



NUEVAS ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE MOTORES DE INDUCCIÓN
UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Jaime Antonio González Castellanos



Accionamiento Industrial Eléctrico

• Definición: Conjunto de dispositivos que forman parte de un proceso determinado y en donde es utilizado un motor eléctrico.

• Máquinas y herramientas, banda transportadora, trituradoras, etc.



Accionamiento Industrial Eléctrico



• Máquina Accionada



Accionamiento Industrial Eléctrico

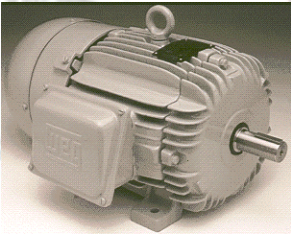


• Máquina Accionada

• Sistema de Control



Accionamiento Industrial Eléctrico



• Máquina Accionada

• Sistema de Control

• Motor Eléctrico



Tipos de Sistemas de Control

• De Acuerdo al grado de Automatismo

• De Acuerdo a los Dispositivos



De acuerdo al grado de Automatismo

- Manual
- Semiautomático
- Automático



De acuerdo a los Dispositivos

- Electromagnéticos
- Electrónicos

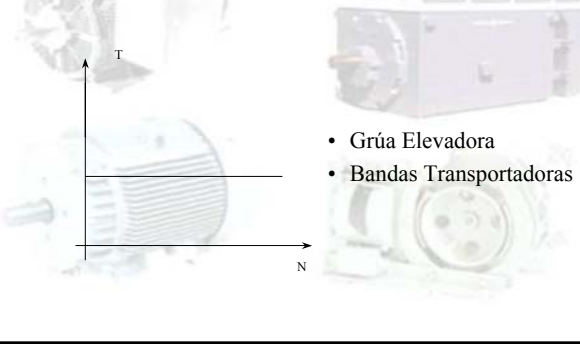


Características del Par Resistente

- Característica de Fricción (Coulomb)
- Característica de Ventilación (Fluida)
- Característica de Tracción (Estática)
- Característica Lineal (Viscosa)

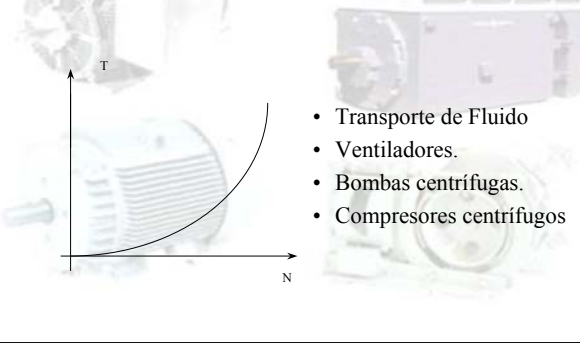


Característica de Fricción



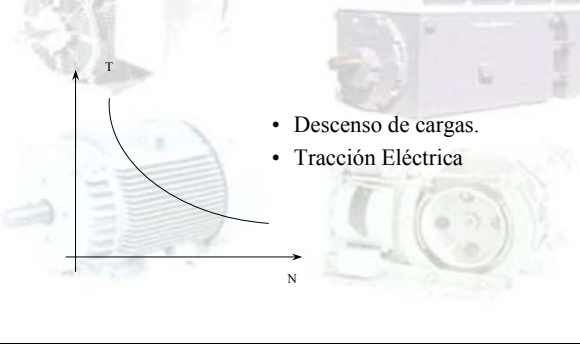



Característica de Ventilación



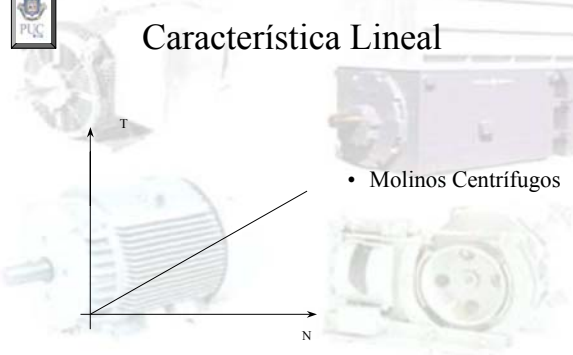


Característica de Tracción






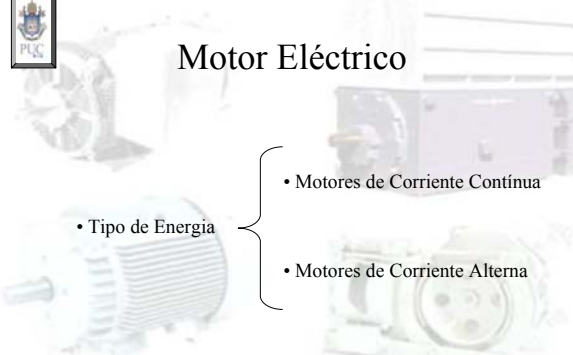
Característica Lineal



- Molinos Centrifugos



Motor Eléctrico



- Tipo de Energía
 - Motores de Corriente Continua
 - Motores de Corriente Alterna



Motores de Corriente Continua



- Motor Serie
- Motor Shunt o Paralelo
- Motor Compound o Compuesto
 - Corto
 - Largo



Motor de Corriente Contínua

- Fuente de Alimentación de corriente continúa
- Circuito de control simple
- Variación continua de velocidad
- No puede trabajar en forma sellada



Motor de Corriente Alterna

- Motor Sincronico
- Motor Asincronico



Motores Especiales

- Motor de Paso
- Motor de Reluctancia
- Motor Universal
- Motor de histéresis
- Otros



Motor Trifásico de Inducción



Por qué el Motor de Inducción?

- Menor tamaño
- Menor peso
- Bajo costo
- Bajo mantenimiento
- Mayor relación Torque/ Amperio
- Posibilidad de ser encapsulado
- Otras

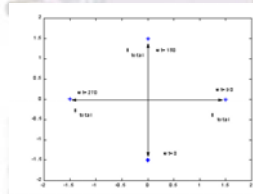
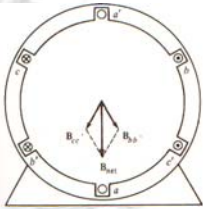


Tipos de Motores de Inducción

- Motor de Rotor Bobinado
- Motor de Jaula de Ardilla



Campo Magnético Giratório

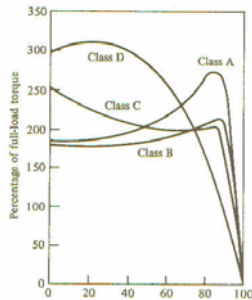


$$B_{total} = \left\{ \left(\frac{1}{2} \right) B_M \text{sen}(\omega t) \right\} x - \left\{ \left(\frac{1}{2} \right) B_M \text{cos}(\omega t) \right\} y$$



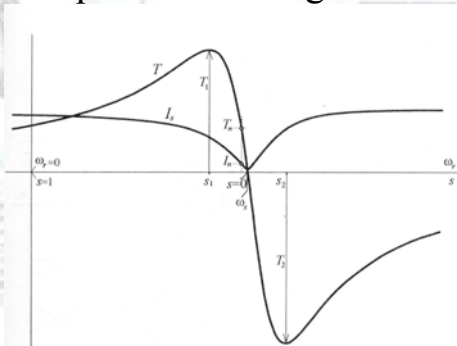
Tipos de Motor de Indução de Jaula de Ardilla

- Motor Classe A
- Motor Classe B
- Motor Classe C
- Motor Classe D
- Motor Classe F



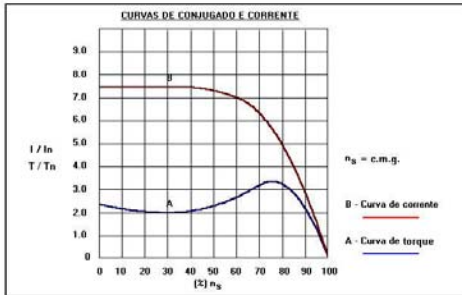


Torque Electromagnético



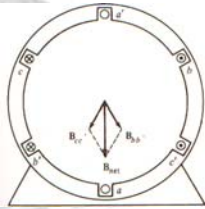


Torque Electromagnético





Velocidad del Campo Magnético Giratorio (CMG)



$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m$$

$$f_e = \frac{P}{2} f_m$$

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m$$

$$f_m = \frac{n_s}{60}$$

$$n_s = \frac{120 * f_e}{P} \text{ (rpm)}$$



Velocidad del Motor

$$n_r = n_s - n_d$$

$$n_r = \frac{120 * f_e}{P} - \frac{120 * f_d}{P}$$

$$n_r = \frac{120}{P} (f_e - f_d)$$

$$n_r = \frac{120}{P} (f_e - f_d) * \frac{f_e}{f_e}$$



Velocidad del Motor

$$f_d = f_e - f_r$$

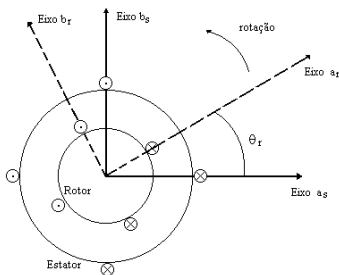
$$n_r = \frac{120}{P} \left(\frac{f_e - f_e - f_r}{f_e} - \frac{f_e - f_r}{f_e} \right) f_e$$

$$n_r = \frac{120 f_e}{P} \left(1 - \frac{f_e - f_r}{f_e} \right)$$

$$n_r = n_s (1 - s)$$



Modelo Matemático del Motor de Inducción





Ecuaciones del Motor Bifásico

$$v_{as} = p \lambda_{as} i_{as} + r_s i_{as}$$

$$v_{bs} = p \lambda_{bs} i_{bs} + r_s i_{bs}$$

$$v_{ar} = p \lambda_{ar} i_{ar} + r_r i_{ar}$$

$$v_{br} = p \lambda_{br} i_{br} + r_r i_{br}$$

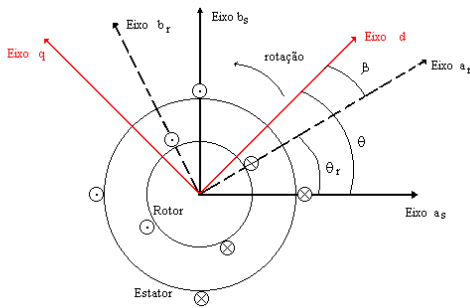


Ecuaciones del Motor de Inducción Bifásico

$$\begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_{sr} \cos \theta_r & -L_{sr} \sin \theta_r \\ 0 & L_s & L_{sr} \sin \theta_r & L_{sr} \cos \theta_r \\ L_{sr} \cos \theta_r & L_{sr} \sin \theta_r & L_r & 0 \\ -L_{sr} \sin \theta_r & L_{sr} \cos \theta_r & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \end{bmatrix}$$



Transformada de Park





Ecuaciones de Transformación

$$\begin{bmatrix} f_{ds} \\ f_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_{dr} \\ f_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{ar} \\ f_{br} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \theta - \theta_r$$



Nuevas Ecuaciones

$$v_{ds} = p\lambda_{ds} - p\theta\lambda_{qs} + r_s i_{ds}$$

$$v_{qs} = p\lambda_{qs} + p\theta\lambda_{ds} + r_s i_{qs}$$

$$v_{dr} = p\lambda_{dr} - p\beta\lambda_{qr} + r_r i_{dr}$$

$$v_{qr} = p\lambda_{qr} + p\beta\lambda_{dr} + r_r i_{qr}$$



Enlaces de Flujo

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr}$$

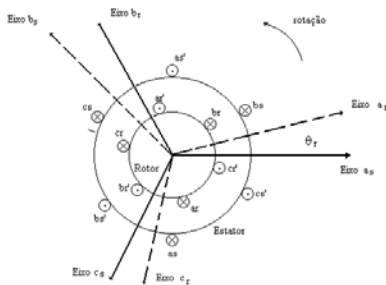
$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr}$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_{sr} i_{ds}$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_{sr} i_{qs}$$

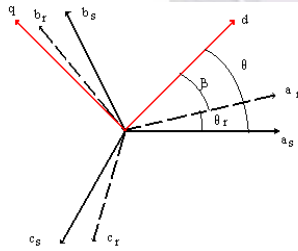


Motor Trifásico de Inducción





Motor Trifásico de Inducción





Distribución de Los Flujos

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{br} \\ \lambda_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & 0 & L_{sr} \cos \theta_r & L_{sr} \cos \theta_{r1} & L_{sr} \cos \theta_{r2} \\ 0 & L_{ss} & 0 & L_{sr} \cos \theta_{r2} & L_{sr} \cos \theta_r & L_{sr} \cos \theta_{r1} \\ 0 & 0 & L_{ss} & L_{sr} \cos \theta_{r1} & L_{sr} \cos \theta_{r2} & L_{sr} \cos \theta_r \\ L_{sr} \cos \theta_r & L_{sr} \cos \theta_{r2} & L_{sr} \cos \theta_{r1} & L_{rr} & 0 & 0 \\ L_{sr} \cos \theta_{r1} & L_{sr} \cos \theta_r & L_{sr} \cos \theta_{r2} & 0 & L_{rr} & 0 \\ L_{sr} \cos \theta_{r2} & L_{sr} \cos \theta_{r1} & L_{sr} \cos \theta_r & 0 & 0 & L_{rr} \end{bmatrix}$$

$$\theta_{r1} = \theta_r + \frac{2\pi}{3}$$

$$\theta_{r2} = \theta_r - \frac{2\pi}{3}$$

$$L_{ss} = L_s - L_{sm}$$

$$L_{rr} = L_r - L_{rm}$$



Ecuaciones de Transformación

$$\begin{bmatrix} f_{ds} \\ f_{qs} \\ f_{0s} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\text{sen} \theta & -\text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_{dr} \\ f_{qr} \\ f_{0r} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\text{sen} \beta & -\text{sen}\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{ar} \\ f_{br} \\ f_{cr} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \theta - \theta_r$$



