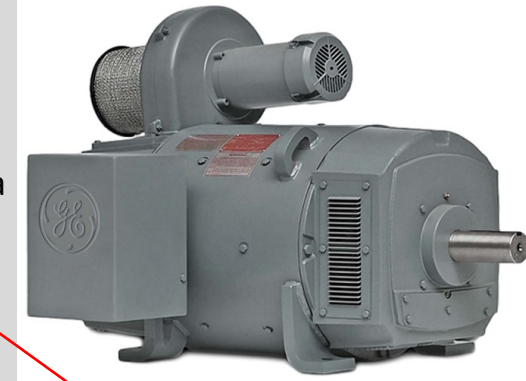
Accionamiento CC de **Izaje Principal** en Grúa Portuaria (STS Container Crane, 40,6 t), 1997
4 Cuadrantes (regenerativo e inversión de marcha) con **control de campo independiente**
 Regiones: **Torque Constante** (0-850 rpm) vs. **Potencia Constante** (debilitamiento de campo) (850-2070 rpm):

2 Motores SE-BDCM marca **General Electric** CD Kinamatic: c/u **280 kW, 850/2070 rpm**, armadura 225 Vcc, 1360 A.

Configuración electromecánica del Sistema de Izaje (Main Hoist) con **2 Motores** → **misma velocidad con suma de torques**:

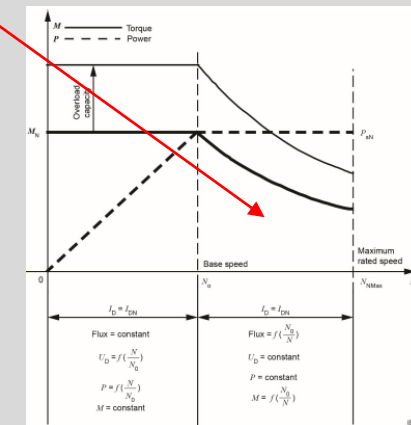
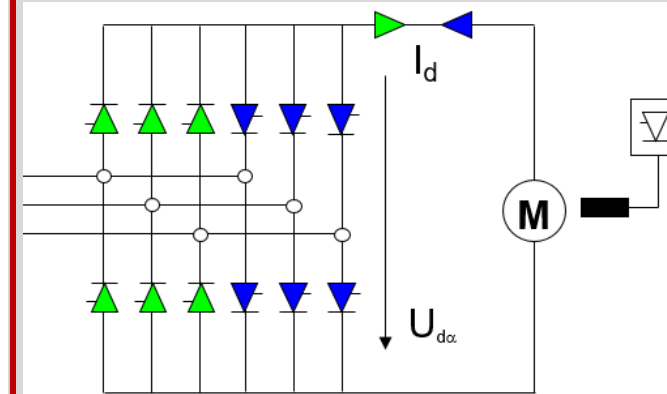
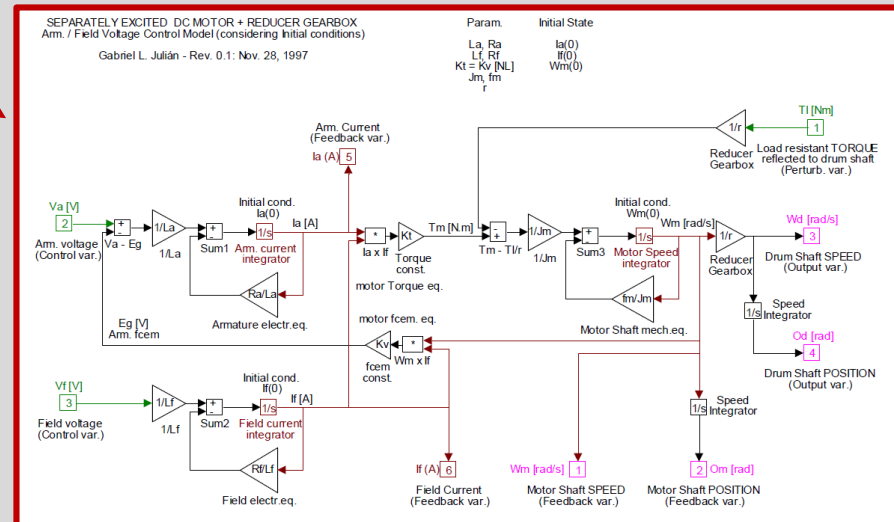
- **Ejes mecánicos** acoplados rígidamente al eje de entrada de una caja reductora de engranajes, para accionar el tambor de izaje.
- **Circuitos eléctricos de Armadura** (rotor) conectados **en serie** entre sí y alimentados por 1 rectificador trifásico controlado con tiristores (SCR) de **4 cuadrantes** (2 puentes en antiparalelo), desde fuente CA trifásica.
- **Circuitos eléctricos de Excitación Separada** (estator) conectados en serie entre sí y alimentados por 1 rectificador monofásico controlado con tiristores (SCR) de **1 cuadrante**, con **control de debilitamiento de campo o "Field Weakening"** (regulación de corriente de campo). En esta aplicación se utiliza específicamente la función de **debilitamiento de campo** para operar a potencia máxima nominal constante con velocidades mayores que la velocidad base con cargas menores que la nominal.

Ver documento: [AyME_04a_Motores CC Excitación Separada_Ref HDK HOIST DC Motors Mathematical Model.pdf](#)



Modelo dinámico global NL
 con **Parámetros compactados**
"1 motor equivalente"

a partir de datos reales del
 fabricante de Motores para
 este proyecto:

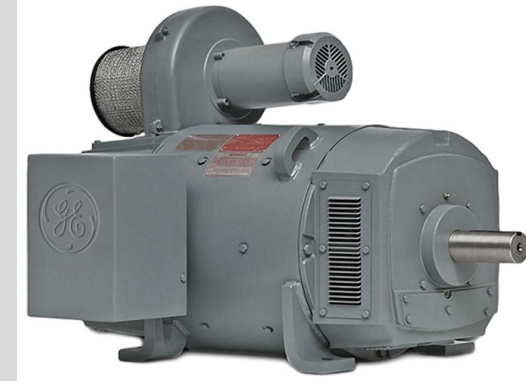


Aplicación: STS Crane Main Hoist (2 Motores SE-BDCM)

Accionamiento CC de **Izaje Principal** en Grua Portuaria (STS Container Crane, 40,6 t), 1997
4 Cuadrantes (regenerativo e inversión de marcha) con **control de campo independiente**
 Regiones: **Torque Constante** (0-850 rpm) vs. **Potencia Constante** (debilitamiento de campo) (850-2070 rpm):

HACER: Modelado, Simulación y Análisis

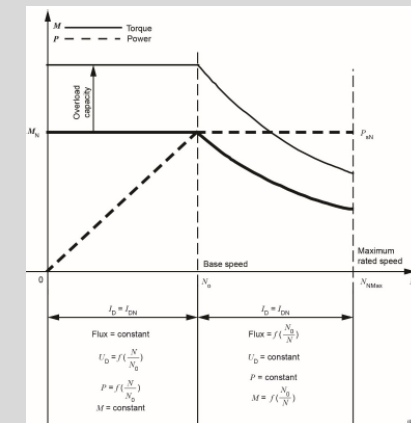
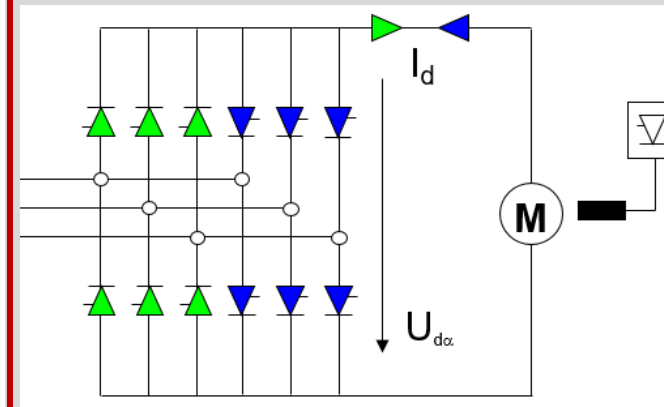
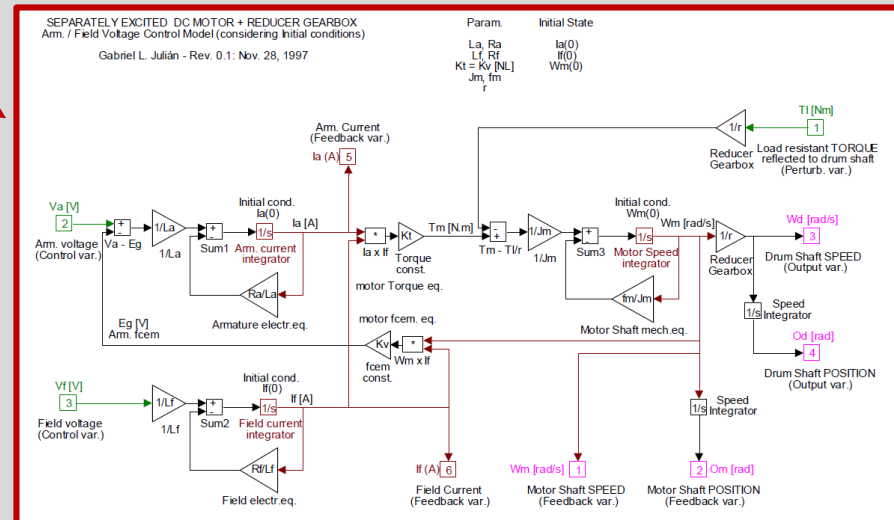
- Implementar Diagrama de Bloque de Estados escalar actualizado en SIMULINK (Parametrización y Estado Inicial: Script en Matlab)
- Agregar Subsistema Térmico acoplado (modelo simplificado de primer orden)
- Simular a Lazo Abierto distintos escenarios:
Estado Inicial y Excitación: entradas manipuladas y perturbación)



Modelo dinámico global NL
 con **Parámetros compactados**

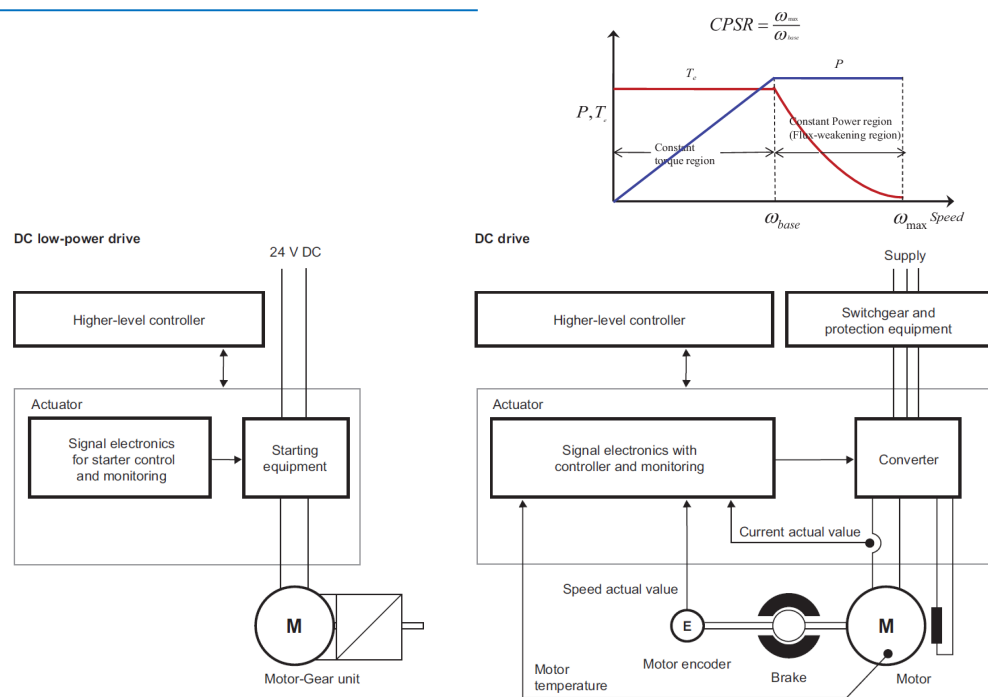
“1 motor equivalente”

a partir de datos reales del fabricante de Motores para este proyecto:



Unidad 4

Control de Accionamientos Eléctricos de Corriente Continua (DC Drives)



AUTOMÁTICA y MÁQUINAS ELÉCTRICAS

4. Control de Accionamientos de Corriente Continua

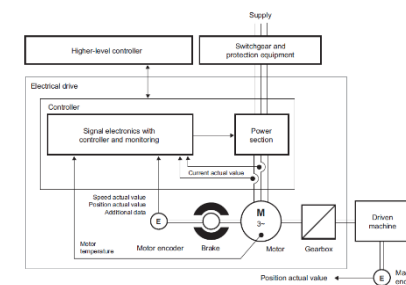
A. Máquina Eléctrica de CC con Conmutador Mecánico (Colector y Escobillas)

- Máquinas de CC con escobillas: Excitación por Imanes Permanentes vs. Excitación Separada.
- Modelado Dinámico: Espacio de Estado en DT – Funciones de Transferencia en DF.
- Análisis y Simulación del Comportamiento Dinámico.



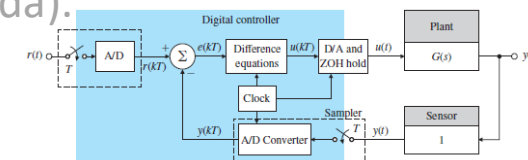
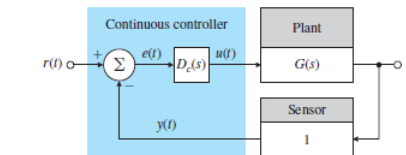
B. Control de Velocidad y Posición por Retroalimentación de Estado

- Control por Tensión de Armadura con Retroalimentación de Estado. Asignación de Polos.
- Observador de Estado.



C. Control en Cascada: Corriente/Torque – Movimiento (Velocidad/Posición)

- Desacoplamiento de retroalimentaciones naturales (propia y cruzada).
- Control interno de Torque $\rightarrow$ Modulador de torque ideal (aproximación).
- Control de movimiento (enfoque mecatrónico, con Modulador de torque ideal en cascada).



Máquina Eléctrica SE-BDCM: Modelo Dinámico NL

Modelo Dinámico

Conversión de energía electro-mecánica (reversible), idealizada (sin pérdidas ni almacenamiento):

$$e_a(t) = k_e \cdot i_f(t) \cdot \omega_m(t), \quad k_e \left[\frac{\text{V}}{\text{A} \cdot \text{rad/s}} \right]$$

$$T_{em}(t) = k_t \cdot i_f(t) \cdot i_a(t), \quad k_t \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}^2} \right]$$

$$p_e(t) = e_a(t) \cdot i_a(t) = k_e \cdot i_f(t) \cdot \omega_m(t) \cdot i_a(t)$$

$$p_m(t) = T_{em}(t) \cdot \omega_m(t) = k_t \cdot i_f(t) \cdot i_a(t) \cdot \omega_m(t)$$

$$p_e(t) = p_m(t) \Rightarrow k_e \equiv k_t$$

Ecuaciones dinámicas: Subsistemas acoplados Mecánico, Eléctrico (Armadura y Excitación), Térmico

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

Rotor: 2° Ley Newton rotacional

$$v_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t)$$

Circuito Armadura: KVL (Kirchhoff Voltage Law)

$$v_f(t) = R_f \cdot i_f(t) + L_f \cdot \frac{di_f(t)}{dt}$$

Circuito Excitación: KVL (Kirchhoff Voltage Law)

$$p_{\text{Joule}}(t) = R_a \cdot i_a^2(t) + R_f \cdot i_f^2(t)$$

Pérdidas de potencia (Efecto Joule)

$$p_{\text{Joule}}(t) = C_{Tm} \cdot \frac{dT_m(t)}{dt} + \frac{1}{R_{Tm-amb}} \cdot (T_m(t) - T_{amb}^{\circ}(t))$$

Transferencia y acumulación de Calor

$$R_a(T_m^{\circ}(t)) = R_{aREF} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_m^{\circ}(t) - T_{mREF}^{\circ}))$$

Resistencia eléctrica de bobinados:

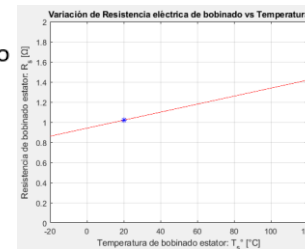
$$R_f(T_m^{\circ}(t)) = R_{fREF} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot (T_m^{\circ}(t) - T_{mREF}^{\circ}))$$

aumenta con temperatura

Ecuación de Estado (NO Lineal: NLDS)

$$\text{NLDS}_5 \begin{cases} \frac{d\theta_m(t)}{dt} \equiv \omega_m(t) \\ J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = k_t \cdot i_f(t) \cdot i_a(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_l(t) \\ L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = -R_a \cdot i_a(t) - k_e \cdot i_f(t) \cdot \omega_m(t) + v_a(t) \\ L_f \cdot \frac{di_f(t)}{dt} = -R_f \cdot i_f(t) + v_f(t) \\ C_{Tm} \cdot \frac{dT_m^{\circ}(t)}{dt} = R_a \cdot i_a^2(t) + R_f \cdot i_f^2(t) - \frac{1}{R_{Tm-amb}} \cdot (T_m^{\circ}(t) - T_{amb}^{\circ}(t)) \end{cases}$$

$$\mathbf{x}(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \\ i_f(t) \\ T_m^{\circ}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_c(t) \equiv \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_f(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_d(t) \equiv \begin{bmatrix} T_l(t) \\ T_{amb}^{\circ}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \end{bmatrix}$$



$$R_a(t) = R_{aREF} [1 + \alpha (T_m^{\circ}(t) - T_{mREF}^{\circ})]$$

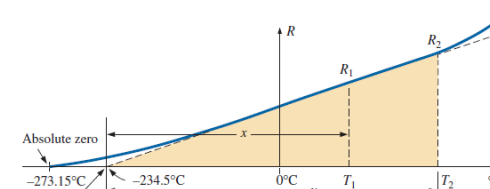
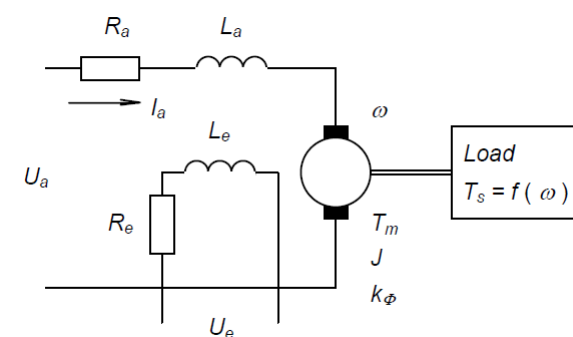
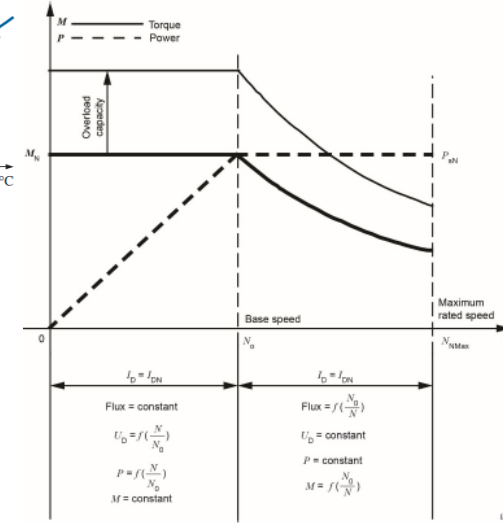
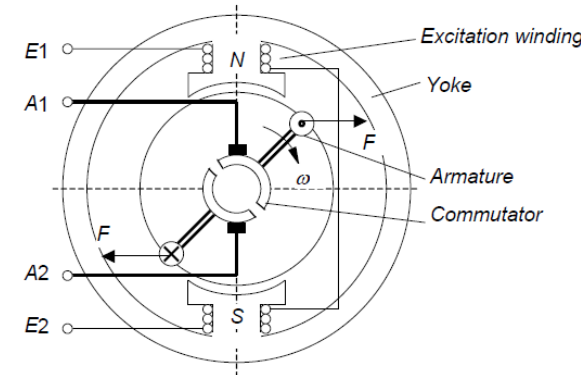
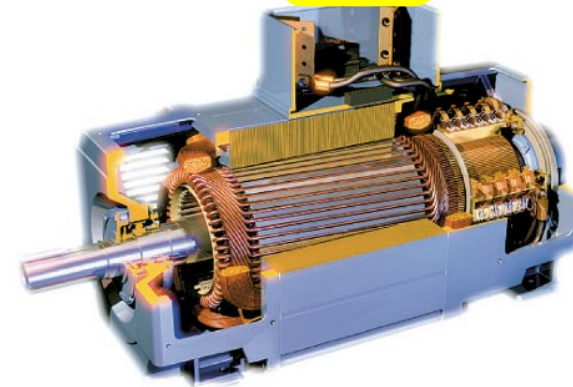
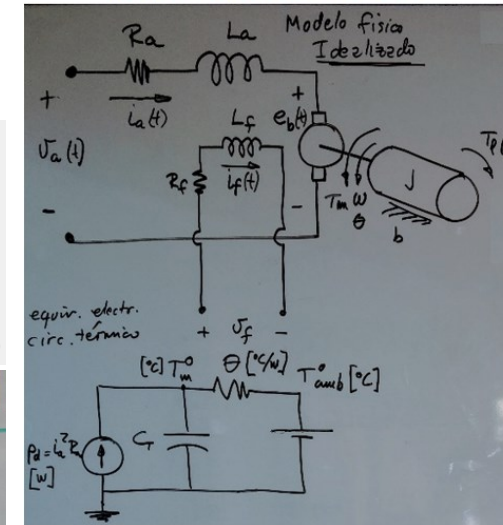


FIG. 3.11 Effect of temperature on the resistance of copper.



