



DEPARTAMENTO DE  
**INGENIERÍA  
ELÉCTRICA**  
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Ingeniería de Ejecución en Electricidad  
Mención Sistemas de Energía  
Modalidad Vespertina

# **CONTROL AUTOMÁTICO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS CÁTEDRA 9**

**PRIMER SEMESTRE 2018**  
**PROF. MATÍAS DÍAZ**

# Agenda



- SISTEMAS DE CONTROL EN CASCADA
- EJEMPLO APLICADO

# Agenda



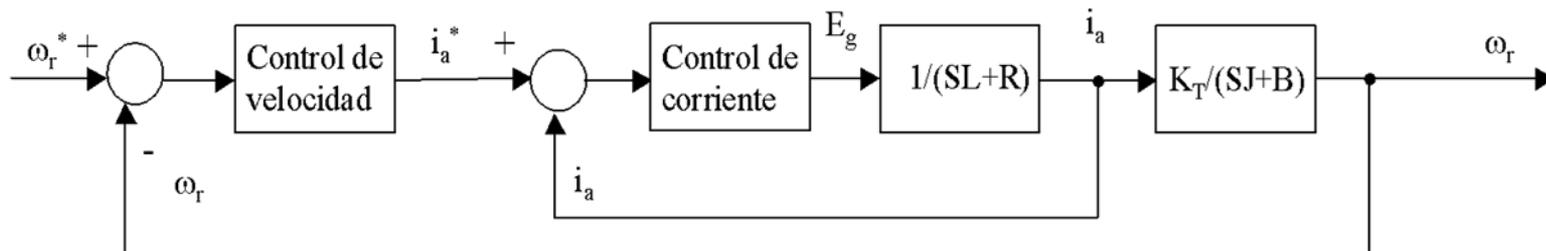
- SISTEMAS DE CONTROL EN CASCADA
- EJEMPLO APLICADO

# Controladores en Cascada



Existen algunas aplicaciones donde se necesitan lazos de control anidados. El ejemplo mas típico es el caso de controladores de máquinas eléctricas. En esta aplicación se usan habitualmente dos lazos, un lazo de velocidad externo e internamente un lazo de corriente.

La siguiente figura muestra esta construcción:



# Controladores en Cascada



La característica principal de estos esquemas de control es que el lazo interno es bastante más rápido que el lazo externo. Por ejemplo en la prueba 2, el lazo de corriente es 10 veces más rápido que el lazo de velocidad. De esta forma los compensadores se pueden diseñar en forma desacoplada.

Para el diseño de los lazos de control se utiliza habitualmente una frecuencia de al menos 70 o 100Hz para el lazo de corriente y alrededor de 5Hz para el lazo de velocidad. El coeficiente de amortiguamiento utilizado es habitualmente cercano a [0.7-0.8] pero esto depende de la aplicación.



La armadura del motor se alimenta utilizando un fuente de voltaje variable  $V_a$ . Si se mantiene la corriente de campo  $i_f$  constante, las ecuaciones diferenciales del motor de corriente continua se escriben como:

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{d}{dt} I_a + E_a$$

Ecuación de Armadura

$$V_f = R_f I_f + L_f \frac{d}{dt} I_f$$

Ecuación de Campo

$$E_a = k_t \omega_r$$

Back EMF

$$J \frac{d}{dt} \omega_r + B \omega_r = T_e - T_m$$

Ecuación Mecánica

$$T_e = k_t I_a$$

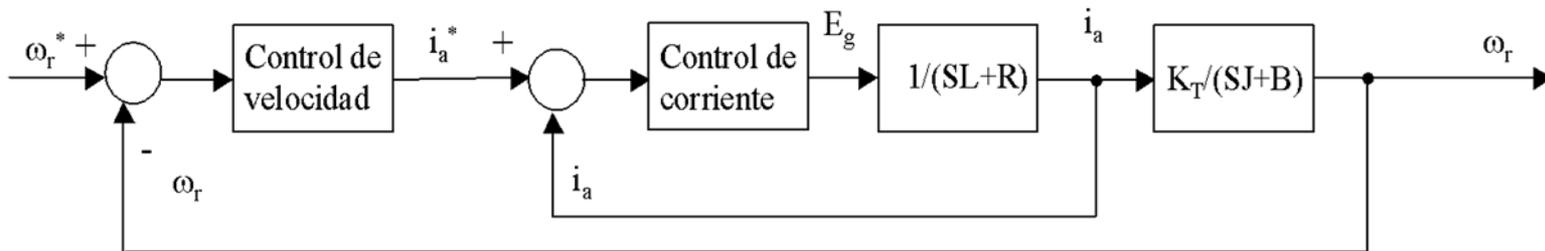
Torque Eléctrico

Donde  $K_T$  es una constante que depende de aspectos constructivos del motor y del flujo de operación,  $R_a$  y  $L_a$  son la resistencia e inductancia de los devanados,  $\omega_r$  es la resistencia rotacional,  $J$  y  $B$  son la inercia rotacional y el coeficiente de fricción respectivamente.