Ecuaciones

$$v_{ds} = p\lambda_{ds} - p\theta\lambda_{qs} + r_s i_{ds}$$

$$v_{qs} = p\lambda_{qs} + p\theta\lambda_{ds} + r_s i_{qs}$$

$$v_{dr} = p\lambda_{dr} - p\beta\lambda_{qr} + r_r i_{dr}$$

$$v_{qr} = p\lambda_{qr} + p\beta\lambda_{dr} + r_r i_{qr}$$



Ecuaciones

$$\lambda_{ds} = L_{ss} i_{ds} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{dr}$$

$$\lambda_{qs} = L_{ss} i_{qs} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qr}$$

$$\lambda_{dr} = L_{rr} i_{dr} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{ds}$$

$$\lambda_{qr} = L_{rr} i_{qr} + \frac{3}{2} L_{sr} i_{qs}$$



Ecuaciones referidas al Estator

$$v_{ds} = p\lambda_{ds} - p\theta\lambda_{qs} + r_s i_{ds}$$

$$v_{qs} = p\lambda_{qs} + p\theta\lambda_{ds} + r_s i_{qs}$$

$$v'_{dr} = p\lambda'_{dr} - p\beta\lambda'_{qr} + r'_r i'_{dr}$$

$$v'_{qr} = p\lambda'_{qr} + p\beta\lambda'_{dr} + r'_r i'_{qr}$$



Ecuaciones referidas al Estator

$$\lambda_{ds} = L_{1s} i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr})$$

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr}$$

$$\lambda_{qs} = L_{1s} i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr})$$

$$M = \frac{3}{2} L_{ms}$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{1r} i'_{dr} + M(i_{ds} + i'_{dr})$$

$$L_{1s} = L_{ss} - M$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{1r} i'_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr})$$

$$L'_{1r} = L'_{rr} - M$$



Expresión del Torque

$$P = T * \omega$$

$$p_e = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs})$$

$$p_s = \frac{3}{2} (-p\beta\lambda_{qr} i_{dr} + p\beta\lambda_{dr} i_{qr})$$

$$\omega = -p\beta \frac{2}{P}$$

$$T_e = \left(\frac{n}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{qr} i'_{dr} - \lambda_{dr} i'_{qr})$$

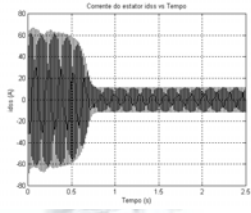


Ecuación Dinámica del Motor

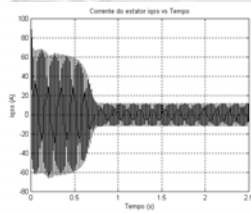
$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r$$



Corrientes del Estator



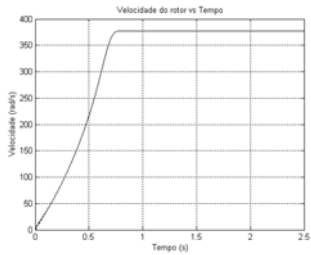
• i_{ds} vs Tiempo



• i_{qs} vs Tiempo



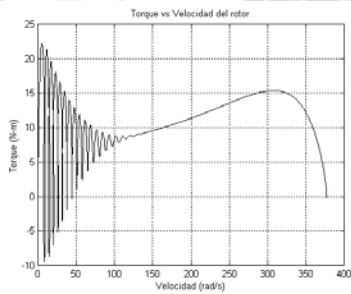
Velocidad del Motor



• Velocidad vs Tiempo



Torque del Motor



• Torque vs Tiempo



Circuito Equivalente del Motor de Inducción

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_{ss} + r_s & -\omega L_{ss} & pM & -\omega M \\ \omega L_{ss} & pL_{ss} + r_s & \omega M & pM \\ pM & -(\omega - \omega_r)M & pL'_{rr} + r'_r & -(\omega - \omega_r)L'_{rr} \\ (\omega - \omega_r)M & pM & (\omega - \omega_r)L'_{rr} & pL'_{rr} + r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{bmatrix}$$



Circuito Equivalente del Motor de Inducción

$$\lambda_{ds} = L_{1s} i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr})$$

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr}$$

$$\lambda_{qs} = L_{1s} i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr})$$

$$M = \frac{3}{2} L_{ms}$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{1r} i'_{dr} + M(i_{ds} + i'_{dr})$$

$$L_{1s} = L_{ss} - M$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{1r} i'_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr})$$

$$L'_{1r} = L'_{rr} - M$$



Circuito Equivalente del Motor de Inducción

$$v_{ds} + jv_{qs} = -p\theta \lambda_{qs} + r_s i_{ds} + j(p\theta \lambda_{ds} + r_s i_{qs})$$

$$p\theta = \omega$$

$$v_{ds} + jv_{qs} = \{-\omega[L_{1s} i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr})] + r_s i_{ds}\} + j\{\omega[L_{1s} i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr})] + r_s i_{qs}\}$$

$$v_{ds} + jv_{qs} = \{-\omega L_{1s} i_{qs} - \omega M(i_{qs} + i'_{qr}) + r_s i_{ds}\} + j\{\omega L_{1s} i_{ds} + \omega M(i_{ds} + i'_{dr}) + r_s i_{qs}\}$$

$$v_{ds} + jv_{qs} = r_s(i_{ds} + ji_{qs}) + j\omega L_{1s}(i_{ds} + ji_{qs}) + j\omega M(i_{ds} + ji_{qs}) + j\omega M(i'_{dr} + ji'_{qr})$$

$$\vec{V}_s = r_s \vec{I}_s + jX_{l1s} \vec{I}_s + jX_M (\vec{I}_s + \vec{I}'_r)$$



Circuito Equivalente del Motor de Inducción

$$v'_{dr} + jv'_{qr} = -p\beta\lambda'_{qr} + r'_r i'_{dr} + j(p\beta\lambda'_{dr} + r'_r i'_{qr})$$

$$v'_{dr} + jv'_{qr} = -\omega_\beta \lambda'_{qr} + r'_r i'_{dr} + j(\omega_\beta \lambda'_{dr} + r'_r i'_{qr})$$

$$\omega_\beta = \omega - \omega_r * \frac{\omega}{\omega}$$

$$\omega_\beta = \frac{\omega - \omega_r}{\omega} * \omega$$



Circuito Equivalente del Motor de Inducción

$$\omega_\beta = s\omega$$

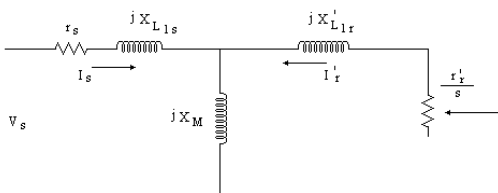
$$v'_{dr} + v'_{qr} = -s\omega [L'_{lr} i'_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr})] + r'_r i'_{dr} + j\{s\omega [L'_{lr} i'_{dr} + M(i_{ds} + i'_{dr})] + r'_r i'_{qr}\}$$

$$0 = \frac{r'_r}{s} (i'_{dr} + ji'_{qr}) + j\omega L'_{lr} (i'_{dr} + ji'_{qr}) + j\omega M (i'_{dr} + ji'_{qr}) + j\omega M (i_{ds} + ji_{qs})$$

$$0 = \frac{r'_r}{s} \vec{I}'_r + jX_{L1r} \vec{I}'_r + jX_M (\vec{I}_s + \vec{I}'_r)$$



Circuito Equivalente del Motor de Inducción



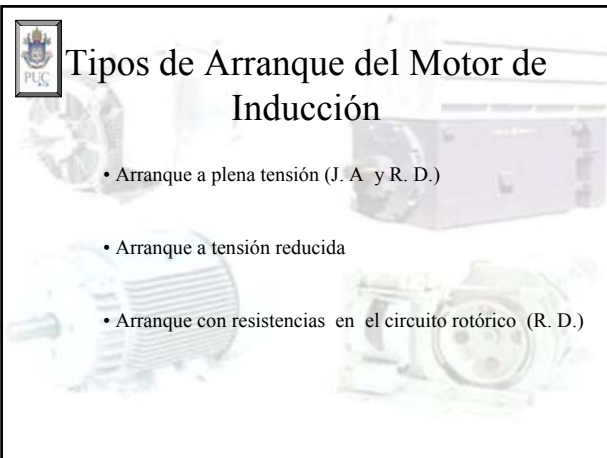


Arranque del Motor de Inducción



Consideraciones del Arranque

- Condiciones de la red de alimentación
- Consideraciones del Proceso
- Consideraciones del propio motor

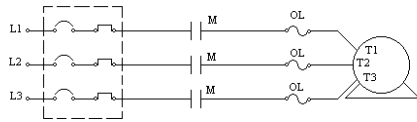


Tipos de Arranque del Motor de Inducción

- Arranque a plena tensión (J. A y R. D.)
- Arranque a tensión reducida
- Arranque con resistencias en el circuito rotórico (R. D.)



Arranque a Plena Tensión



- Corriente de Arranque $\approx 5-7 I_n$
- Torque de Arranque $\approx 1.5 - 3 T_n$

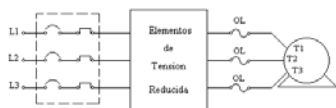


Arranque a Tensión Reducida

- Arranque con Resistencias
- Arranque con Reactancias
- Arranque con Auto transformadores
- Arranque Estrella – Triangulo
- Arrancador Suave



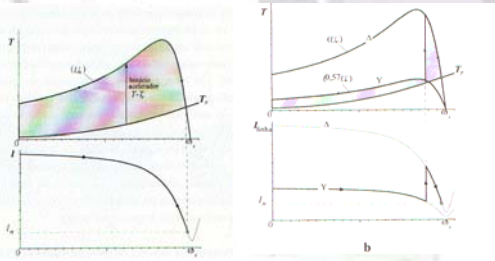
Arranque a Tensión Reducida



- Disminuye la corriente
- Disminuye el Torque
- $T \propto V^2$



Características del Torque y de la Corriente

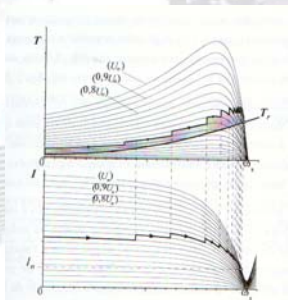


• Plena tensión

• Tensión Reducida

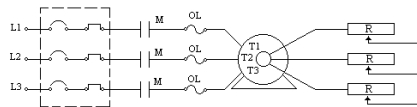


Arrancador Suave



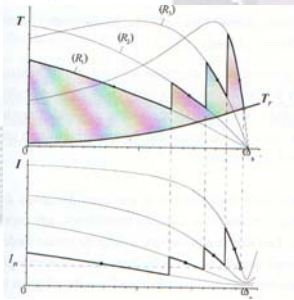


Arranque con Resistencias en el Circuito Rotórico



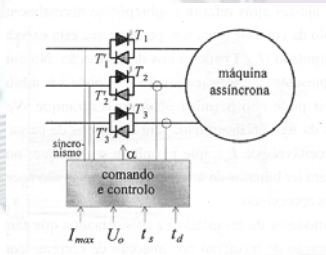


Arranque con Resistencias en el Circuito Rotórico





Arrancador Suave





Arrancador Suave

• Funciones

- Control de Corriente
- Rampa de Tensión Aplicada
- Control del Tiempo de Arranque
- Optimización del f.p.
- Optimización del rendimiento a bajas potencias
- Monitoramento
- Autodiagnóstico



Inconvenientes del Arrancador Suave

- Torques Parásitos
- Pérdidas Adicionales
- Calentamiento
- Vibraciones
- Ruido

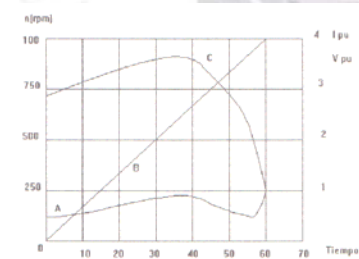


Ventajas del arrancador Suave

- Control de Corriente
- Control de Sobretensión
- Ahorro de Energía
- Protección térmica del motor
- Protección mecánica de la máquina
- Control en la fase de frenado