Aplicación: STS Crane Main Hoist (2 Motores SE-BDCM)

Accionamiento CC de **Izaje Principal** en Grua Portuaria (STS Container Crane, 40,6 t), 1997
4 Cuadrantes (regenerativo e inversión de marcha) con **control de campo independiente**
 Regiones: **Torque Constante** (0-850 rpm) vs. **Potencia Constante** (debilitamiento de campo) (850-2070 rpm):



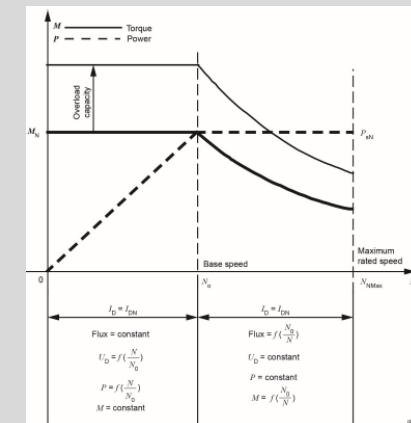
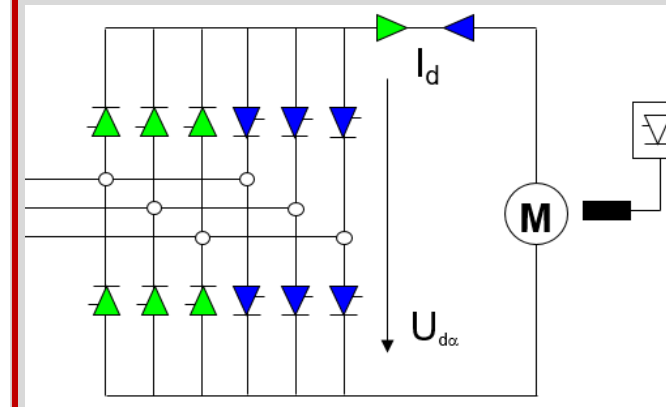
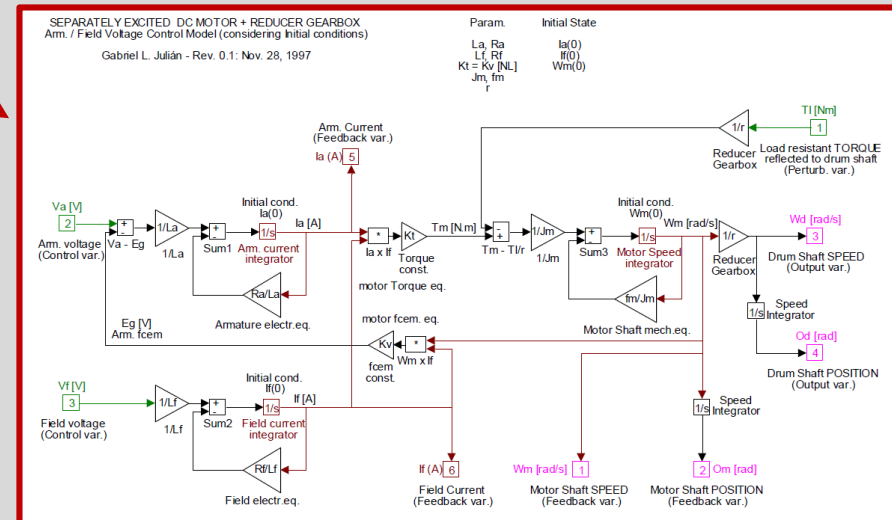
HACER: Modelado, Simulación y Análisis

- Implementar Diagrama de Bloque de Estados escalar actualizado en SIMULINK (Parametrización y Estado Inicial: Script en Matlab)
- Agregar Subsistema Térmico acoplado (modelo simplificado de primer orden)
- Simular a Lazo Abierto distintos escenarios:
Estado Inicial y Excitación: entradas manipuladas y perturbación)

Modelo dinámico global NL
 con **Parámetros compactados**

“1 motor equivalente”

a partir de datos reales del fabricante de Motores para este proyecto:



Máquina Eléctrica SE/PMBDCM: Modelo Dinámico LTI

Control por Armadura con Excitación Constante: $I_f = \text{const}$ o PM

Modelo Dinámico

Conversión de energía electro-mecánica (reversible), idealizada (sin pérdidas):

$$e_a(t) = K_e \cdot \omega_m(t), \quad K_e \left[\frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \right]$$

$$T_{em}(t) = K_t \cdot i_a(t), \quad K_t \left[\frac{\text{N.m}}{\text{A}} \right]$$

$$p_e(t) = e_a(t) \cdot i_a(t) = K_e \cdot \omega_m(t) \cdot i_a(t)$$

$$p_m(t) = T_{em}(t) \cdot \omega_m(t) = K_t \cdot i_a(t) \cdot \omega_m(t)$$

$$p_e(t) = p_m(t) \Rightarrow K_e \equiv K_t$$

Ecuaciones dinámicas: KVL, 2° Ley Newton rotacional

$$\begin{cases} v_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \\ J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = T_{em}(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_l(t) \end{cases}$$

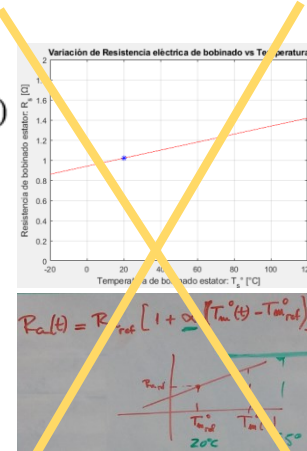
Ecuación de Estado (LTI)

$$LTI_3 \begin{cases} \frac{d\theta_m(t)}{dt} \equiv \omega_m(t) \\ J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = K_t \cdot i_a(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_l(t) \\ L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = -R_a \cdot i_a(t) - K_e \cdot \omega_m(t) + v_a(t) \end{cases}, \quad x(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) \equiv [v_a(t)],$$

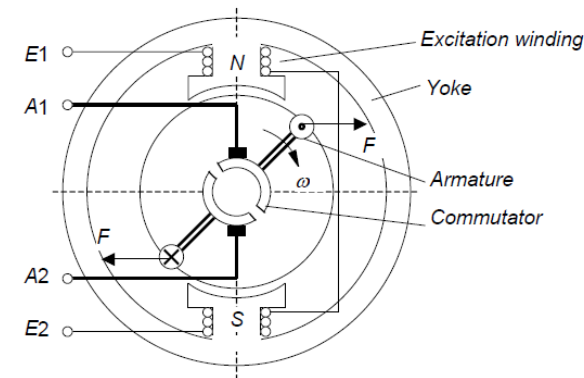
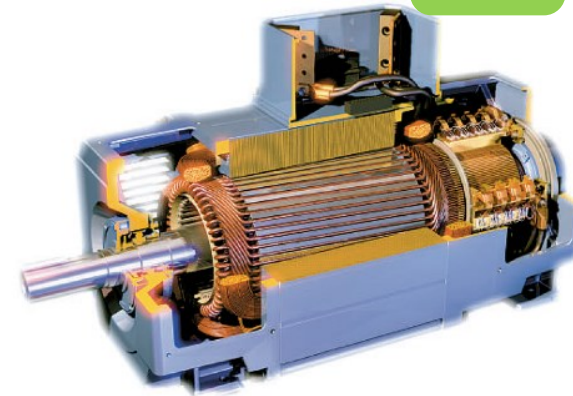
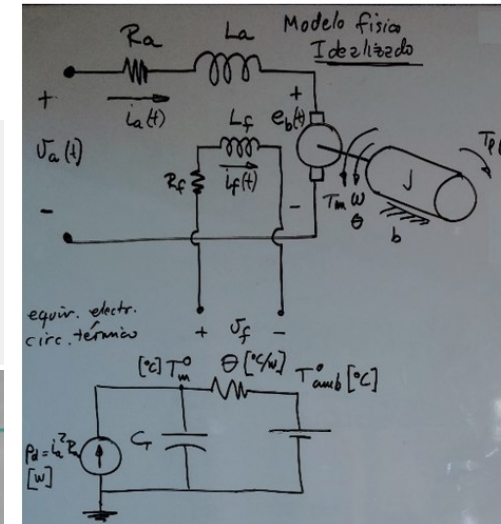
$$d(t) \equiv [T_l(t)], \quad y(t) \equiv [\theta_m(t)] \text{ o } y(t) \equiv [\omega_m(t)], \quad \text{etc.}$$

Equilibrio Dinámico → Espacio de Puntos de Operación (Cuasi-Estacionario Lineal)

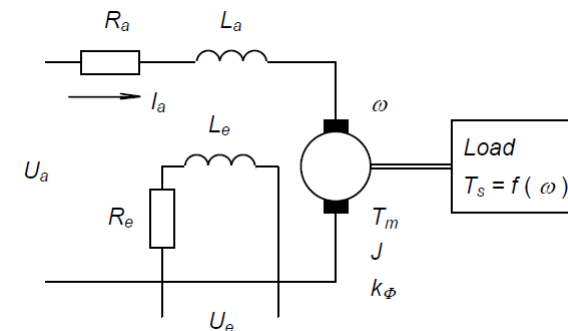
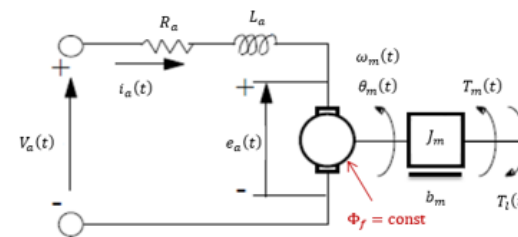
$$\begin{cases} \text{const} \equiv \Omega_{m0} \\ T_{em0} = K_t \cdot I_{a0} \equiv b_m \cdot \Omega_{m0} + T_{l0} \\ V_{a0} \approx R_a \cdot I_{a0} + K_e \cdot \Omega_{m0} \end{cases} \quad \text{const} \equiv \Omega_{m0} \approx \frac{V_{a0} - R_a \cdot I_{a0}}{K_e} \approx \frac{V_{a0} - R_a \cdot \frac{T_{em0}}{K_t}}{K_e} \approx \frac{V_{a0} - R_a \cdot \frac{(b_m \cdot \Omega_{m0} + T_{l0})}{K_t}}{K_e}$$



Modelo Físico Idealizado



Modelo Físico Idealizado



Máquina Eléctrica SE/PMBDCM: Modelo Dinámico LTI

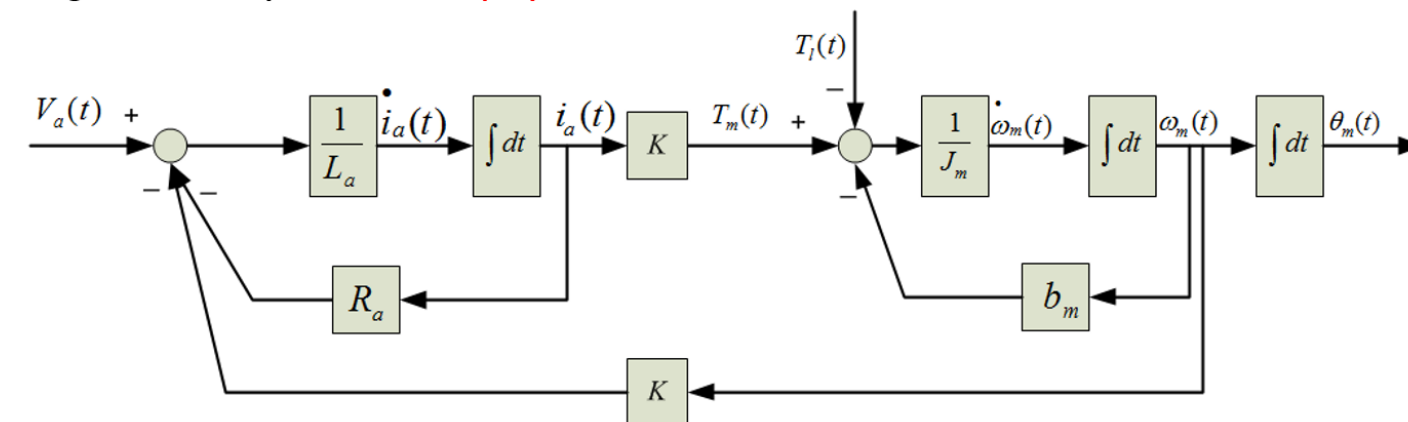
Control por Armadura con Excitación Constante: If=const o PM

Ecuación de Estado (LTI)

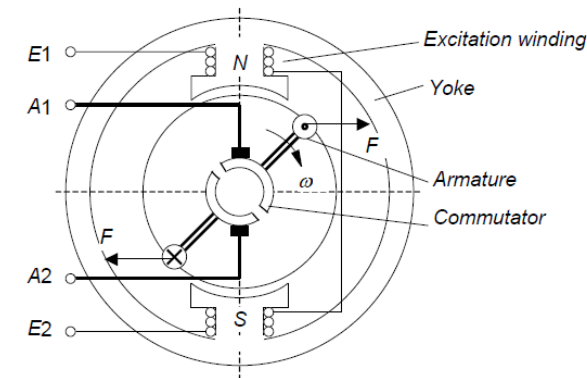
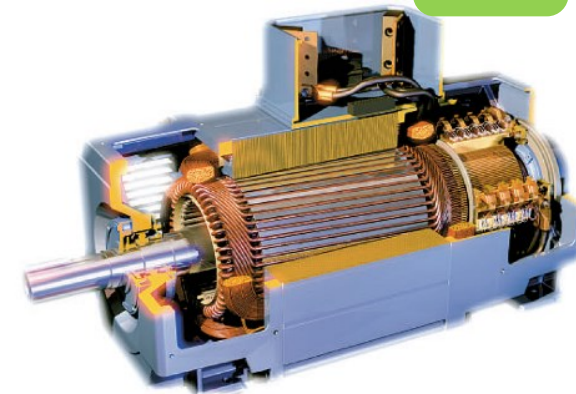
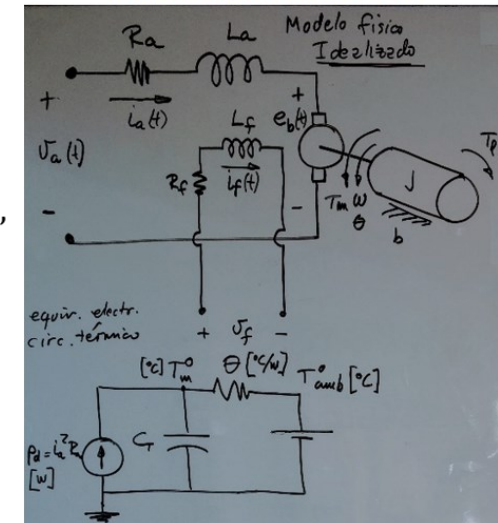
$$LTI_3 \begin{cases} \frac{d\theta_m(t)}{dt} \equiv \omega_m(t) \\ J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = K_t \cdot i_a(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_l(t) \\ L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = -R_a \cdot i_a(t) - K_e \cdot \omega_m(t) + v_a(t) \end{cases}, \quad x(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) \equiv [v_a(t)],$$

$$d(t) \equiv [T_l(t)], \quad y(t) \equiv [\theta_m(t)] \text{ o } y(t) \equiv [\omega_m(t)], \quad \text{etc.}$$

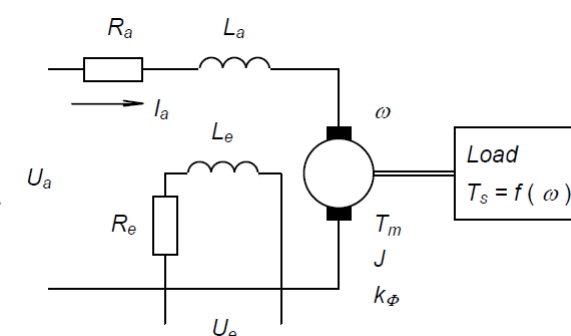
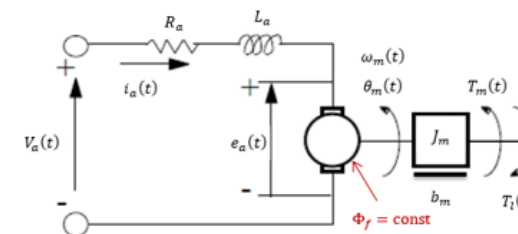
Diagrama de Bloques de Estado (LTI)



Modelo Físico Idealizado



Modelo Físico Idealizado



Máquina Eléctrica SE/PMBDCM: Modelo Dinámico LTI

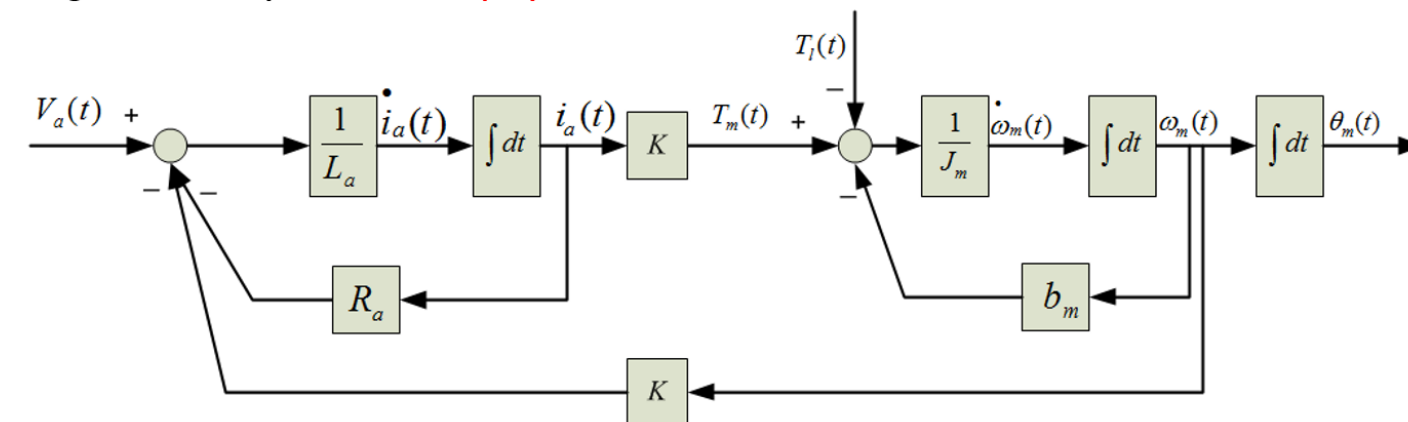
Control por Armadura con Excitación Constante: If=const o PM

Ecuación de Estado (LTI)

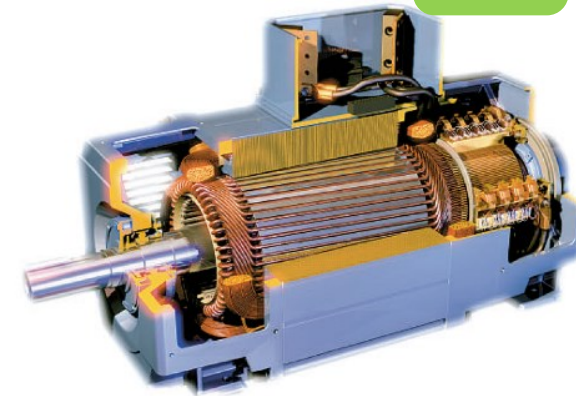
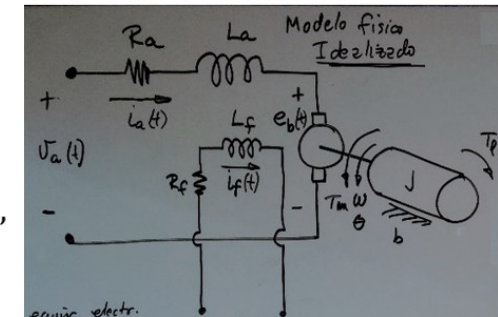
$$LTI_3 \begin{cases} \frac{d\theta_m(t)}{dt} \equiv \omega_m(t) \\ J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = K_t \cdot i_a(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_l(t) \\ L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = -R_a \cdot i_a(t) - K_e \cdot \omega_m(t) + v_a(t) \end{cases}, \quad x(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) \equiv [v_a(t)],$$

$$d(t) \equiv [T_l(t)], \quad y(t) \equiv [\theta_m(t)] \text{ o } y(t) \equiv [\omega_m(t)], \quad \text{etc.}$$

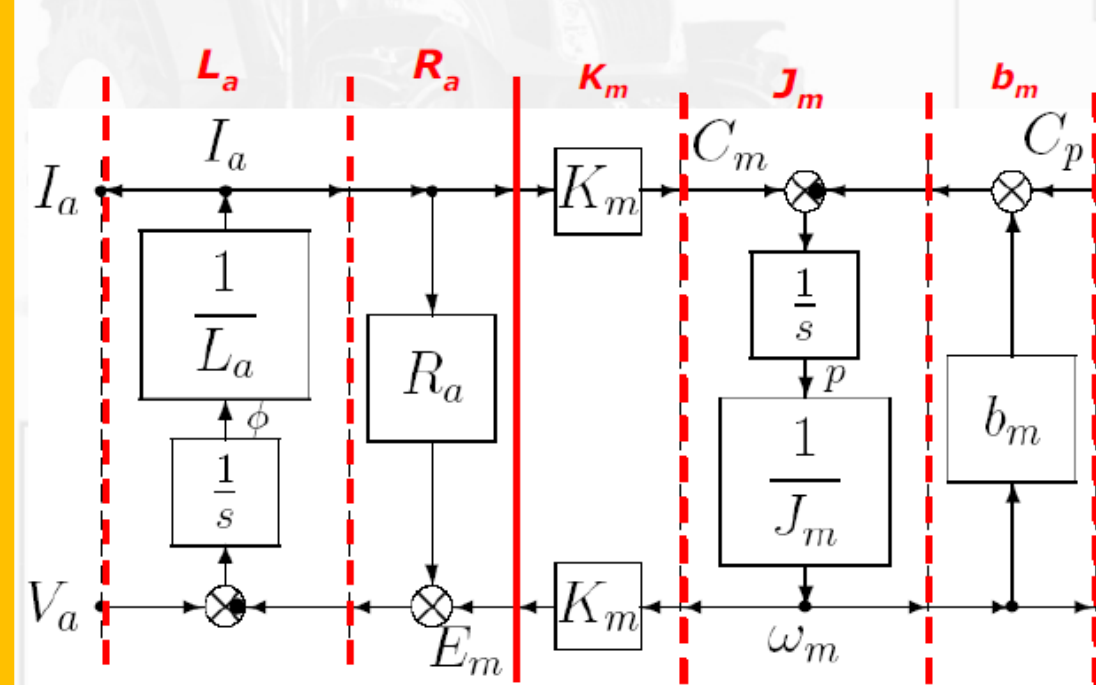
Diagrama de Bloques de Estado (LTI)



Modelo Físico Idealizado



The POG model:



Máquina Eléctrica SE/PMBDCM: Modelo Dinámico LTI

Control por Armadura con Excitación Constante: If=const o PM

Ecuación de Estado (LTI)

$$LTI_3 \begin{cases} \frac{d\theta_m(t)}{dt} \equiv \omega_m(t) \\ J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = K_t \cdot i_a(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_l(t) \\ L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = -R_a \cdot i_a(t) - K_e \cdot \omega_m(t) + v_a(t) \end{cases}, \quad x(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) \equiv [v_a(t)],$$

$$d(t) \equiv [T_l(t)], \quad y(t) \equiv [\theta_m(t)] \text{ o } y(t) \equiv [\omega_m(t)], \quad \text{etc.}$$

Ecuación de Estado (LTI) → Forma Matricial ↔ Matriz de Transferencia

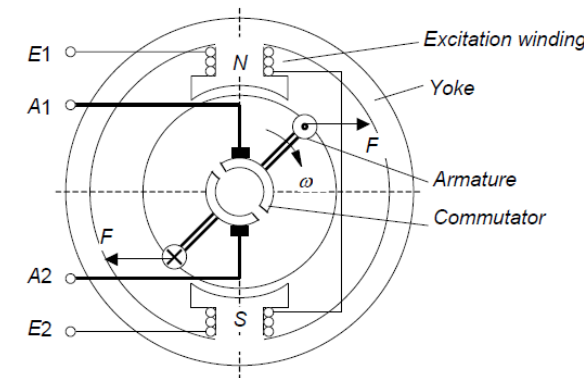
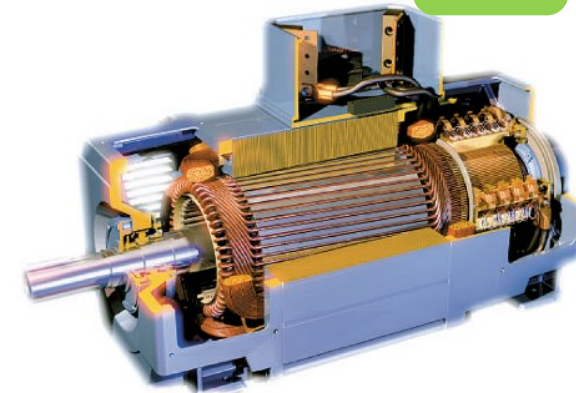
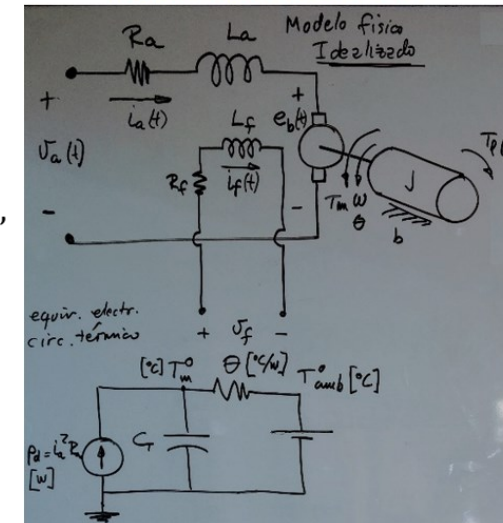
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B_c \cdot u(t) + B_d \cdot d(t); \quad x_0 \equiv x(t_0) \\ y(t) = C \cdot x(t) + D_c \cdot u(t) + D_d \cdot d(t) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow Y(s) = [C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot [B_c \quad B_d] + [D_c \quad D_d]] \cdot \begin{bmatrix} U(s) \\ D(s) \end{bmatrix}$$

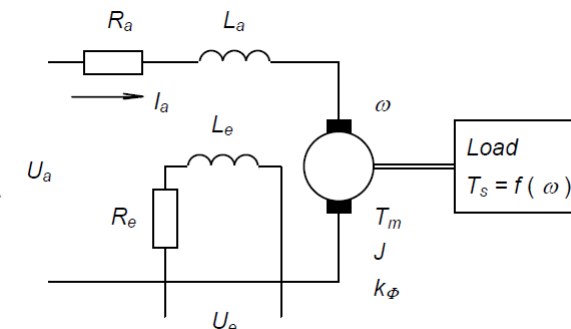
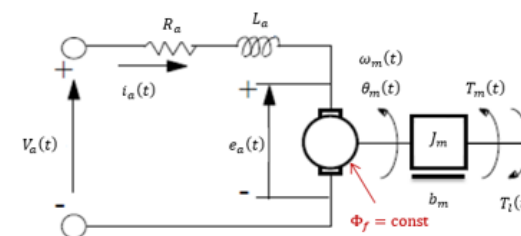
$$x(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}, u(t) \equiv [v_a(t)], d(t) \equiv [T_l(t)], \quad y(t) \equiv [\theta_m(t)] \text{ o } y(t) \equiv [\omega_m(t)], \quad \text{etc.}$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b_m}{J_m} & \frac{K_t}{J_m} \\ 0 & -\frac{K_e}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \cdot x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [v_a(t)] + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [T_l(t)]; \quad x_0 \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t_0) \\ \omega_m(t_0) \\ i_a(t_0) \end{bmatrix} \\ y(t) = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot x(t) \text{ o } y(t) = [0 \quad 1 \quad 0] \cdot x(t), \quad \text{etc.} \end{cases}$$