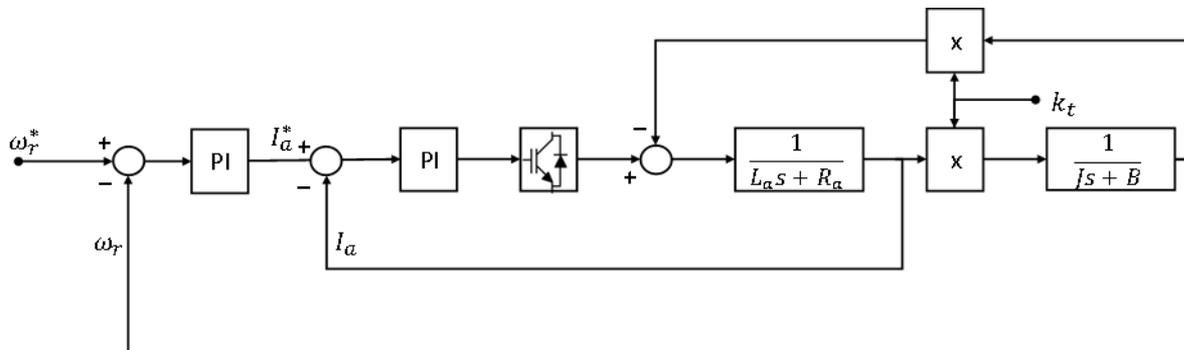
# Controladores en Cascada



## Versión simplificada



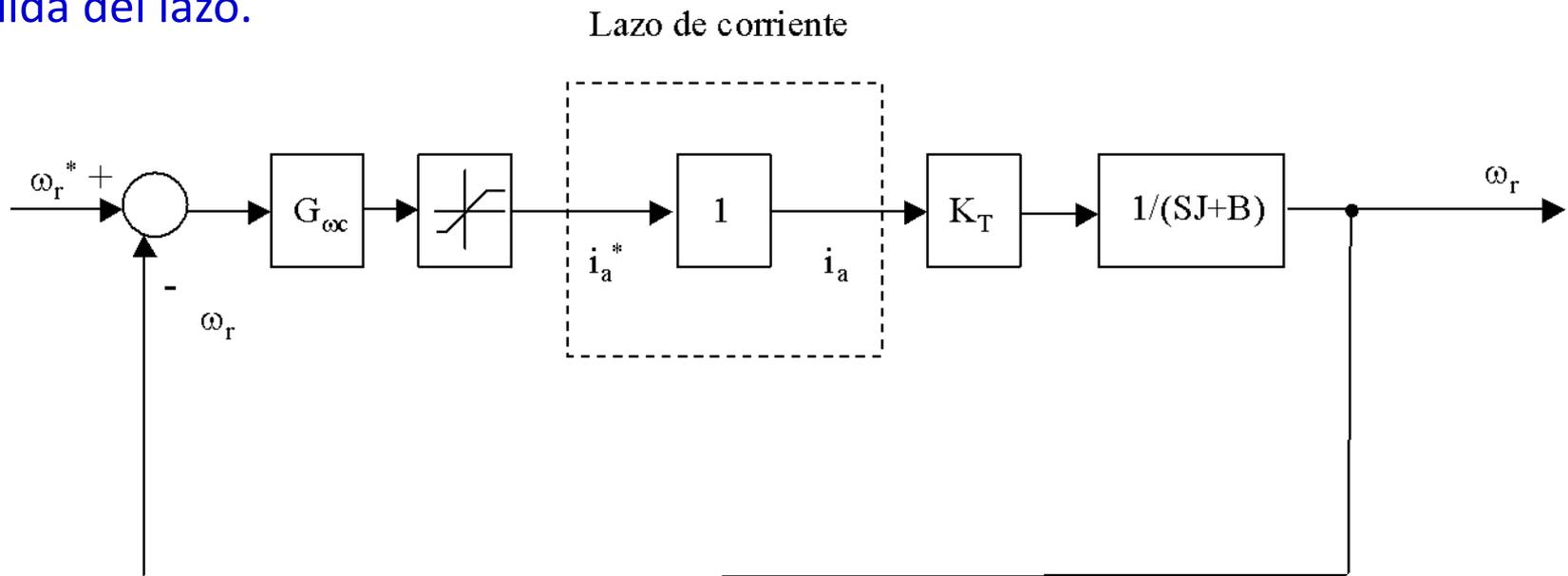
## Versión completa



# Controladores en Cascada



El diseño del lazo de velocidad se hace considerando que el lazo de corriente es muy rápido y que además se encuentra diseñado para cero error en estado estacionario a entrada escalón. En este caso se puede considerar el lazo de corriente como un bloque de ganancia uno. En otras palabras, desde el punto de vista del lazo de velocidad, toda corriente de referencia  $i_a^*$  a la entrada del lazo de corriente aparece instantáneamente como una corriente real  $i_a$  a la salida del lazo.



# Agenda



- SISTEMAS DE CONTROL EN CASCADA
- EJEMPLO APLICADO

# Solución prueba 2



1. Responda las siguientes preguntas teóricas (20 Puntos)
  - 1.1. Dibuje el diagrama de bloques de un controlador PI con anti-wind up y explique cómo funciona la función lógica  $f(u)$ .
  - 1.2. Demuestre que un sistema de control no cambia la posición de los polos de lazo cerrado con respecto a otras entradas como ruidos y perturbaciones que pudieran presentarse en el lazo directo o de realimentación.
  - 1.3. Explique en qué consiste el Lugar Geométrico de la raíz y por qué es importante para el diseño de sistemas de control. Además, explique y detalle el proceso requerido para diseñar controladores usando el lugar de la raíz.
  - 1.4. Valide o refute la afirmación “El diseño de sistemas de control sin sobrepaso puede lograrse seleccionando raíces de lazo cerrado puramente imaginarias”. Apóyese de ecuaciones y gráficas en el plano complejo.

# Solución prueba 2



- 2.1. Utilizando el Lookup Table de la Sección Anexos, diseñe el lazo de control de velocidad considerando una velocidad natural de  $\omega_n=15\text{Hz}$  y  $\xi = 0.7$ . ¿Cuál es el valor de  $k_p$  y  $k_i$ ? (7.5 puntos)
- 2.2. Elija alguno de los métodos analíticos del Anexo y diseñe el lazo de corriente de la máquina considerando  $\omega_n=150\text{Hz}$ . ¿Cuál es el valor de  $k_p$  y  $k_i$ ? (7.5 puntos)