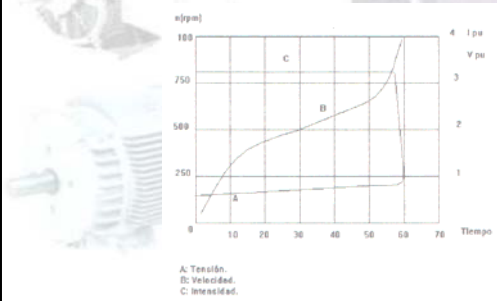


Arranque Suave con Aceleración Constante



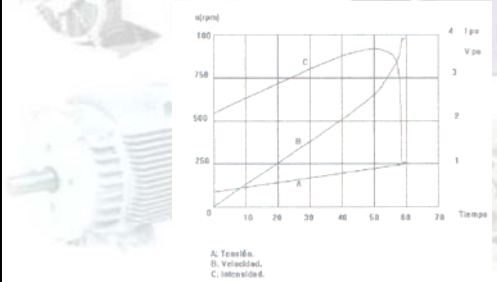


Arranque Suave con intensidad Constante





Arranque Suave con Rampa de Tensión

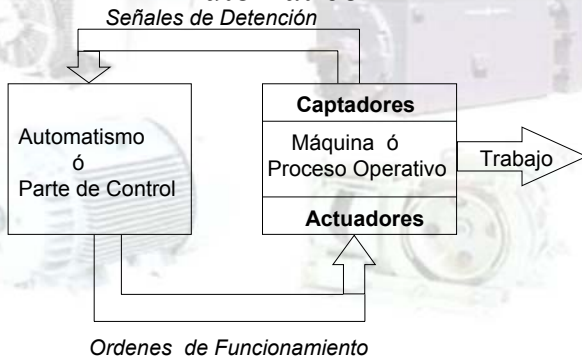




Autómatas Programables (PLC)



Principio de un Sistema Automático





Fases de Estudio en la Elaboración de un Automatismo

- 1.- Estudio Previo
- 2.- Estudio Técnico-económico
- 3.- Decisión Final



Opciones Tecnológicas

TIPO	FAMILIA TECNOLÓGICA	SUBFAMILIA ESPECÍFICA	
LÓGICA CABLEADA	ELÉCTRICA	Relé Electromagnético	
		Electroneumática	
		Electrohidráulica	
	ELECTRÓNICA	Electrónica Estática	
LÓGICA PROGRAMADA	ELECTRÓNICA	Sistemas Informáticos	Micordenadores
			Miniordenadores
		Microsistemas	
		Autómatas Programables	



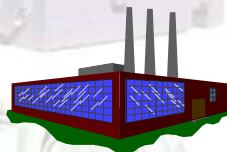
Definición de un PLC

Un Controlador Lógico Programable es una máquina electrónica, diseñada para controlar en tiempo real y en medio industrial procesos secuenciales. Su manejo y programación puede ser realizada por personal eléctrico ó electrónico sin conocimientos informáticos



Campos de Aplicación

- Maniobra de Máquinas.
- Maniobra de Instalaciones.
- Señalización y Control.





Ventajas del PLC

- 1.- Menor tiempo empleado en la elaboración de proyectos.
- 2.- Posibilidad de introducir cambios.
- 3.- Mínimo espacio de ocupación.
- 4.- Menor costo de mano de obra de instalación.



Ventajas del PLC

- 5.- Economía de Mantenimiento.
- 6.- Confiabilidad del Sistema.
- 7.- Posibilidad de gobernar varias máquinas.
- 8.- Menor tiempo para la puesta en funcionamiento



Estructura Modular

- 1.- Estructura Americana:
E/S separadas del resto del PLC.
- 2.- Estructura Europea:
Existe un módulo para cada función
(fuente de alimentación, E/S, CPU, etc).

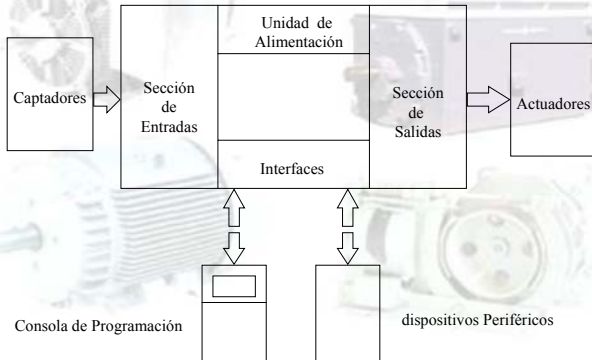


Estructura Interna

- 1.- La sección de entradas.
- 2.- La unidad central de procesos.
- 3.- La sección de salidas.
- 4.- La unidad de alimentación.
- 5.- La unidad de programación.
- 6.- Periféricos.
- 7.- Interfaces



Autómata Programable (PLC)





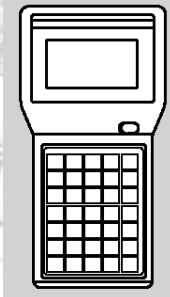
Memorias

- 1.- RAM: Memoria de lectura y escritura
- 2.- ROM: Memoria de lectura solamente



Tipo Calculadora

- Son los más utilizados por los Automatas programables de gama baja.
- Puede ser totalmente independiente.





Tipo Consola de Programación

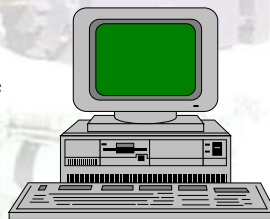
- Presenta una pantalla para 20 - 30 líneas y 60 -80 caracteres.





Unidad con PC

- Se adapta al Automata programable mediante un interfaz.
- Permite la visualización de esquemas ó diagramas





Tamaño de los PLC'S

- *Gama Baja: Hasta un máximo de 128 E/S*
- *Gama Media: De 128 a 512 E/S.*
- *Gama Alta: Más de 512 E/S*



Tipos de Entradas

- Analógicas
- Digitales



Tipos de Salida

- Salidas a Relés
- Salidas a Triacs
- Salidas a Transistores



Salidas a Rele

- Para circuitos de C.C. y C.A.
- Alta Corriente
- Conmutaciones Lentas (Contactores, electro válvulas)



Salidas a TRIACS

- Circuitos de C.C y C. A.
- Para conmutaciones Rápidas
- Su vida es más larga que la del relé
- Capacidad de Corriente semejante a la del relé



Salidas a Transistores

- Para circuitos de C.C.
- Cargas de poco consumo
- Rápida respuesta
- Alto número de operaciones
- Su vida es superior a la del relé.



Lenguajes de Programación

- Nemónico, Lista de Instrucciones, Booleano
- Diagrama de Contactos
- Graficet
- Organigrama ó Diagrama de Flujo



Nemónico

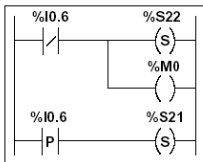
```

000 LDN  %I0.6
001 S    %S22
002 ST   %M0
003 LDR  %I0.6
004 S    %S21

```



Diagrama de Contactos



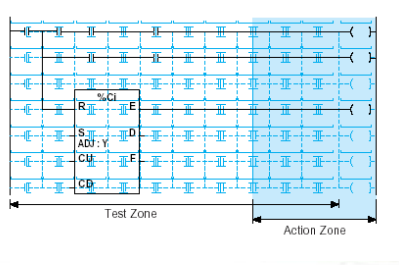
```

000 LDN  %I0.6
001 S    %S22
002 ST   %M0
003 LDR  %I0.6
004 S    %S21

```



Diagrama de Contactos



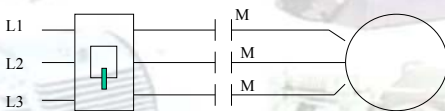


Ejemplo

- Arranque de un motor a plena tensión por medio de un PLC

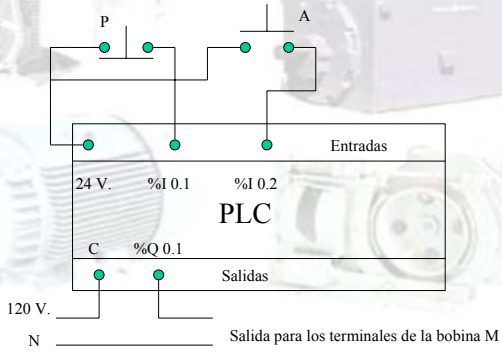


Circuito de Potencia





Circuito de Control





Control de la Velocidad del Motor de Inducción



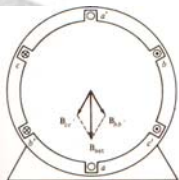
Definiciones

- Control de Velocidad: Es la variación de velocidad de un motor manteniendo siempre el torque constante

- Regulación de Velocidad: Es la capacidad que tiene el control de mantener la velocidad constante cuando suceden variaciones del torque



Velocidad del Campo Magnético Giratorio (CMG)



$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m$$

$$f_e = \frac{P}{2} f_m$$

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m$$

$$f_m = \frac{n_s}{60}$$

$$n_s = \frac{120 * f_e}{P} \text{ (rpm)}$$



Velocidad del Motor

$$n_r = n_s - n_d$$

$$n_r = \frac{120 * f_e}{P} - \frac{120 * f_d}{P}$$

$$n_r = \frac{120}{P} (f_e - f_d)$$

$$n_r = \frac{120}{P} (f_e - f_d) * \frac{f_e}{f_e}$$



Velocidad del Motor

$$f_d = f_e - f_r$$

$$n_r = \frac{120}{P} \left(\frac{f_e}{f_e} - \frac{f_e - f_r}{f_e} \right) f_e$$

$$n_r = \frac{120 f_e}{P} \left(1 - \frac{f_e - f_r}{f_e} \right)$$

$$n_r = n_s (1 - s)$$



Ecuación Básica de la Velocidad

$$n_r = \frac{120 f_e}{P} (1 - s)$$

- n_r = Velocidad del rotor
- P = número de polos
- s = Deslizamiento
- f_e = Frecuencia de la red de alimentación



Métodos del Control de Velocidad

- Variación de la Tensión de Alimentación
- Variación del Número de Polos
- Variación del Deslizamiento
- Variación de la Frecuencia de la red de Alimentación

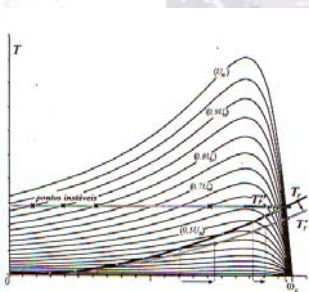


Variación de la Tensión de Alimentación

- Control relativamente continuo de velocidad
- $T \propto V^2$
- Motores con resistencia rotórica baja (normalmente), provocan variaciones grandes de velocidad
- Corrientes elevadas
- No es un método muy utilizado



Variación de la Tensión de Alimentación





Variación del Número de Polos

- Variación Discreta de la Velocidad
- Motor costoso
- Disminución del Torque
- Motor de bajo Rendimiento
- Aplicable a motores de Jaula de Ardilla

$$n_r = \begin{cases} n_s \neq \frac{n_p}{2} & 2 \text{ enrol. 2 veloc.} \\ n_s = \frac{n_p}{2} & 1 \text{ enrol. 2 veloc.} \\ \left. \begin{array}{l} n_{s1} = \frac{n_p}{2} \\ n_{s2} = \frac{n_p}{2} \end{array} \right\} & 2 \text{ enrol. 4 veloc.} \end{cases}$$

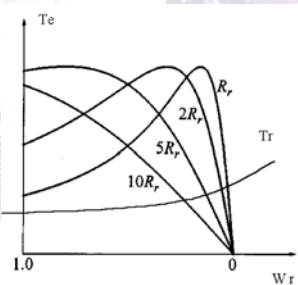


Variación de la Resistencia Rotórica

- Aplicable a motores de Rotor Devanado
- Control relativamente continuo de la velocidad
- Las resistencias de Arranque pueden servir para el control de velocidad
- Teóricamente 50% de velocidad
- Genera pérdidas

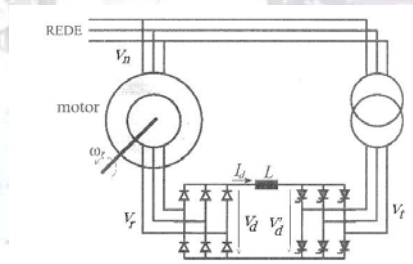


Variación de la Resistencia Rotórica





Hoy en día





Variación de la Frecuencia de la Red de Alimentación

- Mudar la frecuencia implica mudar el campo magnético giratorio
- Redes de Alimentación de corriente alterna con frecuencias normalizadas a 50 y 60 hz.
- Inicialmente un sistema de control muy costoso (máquinas adicionales)
- Poco utilizado hasta la década del ochenta

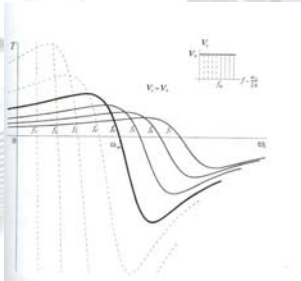


Variación de la Frecuencia de la Red de Alimentación

- Aparecimiento de la Electrónica de Potencia
- Posibilidad de producir Fuentes trifásicas de Tensión y de Frecuencia Variable.
- Comienza el desarrollo del motor de Inducción en el área de variación de la velocidad
- Comienza el control de lazo Cerrado (no aplicable al motor de Inducción de jaula de Ardilla).



Variación de la Frecuencia de la Red de Alimentación





Variación de la Frecuencia de la Red de Alimentación

- Como variar entonces la frecuencia de la red de alimentación????
- Condiciones para variar la frecuencia????
- Que sucede con el torque electromagnético?????
- El control es confiable????