Modelo Físico Idealizado



Modelo Físico Idealizado

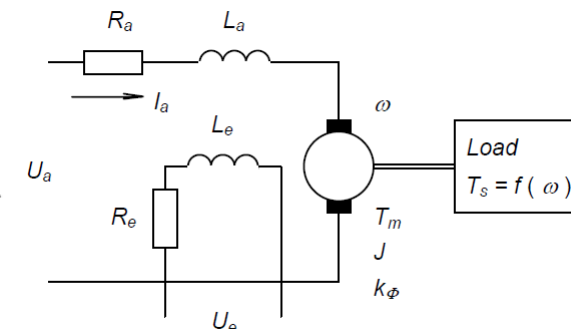
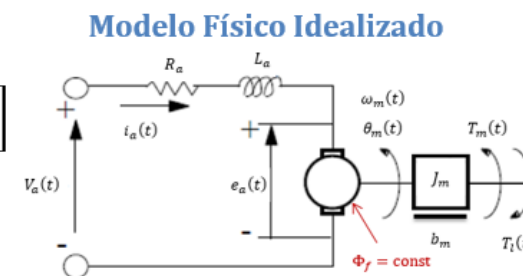
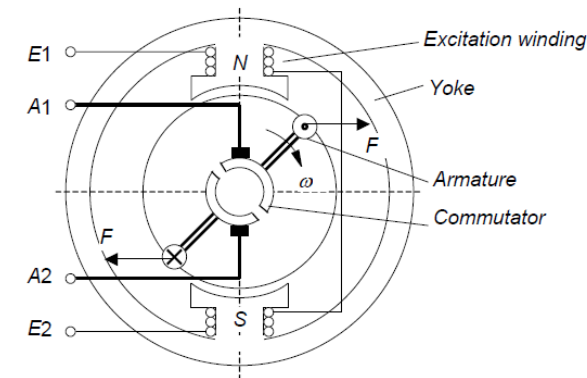
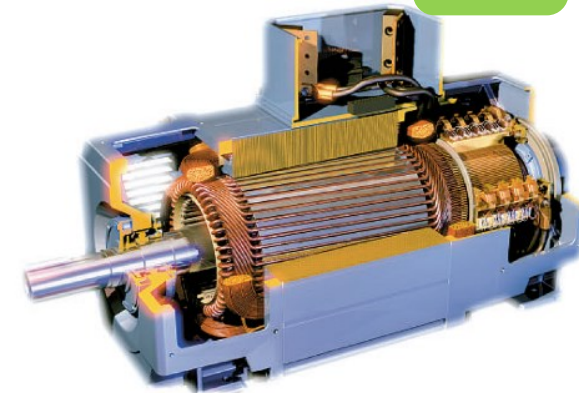
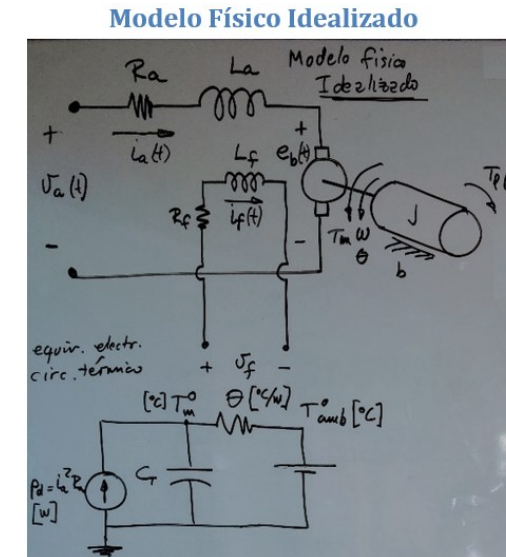


Máquina Eléctrica SE/PMBDCM: Modelo Dinámico LTI

Control por Armadura con Excitación Constante: If=const o PM

$$\mathbf{x}(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}, \mathbf{u}(t) \equiv [v_a(t)], \mathbf{d}(t) \equiv [T_l(t)], \quad \mathbf{y}(t) \equiv [\theta_m(t)] \text{ o } \mathbf{y}(t) \equiv [\omega_m(t)], \quad \text{etc.}$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b_m}{J_m} & \frac{K_t}{J_m} \\ 0 & -\frac{K_e}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [v_a(t)] + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [T_l(t)]; \quad \mathbf{x}_0 \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t_0) \\ \omega_m(t_0) \\ i_a(t_0) \end{bmatrix} \\ \mathbf{y}(t) = [1 \ 0 \ 0] \cdot \mathbf{x}(t) \text{ o } \mathbf{y}(t) = [0 \ 1 \ 0] \cdot \mathbf{x}(t), \quad \text{etc.} \end{cases}$$



Autovalores de A = Polos

$$A \equiv \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b_m}{J_m} & \frac{K_t}{J_m} \\ 0 & -\frac{K_e}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix}; \quad p(s) = |s.I - A| = \begin{vmatrix} s & -1 & 0 \\ 0 & s + \frac{b_m}{J_m} & -\frac{K_t}{J_m} \\ 0 & \frac{K_e}{L_a} & s + \frac{R_a}{L_a} \end{vmatrix}$$

$$= s \cdot \left[\left(s + \frac{b_m}{J_m} \right) \cdot \left(s + \frac{R_a}{L_a} \right) + \frac{K_t}{J_m} \cdot \frac{K_e}{L_a} \right] = s \cdot \left[s^2 + \left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{b_m}{J_m} \right) \cdot s + \left(\frac{b_m}{J_m} \cdot \frac{R_a}{L_a} + \frac{K_t}{J_m} \cdot \frac{K_e}{L_a} \right) \right]$$

Máquina Eléctrica SE/PMBDCM: Modelo Dinámico LTI

Control por Armadura con Excitación Constante: If=const o PM

Ecuación de Estado (LTI)

$$LTI_3 \begin{cases} \frac{d\theta_m(t)}{dt} \equiv \omega_m(t) \\ J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = K_t \cdot i_a(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_l(t) \\ L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = -R_a \cdot i_a(t) - K_e \cdot \omega_m(t) + v_a(t) \end{cases}, \quad x(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) \equiv [v_a(t)],$$

$$d(t) \equiv [T_l(t)], \quad y(t) \equiv [\theta_m(t)] \text{ o } y(t) \equiv [\omega_m(t)], \quad \text{etc.}$$

Matriz de Transferencia (LTI) (← Transformada de Laplace c/Cond. Iniciales Nulas)

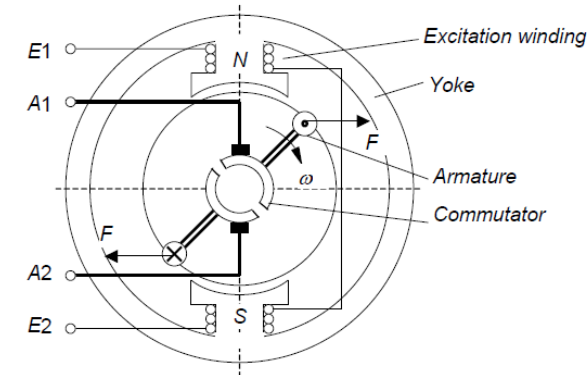
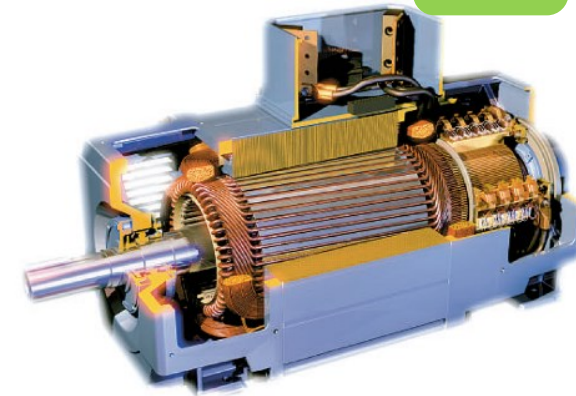
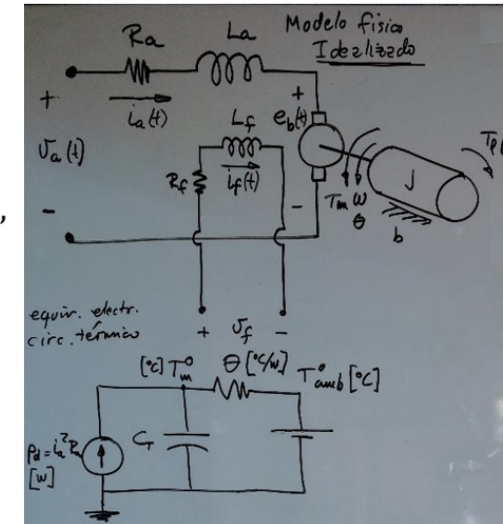
$$\begin{cases} s \cdot \Theta_m(s) \equiv \Omega_m(s) \\ [J_m \cdot s + b_m] \cdot \Omega_m(s) = K_t \cdot I_a(s) - T_l(s) \Rightarrow [J_m \cdot s + b_m] \cdot \Omega_m(s) = K_t \cdot \frac{-K_e \cdot \Omega_m(s) + V_a(s)}{[L_a \cdot s + R_a]} - T_l(s) \\ [L_a \cdot s + R_a] \cdot I_a(s) = -K_e \cdot \Omega_m(s) + V_a(s) \Rightarrow I_a(s) = \frac{-K_e \cdot \Omega_m(s) + V_a(s)}{[L_a \cdot s + R_a]} \end{cases}$$

$$[J_m \cdot s + b_m] \cdot [L_a \cdot s + R_a] \cdot \Omega_m(s) = -K_t \cdot K_e \cdot \Omega_m(s) + K_t \cdot V_a(s) - [L_a \cdot s + R_a] \cdot T_l(s)$$

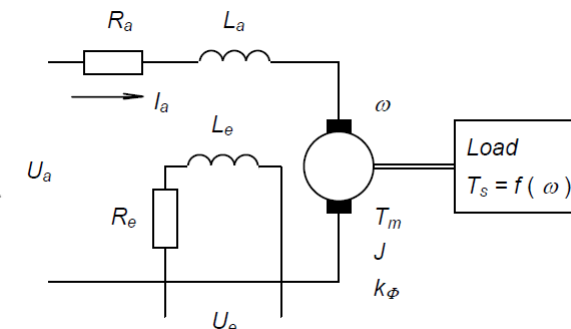
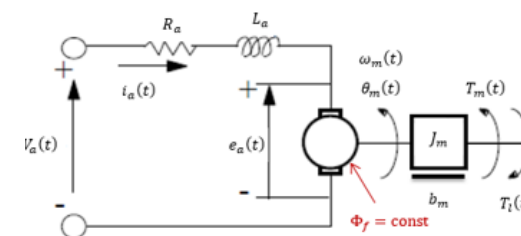
$$[J_m \cdot L_a \cdot s^2 + (b_m \cdot L_a + J_m \cdot R_a) \cdot s + (b_m \cdot R_a + K_t \cdot K_e)] \cdot \Omega_m(s) = K_t \cdot V_a(s) - [L_a \cdot s + R_a] \cdot T_l(s)$$

$$s \cdot \Theta_m(s) \equiv \Omega_m(s) = \frac{K_t \cdot V_a(s) - [L_a \cdot s + R_a] \cdot T_l(s)}{[J_m \cdot L_a \cdot s^2 + (b_m \cdot L_a + J_m \cdot R_a) \cdot s + (b_m \cdot R_a + K_t \cdot K_e)]}$$

Modelo Físico Idealizado



Modelo Físico Idealizado



Máquina Eléctrica SE/PMBDCM: Modelo Dinámico LTI

Control por Armadura con Excitación Constante: $I_f = \text{const}$ o PM

Ecuación de Estado (LTI)

$$LTI_3 \begin{cases} \frac{d\theta_m(t)}{dt} \equiv \omega_m(t) \\ J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = K_t \cdot i_a(t) - b_m \cdot \omega_m(t) - T_l(t) \\ L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = -R_a \cdot i_a(t) - K_e \cdot \omega_m(t) + v_a(t) \end{cases}, \quad x(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) \equiv [v_a(t)],$$

$$d(t) \equiv [T_l(t)], \quad y(t) \equiv [\theta_m(t)] \text{ o } y(t) \equiv [\omega_m(t)], \quad \text{etc.}$$

$$s \cdot \Theta_m(s) \equiv \Omega_m(s) = \frac{K_t \cdot V_a(s) - [L_a \cdot s + R_a] \cdot T_l(s)}{J_m \cdot L_a \cdot s^2 + (b_m \cdot L_a + J_m \cdot R_a) \cdot s + (b_m \cdot R_a + K_t \cdot K_e)}$$

Polos y Ceros

$$[J_m \cdot L_a \cdot s^2 + (b_m \cdot L_a + J_m \cdot R_a) \cdot s + (b_m \cdot R_a + K_t \cdot K_e)] = 0 \Rightarrow$$

$$p_{1,2} = -\frac{(b_m \cdot L_a + J_m \cdot R_a)}{2 \cdot J_m \cdot L_a} \pm \sqrt{\left(\frac{(b_m \cdot L_a + J_m \cdot R_a)}{2 \cdot J_m \cdot L_a}\right)^2 - \frac{(b_m \cdot R_a + K_t \cdot K_e)}{J_m \cdot L_a}}$$

$$\left(\frac{(b_m \cdot L_a + J_m \cdot R_a)}{2 \cdot J_m \cdot L_a}\right)^2 \begin{cases} > \frac{(b_m \cdot R_a + K_t \cdot K_e)}{J_m \cdot L_a} \\ < \frac{(b_m \cdot R_a + K_t \cdot K_e)}{J_m \cdot L_a} \\ = \frac{(b_m \cdot R_a + K_t \cdot K_e)}{J_m \cdot L_a} \end{cases} \begin{cases} > \text{sobreamortiguado} \\ < \text{subamortiguado} \\ = \text{amort. crítico} \end{cases}$$

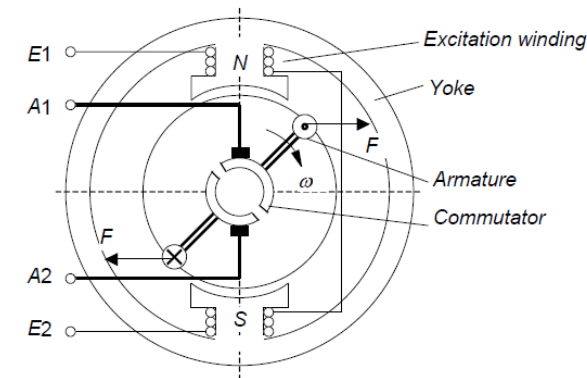
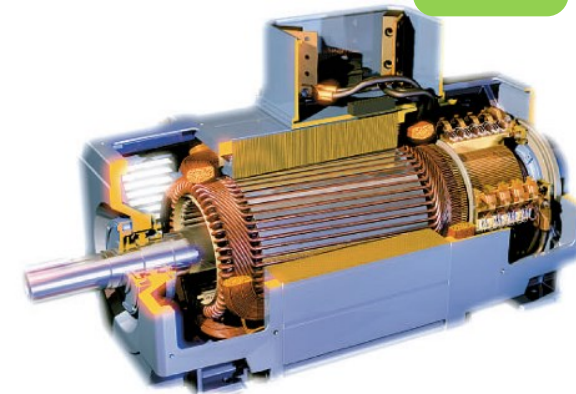
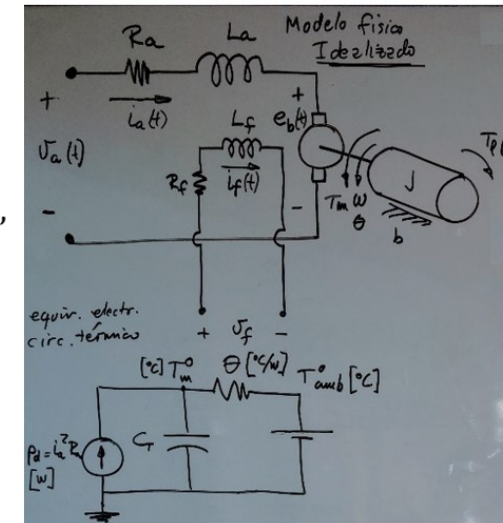
$$\Leftrightarrow \frac{(b_m \cdot L_a + J_m \cdot R_a)^2}{4 \cdot J_m \cdot L_a} - b_m \cdot R_a \begin{cases} > (K_t \cdot K_e) \\ < (K_t \cdot K_e) \end{cases}$$

Concepto: "Servo"-motor vs motor: $K_t = K_e \gg J_m \ll$ (baja inercia y alta constante de torque/fem)

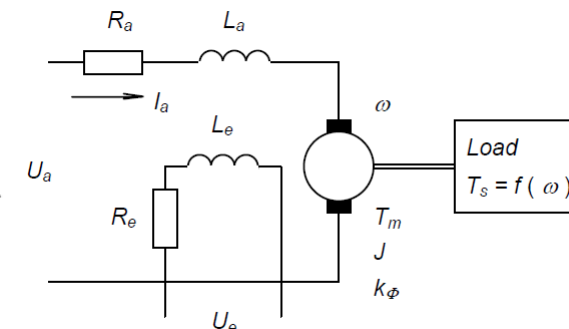
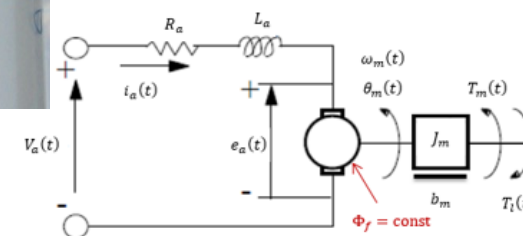
Polo en origen = integrador puro: velocidad a posición ang. $s \cdot \Theta_m(s) \equiv \Omega_m(s) \Rightarrow p_3 = 0$

Cero en Transf. Desde perturbación: $[L_a \cdot s + R_a] = 0 \Rightarrow z_{T_l} = -\frac{R_a}{L_a}$

Modelo Físico Idealizado



Modelo Físico Idealizado



Máquina Eléctrica SE/PMBDCM: Modelo Dinámico LTI

Control por Armadura con Excitación Constante: If=const o PM

$$\mathbf{x}(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}, \mathbf{u}(t) \equiv [v_a(t)], \mathbf{d}(t) \equiv [T_l(t)], \quad \mathbf{y}(t) \equiv [\theta_m(t)] \text{ o } \mathbf{y}(t) \equiv [\omega_m(t)], \quad \text{etc.}$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b_m}{J_m} & \frac{K_t}{J_m} \\ 0 & -\frac{K_e}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [v_a(t)] + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [T_l(t)]; & \mathbf{x}_0 \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t_0) \\ \omega_m(t_0) \\ i_a(t_0) \end{bmatrix} \\ \mathbf{y}(t) = [1 \ 0 \ 0] \cdot \mathbf{x}(t) \text{ o } \mathbf{y}(t) = [0 \ 1 \ 0] \cdot \mathbf{x}(t), & \text{etc.} \end{cases}$$

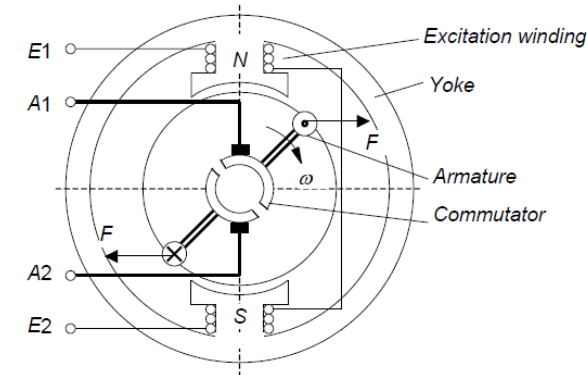
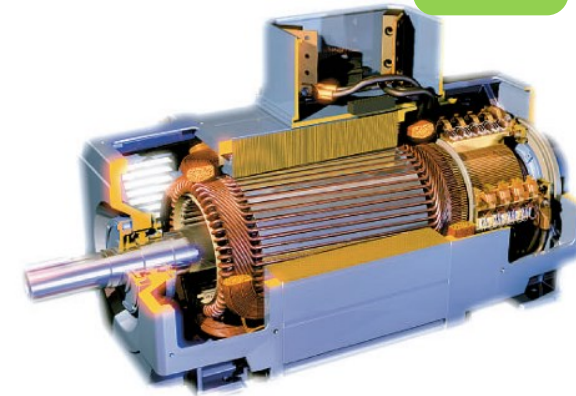
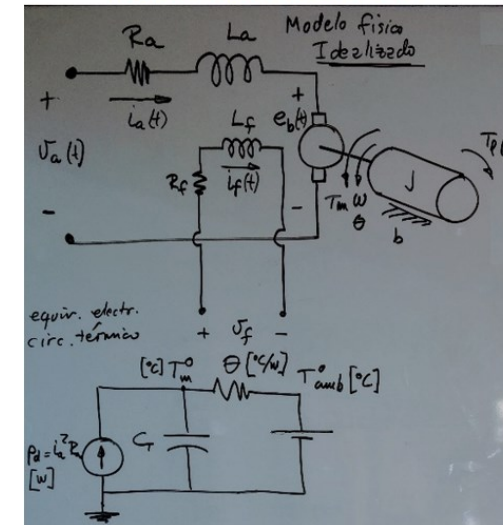
Controlabilidad y Observabilidad (← Criterio de Kalman)

Controlabilidad desde $\mathbf{u}(t) \equiv [v_a(t)]$:

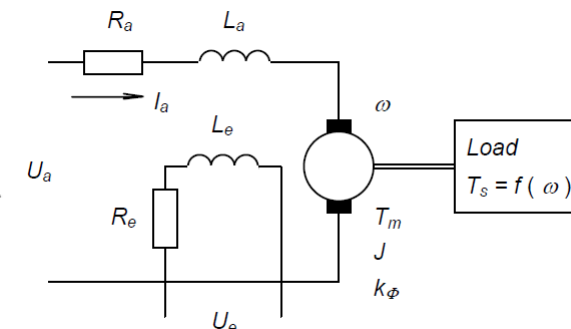
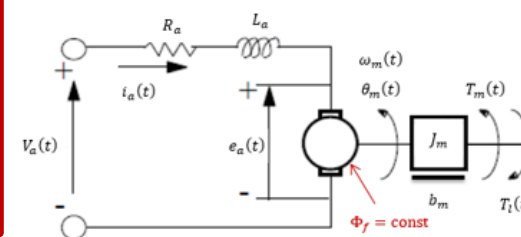
$$\mathcal{C} \equiv [B \quad A \cdot B \quad A^2 \cdot B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_t}{J_m \cdot L_a} \\ 0 & \frac{K_t}{J_m \cdot L_a} & -\left(\frac{b_m \cdot K_t}{J_m^2 \cdot L_a} + \frac{R_a \cdot K_t}{J_m \cdot L_a^2}\right) \\ \frac{1}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a^2} & -\frac{K_t \cdot K_e}{J_m \cdot L_a^2} + \frac{R_a^2}{L_a^3} \end{bmatrix};$$

$$\text{rango}(\mathcal{C}) = 3 = n \Rightarrow \text{Totalmente Controlable desde } \mathbf{u}(t) \equiv [v_a(t)]$$

Modelo Físico Idealizado



Modelo Físico Idealizado



Máquina Eléctrica SE/PMBDCM: Modelo Dinámico LTI

Control por Armadura con Excitación Constante: If=const o PM

$$x(t) \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}, u(t) \equiv [v_a(t)], d(t) \equiv [T_l(t)], \quad y(t) \equiv [\theta_m(t)] \text{ o } y(t) \equiv [\omega_m(t)], \quad \text{etc.}$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b_m}{J_m} & \frac{K_t}{J_m} \\ 0 & -\frac{K_e}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \cdot x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [v_a(t)] + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [T_l(t)]; & x_0 \equiv \begin{bmatrix} \theta_m(t_0) \\ \omega_m(t_0) \\ i_a(t_0) \end{bmatrix} \\ y(t) = [1 \ 0 \ 0] \cdot x(t) \text{ o } y(t) = [0 \ 1 \ 0] \cdot x(t), & \text{etc.} \end{cases}$$

Controlabilidad y Observabilidad (← Criterio de Kalman)

Observabilidad desde $y(t) \equiv [\theta_m(t)]$:

$$\mathcal{O} \equiv \begin{bmatrix} C \\ C \cdot A \\ C \cdot A^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b_m}{J_m} & \frac{K_t}{J_m} \end{bmatrix}$$