<p>1. Método de Aström y Hägglund Plantas de primer orden sin tiempo muerto</p> $G(s) = \frac{k_1}{\tau s + 1}$ $k_p = \frac{k_1}{2\xi\lambda\tau - 1}$ $T_i = \frac{k_1}{\lambda^2\tau}$ $T_d = \frac{2\xi\lambda\tau - 1}{\lambda^2\tau}$	<p>2. Método de Brosislow Plantas de primer orden con tiempo muerto</p> $G(s) = \frac{k_1 e^{-t_1 s}}{\tau s + 1}$ $k_p = \frac{\tau + \frac{t_1^2}{2}(\lambda + t_1)}{k_1(\lambda + t_1)}$ $T_i = \tau + \frac{t_1^2}{2}(\lambda + t_1)$ $T_d = \frac{t_1^2}{2}(\lambda + t_1) \left(1 - \frac{t_1}{3T_i}\right)$
<p>3. Método de Aström y Hägglund Plantas de segundo orden sin tiempo muerto</p> $G(s) = \frac{k_1}{(s + \tau_1)(s + \tau_2)}$ $k_p = \frac{\tau_1\tau_2\lambda^2(1 + 2\xi) - 1}{k_1}$ $T_i = \frac{\tau_1\tau_2(1 + 2\xi) - 1}{k_1\lambda}$ $T_d = \frac{\tau_1\tau_2(1 + 2\xi) - \tau_1 - \tau_2}{\tau_1\tau_2\lambda(1 + 2\xi) - 1}$	<p>4. Asocie: Velocidad natural de diseño a <math>\lambda</math>.</p> $T_i = k_i^{-1}$ $T_d = k_d$

# Solución prueba 2



- 2.3. Encuentre la función de transferencia equivalente que relaciona la velocidad de referencia y la velocidad del sistema. (5 puntos)
- 2.4. El actuador se reemplaza por un actuador ideal de ganancia unitaria. Encuentre la nueva función de transferencia equivalente que relaciona la corriente de armadura de referencia con la corriente de armadura medida en el sistema. (10 puntos)

# Solución prueba 2



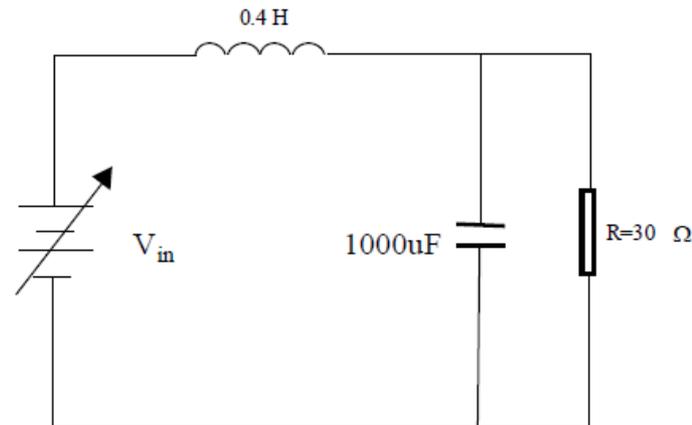
```
/*
//Definiciones Iniciales
Int_disc0=0;
//Codigo de control maquina CC
Linea 1: Error=Corriente_Referencia + Corriente_Medida; //Calculo del Error
Linea 2: Int_disc=Int_disc0 + ki*Error;
Linea 3: V_actuador=kp*Error + Int_disc; //Control PI
Linea 4: Int_disc0=Int_disc;
Linea 5: Ref_Actuador=V_actuador;
*/
```

- 3.1. Explique la función de cada línea de código e identifique dónde y cómo se produce el efecto integral del controlador PI. (10 puntos)
- 3.2. Este controlador presenta anti-windup?. Proponga, de ser el necesario, líneas de código adicionales para efectuar el anti-winding up. (10 puntos)

# Solución prueba 2



4. Para un sistema de calefacción se desea controlar la potencia consumida por la resistencia de  $30\Omega$ .



- 4.1. Encuentre la función de transferencia del sistema y proponga un sistema de control a lazo cerrado que asegure 0 error. (10 puntos)
- 4.2. Dibuje el diagrama de bloques e identifique la variable que manipulará para controlar potencia en la resistencia. (5 puntos)
- 4.3. Utilizando alguno de los métodos analíticos, diseñe un sistema de control tipo PID considerando frecuencia natural de  $70 \text{ rads}^{-1}$  y 0 error a entrada escalón. ¿Cuál es el valor de  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$ ? (10 puntos)
- 4.4. ¿Qué modificaciones serían necesarias en el sistema de control para seguir una parábola de potencia de entrada con cero error en estado estacionario?. Rediseñe de ser necesario. (5 puntos)