CONVERTIDORES



Control de Velocidad

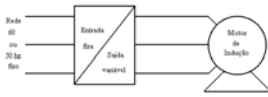
$$\omega_r = \omega_e(1-s) \left[\frac{rad}{s} \right]$$

$$\omega_r = \frac{4\pi f}{P}(1-s) \left[\frac{rad}{s} \right]$$



Convertidores de Frecuencia variable

- Ciclo convertidores



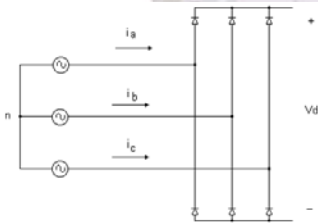
- Inversores





Partes de un Inversor

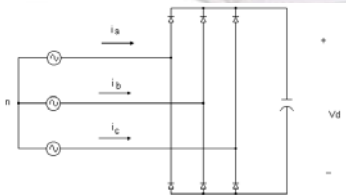
- Etapa Rectificadora





Partes de un Inversor

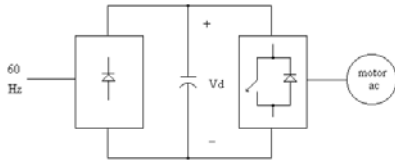
- Etapa de Filtraje





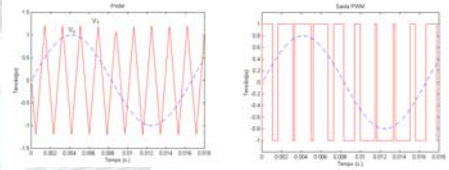
Partes de un Inversor

- Etapa Inversora





PWM



- V_c = señal de controle
- V_t = señal de disparo



Tipos de Inversores

- Inversor de fuente de tensión con modulación de amplitud de pulso con rectificador de diodo (PWM-VSI)
- Inversor de fuente de tensión de onda cuadrada con rectificador de tiristor (Square-wave VSI)
- Inversor fuente de corriente con rectificador de tiristores (CSI)



PWM

$$m_a = \frac{V_c}{V_t}$$

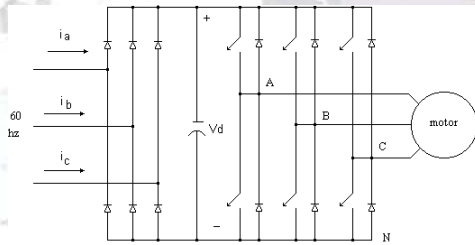
• Amplitud de Modulación

$$m_f = \frac{f_s}{f_e}$$

• Frecuencia de Modulación

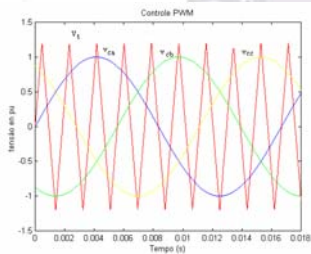


Inversor Trifásico PWM-VSI



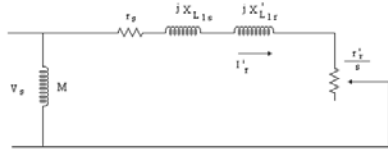


Inversor Trifásico PWM-VSI





Variación de la Velocidad





Variación de la Velocidad

$$T_c = \frac{3 V_s^2 r'_r}{s \omega_e \left[(r_s + r'_r)^2 + (X_{L1s} + X'_{L1r})^2 \right]}$$

$$T_{em} = \frac{3 V_s^2}{2 \omega_e \left\{ r_s + \left[r_s^2 + (X_{L1s} + X'_{L1r})^2 \right]^{1/2} \right\}}$$

$$s_m = \frac{r'_r}{\left[r_s^2 + (X_{L1s} + X'_{L1r})^2 \right]^{1/2}}$$



Relación Tensión / Frecuencia

$$v(t) = V_M \cos(\omega t)$$

$$v(t) = N \frac{d\lambda}{dt}$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i$$

$$\lambda = \frac{1}{N} \int V_M \cos(\omega t) dt$$

$$\lambda = \frac{V_M}{\omega N} \sin(\omega t)$$



Velocidad por encima de la Velocidad Base

$$\omega_{ek} = K\omega_b$$

$$s_{ek} = \frac{k\omega_b - \omega_r}{k\omega_b} = 1 - \frac{\omega_r}{k\omega_b}$$

$$T_r = \frac{3V_s^2 r'_r}{s k\omega_b [(r'_s + r'_r)^2 + (kX_{L1s} + kX'_{L1r})^2]}$$

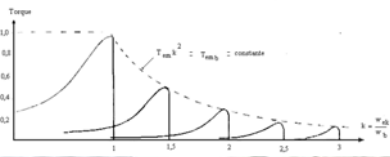
$$T_{embk} = \frac{3}{2\omega_b (X_{L1s} + X'_{L1r})} \left(\frac{V_s}{k}\right)^2$$

$$s_{mk} = \frac{r'_r}{k(X_{L1s} + X'_{L1r})^2}$$

$$T_{em} k^2 = T_{emb}$$



Velocidad por encima de la Velocidad Base



- Control de Debilitamiento de Campo



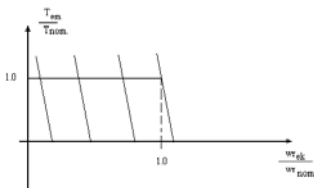
Velocidad por debajo de la Velocidad Base

- Hay que realizar control V/f

$$d = \frac{V}{\omega_b}$$

$$V_{sek} = d\omega_{ek} = d(k\omega_b)$$

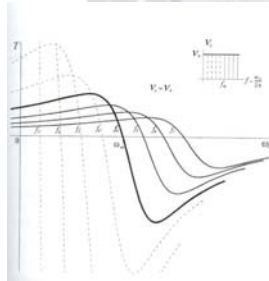
$$\therefore \omega_{ek} = k\omega_b \quad k < 1$$





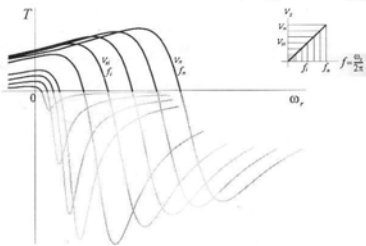
Característica del Torque vs Velocidad

• Sin tomar en cuenta la saturación



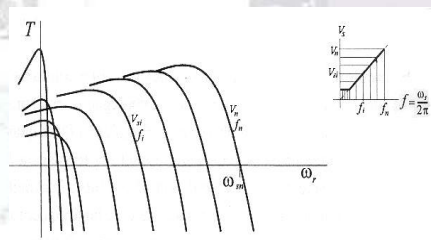


Característica del Torque vs Velocidad



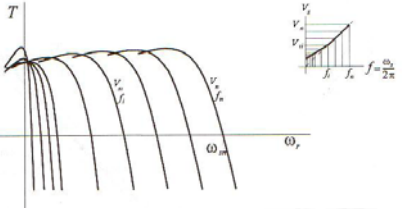


Característica del Torque vs Velocidad





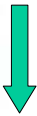
Característica del Torque vs Velocidad





Control Vectorial

- Que hacer para mejorar o desempeño del Control?????????



Control Vectorial



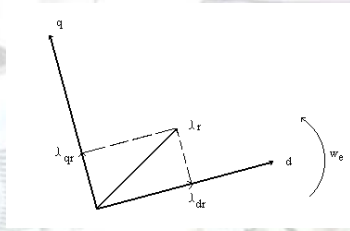
Control Vectorial

- También llamado Control de Orientación del Campo (FOC)
- El eje de referencia se sitúa fijo a un vector de flujo
- O vector más utilizado, es el vector de flujo del rotor
- Pretende simular el motor de inducción como un motor de corriente continua, donde la corriente de campo y la corriente de torque estén ortogonales

$$\bullet T = k \phi I$$



Control Vectorial



$$\vec{\lambda}_r = \lambda_{dr} + j\lambda'_{qr}$$



Control Vectorial

$$\lambda_{ds} = L_{1s}i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr})$$

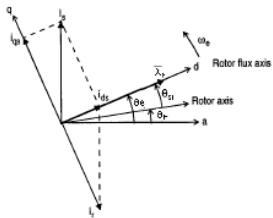
$$\lambda_{qs} = L_{1s}i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr})$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{1r}i'_{dr} + M(i_{ds} + i'_{dr})$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{1r}i'_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr})$$



Control Vectorial



$$\vec{\lambda}_r = \lambda_{dr}$$

$$\therefore i'_{dr} = 0$$

$$\lambda'_{dr} = Mi_{ds}$$

$$\lambda'_{qr} = 0$$



Control Vectorial

$$\lambda'_{dr} = M i_{ds} = \bar{\lambda}_r$$

$$i_{ds} = \frac{\lambda'_{dr}}{M} = \frac{\bar{\lambda}_r}{M}$$

$$0 = L'_{lr} i'_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr})$$

$$i'_{qr} = -\left(\frac{M}{L'_{lr} + M}\right) i_{qs} \quad \therefore L'_{lr} = L'_{rr} - M$$

$$i'_{qr} = -\left(\frac{M}{L'_{rr}}\right) i_{qs}$$



Control Vectorial

$$T_e = \left(\frac{n}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) [\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}] \quad \therefore \lambda'_{qr} = 0$$

$$T_e = \left(\frac{n}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) [-\lambda'_{dr} i'_{qr}] \quad \therefore i'_{qr} = -\left(\frac{M}{L'_{rr}}\right) i_{qs}$$

$$T_e = \left(\frac{n}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{M}{L'_{rr}}\right) [\lambda'_{dr} i_{qs}] \quad \therefore \lambda'_{dr} = \bar{\lambda}_r$$

$$T_e = \left(\frac{n}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{M}{L'_{rr}}\right) [\bar{\lambda}_r i_{qs}]$$

$$T_e = K \lambda I$$



Control Vectorial

$$i_{ds} = \frac{\lambda'_{dr}}{M} = \frac{\bar{\lambda}_r}{M}$$

$$i'_{qr} = -\left(\frac{M}{L'_{rr}}\right) i_{qs}$$

$$T_e = \left(\frac{n}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{M}{L'_{rr}}\right) [\bar{\lambda}_r i_{qs}]$$

- Todo el método esta basado en la posición correcta de los ejes con el flujo



Control Vectorial

$$\dot{\theta}_e = \omega_e = \omega_r + \omega_{sl}$$

ω_r = Velocidad del rotor

ω_{sl} = Velocidad del rotor

• Como determinar ω_{sl} ?????



Control Vectorial

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_{ss} + r_s & -\omega L_{ss} & pM & -\omega M \\ \omega L_{ss} & pL_{ss} + r_s & \omega M & pM \\ pM & -(\omega - \omega_r)M & pL'_{rr} + r'_r & -(\omega - \omega_r)L'_{rr} \\ (\omega - \omega_r)M & pM & (\omega - \omega_r)L'_{rr} & pL'_{rr} + r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{bmatrix}$$



Control Vectorial

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_{ss} + r_s & -\omega_e L_{ss} & pM & -\omega_e M \\ \omega_e L_{ss} & pL_{ss} + r_s & \omega_e M & pM \\ pM & -\omega_{sl} M & pL'_{rr} + r'_r & -\omega_{sl} L'_{rr} \\ \omega_{sl} M & pM & \omega_{sl} L'_{rr} & pL'_{rr} + r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{bmatrix}$$

$$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r$$



Control Vectorial

$$0 = \omega_{sl} M i_{ds} + pM i_{qs} + [p(L'_{lr} + M) + r' r] i'_{qr}$$

$$i_{dr} = 0 \quad i_{qr} = -\frac{M}{L'_{rr}} i_{qs}$$

$$0 = \omega_{sl} M i_{ds} + pM i_{qs} + [pL'_{rr} + r' r] \left[-\frac{M}{L'_{rr}} i_{qs} \right]$$

$$\omega_{sl} = \frac{r' r}{L'_{rr}} i_{qs}$$

$$\omega_{sl} = \frac{M r' r}{L'_{rr} |\lambda_r|} i_{qs}$$



Control Vectorial

$$i_{ds} = \frac{\lambda'_{dr}}{M} = \frac{\bar{\lambda}_r}{M}$$

$$i'_{qr} = -\left(\frac{M}{L'_{rr}}\right) i_{qs}$$

$$\omega_{sl} = \frac{M r' r}{L'_{rr} |\lambda_r|} i_{qs}$$

$$T_e = \left(\frac{n}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{M}{L'_{rr}}\right) [\bar{\lambda}_r i_{qs}]$$



Control Vectorial

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} =
 \begin{bmatrix} pL_{\alpha} + r_s & -\omega L_{\alpha} & \frac{pM}{L'_{rr}} & \frac{\omega M}{L'_{rr}} \\ \omega L_{\alpha} & pL_{\alpha} + r_s & \frac{\omega M}{L'_{rr}} & \frac{pM}{L'_{rr}} \\ \frac{r' r M}{L'_{rr}} & 0 & \frac{pL'_{rr} + r' r}{L'_{rr}} & -\omega_{sl} \\ 0 & \frac{r' r M}{L'_{rr}} & \omega_{sl} & \frac{pL'_{rr} + r' r}{L'_{rr}} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{qr} \end{bmatrix}$$

$$L_{\alpha} = \frac{L_{ss} L'_{rr} - M^2}{L'_{rr}}$$



Control Vectorial

- Como determinar la posición exacta del flujo????
- Métodos Directos : Blaschke propuso un método, pero implicaba modificar la máquina con la colocación de sensores de flujo de efecto Hall en el entrehierro de La máquina
- Observadores de Flujo: Control Indirecto de Flujo