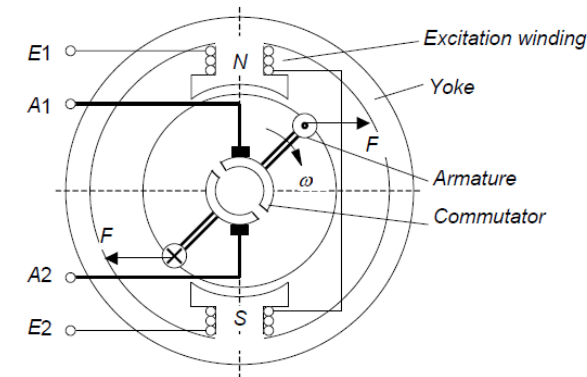
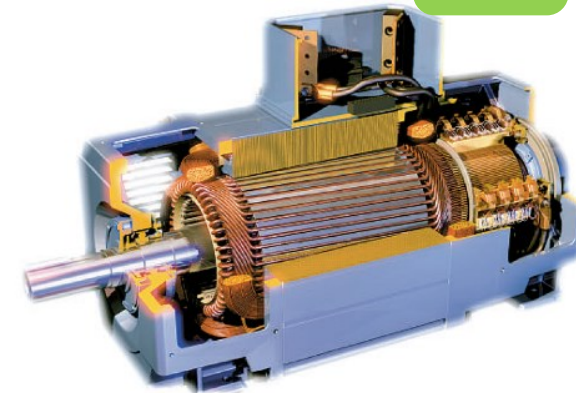
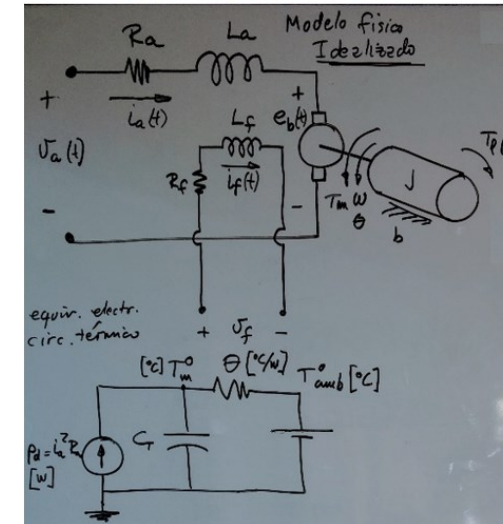
$\text{rango}(\mathcal{O}) = 3 = n \Rightarrow$ **Totalmente Observable** desde $y(t) \equiv [\theta_m(t)]$

Observabilidad desde $y(t) \equiv [\omega_m(t)]$:

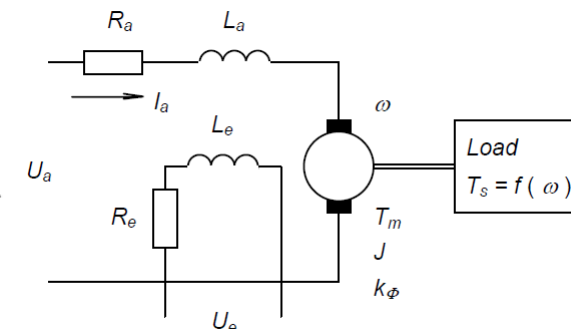
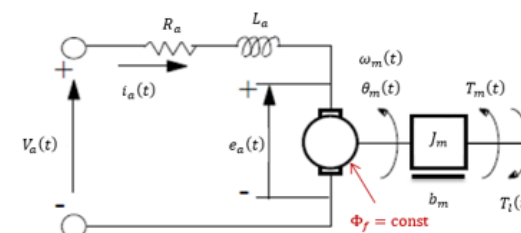
$$\mathcal{O} \equiv \begin{bmatrix} C \\ C \cdot A \\ C \cdot A^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J_m} & 0 \\ 0 & -\frac{b_m}{J_m} & \frac{K_t}{J_m} \\ 0 & \frac{b_m^2}{J_m^2} - \frac{K_t \cdot K_e}{J_m \cdot L_a} & -\left(\frac{b_m \cdot K_t}{J_m^2} + \frac{K_t \cdot R_a}{J_m \cdot L_a}\right) \end{bmatrix}$$

$\text{rango}(\mathcal{O}) = 2 < n \Rightarrow$ **NO totalmente Observable** desde $y(t) \equiv [\omega_m(t)]$

Modelo Físico Idealizado



Modelo Físico Idealizado



AUTOMÁTICA y MÁQUINAS ELÉCTRICAS

4. Control de Accionamientos de Corriente Continua

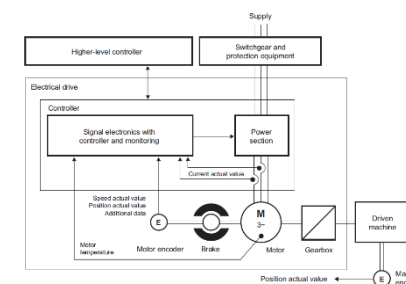
A. Máquina Eléctrica de CC con Conmutador Mecánico (Colector y Escobillas)

- Máquinas de CC con escobillas: Excitación por Imanes Permanentes vs. Excitación Separada.
- Modelado Dinámico: Espacio de Estado en DT – Funciones de Transferencia en DF.
- Análisis y Simulación del Comportamiento Dinámico.



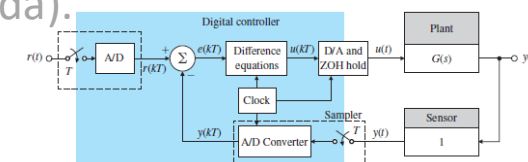
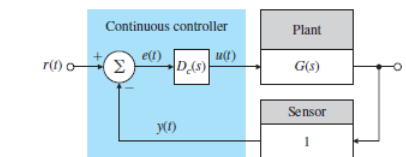
B. Control de Velocidad y Posición por Retroalimentación de Estado

- Control por Tensión de Armadura con Retroalimentación de Estado. Asignación de Polos.
- Observador de Estado.



C. Control en Cascada: Corriente/Torque – Movimiento (Velocidad/Posición)

- Desacoplamiento de retroalimentaciones naturales (propia y cruzada).
- Control interno de Torque $\rightarrow$ Modulador de torque ideal (aproximación).
- Control de movimiento (enfoque mecatrónico, con Modulador de torque ideal en cascada).



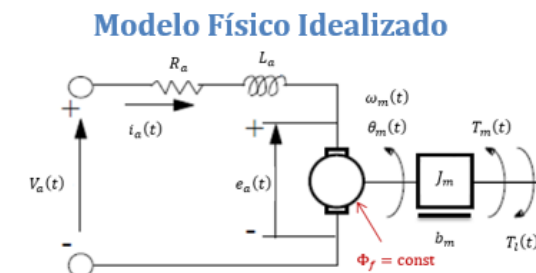
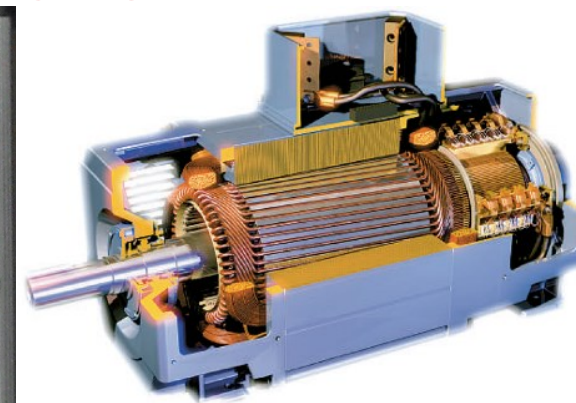
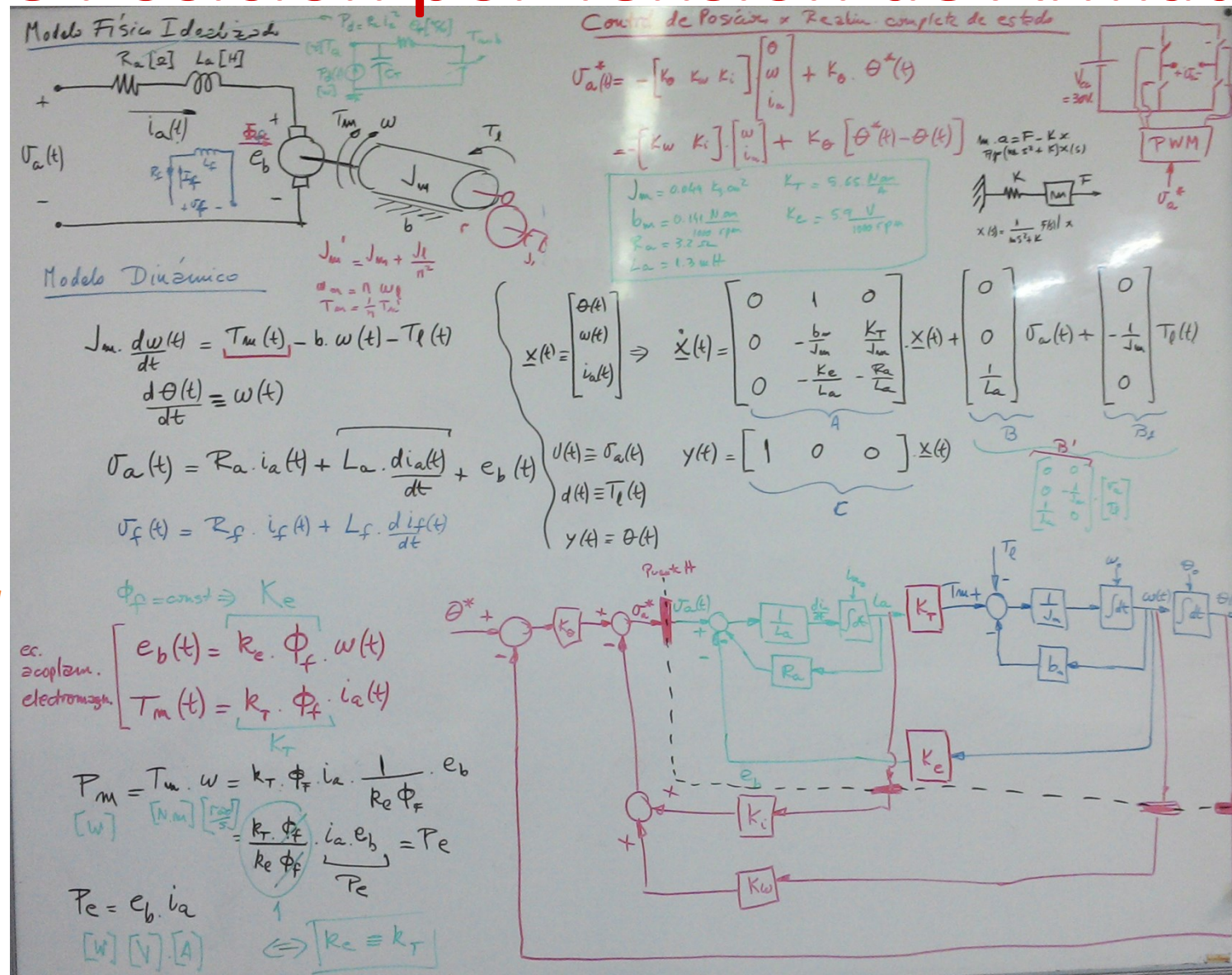
Resumen:

Modelo Dinámico

En realidad

Sí está LIMITADA por la Tensión de la barra de CC (V_{CC}):

$-V_{CC} \leq V_a \leq +V_{CC}$
(Saturación)



Control de Posición por Tensión de Armadura

Control de Posición con manipulación de TENSIÓN V_a (idealmente **no limitada**)

→ En realidad **SÍ está LIMITADA** por la Tensión de la barra de CC (V_{cc}):
 $-V_{cc} \leq V_a \leq +V_{cc}$ (Saturación)

Planta tipo 1 – **Ley Control**

Cálculo de Ganancias

(Sintonía):

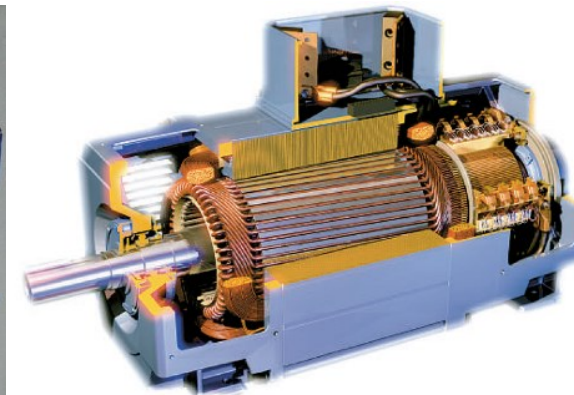
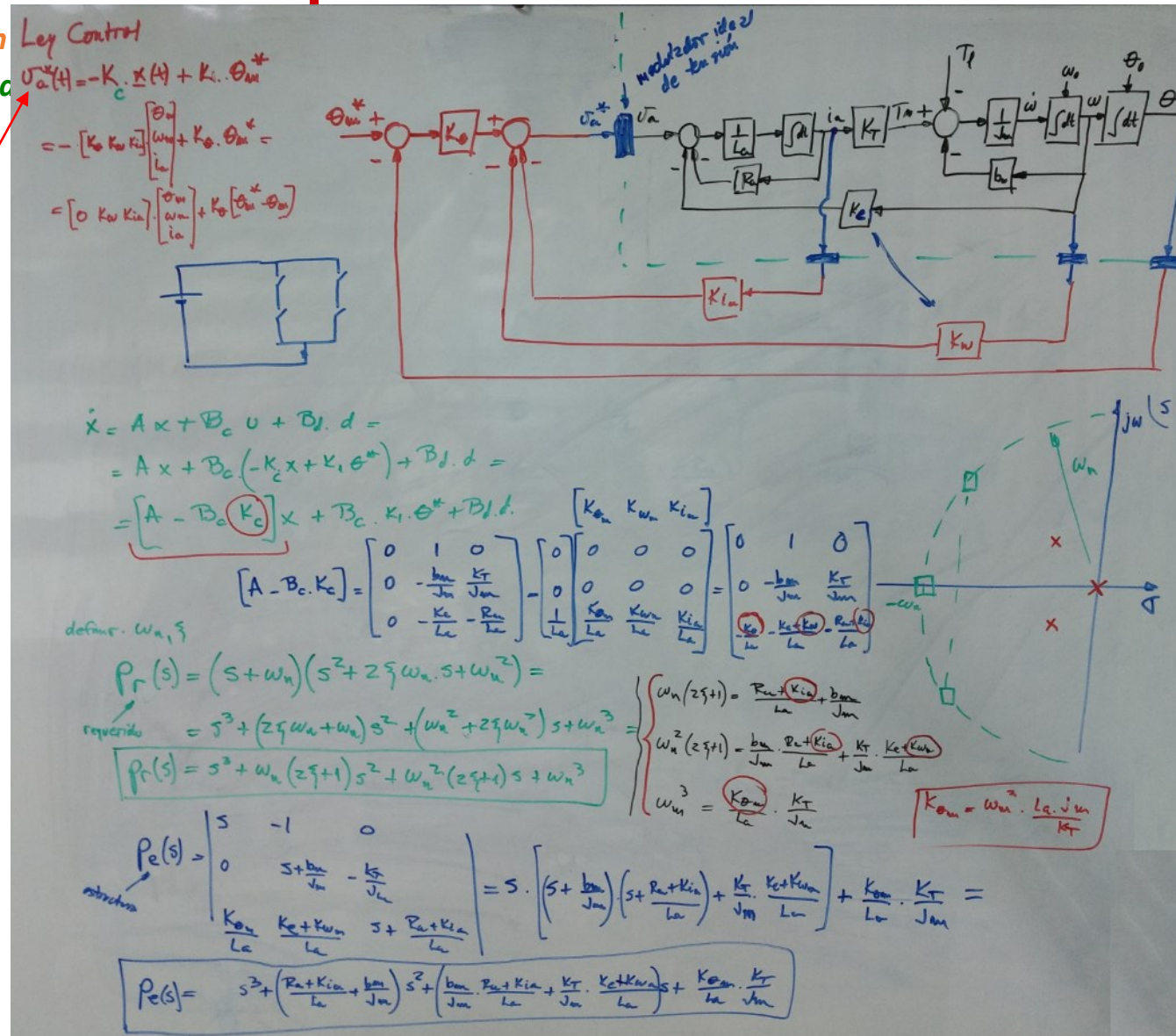
Método de Asignación o

Ubicación de Polos

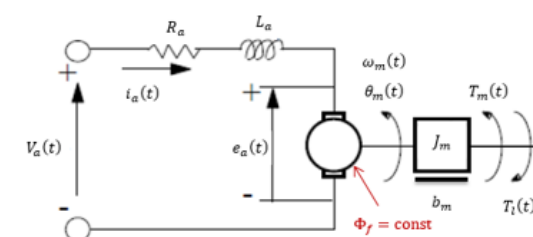
Observador de Estado

Completo

(planteo similar, ver Unidad 3)



Modelo Físico Idealizado



Control de Posición por Va: Ejercicio Electrocraft G364

Control de Posición con manipulación de TENSIÓN V_a (idealmente **no limitada**)
→

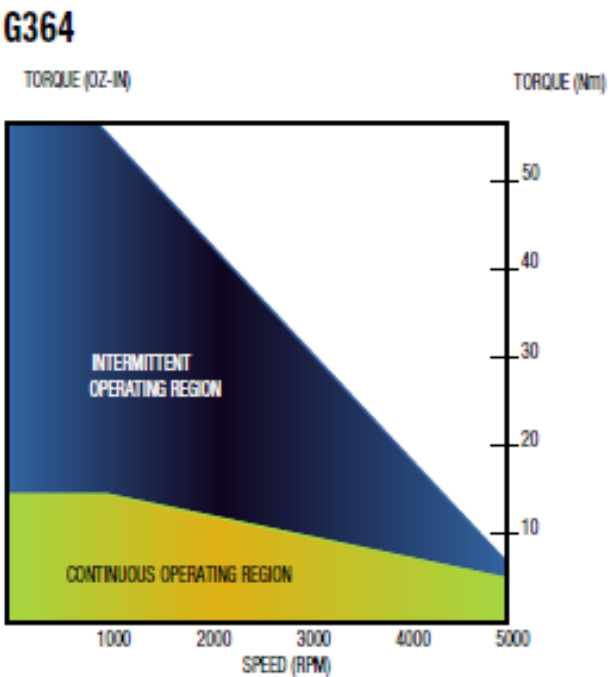
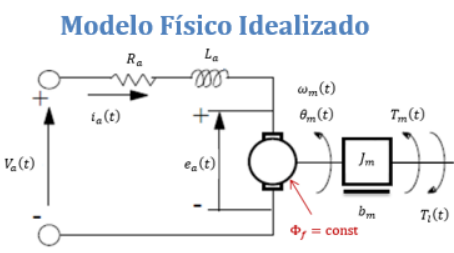
En realidad **SÍ está LIMITADA** por la Tensión de la barra de CC (V_{cc}):
 $-V_{cc} \leq V_a \leq +V_{cc}$ (Saturación)

Planta tipo 1 – Ley Control
Cálculo de Ganancias
(Sintonía):
Método de Asignación o
Ubicación de Polos

Observador de Estado
Completo
(planteo similar, ver Unidad 3)

HACER y SIMULAR
para Motor ElectroCraft
G364

G360 Series Performance Specifications		
Motor Ratings	362	364
Continuous Stall Torque (Ncm)	8.5	14.1
Continuous Stall Torque (oz-in)	12	20
Peak Torque (Ncm)	31.8	56.5
Peak Torque (oz-in)	45	80
Maximum Terminal Voltage (V)	30	30
Maximum Operating Speed (rpm)	5000	5000
Mechanical Data		
Rotor Inertia (kg cm ²)	0.021	0.049
Rotor Inertia (oz-in-sec ²)	0.0003	0.0007
Damping Constant (Ncm/krpm)	0.141	0.141
Damping Constant (oz-in/krpm)	0.2	0.2
Thermal Resistance (C/watt)	7.8	7.5
Maximum Armature Temperature (°C)	155	155
Maximum Friction Torque (Ncm)	1.1	1.1
Maximum Friction Torque (oz-in)	1.5	1.6
Maximum Radial Load (25mm from bearing) (Kg)	2.3	2.3
Maximum Radial Load (25mm from bearing) (lbs)	5	5
Weight (Kg)	0.3	0.5
Electrical Data	A	A
Kt Torque Constant +10% (Ncm/amp)	4.73	5.65
Kt Torque Constant +10% (oz-in/amp)	6.7	8.0
Ke Voltage Constant +10% (V/Krpm)	4.9	5.9
Terminal Resistance (ohms)	3.5	3.2
Maximum Continuous Current (A)	1.8	1.8
Maximum Peak Current (A)	7	10
Armature Inductance (mH)	1.1	1.3
Tachometer Specifications - (optional)		
Ke Voltage Constant +10% (V/Krpm)	3	
Terminal Resistance (ohms)	42	
Ripple Peak-to-Peak at 1000 rpm (%)	5	
Increase Motor Inertia by: (kg cm ²)	0.007	
Increase Motor Inertia by: (oz-in-sec ²)	0.0001	



Control de Posición por Va: Ejercicio Electrocrafft G364

Ejercicio de Aplicación: ElectroCraft G364

Parámetros:

G364 Parámetros

$$J_m = 0.049 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^2 = 49 \times 10^{-7} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

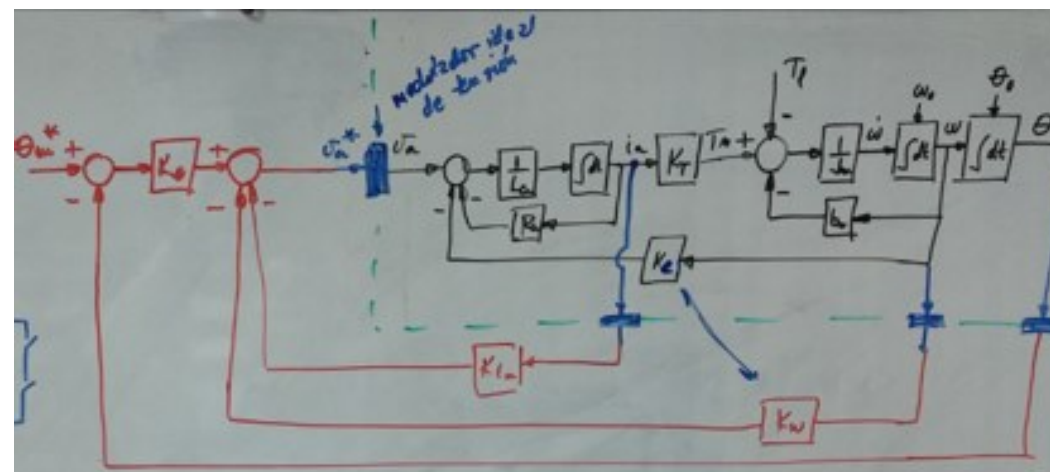
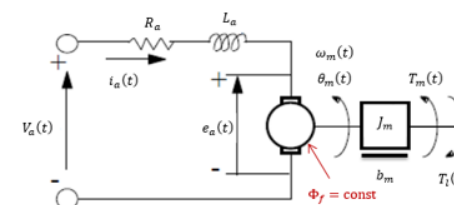
$$b_m = 0.141 \frac{\text{N} \cdot \text{cm}}{1000 \text{ rpm}} = 1.3465 \times 10^{-5} \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}}$$

$$R_a = 3.2 \Omega$$

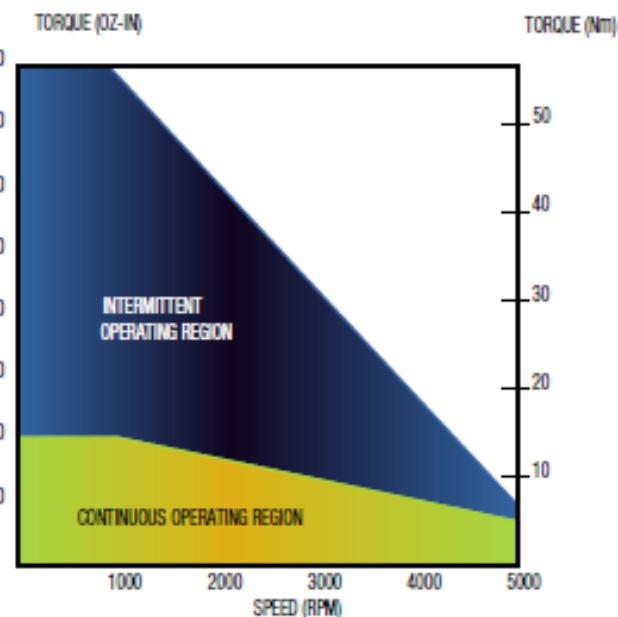
$$L_a = 1.3 \text{ mH} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$K \begin{cases} K_r = 5.65 \pm 10\% \frac{\text{N} \cdot \text{cm}}{\text{A}} = 0.0565 \pm 10\% \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}} \\ K_e = 5.9 \pm 10\% \frac{\text{V}}{1000 \text{ rpm}} = 0.0563 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \end{cases}$$

Modelo Físico Idealizado



G364



Realizar:

a) **Análisis Dinámico a lazo Abierto**

(Estabilidad, Controlabilidad y Observabilidad)

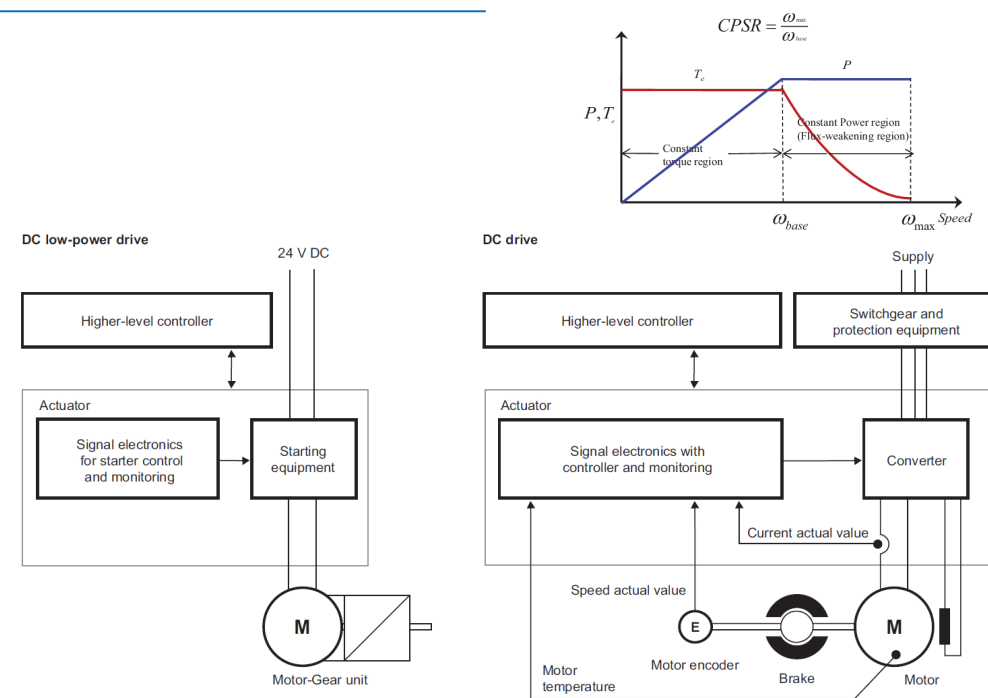
b) **Diseño de Control por Retroalimentación de Estado**

c) Incorporar **Estimación de Estado con Observador de Estado Completo**

c) **SIMULAR** con Modulador de Tensión SATURADO a +/-30 Vdc

Unidad 4

Control de Accionamientos Eléctricos de Corriente Continua (DC Drives)



AUTOMÁTICA y MÁQUINAS ELÉCTRICAS

4. Control de Accionamientos de Corriente Continua

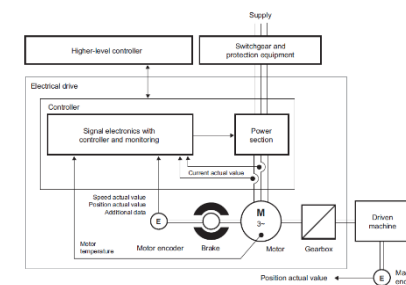
A. Máquina Eléctrica de CC con Conmutador Mecánico (Colector y Escobillas)

- Máquinas de CC con escobillas: Excitación por Imanes Permanentes vs. Excitación Separada.
- Modelado Dinámico: Espacio de Estado en DT – Funciones de Transferencia en DF.
- Análisis y Simulación del Comportamiento Dinámico.



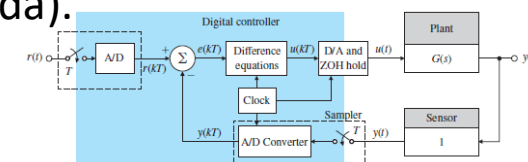
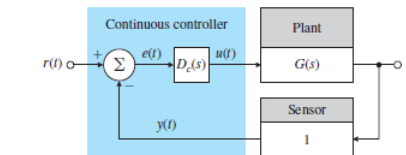
B. Control de Velocidad y Posición por Retroalimentación de Estado

- Control por Tensión de Armadura con Retroalimentación de Estado. Asignación de Polos.
- Observador de Estado.



C. Control en Cascada: Corriente/Torque – Movimiento (Velocidad/Posición)

- Desacoplamiento de retroalimentaciones naturales (propia y cruzada).
- Control interno de Torque $\rightarrow$ Modulador de torque ideal (aproximación).
- Control de movimiento (enfoque mecatrónico, con Modulador de torque ideal en cascada).



Resumen:

Modelo Dinámico

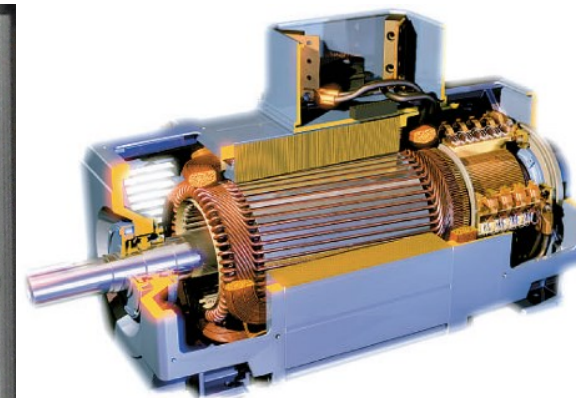
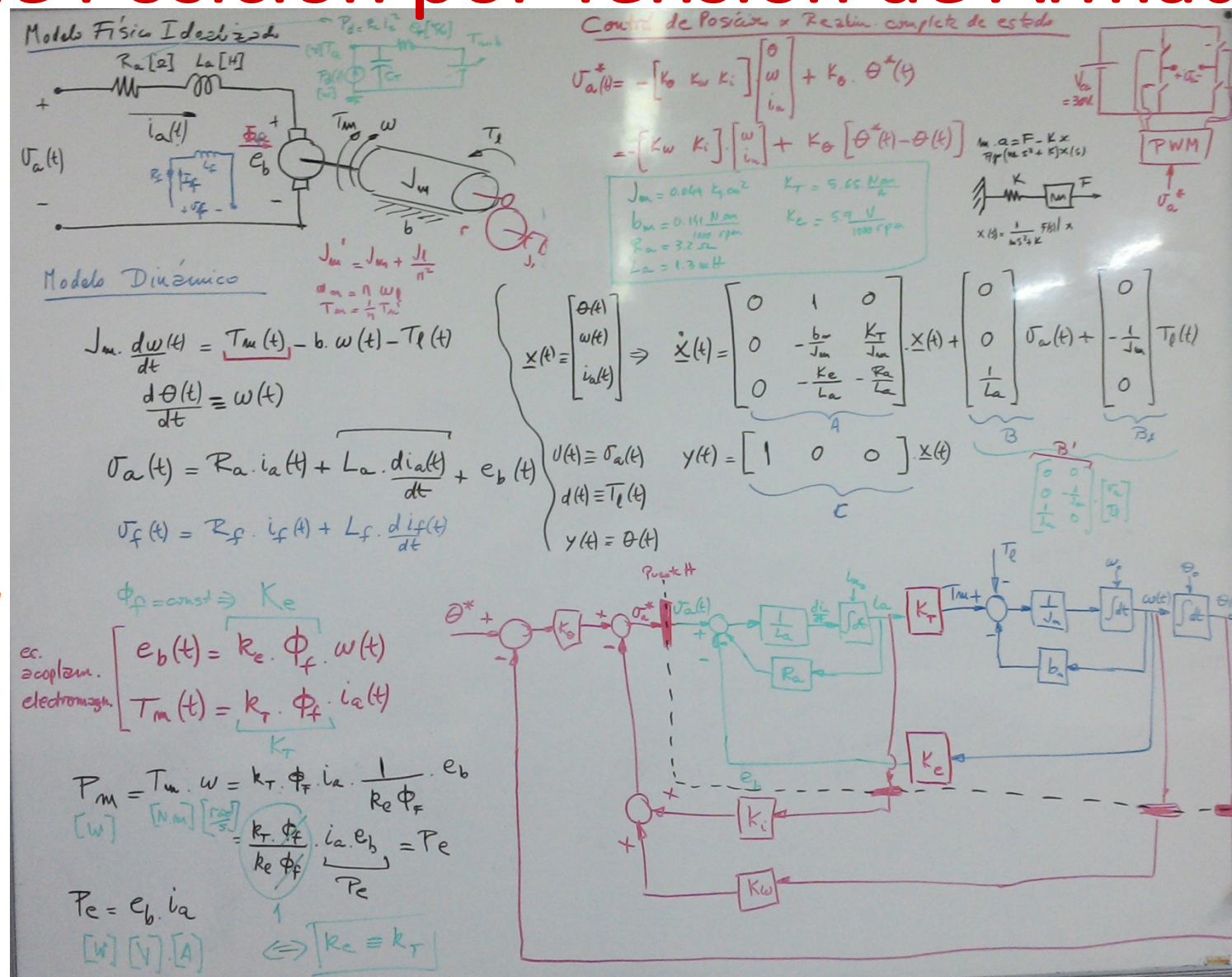
(idealmente **no limitada**)



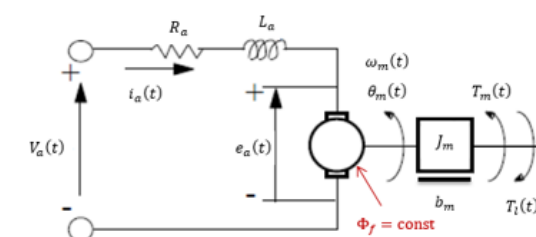
En realidad

Sí está LIMITADA por la Tensión de la barra de CC (V_{CC}):

$-V_{cc} \leq V_a \leq +V_{cc}$
(Saturación)



Modelo Físico Idealizado



Control de Posición por Tensión de Armadura

Control de Posición con manipulación de TENSIÓN V_a (idealmente **no limitada**)

→ En realidad **SÍ está LIMITADA** por la Tensión de la barra de CC (V_{cc}):
 $-V_{cc} \leq V_a \leq +V_{cc}$ (Saturación)

Planta tipo 1 – **Ley Control**

Cálculo de Ganancias

(Sintonía):

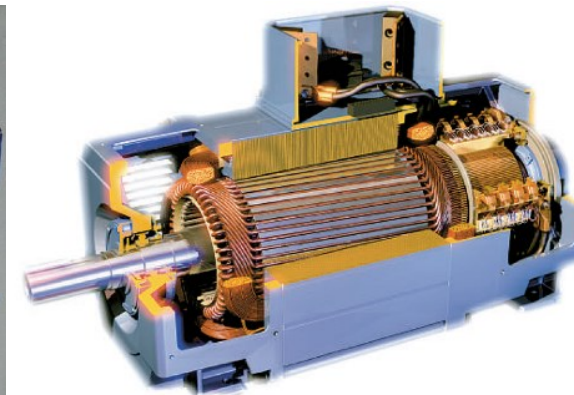
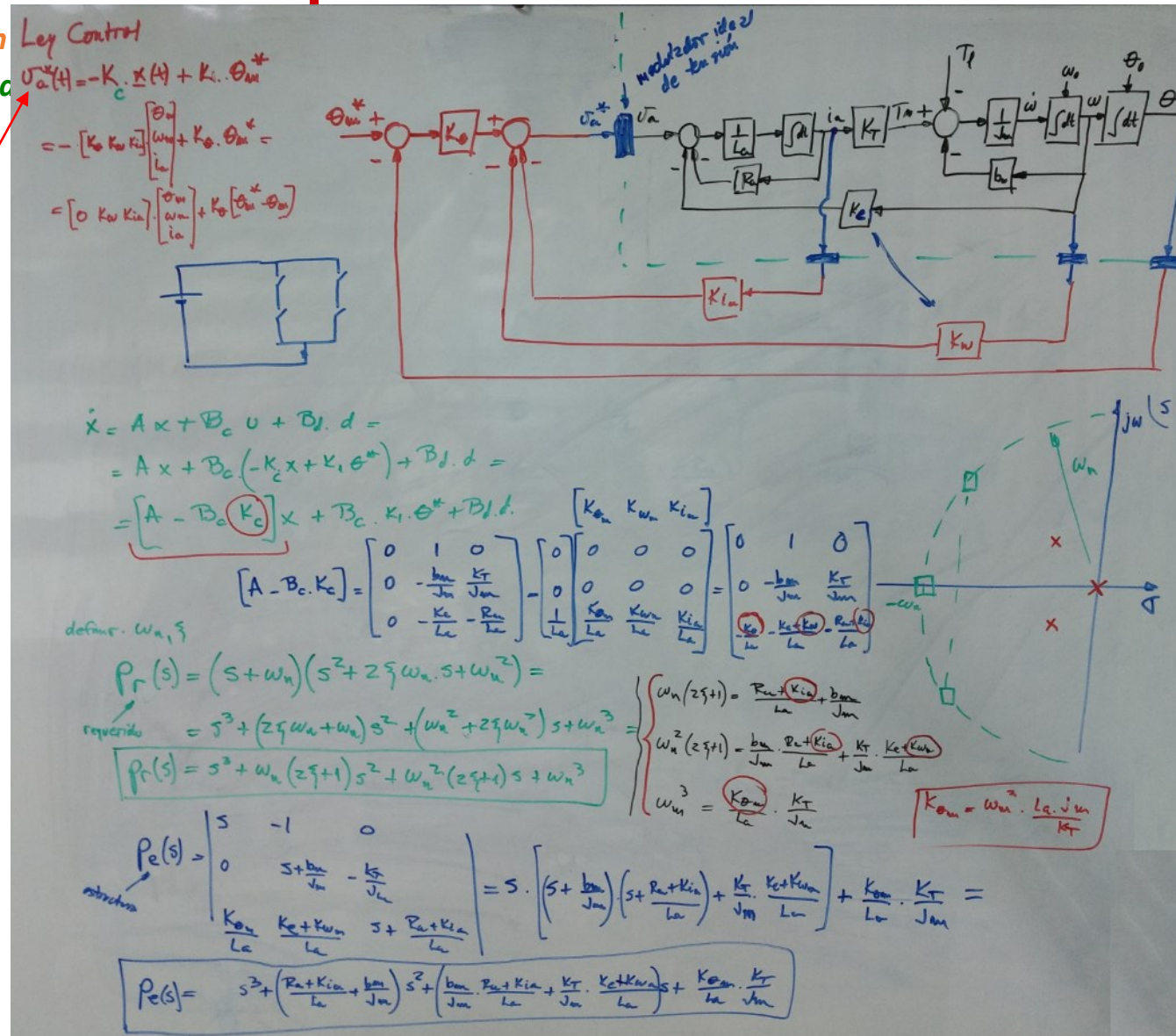
Método de Asignación o

Ubicación de Polos

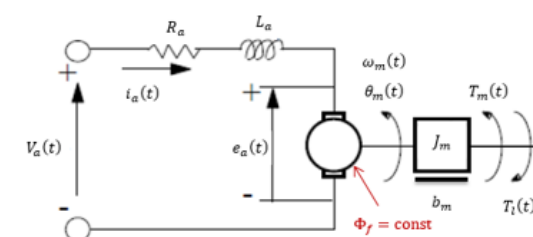
Observador de Estado

Completo

(planteo similar, ver Unidad 3)



Modelo Físico Idealizado

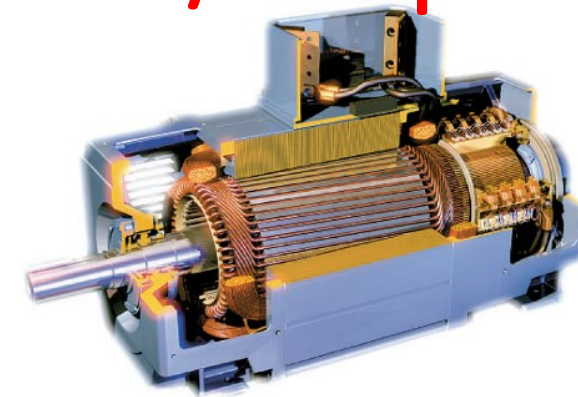
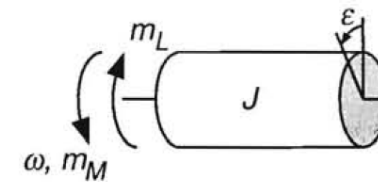
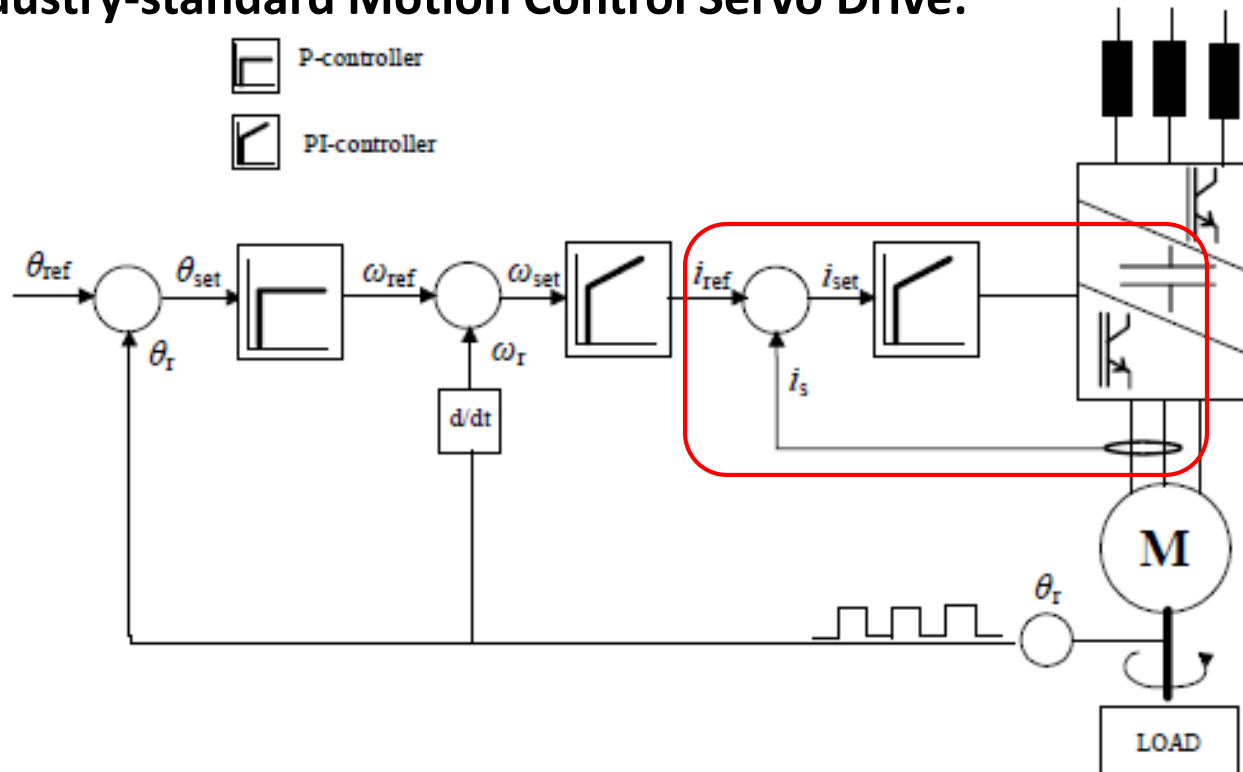


Control en Cascada: Movimiento $\rightarrow$ Corriente/Torque

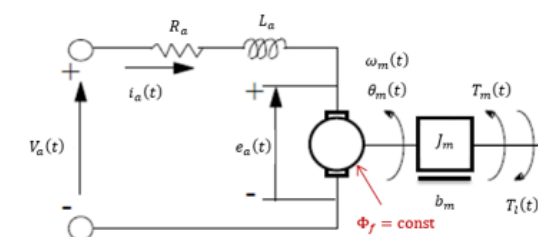
2 Lazos de Control:

- Externo de **Posición / Velocidad** (Maestro, comparativamente lento) $\rightarrow$
- Interno de **Corriente / Torque** (Esclavo, comparativamente rápido)

Industry-standard Motion Control Servo Drive:



Modelo Físico Idealizado



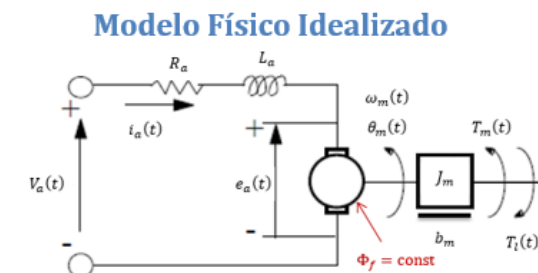
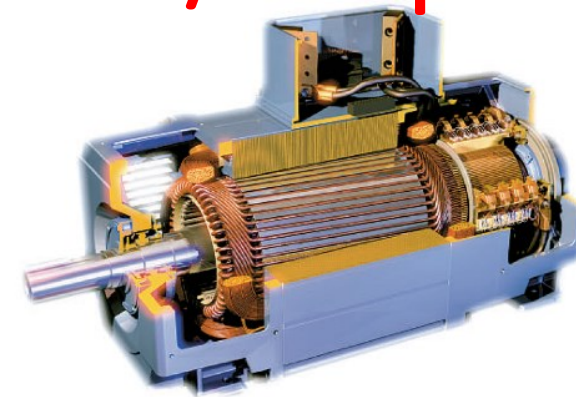
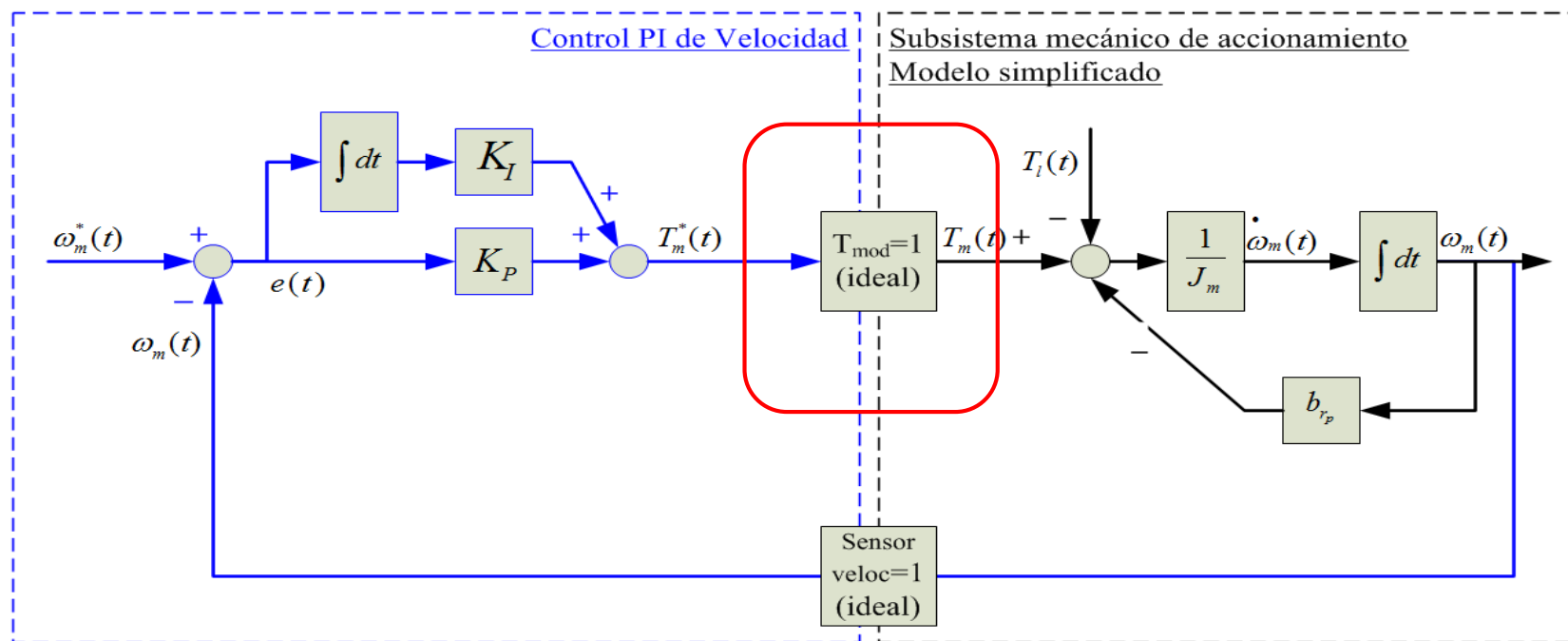
Nota: el esquema muestra accionamiento de CA, pero el concepto de Control es válido también para CC.