Control Indirecto del Flujo

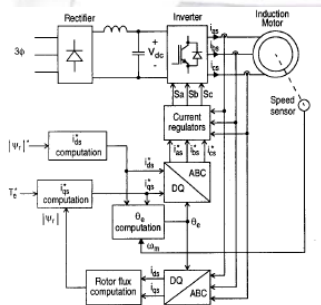
$$i_{qs}^* = \left(\frac{2}{n} \right) \left(\frac{2}{P} \right) \left(\frac{L'_{rr}}{M} \right) \frac{T_e^*}{|\lambda_r|_{est.}}$$

$$|\lambda_r|_{est.} = \left(\frac{r'_r M}{pL'_{rr} + r'_r} \right) i_{ds} \quad i_{ds} = \frac{|\lambda_r|^*}{M}$$

$$\theta_e = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt \quad \omega_{sl} = \frac{M}{|\lambda_r|_{est.}} \frac{r'_r}{L'_{rr}} i_{qs}^*$$



Control Indirecto del Flujo





Control de Torque Directo



Control de Torque Directo

- El control de Torque Directo no reproduce el comportamiento electromecánico del motor DC
- Procura explorar las capacidades del torque y del flujo del motor



Control de Torque Directo

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_{ss} + r_s & -\omega L_{ss} & pM & -\omega M \\ \omega L_{ss} & pL_{ss} + r_s & \omega M & pM \\ pM & -(\omega - \omega_r)M & pL'_{rr} + r'_r & -(\omega - \omega_r)L'_{rr} \\ (\omega - \omega_r)M & pM & (\omega - \omega_r)L'_{rr} & pL'_{rr} + r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{bmatrix}$$



Enlaces de Flujo

$$\lambda_{ds} = L_{1s} i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr})$$

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr}$$

$$\lambda_{qs} = L_{1s} i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr})$$

$$M = \frac{3}{2} L_{ms}$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{1r} i'_{dr} + M(i_{ds} + i'_{dr})$$

$$L_{1s} = L_{ss} - M$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{1r} i'_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr})$$

$$L'_{1r} = L'_{rr} - M$$



Enlaces de Flujo

$$\lambda_{ds} = L_{1s} i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr})$$

$$\lambda_{qs} = L_{1s} i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr})$$

$$\lambda_{ds} + j\lambda_{qs} = \vec{\lambda}_s = L_{1s} i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr}) + j[L_{1s} i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr})]$$

$$\vec{\lambda}_s = L_{ss}(i_{ds} + ji_{qs}) + M(i'_{dr} + ji'_{qr})$$

$$\vec{\lambda}_s = L_{ss} \vec{i}_s + M \vec{i}'_r$$



Ecuación del Motor para ejes de referencia en el Estator ($\omega=0$)

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_{ss} + r_s & 0 & pM & 0 \\ 0 & pL_{ss} + r_s & 0 & pM \\ pM & \omega_r M & pL'_{rr} + r'_r & \omega_r L'_{rr} \\ -\omega_r M & pM & -\omega_r L'_{rr} & pL'_{rr} + r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{bmatrix}$$



Ecuación del Motor para ejes de referencia en el Estator ($\omega=0$)

$$v_{ds} + jv_{qs} = \vec{v}_s = r_s \vec{i}_s + pL_{ss} \vec{i}_s + pM \vec{i}_r$$

$$\vec{\lambda}_s = L_{ss} \vec{i}_s + M \vec{i}_r$$

$$\vec{v}_s = r_s \vec{i}_s + p \vec{\lambda}_s$$



Expresión del Torque

$$P = T * \omega$$

$$p_e = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs})$$

$$p_s = \frac{3}{2} (-p\beta \lambda_{qr} i_{dr} + p\beta \lambda_{dr} i_{qr})$$

$$\omega = -p\beta \frac{2}{P}$$

$$T_e = \left(\frac{n}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) (\lambda_{qr} i'_{dr} - \lambda_{dr} i'_{qr})$$



Expresión del Torque

$$T_e = \left(\frac{n}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) (\lambda_{qr} i'_{dr} - \lambda_{dr} i'_{qr})$$

$$T_e = \left(\frac{n}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{M}{L_{rr}} \right) \vec{i}_s \bullet j \vec{\lambda}_r$$

$$T_e = \left(\frac{n}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \vec{i}_s \bullet j \vec{\lambda}_s$$

$$T_e = - \left(\frac{n}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \vec{i}_r \bullet j \vec{\lambda}_r$$



Principio del DTC

$$\vec{v}_s \cong p\vec{\lambda}_s \quad r_s = 0$$

$$\Delta\vec{\lambda}_s \cong \vec{v}_s \Delta t$$

- El vector de tensión aplicado produce una variación del flujo del estator en la misma dirección del vector de tensión y una amplitud proporcional al valor de la tensión y al intervalo de tiempo.



Principio del DTC

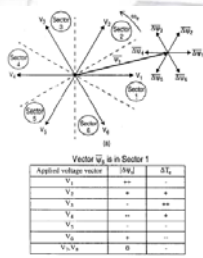


Fig. 4. Direct torque control principle
 (a) Variation of stator flux ($\Delta\psi_s$) in Sector I)
 (b) Influence of stator voltage space vectors on flux and torque



Principio del DTC

$$T_e = \left(\frac{n}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{qr} i'_{dr} - \lambda_{dr} i'_{qr})$$

$$T_e = - \left(\frac{n}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{M}{\sigma L_{ss} L_{rr}}\right) \vec{\lambda}_s \bullet j\vec{\lambda}_r$$

- El torque es proporcional al producto escalar entre los flujos del estator y del rotor, desfasados 90° grados.

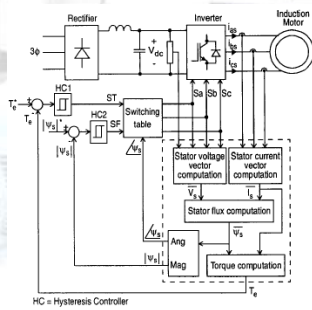


Principio del DTC

- La única cantidad a ser controlada por el inversor es el vector de tensión del estator.
- El vector de tensión comanda prácticamente la variación del vector de campo del estator.
- Cualquier variación del vector de campo del estator lleva a una variación del torque debido a la variación de la amplitud y de la fase entre los vectores de flujo de estator y del rotor.



Principio del DTC





Medición de la Velocidad del Motor de Inducción



Ecuación Básica de la Velocidad

$$n_r = \frac{120f_e}{P}(1-s)$$

- n_r = Velocidad del rotor
- P = número de polos
- s = Deslizamiento
- f_e = Frecuencia de la red de alimentación

Métodos Directos

• Dínamos Tacométricos: Generadores de corriente continua con excitación fija por medio de magnetos permanentes

f.e.m. \propto velocidad

$$e = k \phi n$$

- 10 V / 1000 rpm
- 100 V / 1000 rpm
- Problemas

{ Efecto de carga
 Desmagnetización a largo plazo
 Degradación de escobas y colector

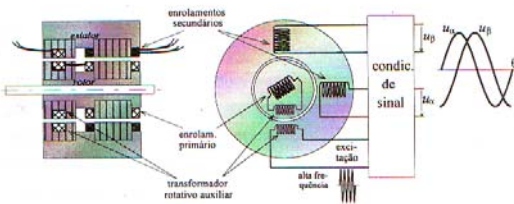


Métodos Directos

- Resolver: Funcionamiento basado en el efecto de transformador con relación de transformación variable con la posición
- Primario en el rotor alimentado por otro transformador de relación fija
- Dos secundarios en cuadratura colocados en el estator



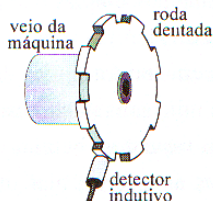
Resolver





Métodos Directos

- Sensores inductivos de proximidad





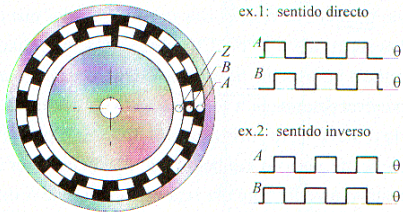
Métodos Directos

• Transductores de Lectura óptica

- Encoder Incremental
- Encoder Absoluto

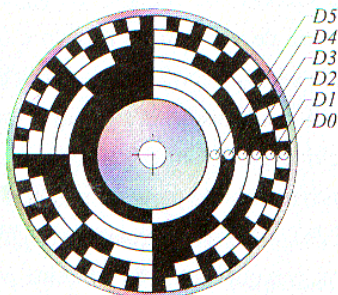


Encoder Incremental





Encoder Absoluto





Método Convencional de Detección de Velocidad

$$N_f = \frac{60X}{2\pi T_d} = \frac{60X}{2\pi(T_c + \Delta T)}$$

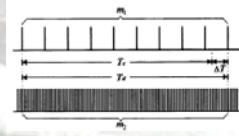
$$X = \frac{2\pi m_1}{P}$$

$$T_d = \frac{m_2}{f_c}$$

$$N_f = \frac{60 f_c m_1}{P m_2}$$

• N_f = velocidad rpm

• X = desplazamiento angular (rad)



- P = pulso del generador (p/r)
- m_1 = pulsos de salida
- m_2 = pulso digitalizados



Problemas del Método Convencional

• La velocidad estimada es un valor promedio

• El valor límite de frecuencia del Transdutor

• Desempeño pobre en baja velocidad

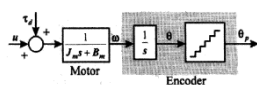
Speed Range	Encoder Pulse	Detection Lag (Max.)
Ordinary Speed		$\frac{T_s}{2} + t_s$
Very Low Speed		$\frac{3}{2} T_s + T_d$



Solución

• Modelar el Sistema Mecánico

$$J_m \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega = u + \tau_d$$



• Utilizar un estimador de velocidad y disturbio de torque (asumido como una variable de estado aumentada)

- u = Torque de operación
- τ_d = Disturbio del torque
- B_m = Viscosidad



Métodos Indirectos

- Observadores de estado
 - Sistemas MRAS
 - Filtros de Kalman
 - Inteligencia Artificial
- Algoritmos Genéticos
 - Redes neurales
 - Lógica Fuzzy



Sistemas MRAS

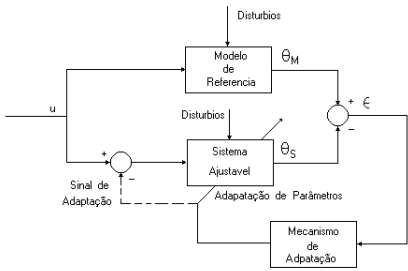


Sistemas de Modelo Referencial Adaptativo

“Un sistema adaptativo determina un índice de desempeño (IP) usando las entradas, los estados y las salidas de un sistema ajustable. De la comparación de las medidas de índice de desempeño y un conjunto de datos, el mecanismo de adaptación modifica los parámetros del sistema ajustable o genera una salida auxiliar para mantener el índice de desempeño dentro del conjunto de datos”.



Configuración Básica del MRAS





Modelo Referencial y Sistema Adaptativo

Modelo Referencial:

$$\dot{x} = A_M x + B_M u$$

$$\dot{\theta} = Cx$$

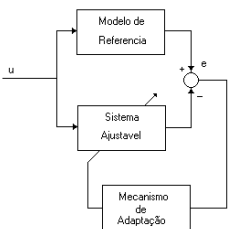
Sistema Adaptativo:

$$\dot{y} = A_p(t) + B_p(t)$$

$$\bar{\theta} = Cy$$



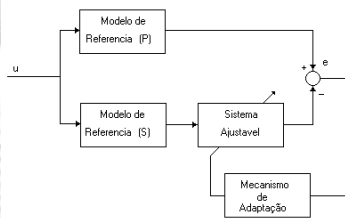
Estructura del MRAS



MRAS PARALELO



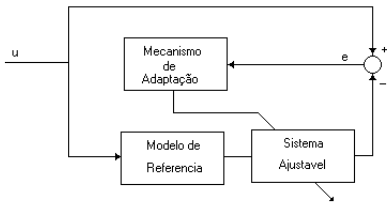
Estructura del MRAS



MRAS SERIE PARALELO



Estructura del MRAS



MRAS SERIE



Índice de Desempeño

- Minimización del error generalizado ϵ (o la norma de ϵ y sus derivadas)
- Minimización de la distancia de estado
- Minimización de la distancia estructura



Diseño de los MRAS

- Método basado en la teoría de optimización de parámetros locales
- Métodos basados en la teoría de estabilidad
- Método del gradiente y mínimos cuadrados basados en el criterio de costo de estimación del error.