Control en Cascada: Movimiento $\rightarrow$ Corriente/Torque

2 Lazos de Control:

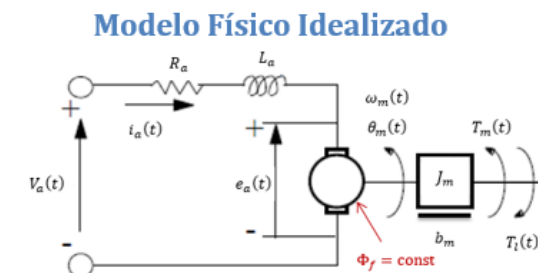
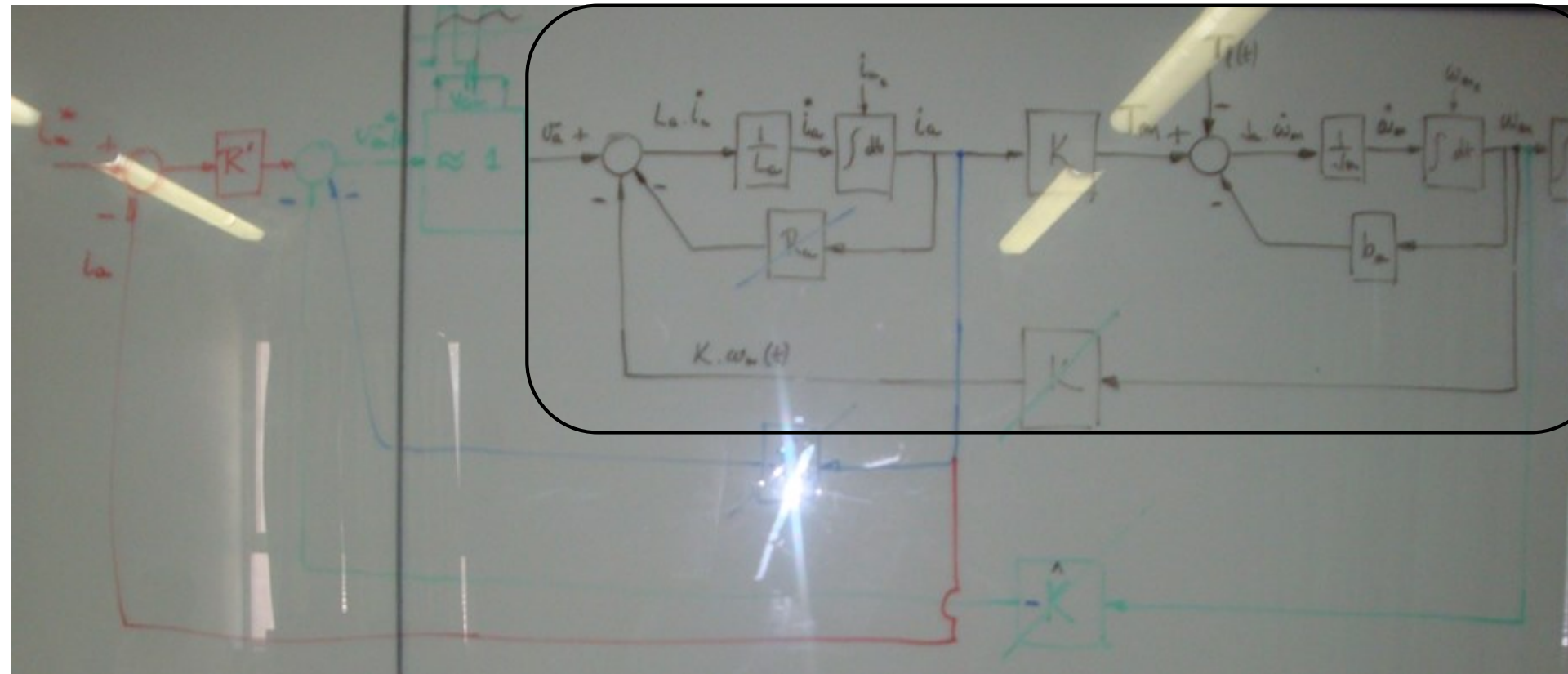
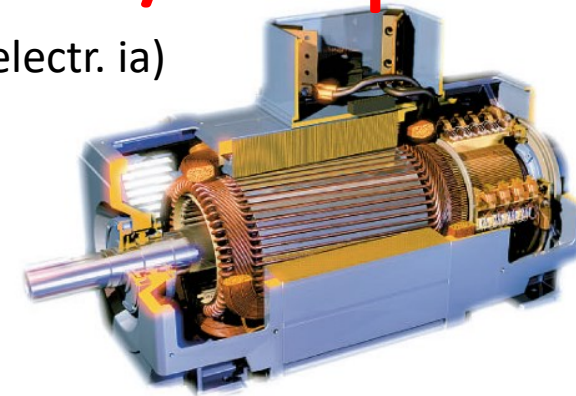
- Externo de **Posición / Velocidad** (Maestro, comparativamente lento) $\rightarrow$
- Interno de **Corriente / Torque** (Esclavo, comparativamente rápido)

Industry-standard Motion Control Servo Drive: **Control de velocidad en accionamiento**



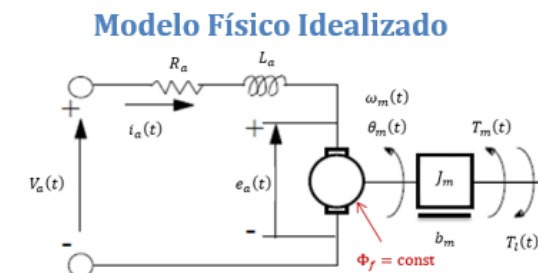
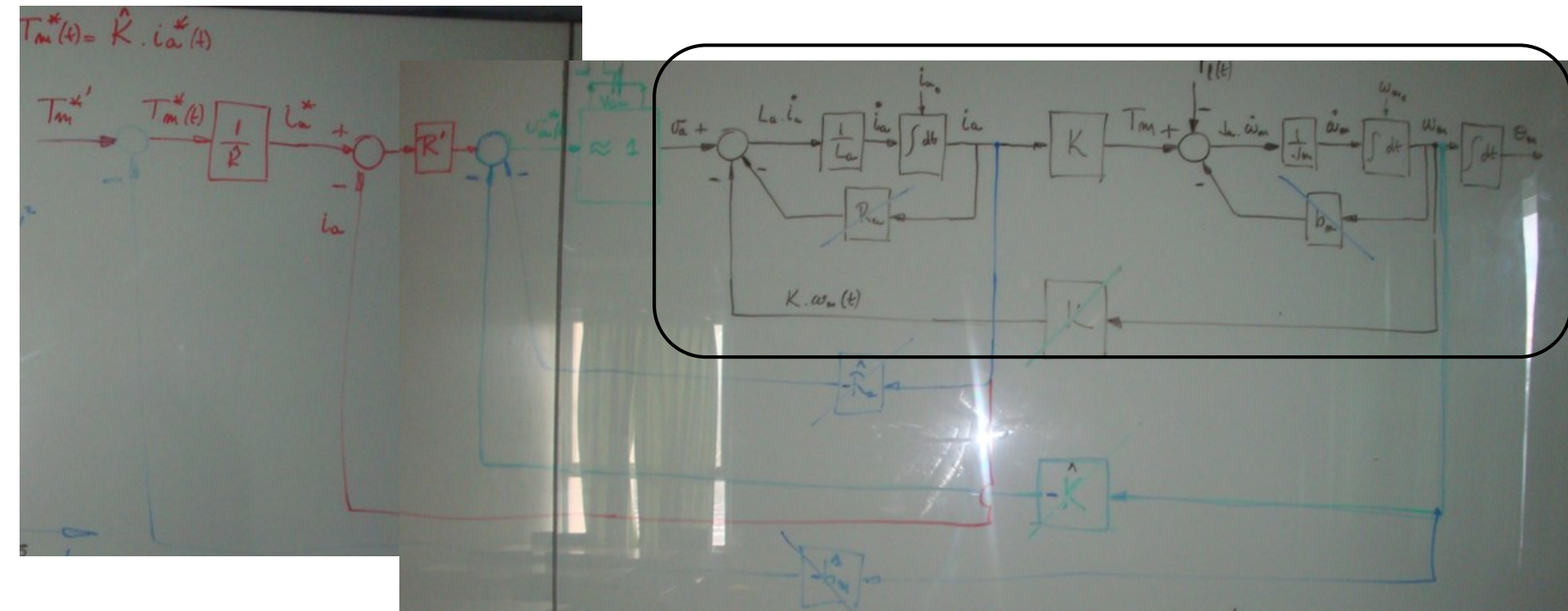
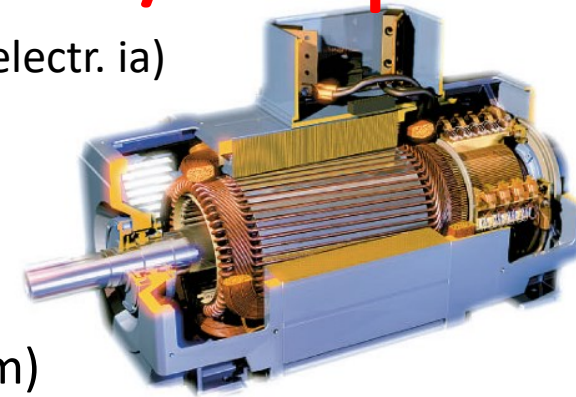
Control en Cascada: Modulador de Corriente/Torque

1. “Desacoplamiento” (Compensación) de K_e (retroalim. cruzada de estado mecánico $\omega_m \rightarrow$ electr. i_a)
2. “Desacoplamiento” (Compensación) de R_a (retroalim. propia de estado eléctrico i_a)
3. Lazo de CONTROL P (ó PI) de Corriente (suficientemente rápido, ej. BW= 1 kHz)



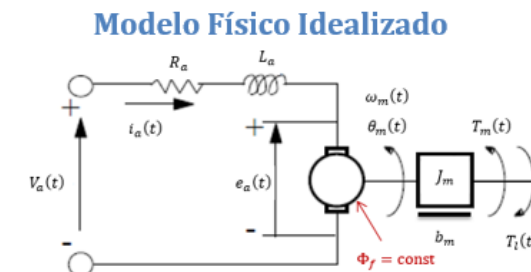
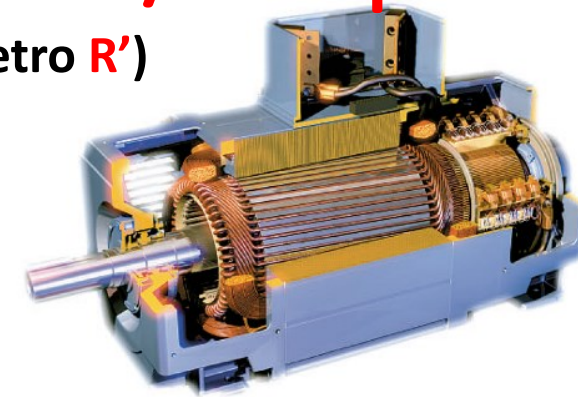
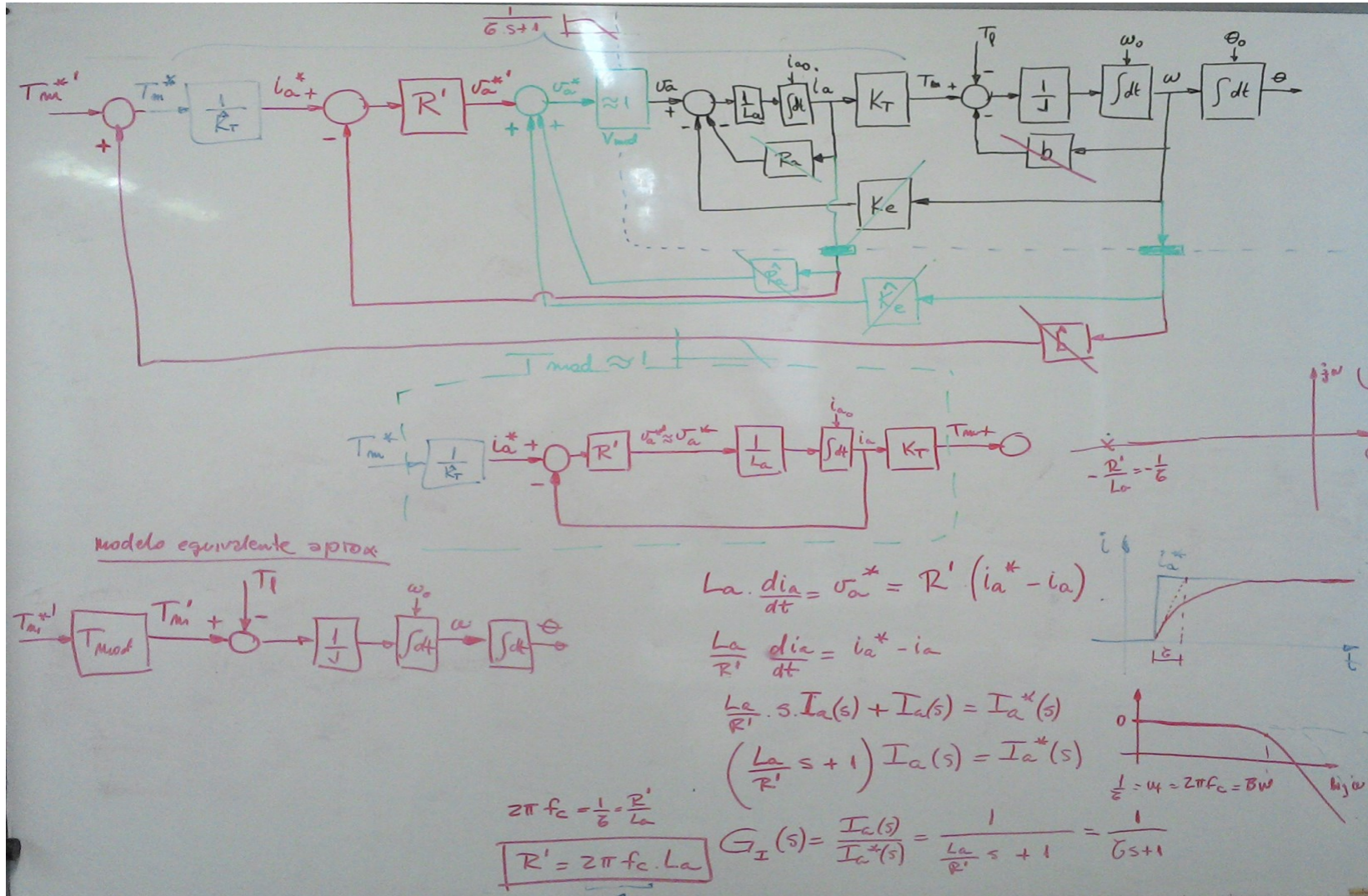
Control en Cascada: Modulador de Corriente/Torque

1. “Desacoplamiento” (Compensación) de K_e (retroalim. cruzada de estado mecánico $\omega_m \rightarrow$ electr. i_a)
2. “Desacoplamiento” (Compensación) de R_a (retroalim. propia de estado eléctrico i_a)
3. Lazo de CONTROL P (ó PI) de Corriente (suficientemente rápido, ej. BW= 1 kHz)
4. “Desacoplamiento” (Compensación) de K_t (Consigna Torque $T_m^* \rightarrow$ Consigna i_a^*)
5. “Desacoplamiento” (Compensación) de b_m (retroalim. propia de estado mecánico ω_m)



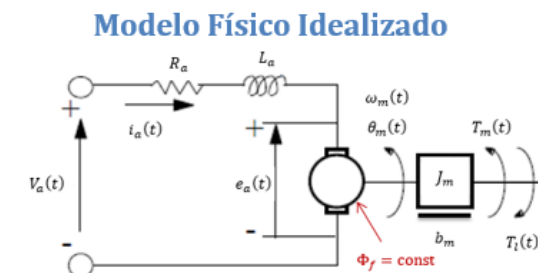
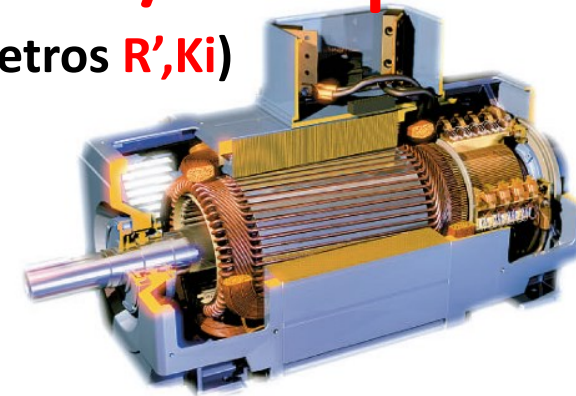
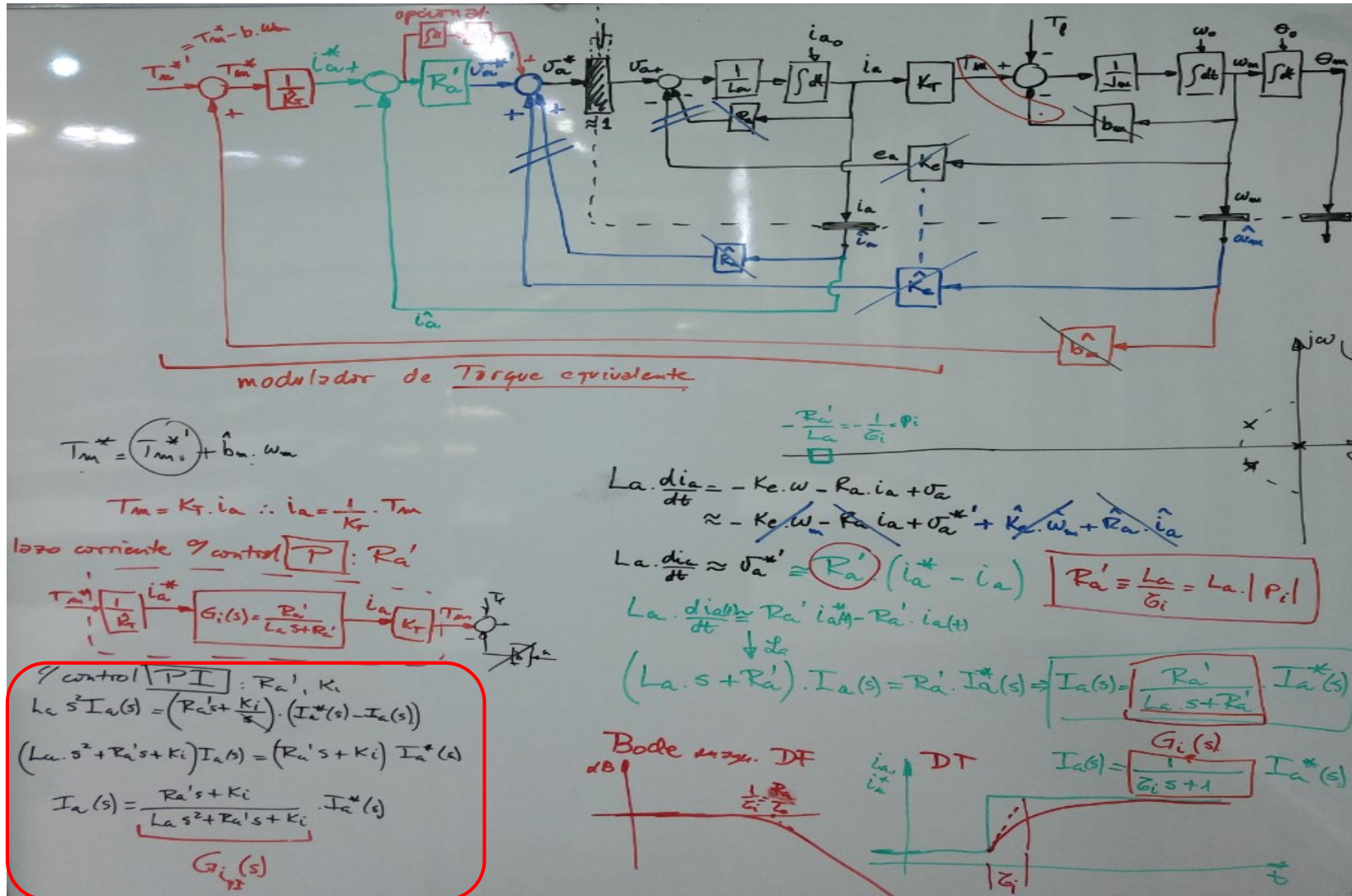
Control en Cascada: Modulador de Corriente/Torque

Modelo Equivalente P: Filtro pasabajos 1° orden → Análisis y Sintonía (Cálculo parámetro R')



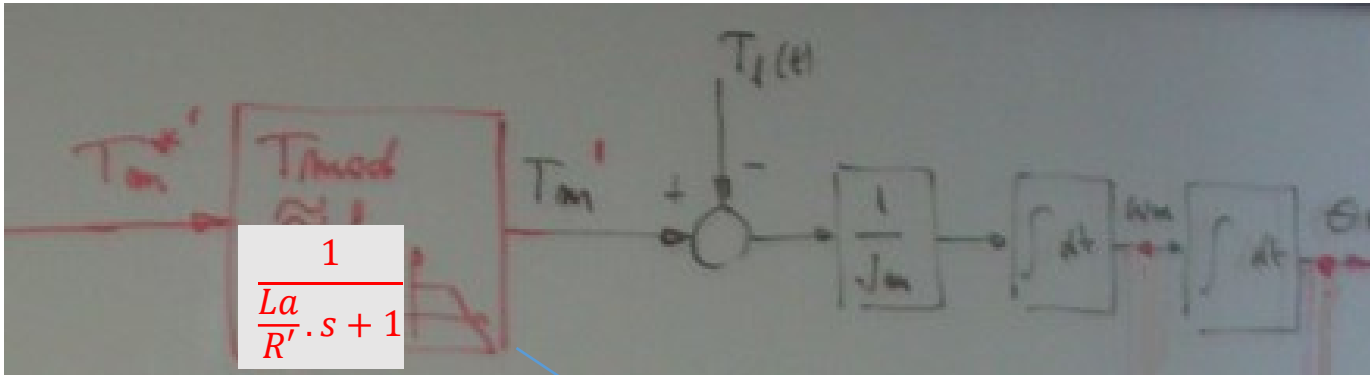
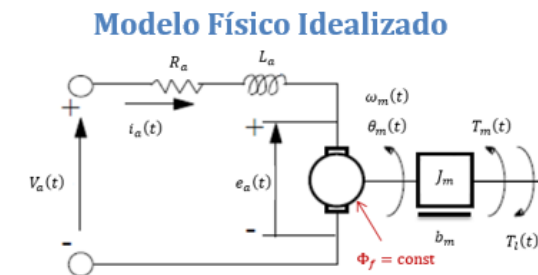
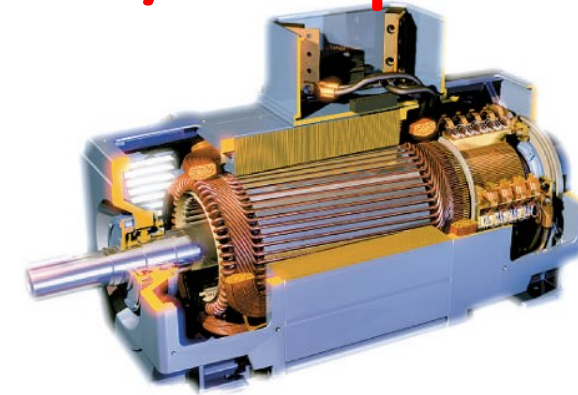
Control en Cascada: Modulador de Corriente/Torque

Modelo Equivalente **PI**: Filtro pasabajos 2° orden → Análisis y Sintonía (Cálculo parámetros R', K_i)

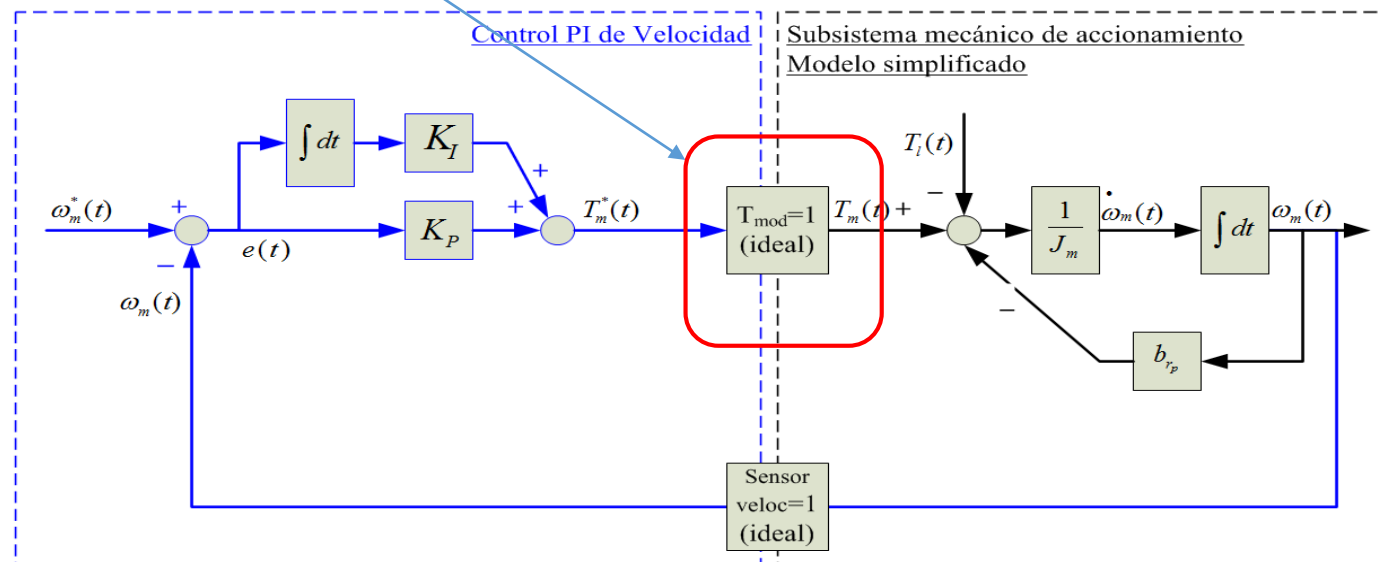


Control en Cascada: Modulador de Corriente/Torque

Modelo Equivalente **Modulador de Torque** y Subsistema Mecánico Simplificado



Control de velocidad en accionamiento



AUTOMÁTICA y MÁQUINAS ELÉCTRICAS

4. Control de Accionamientos de Corriente Continua

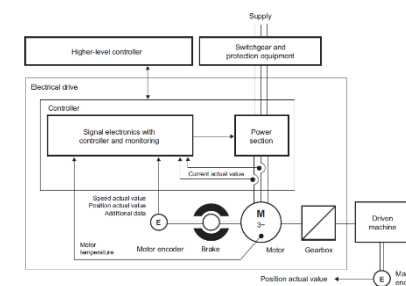
A. Máquina Eléctrica de CC con Conmutador Mecánico (Colector y Escobillas)

- Máquinas de CC con escobillas: Excitación por Imanes Permanentes vs. Excitación Separada.
- Modelado Dinámico: Espacio de Estado en DT – Funciones de Transferencia en DF.
- Análisis y Simulación del Comportamiento Dinámico.



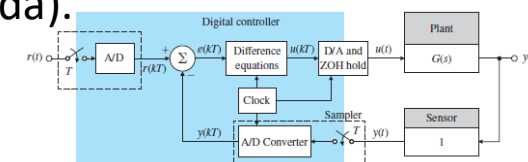
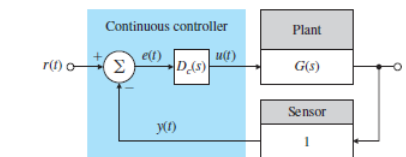
B. Control de Velocidad y Posición por Retroalimentación de Estado

- Control por Tensión de Armadura con Retroalimentación de Estado. Asignación de Polos.
- Observador de Estado.



C. Control en Cascada: Corriente/Torque – Movimiento (Velocidad/Posición)

- Desacoplamiento de retroalimentaciones naturales (propia y cruzada).
- Control interno de Torque $\rightarrow$ Modulador de torque ideal (aproximación).
- Control de movimiento (enfoque mecatrónico, con Modulador de torque ideal en cascada).

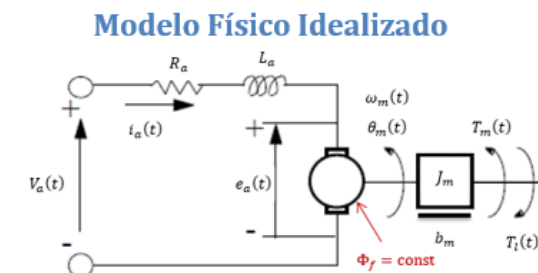
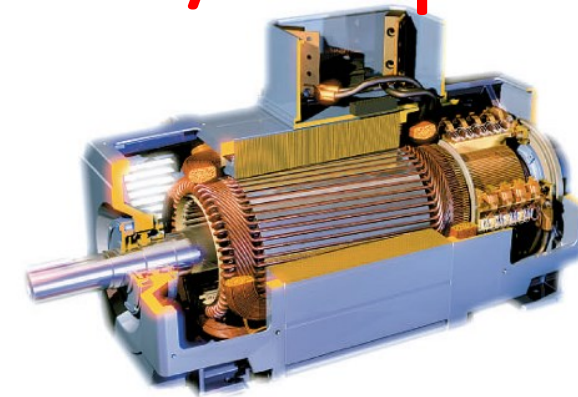
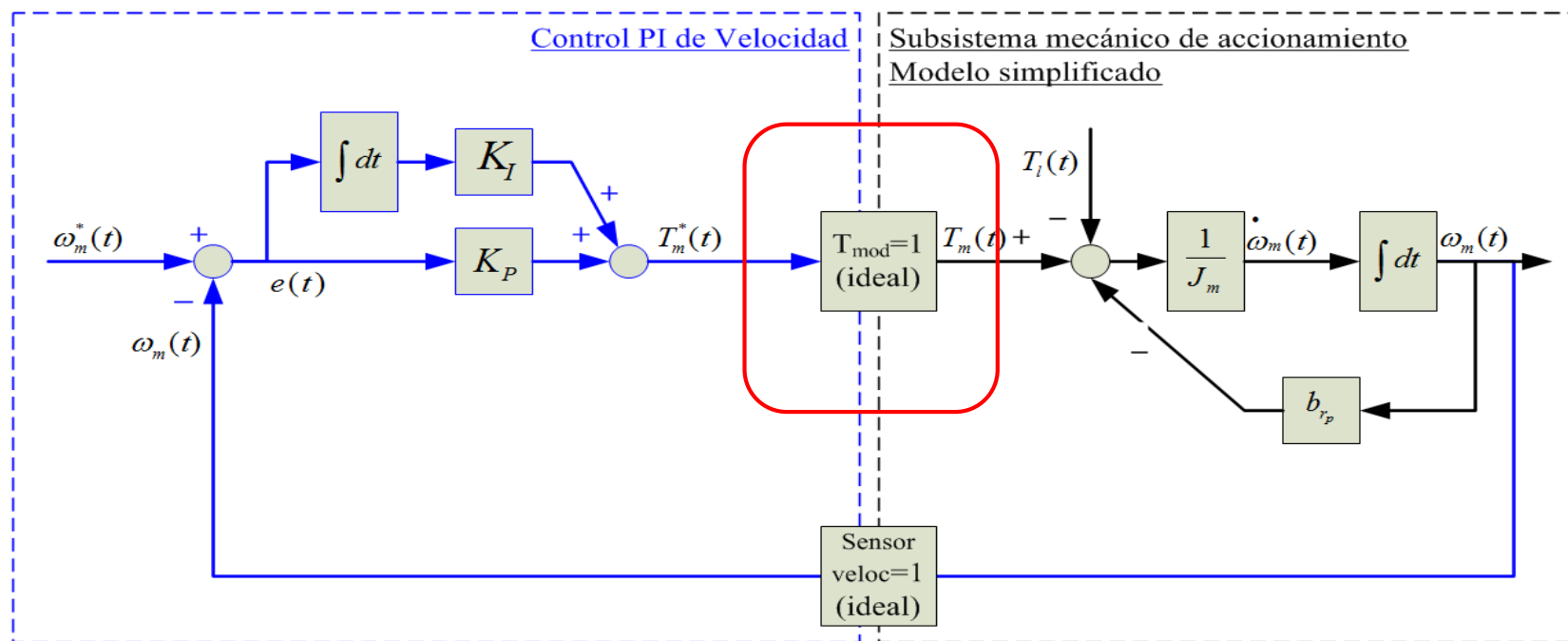


Control en Cascada: Movimiento $\rightarrow$ Corriente/Torque

2 Lazos de Control:

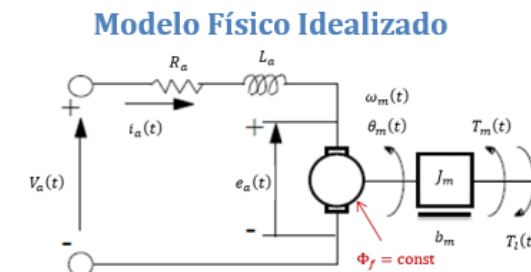
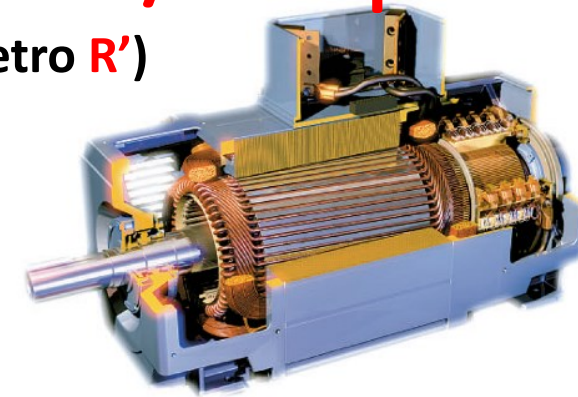
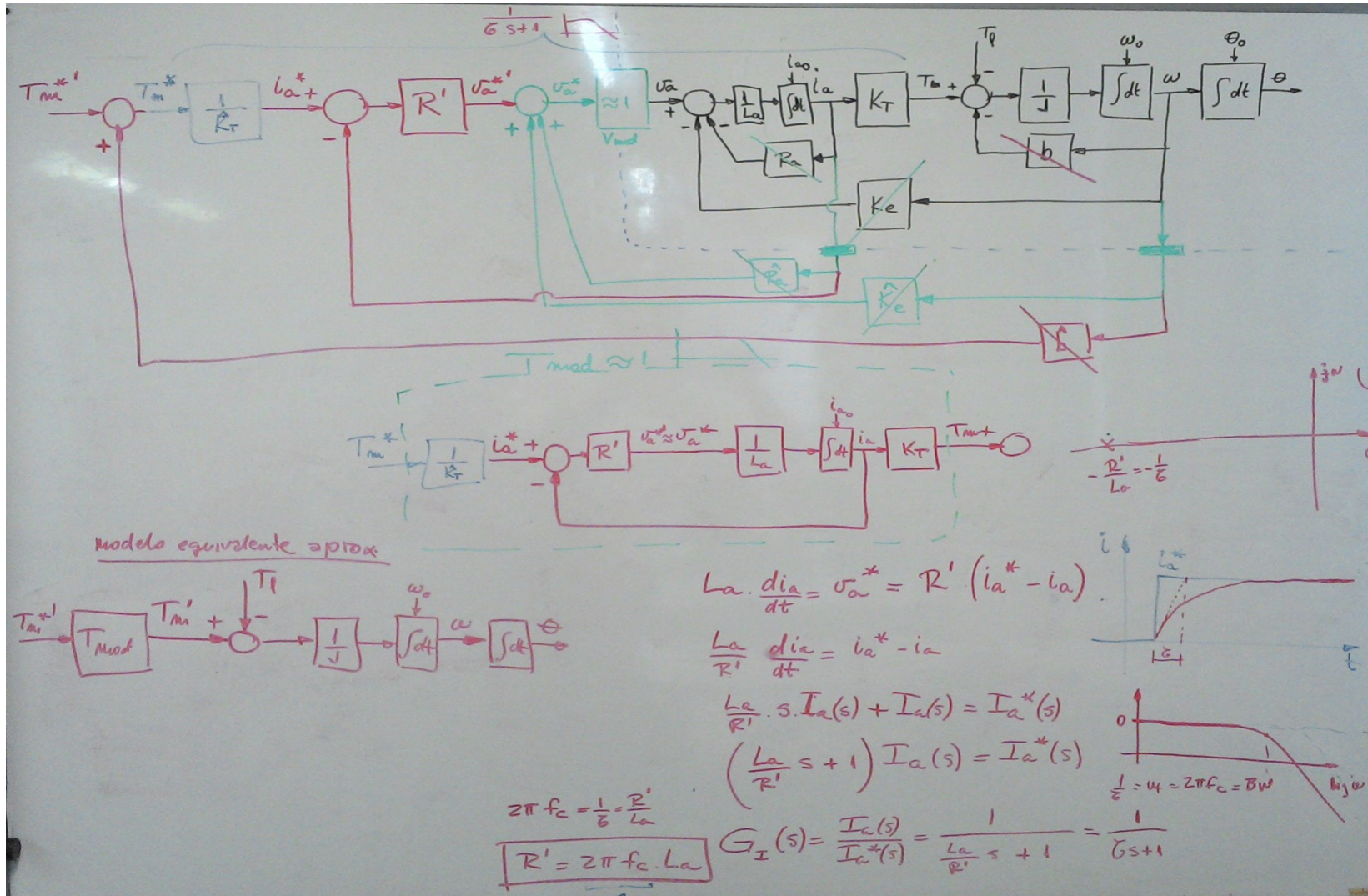
- Externo de Posición / Velocidad (Maestro, comparativamente lento) $\rightarrow$
- Interno de Corriente / Torque (Esclavo, comparativamente rápido)

Industry-standard Motion Control Servo Drive: Control de velocidad en accionamiento



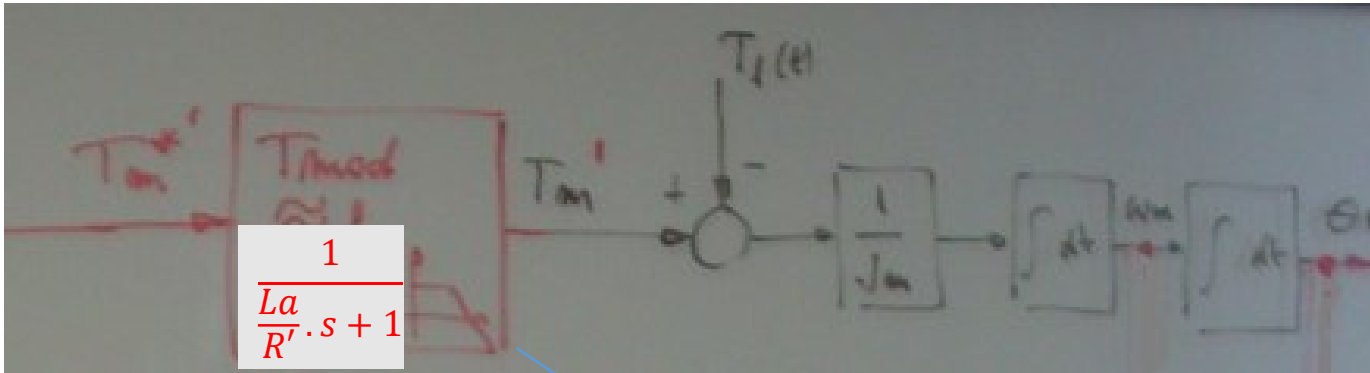
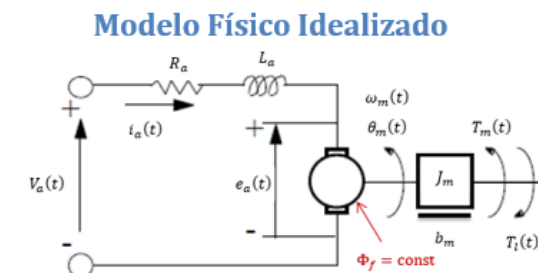
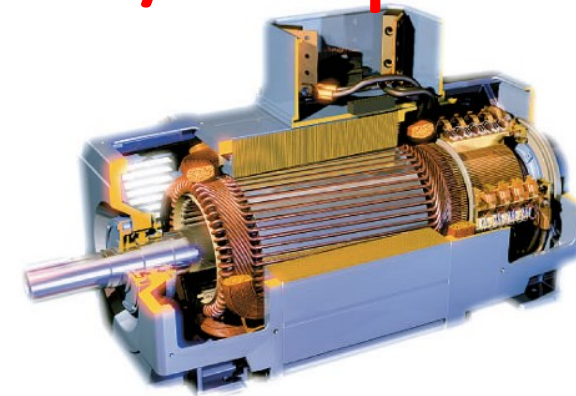
Control en Cascada: Modulador de Corriente/Torque

Modelo Equivalente **P**: Filtro pasabajos 1° orden → Análisis y Sintonía (Cálculo parámetro R')

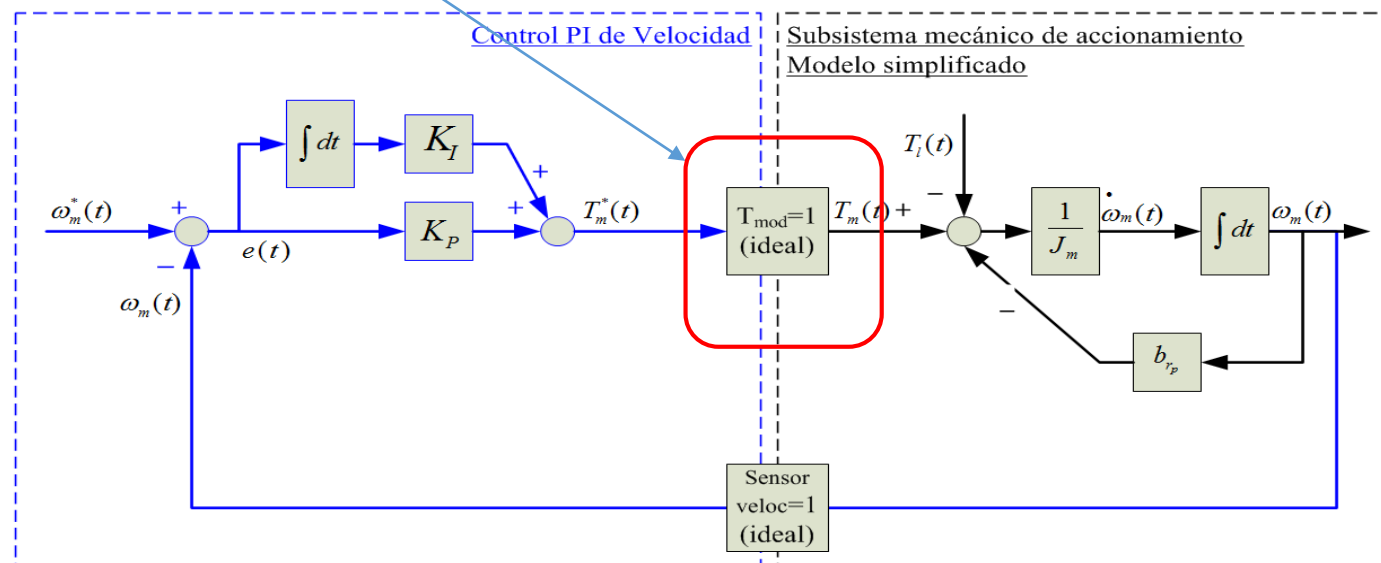


Control en Cascada: Modulador de Corriente/Torque

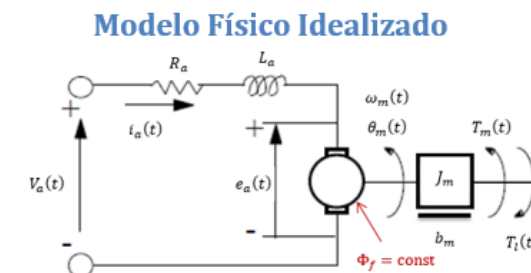
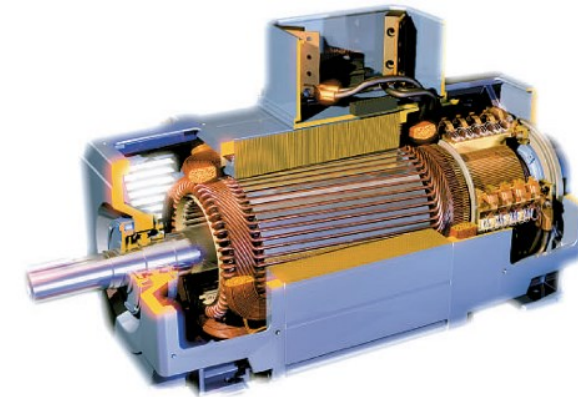
Modelo Equivalente **Modulador de Torque** y Subsistema Mecánico Simplificado



Control de velocidad en accionamiento

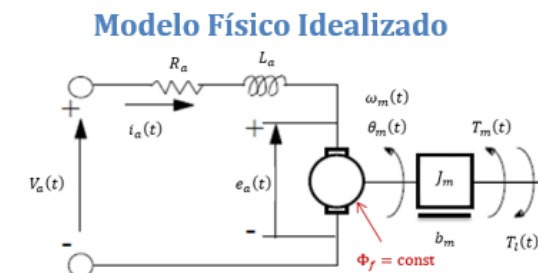
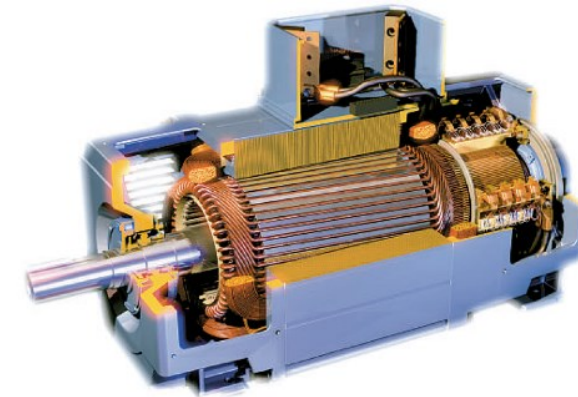
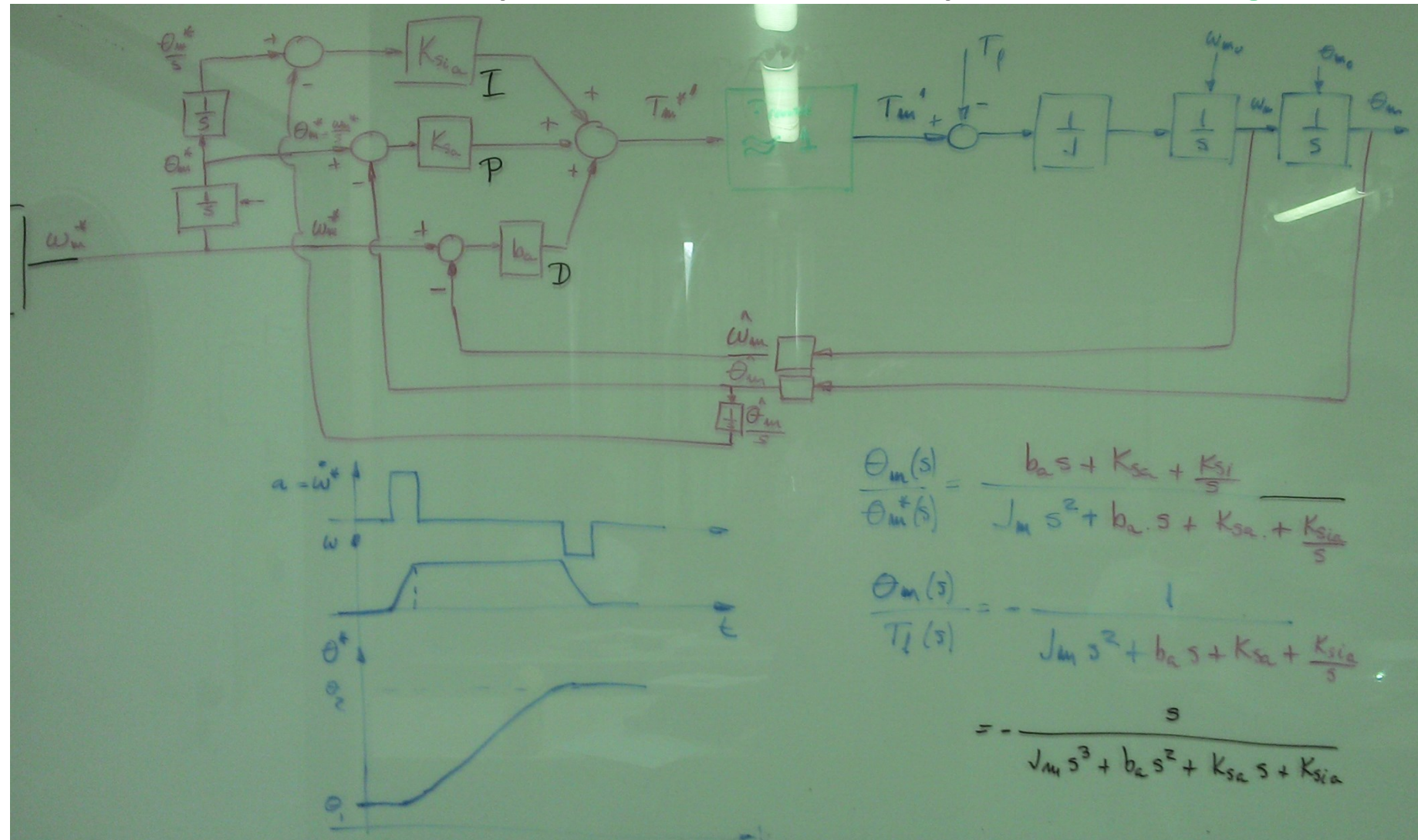