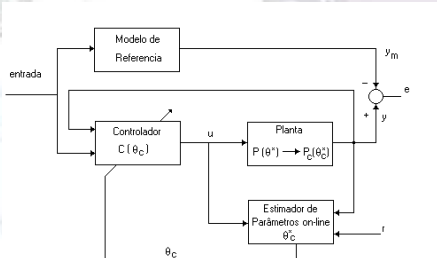
Método Basado en la Teoría de Optimización de Parámetros Método de Sensitividad

- Método más antiguo
- Usado para diseñar la ley adaptativa tal que los parámetros son ajustados en la dirección de minimizar una función de desempeño dada.

$$\frac{\partial y}{\partial \theta_{Ci}}, i = 1, 2, \dots, n = \text{Funciones de sensibilidad}$$



Método Basado en la Teoría de Optimización de Parámetros Método de Sensitividad





Método Basado en la Teoría de Optimización de Parámetros Método de Sensitividad

$$e \equiv y - y_m$$

$$y = y(\theta_c)$$

$$e = e(\theta_c)$$



Método Basado en la Teoría de Optimización de Parámetros Método de Sensitividad

$$J(\theta_c) = \frac{e^2(\theta_c)}{2}$$

$$\dot{\theta}_c = -\gamma \nabla J(\theta_c) = -\gamma e \nabla e(\theta_c)$$

onde :

$$\nabla e(\theta_c) \equiv \left[\frac{\partial e}{\partial \theta_{c1}}, \frac{\partial e}{\partial \theta_{c2}}, \dots, \frac{\partial e}{\partial \theta_{cn}} \right]^T$$

$$\nabla e(\theta_c) = \nabla y(\theta_c)$$

$$\dot{\theta}_c = -\gamma e \nabla y(\theta_c)$$



Métodos Basados en La Teoría de Estabilidad

- Segundo método de Liapanov:
- Consiste en la determinación de una función ficticia llamada función de Liapanov
- $V(x,t)$
- $V'(x,t)$



Método del Gradiente y Mínimos Cuadrados Basados en el Criterio de Estimación del Error

- La principal desventaja de los métodos de sensibilidad usados en los años 60 es que la minimización de la función costo desempeño de las funciones de sensibilidad no eran implementables
- Una forma para evitar esta desventaja es escoger un criterio de la función de costo que lleve a las funciones de sensibilidad a ser encontradas a través de mediciones.



MRAS

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_{ss} + r_s & 0 & pM & 0 \\ 0 & pL_{ss} + r_s & 0 & pM \\ pM & \omega_r M & pL_{rr} + r'_r & \omega_r L_{rr} \\ -\omega_r M & pM & -\omega_r L_{rr} & pL_{rr} + r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{bmatrix}$$

$$I_m = I_s + \left(\frac{L_{rr}}{M} \right) I'_r$$

$$\therefore I_s = [i_{ds}, i_{qs}]^T \quad I'_r = [i'_{dr}, i'_{qr}]^T \quad I_m = [i_{dm}, i_{qm}]^T$$



MRAS

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_{ss} + r_s & 0 & p \frac{M^2}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & pL_{ss} + r_s & 0 & p \frac{M^2}{L_{rr}} \\ -\frac{r'_r M}{L_{rr}} & 0 & pM + \frac{r'_r M}{L_{rr}} & \omega_r M \\ 0 & -\frac{r'_r M}{L_{rr}} & \omega_r M & pM + \frac{r'_r M}{L_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i'_{dm} \\ i'_{qm} \end{bmatrix}$$



MRAS

$$v_s = r_s i_s + L_\alpha p i_s + e_m$$

$$\therefore v_s = [v_{ds}, v_{qs}]^T$$

$$e_m = \frac{M^2}{L_{rr}} p i_m$$

$$p i_m = \omega_r i_m - \frac{r'_r}{L_{rr}} i_m + \frac{r'_r}{L_{rr}} i_s \quad (B)$$

$$\begin{bmatrix} e_{dm} \\ e_{qm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_\alpha & 0 \\ 0 & L_\alpha \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (A)$$



MRAS

$$e_m = \frac{M^2}{L_{rr}} p i_m$$

$$\begin{bmatrix} e_{dm} \\ e_{qm} \end{bmatrix} = \frac{M^2}{L_{rr}} \left\{ \begin{bmatrix} \omega_r & 0 \\ 0 & \omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dm} \\ i_{qm} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{r'_r}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & \frac{r'_r}{L_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dm} \\ i_{qm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r'_r}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & \frac{r'_r}{L_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \right\}$$

(C)



MRAS

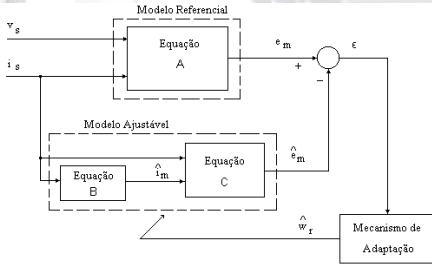
$$\begin{bmatrix} e_{dm} \\ e_{qm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_\alpha & 0 \\ 0 & L_\alpha \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix}$$

$$p i_m = \omega_r i_m - \frac{r'_r}{L_{rr}} i_m + \frac{r'_r}{L_{rr}} i_s$$

$$\begin{bmatrix} e_{dm} \\ e_{qm} \end{bmatrix} = \frac{M^2}{L_{rr}} \left\{ \begin{bmatrix} \omega_r & 0 \\ 0 & \omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dm} \\ i_{qm} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{r'_r}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & \frac{r'_r}{L_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dm} \\ i_{qm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r'_r}{L_{rr}} & 0 \\ 0 & \frac{r'_r}{L_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \right\}$$

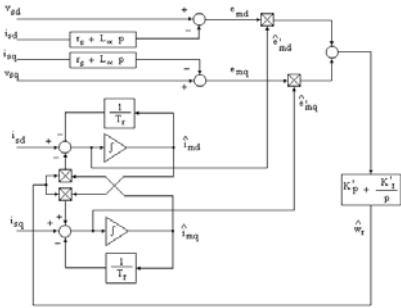


MRAS



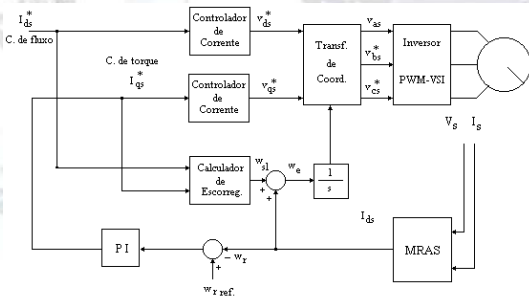


MRAS





MRAS





Filtro de Kalman



Filtro de Kalman

- Formulación matemática en términos de concepto de Espacio de estado
- Su solución es computada Recursivamente
- Pertenece a la familia de Filtros Recursivos de Mínimos Cuadrados



Filtro de Kalman (Innovación)

- Sea el error de predicción forward

$$f_{n-1}(n) = y(n) - \hat{y}(n|Y_{n-1}), n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\alpha(n) = f_{n-1}(n) = \text{innovación}$$

- $\alpha(n)$ es ortogonal a todas las observaciones pasadas y puede ser mantenida como una medida de la nueva información



Propiedades de $\alpha(n)$

- 1.- $E[\alpha(n)y^*(k)] = 0, \quad 1 \leq k \leq n-1$
- 2.- $E[\alpha(n)\alpha^*(k)] = 0, \quad 1 \leq k \leq n-1$
- 3.- $\{y(1), y(2), \dots, y(n)\} \Leftrightarrow \{\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(n)\}$



Propiedades de $\alpha(n)$

$$\alpha(1) = y(1)$$

$$\alpha(2) = y(2) + a_{1,1}y(1) \Rightarrow a_{1,1} \begin{cases} E[\alpha(2)\alpha^*(1)] = 0 \\ a_{1,1} = -\frac{E[y(2)y^*(1)]}{E[y(1)y^*(1)]} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha(1) \\ \alpha(1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \alpha(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ a_{1,1} & 1 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n-1,n-1} & a_{n-1,n-2} & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(1) \\ y(1) \\ \cdot \\ \cdot \\ y(n) \end{bmatrix}$$



Mínimo Medio Cuadrático Estimado $\hat{x}(n|Y_n)$

$$\hat{x}(n|Y_n) = \text{estimado}_{LMS} x(n) \begin{cases} \text{dado: } y(1), y(2), \dots, y(n) \\ \text{ou: } \alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(n) \end{cases}$$

$$\hat{x}(n|Y_n) = \sum_{k=1}^n b_k \alpha(k)$$

$$b_k = \frac{E[x(n)\alpha^*(k)]}{E[\alpha(k)\alpha^*(k)]}, \quad 1 \leq k \leq n$$



Mínimo Medio Cuadrático

Estimado $\hat{x}(n|Y_n)$

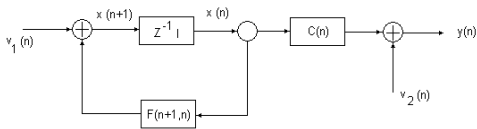
$$\hat{x}(n|Y_n) = \sum_{k=1}^{n-1} b_k \alpha(k) + b_n \alpha(n)$$

$$b_n = \frac{E[x(n)\alpha^*(n)]}{E[\alpha(n)\alpha^*(n)]}$$

$$\hat{x}(n|Y_n) = \hat{x}(n-1|Y_{n-1}) + b_n \alpha(n)$$



El Problema del Filtro de Kalman





Ecuaciones

- Ecuación del proceso:

$$x(n+1) = F(n+1, n)x(n) + v_1(n)$$

$$E[v_1(n)v_1^H(k)] = \begin{cases} Q_1(n) & n = k \\ 0 & n \neq k \end{cases}$$



Ecuaciones

- Ecuación de Medición

$$y(n) = C(n)x(n) + v_2(n)$$

$$E[v_2(n)v_2^H(k)] = \begin{cases} Q_2(n) & n = k \\ 0 & n \neq k \end{cases}$$



Ecuaciones

- $v_1(n)$ y $v_2(n)$ son estadísticamente independientes

$$E[v_1(n)v_2^H(n)] = 0 \quad \forall n \in k$$



Formulación del Problema

Con la data observada
 $y(1), y(2), \dots, y(n)$



Encontrar para $n \geq 1$, el
 estimado mínimo medio
 cuadrático de $x(i)$

- $i = n$ Filtraje
- $i > n$ Predicción
- $1 \leq i \leq n$ Alisamiento



Innovación $\alpha(n)$

- De la expresión de Medición, tenemos:

$$\hat{y}(n|Y_{n-1}) = C(n)\hat{x}(n|Y_{n-1}) + \hat{v}_2(n|Y_{n-1})$$

$$\hat{y}(n|Y_{n-1}) = C(n)\hat{x}(n|Y_{n-1})$$

$$\alpha(n) = y(n) - C(n)\hat{x}(n|Y_{n-1})$$



Innovación $\alpha(n)$

- De la ecuación de medición

$$\alpha(n) = C(n)\epsilon(n, n-1) + v_2(n)$$

$$\epsilon(n, n-1) = x(n) - \hat{x}(n|Y_{n-1})$$



Matriz de Correlación del Proceso de Innovación $\alpha(n)$: $R(n)$

$$R(n) = E[\alpha(n)\alpha^H(n)]$$

$$R(n) = C(n)K(n, n-1)C^H(n) + Q_2(n)$$

$$K(n, n-1) = E[\epsilon(n, n-1)\epsilon^H(n, n-1)]$$

- $K(n, n-1)$: Matriz de Correlación del error del estado previsto
- $\epsilon(n, n-1)$: vector de error de estado previsto



Ganancia de Kalman: $G(n)$

$$G(n) = F(n+1, n)K(n, n-1)C^H(n)R^{-1}(n)$$

- La matriz $K(n, n-1)$ debe ser conocida para computar la Ganancia de Kalman



- Ecuación Diferencia de Riccati



Ecuación Diferencia de Riccati

$$K(n) = K(n, n-1) - F(n, n+1)G(n)C(n)K(n, n-1)$$

$$K(n+1, n) = F(n+1)K(n)F^H(n+1, n) + Q_1(n)$$

$$F(n+1, n)F(n, n+1) = I$$



Resumen

Variável	Definição	Dimensão
$x(n)$	Vetor de estado no tempo n	$M \times 1$
$y(n)$	Vetor de observação no tempo n	$N \times 1$
$F(n+1, n)$	Matriz de Transição de estado do tempo n para $n+1$	$M \times M$
$C(n)$	Matriz de Medição no tempo n	$N \times M$
$Q_1(n)$	Matriz de correlação do ruído do processo, do vetor $v_1(n)$	$M \times M$
$Q_2(n)$	Matriz de correlação do ruído da medição, do vetor $v_2(n)$	$N \times N$
$\hat{x}(n+1 Y_n)$	Vetor de estado estimado previsto no tempo n , dada os vetores de observação	$M \times 1$
$G(n)$	Ganho de Kalman no tempo n	$M \times N$
$\alpha(n)$	Vetor de inovação no tempo n	$N \times 1$
$R(n)$	Matriz de Correlação do vetor de inovação $\alpha(n)$	$N \times N$
$K(n)$	Matriz de Correlação do erro $\hat{x}(n Y_n)$	$M \times M$
$K(n+1, n)$	Matriz de Correlação do erro $\hat{x}(n+1 Y_n)$	$M \times M$



Resumen

- Vector de entrada del Proceso

Observaciones: $\{y(1), y(2), \dots, y(n)\}$

- Parámetros Conocidos:

Matriz de Transición de Estado = $F(n+1, n)$

Matriz de Medición = $C(n)$

Matriz de Correlación do ruido de proceso = $Q_1(n)$

Matriz de Correlación do ruido de medición = $Q_2(n)$



Resumen

- Computación: $n=1, 2, 3, \dots$

$$G(n) = F(n+1, n)K(n, n-1)C^H(n)[C(n)K(n, n-1)C^H(n) + Q_2(n)]^{-1}$$

$$\alpha(n) = y(n) - C(n)\hat{x}(n|Y_{n-1})$$

$$\hat{x}(n+1|Y_n) = F(n+1, n)\hat{x}(n|Y_{n-1}) + G(n)\alpha(n)$$

$$K(n) = K(n, n-1) - F(n, n+1)G(n)C(n)K(n, n-1)$$

$$K(n+1, n) = F(n+1)K(n)F^H(n+1, n) + Q_1(n)$$



Filtro Extendido de Kalman

$$x(n+1) = F(n, x(n)) + v_1(n)$$

$$y(n) = C(n, x(n)) + v_2(n)$$

$$F(n+1, n) = \left. \frac{\partial F(n, x)}{\partial x} \right|_{x = \hat{x}(n|Y_n)}$$

$$C(n) = \left. \frac{\partial C(n, x)}{\partial x} \right|_{x = \hat{x}(n|Y_{n-1})}$$



Filtro Extendido de Kalman

Vector de Estado del Proceso:

Observaciones: $\{y(1), y(2), \dots, y(n)\}$

Parámetros Conocidos:

Matriz de Transición de estado no lineal: $F(n, x(n))$

Matriz de Medición no lineal: $C(n, x(n))$

Matriz de Correlación del ruido del Proceso: $Q_1(n)$

Matriz de Correlación del ruido de Medición: $Q_2(n)$

Computación: $n=1,2,3,\dots$

$$G_r(n) = K(n, n-1)C^T(n)[C(n)K(n, n-1)C^T(n) + Q_2(n)]^{-1}$$

$$\alpha(n) = y(n) - C(n, \hat{x}(n|y_{n-1}))$$

$$\hat{x}(n|y_n) = \hat{x}(n|y_{n-1}) + G_r(n)\alpha(n)$$

$$\hat{x}(n+1|y_n) = F(n, \hat{x}(n|y_n))$$

$$K(n) = [I - G_r(n)C(n)]K(n, n-1)$$

$$K(n+1, n) = F(n+1, n)K(n)F^T(n+1, n) + Q_1(n)$$

Condiciones Iniciales:

$$\hat{x}(0|y_0) = E[x(1)]$$

$$K(1,0) = E[(x(1) - E[x(1)])(x(1) - E[x(1)]^T)] = K_0$$



Artículo

Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Using Extended Kalman Filter

Y. Kim, S. Sul and M. Park



Filtro Extendido de Kalman

- Estimación
- Velocidad
- Flujo del rotor

• La Velocidad del rotor es considerada como un parámetro y como un estado



Modelo Discreto del Motor de Inducción

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] + G(t)w(t)$$

$$z(t_i) = h[x(t_i), t_i] + v(t_i)$$

$G(t)$ = Matriz de peso de ruido

$w(t)$ = Matriz de ruido del modelo de estado

$v(t)$ = Matriz de ruido del modelo de salida



Algoritmo

1. - Predicción del Estado :

$$\hat{x}(k+1|k) = \hat{x}(k|k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} f[\hat{x}(t|t_k), u(t), t] dt$$

2. - Estimación de la Matriz de Covariancia del error :

$$P(k+1|k) = \Phi(k+1, k)P(k|k)\Phi'(k+1, k) + Q_d(k)$$

donde :

$$\Phi(k+1, k) = \exp(F(k) * T_s)$$

$$F(k) = \left. \frac{\partial f[x(t), u(t), t]}{\partial x} \right|_{x = \hat{x}(k|k)}$$

$$Q_d = \int \Phi(t_{k+1}, \tau)G(\tau)Q(\tau)G'(\tau)\Phi'(t_{k+1}, \tau)d\tau$$



Algoritmo

3. - Computación de la Ganancia del Filtro de Kalman

$$K(k+1) = P(k+1|k)H'(k+1)[H(k+1)P(k+1|k)H'(k+1) + R(k+1)]^{-1}$$

donde

$$H(k+1) = \left. \frac{\partial h[x(t), t]}{\partial x} \right|_{x = \hat{x}(k+1|k)}$$

4. - Actualización de la Matriz de Covariancia del error

$$P(k+1|k+1) = [I - K(k+1)H(k+1)]P(k+1|k)$$



Algoritmo

5.- Estimación del estado

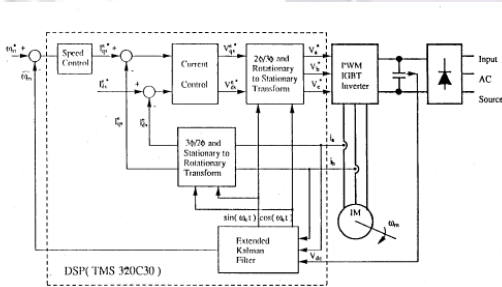
$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1)\{z(k+1) - h[\hat{x}(k+1|k), k+1]\}$$

• Variables de estado:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ds}(t) \\ i_{qs}(t) \\ \lambda_{ds}(t) \\ \lambda_{qs}(t) \\ \omega_r(t) \end{bmatrix}$$

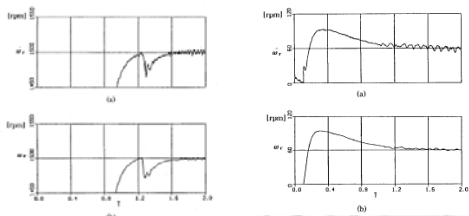


Diagrama de Bloques del Sistema Propuesto





Resultados

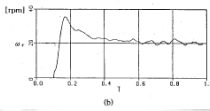
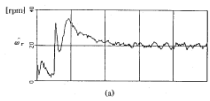


• 1500 rpm

• 60 rpm



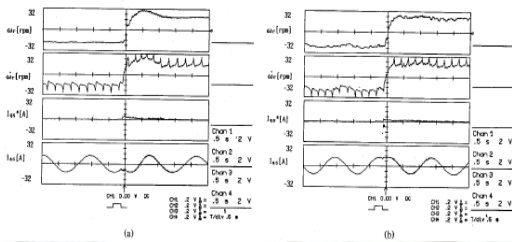
Resultados



• 20 rpm



Respuesta Dinámica del Sistema

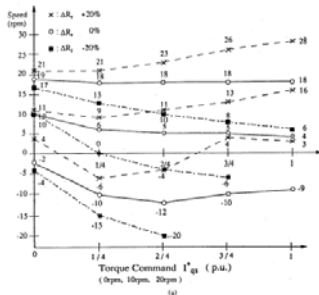


• Caso real

• Caso estimado



Efecto de la Variación de los Parámetros





Medición de la Velocidad del Motor de Inducción utilizando Inteligencia Artificial



Estrategias

- Algoritmos Genéticos
- Lógica Fuzzy
- Redes Neuronales
- Otros



Algoritmos Genéticos

• Es un algoritmo de busca y/o optimización que es inspirado en la selección natural y la reproducción genética.

• Algoritmo que combina sobre vivencia del más apto y el cruzamiento aleatorio de genes para crear un mejor individuo.



Algoritmos Genéticos

• Caracterización

- Problema a ser optimizado
- Representación de las soluciones
- Decodificación del Cromosoma
- Evaluación
- Selección
- Operadores genéticos
- Inicialización de la Población



Problema

• Son aplicados en problemas complejos de optimización:

- Problemas con diversos parámetros
- Problemas con muchas restricciones
- No pueden ser representados matemáticamente
- Problemas con grandes espacios de busca



Representación de las Soluciones del Problema

• Define la estructura del cromosoma a ser manipulado por el algoritmo

• A representación binaria es la más utilizada por ser más simple, fácil de manipular a través de los operadores genéticos.



Representación de las Soluciones del Problema

- Encontrar el valor máximo de $f(x)=x^2$, x entero $[0,63]$

A_1 001110 representa $x = 14$

A_1 000100 representa $x = 4$



Representación de las Soluciones del Problema

- Binario Codificando Real
- Enteros
- Reales
- Estructuras : Vectores, Listas, Matrices, etc.



Decodificación del Cromosoma

- El proceso de decodificación construye la solución para que ésta sea validada por el problema.

001000

Solución: $x = 16$



Evaluación

- Es el lazo entre el AG y el mundo externo
- La evaluación es hecha por medio de una función de evaluación (Aptitud)

	Cromosoma	x	f(x)
C_1	0 0 1 0 0 0	8	64
C_2	0 0 0 0 1 0	2	4



Selección

- Seleccionar individuos para la reproducción
- La selección esta basada en la Aptitud de los individuos:

Individuos más aptos tendrán mas posibilidad de ser escogidos

- La selección es típicamente implementada por una ruleta, donde cada individuo es representado por una parte proporcional con su aptitud relativa



Operadores Genéticos

- Los individuos seleccionados (y reproducidos en la población siguiente) son recombinados sexualmente a través de operadores. El más utilizado es el crossover

- Crossover
- Mutación
- Inversión
- Otros



Crossover

C_1	0	0	1	0	0	0
C_2	0	0	0	1	0	0

↓

D_1	0	0	1	1	0	0
D_2	0	0	0	0	0	0



Inicialización de la Población

- La inicialización de la población determina o proceso de creación de los individuos para el primer ciclo del algoritmo.
- Típicamente, La población inicial es formada a partir de individuos aleatoriamente creados.



Lógica Fuzzy



Lógica Tradicional

- Aristóteles (384 - 322 a C.): Fundador de la ciencia lógica
- Su lógica esta basada en premisas y conclusiones

• Todo ser vivo es mortal Premisa 1

• Jhuliana es un ser vivo Premisa 2

• Jhuliana es mortal Conclusión



Lógica Tradicional

- Esta lógica (Aristotélica) es binaria: una declaración es falsa o verdadera.

A e A' cubren todas las posibilidades !!!!

$$\mu_A(x): U \rightarrow \{0, 1\}$$

$$\mu_A(x) = 1 \quad \text{si} \quad x \in A$$

$$\mu_A(x) = 0 \quad \text{si} \quad x \notin A$$



Lógica Tradicional

$$A \cap \emptyset = \emptyset \quad A \cap U = A$$

$$A \cup \emptyset = A \quad A \cup U = U$$

$$A \cap A' = \emptyset$$

$$A \cup A' = U$$



Lógica Fuzzy

- La Lógica Fuzzy puede ser definida, como una lógica que soporta los modos de raciocinio que son aproximados, y no exactos como ocurre en la lógica tradicional.
- El raciocinio exacto corresponde a un caso extremo del raciocinio aproximado



Conjunto Fuzzy

- Sea el Conjunto A definido:

$$A = \{ \mu_A(x) | x \}$$

$\mu_A(x)$ es la función de pertenencia de x en A y es definida como el mapeamiento de X em el intervalo cerrado [0,1]



Conjunto Fuzzy

- Sea A={bajo}, en el universo de números positivos menores o iguales a 100

$$\mu_A(0) = \mu_A(5) = \mu_A(10) = \mu_A(15) = \mu_A(20) = 1$$

$$\mu_A(25) = 0.9$$

$$\mu_A(30) = 0.8$$

-
-

$$\mu_A(50) = \mu_A(55) = \mu_A(60) \dots \dots \mu_A(100) = 0$$



Variables Linguísticas

- Una variable lingüística es una variable cuyos valores son nombres de conjuntos fuzzy



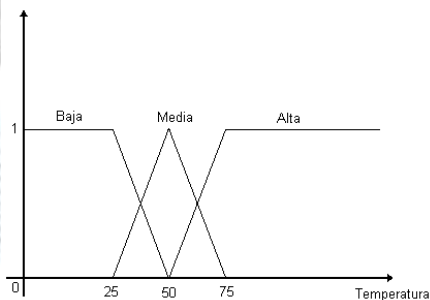


Variables Linguísticas

- Términos Primarios: alto, bajo, pequeño, medio, grande,...
- Conectivos Lógicos: Negación, conectivos E O
- Conectivos Enmascarados: pero, a pesar de,...
- Modificadores: mucho, poco, levemente, extremadamente,...
- Delimitadores: ()



Variable Lingüística





Conectores Lógicos

$$A = \{\mu_A(x)|x\} \quad x \in X \\ B = \{\mu_B(y)|y\} \quad y \in Y \rightarrow A \text{ e } B \{\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)\}(x, y) = \{\mu_{A \cap B}(x, y)\}(x, y)$$

$$A = \{\mu_A(x)|x\} \quad x \in X \\ B = \{\mu_B(x)|x\} \quad x \in X \rightarrow A \text{ o } B \{\mu_A(x) \vee \mu_B(x)\}(x) = \{\mu_{A \cup B}(x)\}(x)$$



Funciones de Implicación

R: Si A entonces B = $A \rightarrow B = A \times B$

$$\mu_R(x, y) = f_1[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad x \in X, y \in Y \\ R = \{\mu_R(x, y)\}(x, y)$$



Funciones de Implicación

R^N : Si A^1 entonces B^1

o

Si A^2 entonces B^2

Las funciones de implicación más utilizadas en aplicaciones de Ingeniería son el mínimo y el producto

o

Si A^N entonces B^N

$$\mu_{R^N}(x, y) = f_2[\mu_{R^1}(x, y), \mu_{R^2}(x, y), \dots, \mu_{R^N}(x, y)]$$



Funciones de Implicación

$$\text{min} : \mu_R(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y)$$

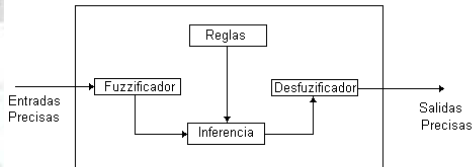
$$\text{producto} : \mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$$

Para R^N :

$$\mu_{R^N}(x, y) = \bigvee_j [\mu_{A_j}(x) \wedge \mu_{B_j}(y)]$$



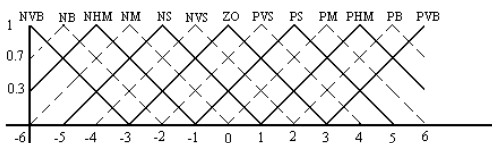
Sistema de Inferencia Fuzzy





Ejemplo

- Datos: 13 Conjuntos Fuzzy para cada variable, (triangulares), simétricos definidos en universos discretos finitos de [-6, 6]. Com función de pertenencia:





Ejemplo

- Conectivo e: min
- Implicación: min
- Conectivo o: max
- Reglas:

Si $E = NS$ e $CE = PS$ entonces $U = NS$

Si $E = ZO$ e $CE = NVS$ entonces $U = ZO$

- entradas: $e_i = -1$ y $ce_i = 0$



Ejemplo

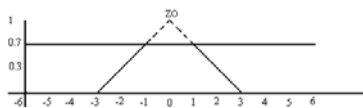
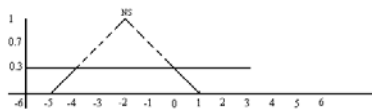
$$\left. \begin{array}{l} \mu_{NS}(e_i) = 0.7 \\ \mu_{PS}(ce_i) = 0.3 \end{array} \right\} \Rightarrow \mu_{NS}(e_i) \wedge \mu_{PS}(ce_i) = 0.3$$

$$\left. \begin{array}{l} \mu_{ZO}(e_i) = 0.7 \\ \mu_{NVS}(ce_i) = 0.7 \end{array} \right\} \Rightarrow \mu_{ZO}(e_i) \wedge \mu_{NVS}(ce_i) = 0.7$$

$$\mu_U(u) = \max[0.3 \wedge \mu_{NS}(u); 0.7 \wedge \mu_{PS}(ce_i) = 0.3]$$



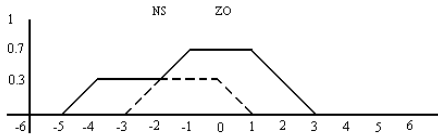
Ejemplo





Ejemplo

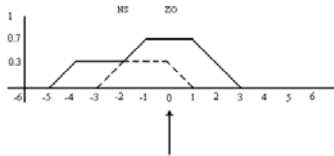
- Unión (Conjunto de Salida):





Ejemplo

- Desfuzificación:
 - Media de los Máximos
 - Centro de Gravedad





Redes Neuronales



Redes Neurales

Las Redes Neurales Artificiales son sistemas inspirados en las neuronas biológicas y en la estructura masivamente paralela del cerebro, con capacidad de adquirir, almacenar y utilizar conocimiento experimental.



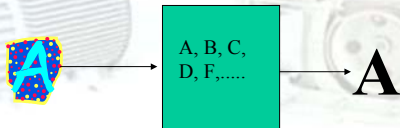
Redes Neurales

- Los sistemas compuestos de diversas unidades simples (neuronas artificiales) ligadas de manera adecuada, pueden generar **comportamientos** importantes y complejos
- Este comportamiento es determinado por la estructura de las uniones (Topologías) y por los valores de las conexiones (pesos)



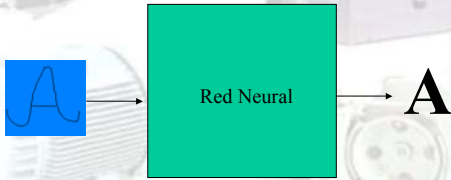
Entrenamiento

- El entrenamiento es efectuado a través de la presentación de ejemplos





Redes Neurales



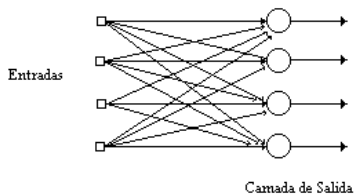


Arquitecturas de la RNA

- Redes de una camada Feedforward
- Redes Multicamadas Feedforward
- Redes Recurrentes

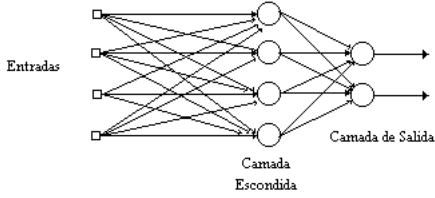


Red de Una Camada Feedforward



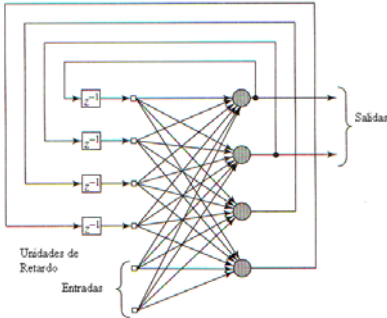


Red Multicamada Feedforward





Red Recurrente





Proceso de Aprendizaje

• Proceso por el cual los parámetros libres (pesos) de una red neural artificial son adaptados a través de un proceso continuo de estimulación

• Tipos Básicos de Aprendizaje

- Entrenamiento Supervisionado
- Entrenamiento No Supervisionado
- Entrenamiento Batch
- “Reinforcement Learning”
- T.S. com “distal teacher”

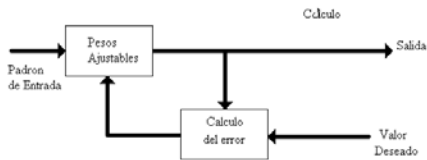


Entrenamiento Supervisionado (T.S.)

- La Red es entrenada por medio de la adquisición de datos en la entrada con su respectiva salida deseada
- Generalmente se usa la minimización del error de la salida



Entrenamiento Supervisionado (T.S.)





Algoritmo de Aprendizaje Back Propagation

- Permite el avance de las Redes Neuronales Artificiales
- Algoritmo más utilizado en las Redes Neuronales Artificiales



Artículo

Speed Estimation of Induction Motor Using Artificial Neural Networks

Prashant Mehrotra, John E. Quaicoe and R. Venkatesan



Ideas Básicas

- Este artículo propone dos técnicas para la estimación de la velocidad usando Redes Neurales Artificiales.
- Estas técnicas están basadas en las expresiones de velocidad obtenidas de la ecuación dinámica del motor de inducción.



Ecuaciones del Motor de Inducción

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{I}$$

$$\mathbf{V} = [V_{sd} \quad V_{sq} \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I} = [i_{sd} \quad i_{sq} \quad i_{rd} \quad i_{rq}]^T$$



Ecuaciones del Motor de Inducción

$$i_{rd} = \frac{1}{L_m} \left[\int (V_{sd} - R_s i_{sd}) dt - L_s i_{sd} \right]$$

$$i_{rq} = \frac{1}{L_m} \left[\int (V_{sq} - R_s i_{sq}) dt - L_s i_{sq} \right]$$

$$\omega_r = \frac{-[\sigma^2 \frac{di_{sq}}{dt} - R_r L_s i_{sd} + R_r \int v_{zd} dt + L_r v_{zd}]}{\sigma^2 i_{sq} + L_r \int v_{zd} dt}$$

$$\omega_r = \frac{[\sigma^2 \frac{di_{sq}}{dt} - R_r L_s i_{sq} + R_r \int v_{zq} dt + L_r v_{zq}]}{\sigma^2 i_{sd} + L_r \int v_{zd} dt}$$



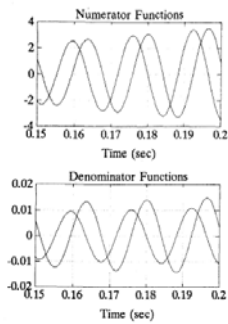
Método 1: Usando Funciones Singulares

$$N_1 = -[\sigma^2 \frac{di_{sd}}{dt} - R_r L_s i_{sd} + R_r \int v_{zd} dt + L_r v_{zd}]$$

$$D_1 = \sigma^2 i_{sq} + L_r \int v_{zq} dt$$

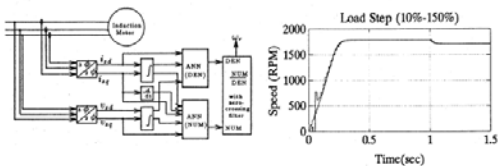
$$N_2 = [\sigma^2 \frac{di_{sq}}{dt} - R_r L_s i_{sq} + R_r \int v_{zq} dt + L_r v_{zq}]$$

$$D_2 = \sigma^2 i_{sd} + L_r \int v_{zd} dt$$





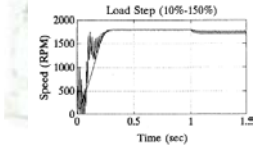
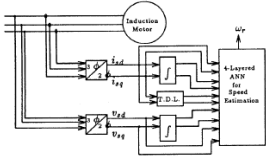
Método 1: Usando Funciones Singulares





Método 2: Usando Funciones No Singulares

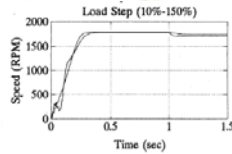
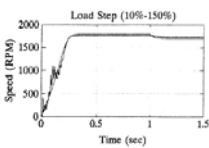
$$\omega_r = \frac{(\sigma^2 p - R_r L_s - R_s L_r - \frac{R_s R_r}{p})s + (L_r + \frac{R_s}{p})\psi_8}{j[(\sigma^2 - \frac{R_s L_r}{p})\psi_8 + \frac{L_s}{p}\psi_8]}$$





Método 2: Usando Funciones No Singulares

- Mejorar: - Dar las entradas con fase y ángulo
- Utilizar Filtro Paso Bajo





Artículo 2: Estimación de la Velocidad del Motor de Inducción Utilizando Redes Neuronales

J. A González y M. da Silveira



Ideas Básicas

- Estimar la velocidad del motor de Inducción, utilizando como entradas las tensiones y las corrientes del estator.
- Esta red neural Artificial debe ser simple, con pocas neuronas, permitiendo una computación rápida.



Ecuaciones del Motor de Inducción

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= p\lambda_{ds} - \lambda_{qs}p\theta + r_s i_{ds} & \lambda_{ds} &= L_{1s}i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \\
 v_{qs} &= p\lambda_{qs} - \lambda_{ds}p\theta + r_s i_{qs} & \lambda_{qs} &= L_{1s}i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr}) \\
 v'_{dr} &= p\lambda'_{dr} - \lambda'_{qr}p\beta + r_r i'_{dr} & \lambda'_{dr} &= L_{1r}i'_{dr} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \\
 v'_{qr} &= p\lambda'_{qr} - \lambda'_{dr}p\beta + r_r i'_{qr} & \lambda'_{qr} &= L_{1s}i'_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr}) \\
 & & \lambda_{md} &= M(i_{ds} + i'_{dr}) \\
 & & \lambda_{mq} &= M(i_{qs} + i'_{qr})
 \end{aligned}$$

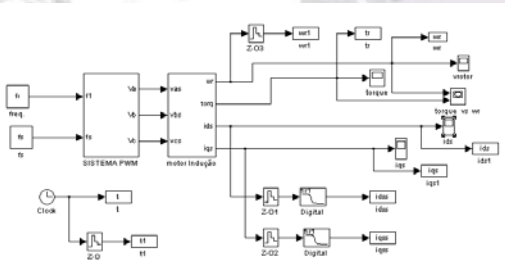


Ecuaciones del Motor de Inducción

$$\begin{aligned}
 \lambda_{ds} &= \frac{1}{p} \left[v_{ds} + \omega \lambda_{qs} + \frac{r_s}{L_{1s}} (\lambda_{ds} - \lambda_{md}) \right] \\
 \lambda_{qs} &= \frac{1}{p} \left[v_{qs} - \omega \lambda_{ds} + \frac{r_s}{L_{1s}} (\lambda_{qs} - \lambda_{mq}) \right] \\
 \lambda'_{dr} &= \frac{1}{p} \left[v'_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + \frac{r_r}{L_{1r}} (\lambda'_{dr} - \lambda_{md}) \right] \\
 \lambda'_{qr} &= \frac{1}{p} \left[v'_{qr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + \frac{r_r}{L_{1r}} (\lambda'_{qr} - \lambda_{mq}) \right] \\
 T &= \left(\frac{n}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr})
 \end{aligned}$$

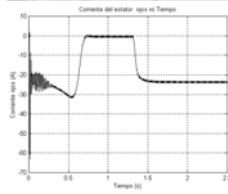
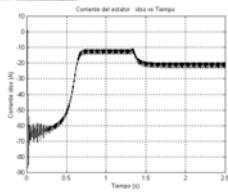


Simulación del Motor de Inducción



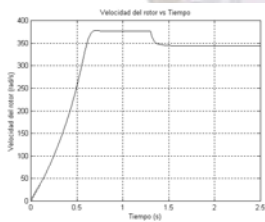


Corrientes del Estator





Velocidad del Motor de Inducción





Configuración de La Red Neural Artificial

- 4 Entradas (2 de corriente, 2 de Tensión)
- 9 Neuronas en la camada escondida
- 200 épocas de entrenamiento
- 1 Camada de Salida



Estimación de la Velocidad