PID Movimiento: Modelo Equivalente con 3 lazos complementarios **separados**



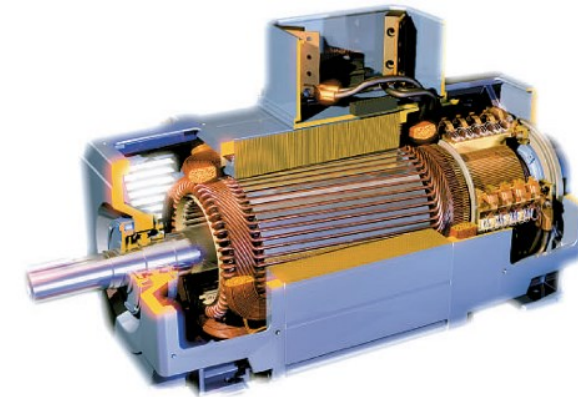
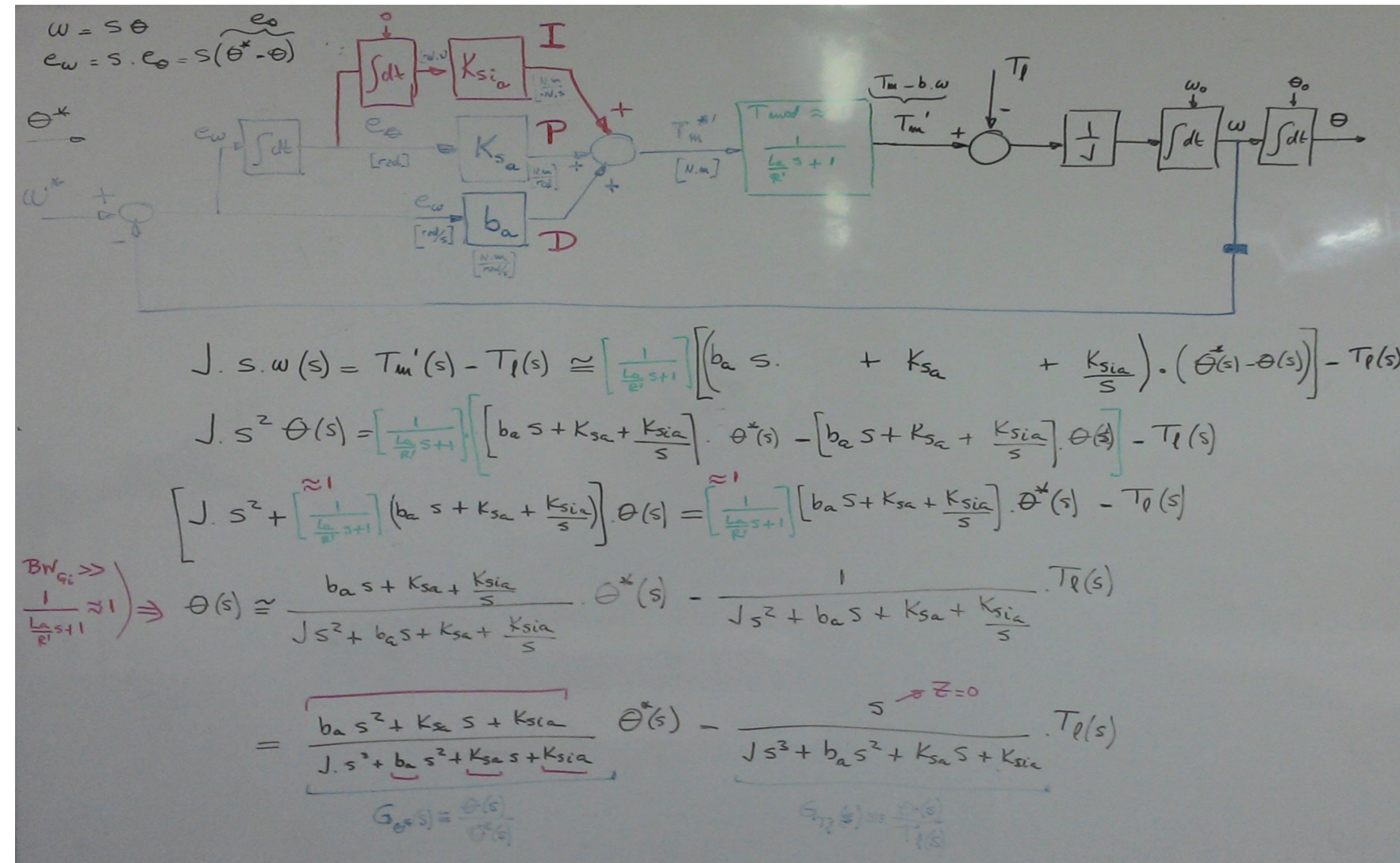
Control en Cascada: Control PID de Movimiento

PID Movimiento: Modelo Equivalente con 3 lazos complementarios **integrados**

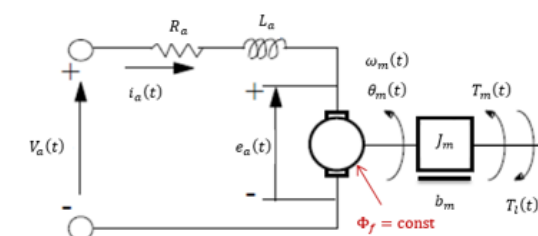


Control en Cascada: Control PID de Movimiento

PID Movimiento: Análisis – Funciones de Transferencia Equivalentes

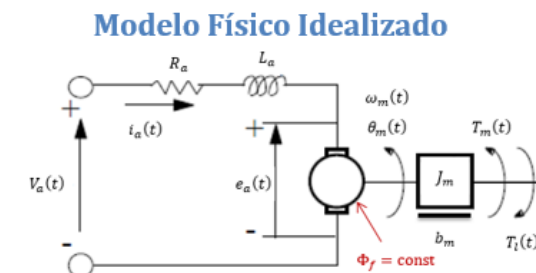
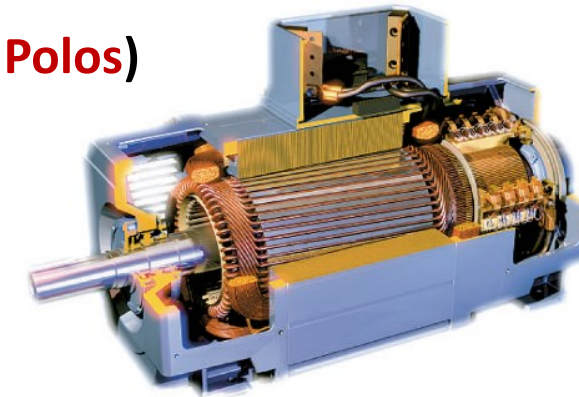
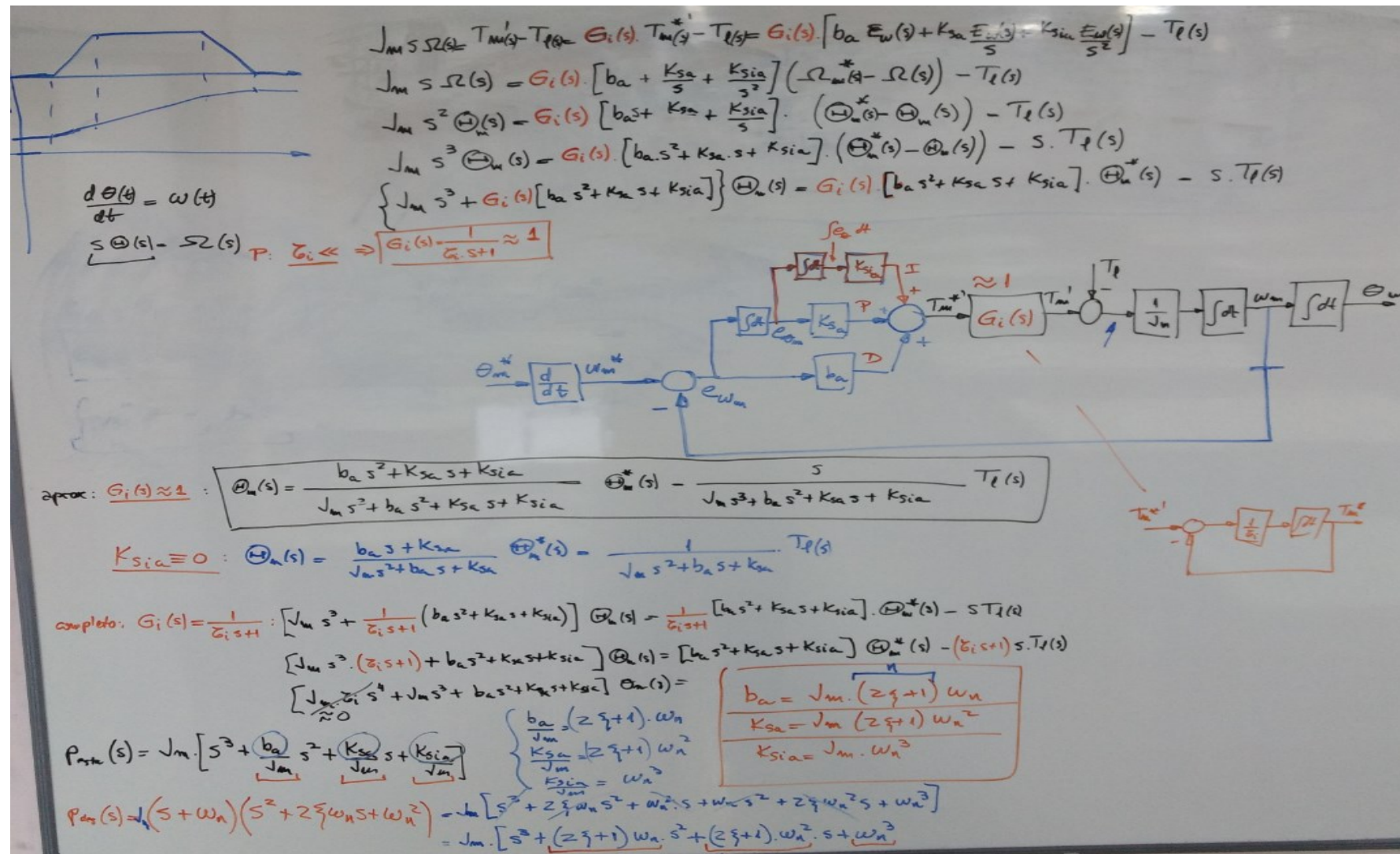


Modelo Físico Idealizado



Control en Cascada: Control PID de Movimiento

PID Movimiento: Diseño – **Método de Sintonía Serie** (Caso Particular de **Asignación de Polos**)



Control de Posición en Cascada: Ejercicio Electrocraft G364

Control de Posición con manipulación de TENSIÓN V_a (idealmente no limitada) →

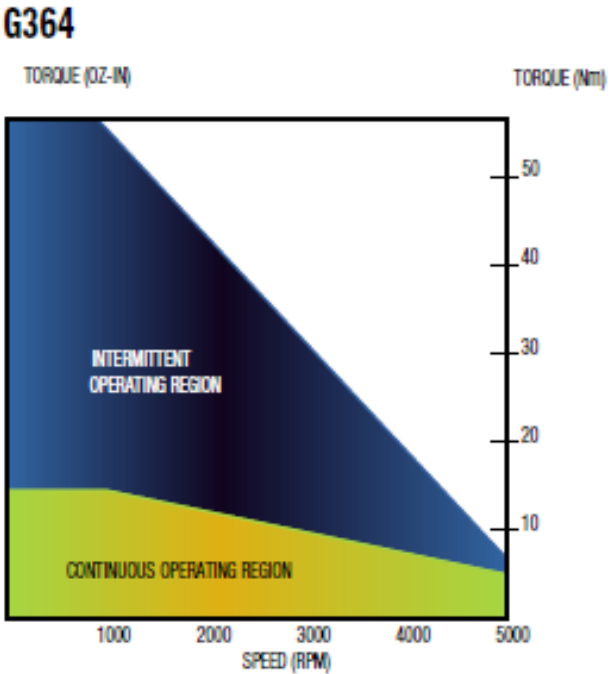
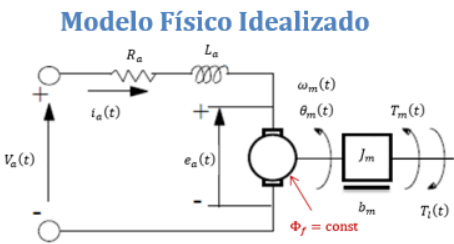
En realidad **SÍ** está **LIMITADA** por la Tensión de la barra de CC (V_{cc}):
 $-V_{cc} \leq V_a \leq +V_{cc}$ (Saturación)

Planta tipo 1 – Ley Control
Cálculo de Ganancias
(Sintonía):
Método de Asignación o
Ubicación de Polos

Observador de Estado
Completo
(planteo similar, ver Unidad 3)

HACER y SIMULAR
para Motor ElectroCraft G364

G360 Series Performance Specifications		
Motor Ratings	362	364
Continuous Stall Torque (Ncm)	8.5	14.1
Continuous Stall Torque (oz-in)	12	20
Peak Torque (Ncm)	31.8	56.5
Peak Torque (oz-in)	45	80
Maximum Terminal Voltage (V)	30	30
Maximum Operating Speed (rpm)	5000	5000
Mechanical Data		
Rotor Inertia (kg cm ²)	0.021	0.049
Rotor Inertia (oz-in-sec ²)	0.0003	0.0007
Damping Constant (Ncm/krpm)	0.141	0.141
Damping Constant (oz-in/krpm)	0.2	0.2
Thermal Resistance (C/watt)	7.8	7.5
Maximum Armature Temperature (°C)	155	155
Maximum Friction Torque (Ncm)	1.1	1.1
Maximum Friction Torque (oz-in)	1.5	1.6
Maximum Radial Load (25mm from bearing) (Kg)	2.3	2.3
Maximum Radial Load (25mm from bearing) (lbs)	5	5
Weight (Kg)	0.3	0.5
Electrical Data	A	A
Kt Torque Constant +10% (Ncm/amp)	4.73	5.65
Kt Torque Constant +10% (oz-in/amp)	6.7	8.0
Ke Voltage Constant +10% (V/Krpm)	4.9	5.9
Terminal Resistance (ohms)	3.5	3.2
Maximum Continuous Current (A)	1.8	1.8
Maximum Peak Current (A)	7	10
Armature Inductance (mH)	1.1	1.3
Tachometer Specifications - (optional)		
Ke Voltage Constant +10% (V/Krpm)	3	
Terminal Resistance (ohms)	42	
Ripple Peak-to-Peak at 1000 rpm (%)	5	
Increase Motor Inertia by: (kg cm ²)	0.007	
Increase Motor Inertia by: (oz-in-sec ²)	0.0001	



Control de Posición en Cascada: Ejercicio Electrocraft G364

Ejercicio de Aplicación: ElectroCraft G364

Parámetros:

G364 Parámetros

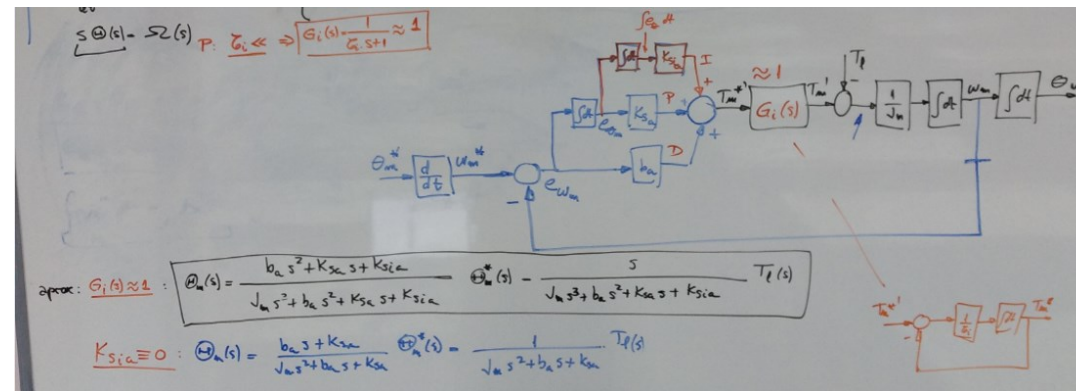
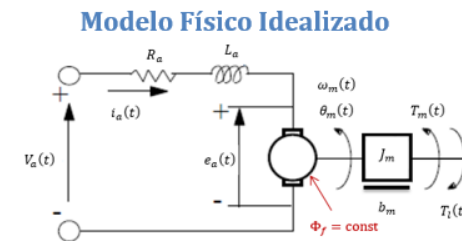
$$J_m = 0.049 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^2 = 49 \times 10^{-7} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

$$b_m = 0.141 \frac{\text{N} \cdot \text{cm}}{1000 \text{ rpm}} = 1.3465 \times 10^{-5} \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}}$$

$$R_a = 3.2 \Omega$$

$$L_a = 1.3 \text{ mH} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ H}$$

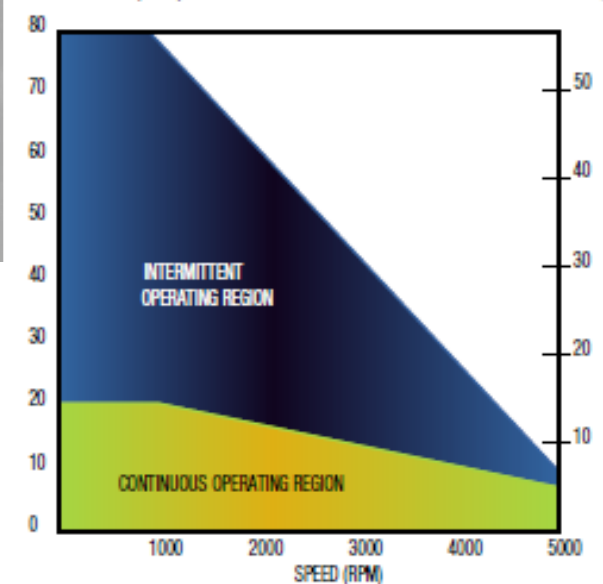
$$K \begin{cases} K_r = 5.65 \pm 10\% \frac{\text{N} \cdot \text{cm}}{\text{A}} = 0.0565 \pm 10\% \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}} \\ K_e = 5.9 \pm 10\% \frac{\text{V}}{1000 \text{ rpm}} = 0.0563 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \end{cases}$$



G364

TORQUE (OZ-IN)

TORQUE (Nm)

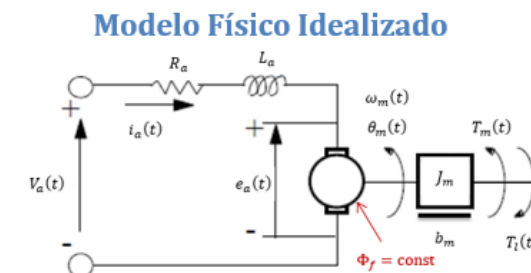
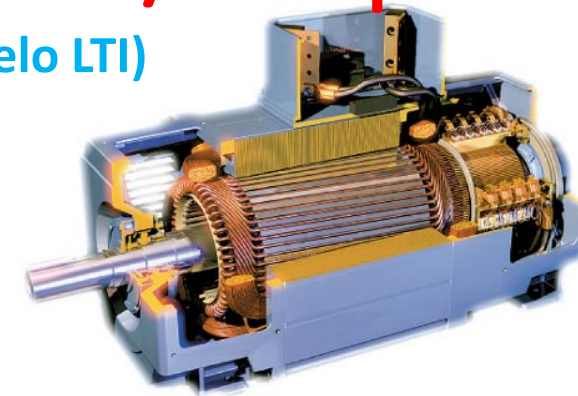
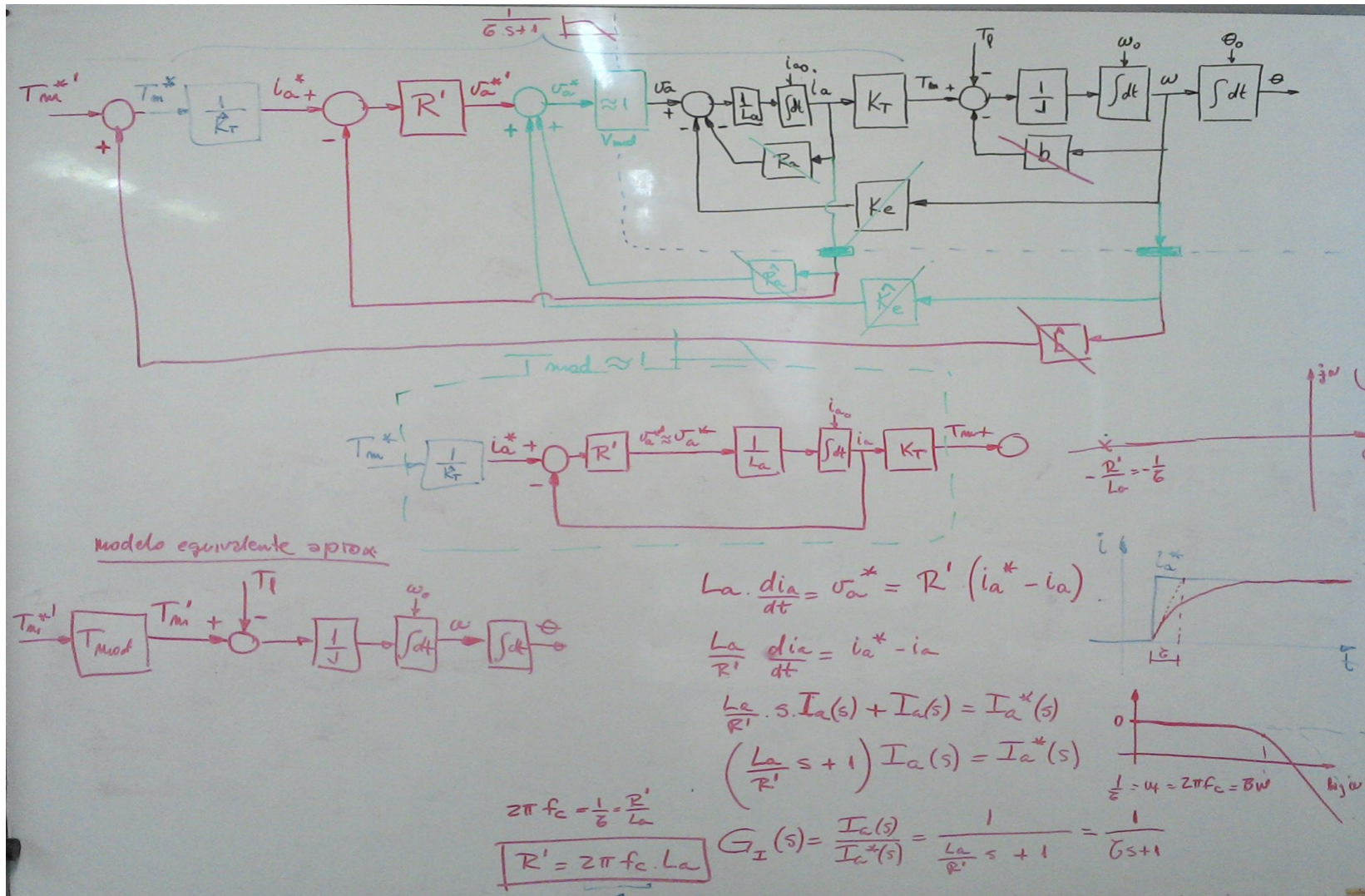


Realizar:

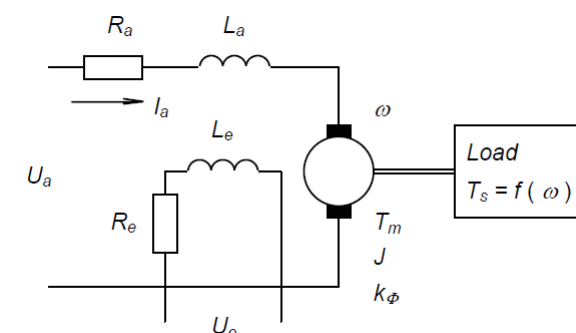
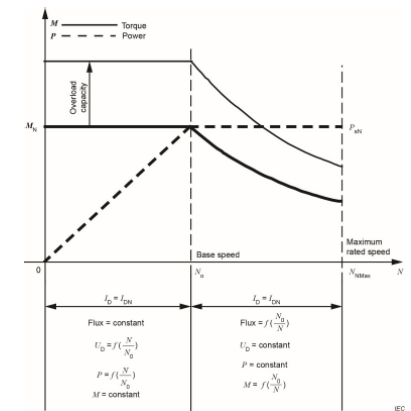
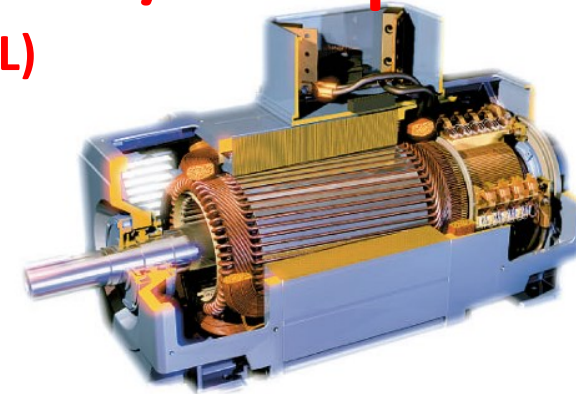
- Diseño de Control en CASCADA: Modulador de Torque (desacoplamiento, control corriente).
- Diseño de Control en CASCADA: Control de Movimiento
- Incorporar Estimación de Estado con Observador de Estado Completo
- SIMULAR con Modulador de Tensión SATURADO a +/-30 Vdc
- COMPARAR con diseño anterior: Control por Retroalim. Estado convencional

Control en Cascada: Modulador de Corriente/Torque

Hasta aquí: Control solo por Armadura con **Excitación Constante: $I_f = \text{const}$ o PM** (Modelo LTI)



Control por Armadura y Excitación con Excitación Variable: If NO constante (Modelo NL)



Aplicación: STS Crane Main Hoist (2 Motores SE-BDCM)

Accionamiento CC de **Izaje Principal** en Grua Portuaria (STS Container Crane, 40,6 t), 1997
4 Cuadrantes (regenerativo e inversión de marcha) con **control de campo independiente**
 Regiones: **Torque Constante** (0-850 rpm) vs. **Potencia Constante** (debilitamiento de campo) (850-2070 rpm):

Modelo NL →

HACER: Diseño de Controlador en Cascada para SE-BDCM con Field Weakening
 – **Modulador de Torque** (compensación armadura y excitación por retroalim. NL)
 + **PID Movimientos**

Modelo dinámico global NL
 con **Parámetros compactados**
 “1 motor equivalente”

a partir de datos reales del fabricante de Motores para este proyecto:

