



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 10

PRIMER SEMESTRE 2018
PROF. MATÍAS DÍAZ

Agenda



- PROGRAMACIÓN PARTE FINAL DEL CURSO
- SISTEMAS DE CONTROL EN CASCADA
- CONTROL FEED-FORWARD
- CONTROL DIGITAL

Agenda



- PROGRAMACIÓN PARTE FINAL DEL CURSO
- SISTEMAS DE CONTROL EN CASCADA
- CONTROL FEED-FORWARD
- CONTROL DIGITAL

Prog. parte final curso

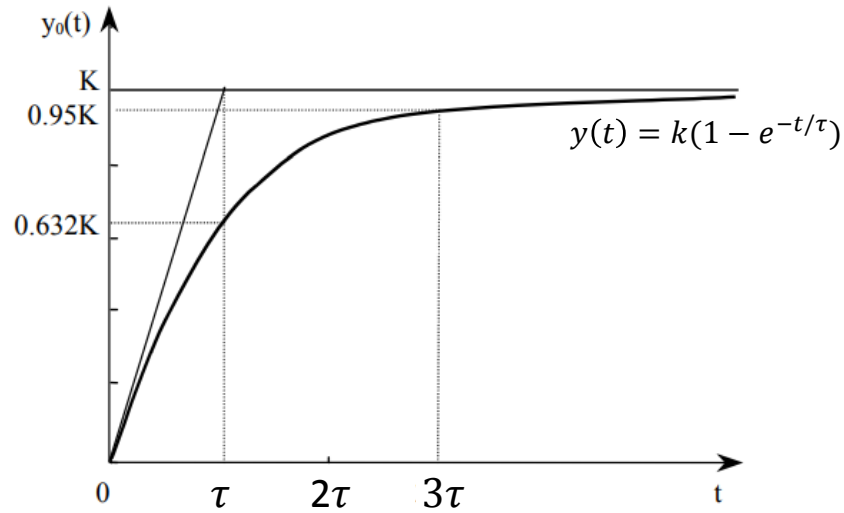


- Miércoles 29-11, Prueba 2
- Viernes 01-12, Laboratorio
- Miércoles 06-12, Ayudantía
- Miércoles 13-12, Consultas online
- Miércoles 20-12, Entrega Proyecto
- Miércoles 27-12, Interrogación
- Viernes 05-01, Examen

Agenda



- PROGRAMACIÓN PARTE FINAL DEL CURSO
- **SISTEMAS DE CONTROL EN CASCADA**
- CONTROL FEED-FORWARD
- IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR PID DISCRETO



Planta

$$G(s) = \frac{k}{1 + \tau s}$$

Función en el tiempo

$$y(t) = k(1 - e^{-t/\tau})$$

Los parámetros característicos que aparecen representados en la figura anterior son:

- K : La ganancia estática se define como el valor final ante entrada escalón unitario.
- τ : Constante de tiempo (es el tiempo en el que se alcanza el 63% del valor final).
- $t_s = 3\tau$: Tiempo de establecimiento (es el tiempo que tarda la respuesta en entrar y permanecer en la zona del $\pm 5\%$ en torno a su valor de equilibrio).



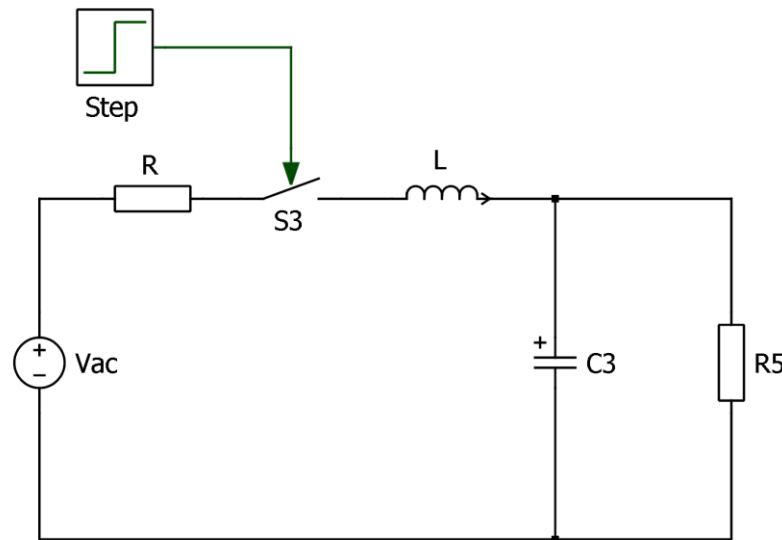
Encontrar la constante de tiempo de las siguientes plantas

$$G(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad G(s) = \frac{1}{Js + B}$$

Nombre	Valor	Unidad
Potencia	7	kW
Corriente nominal	16	A
kt	2.54	-
Inductancia de campo (Lf)	900	mH
Resistencia de campo (Rf)	3	ohm
Inductancia de armadura (La)	120	mH
Resistencia de armadura (Ra)	1,02	ohm
Inercia rotacional (J)	0.2	Kgm ²
Coefficiente de fricción (B)	0.02	Nm-s/rads
Retardo del actuador	0.005	s

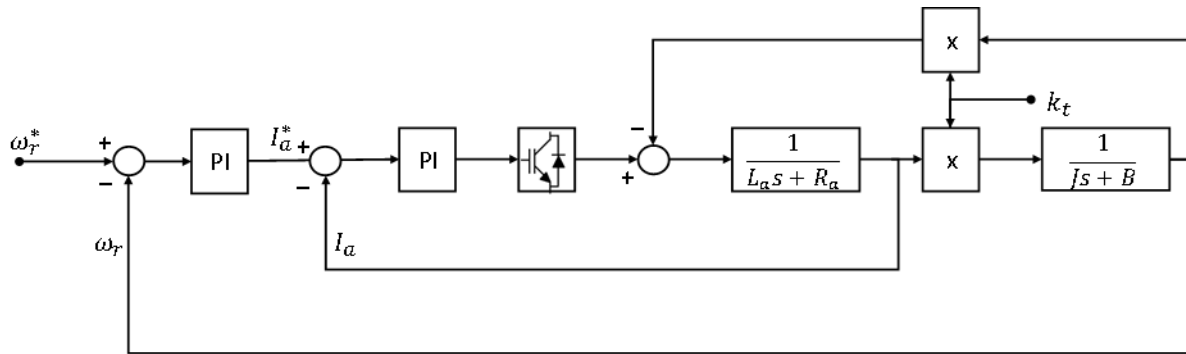
Ejercicio:

Se tiene un sistema de calefacción que regula la potencia disipada en la resistencia R5.



Se pide diseñar un sistema de control anidado (controladores en cascada) para regular la tensión en el condensador “C” a través de regular la corriente “ i ” que entrega la fuente controlada de tensión “E”

Estructura típica, Máquina CC



Agenda

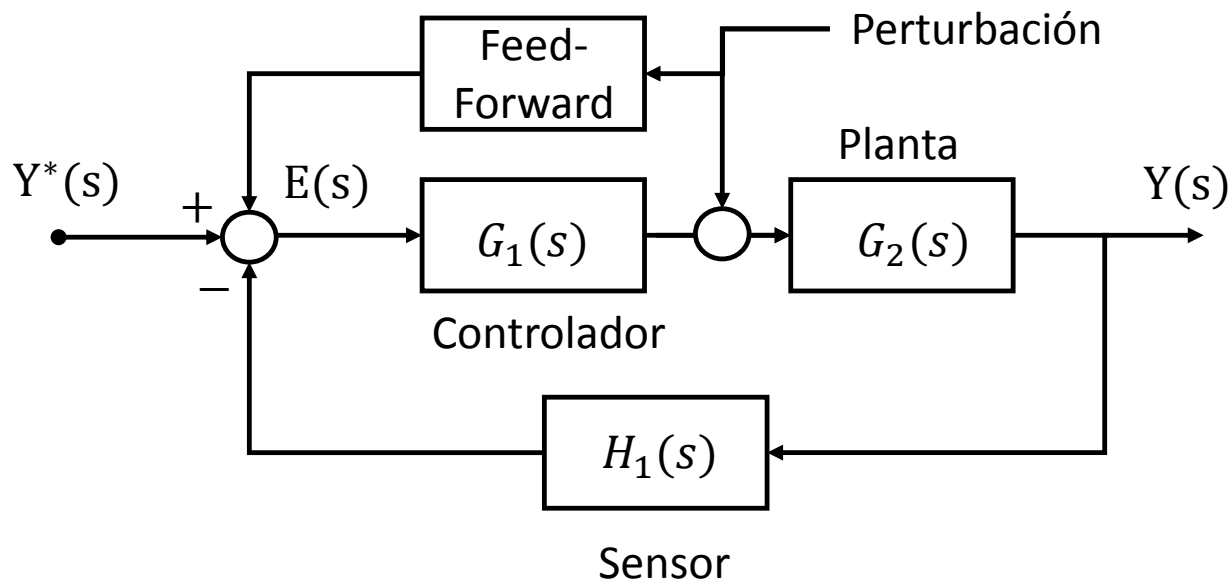


- PROGRAMACIÓN PARTE FINAL DEL CURSO
- SISTEMAS DE CONTROL EN CASCADA
- **CONTROL FEED-FORWARD**
- IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR PID DISCRETO

Control Feedforward

Control en el cual la información relacionada con una o más condiciones que pueden alterar la variable controlada son convertidas, fuera de cualquier lazo de realimentación, en una acción correctiva para minimizar las desviaciones de la variable controlada

El control realimentado (feedback) opera para eliminar los errores mientras que el control prealimentado (feed-forward) lo hace para prevenir la ocurrencia del error.



Control Feedforward

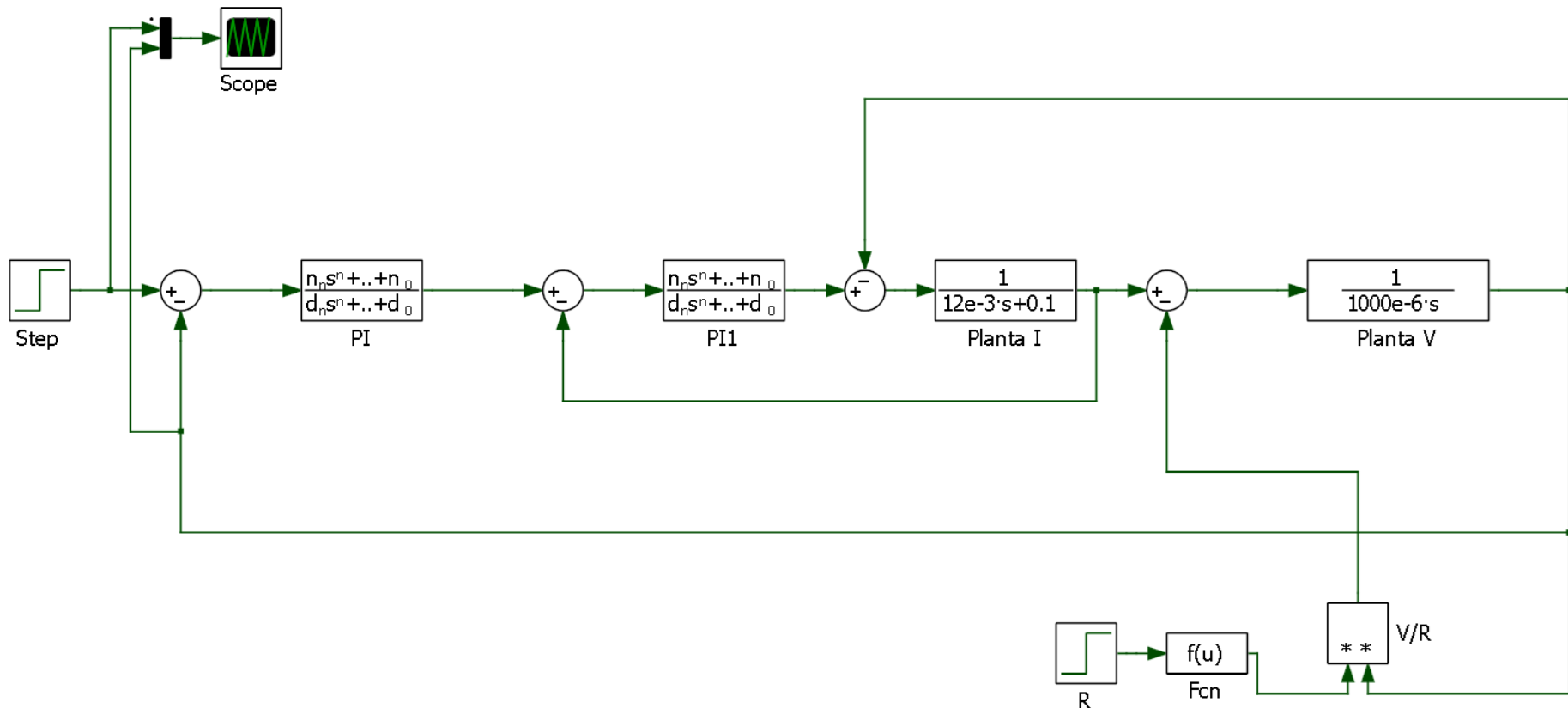


Para ilustrar el efecto de la compensación feed-forward se simulará un transiente que consiste en la conexión de una resistencia en paralelo con la ya existente. El lazo de corriente se encuentra diseñado para una frecuencia natural de 300rad/s mientras que el lazo de voltaje se encuentra diseñado con una frecuencia natural de 30rad/s . Para ambos lazos el coeficiente de amortiguamiento es 0.707 .

La resistencia conectada en paralelo con el condensador cambia de 200 Ohms a 10 Ohms en $t=2\text{seg}$. La inductancia es de 12mH y la capacitancia es de 1000uF

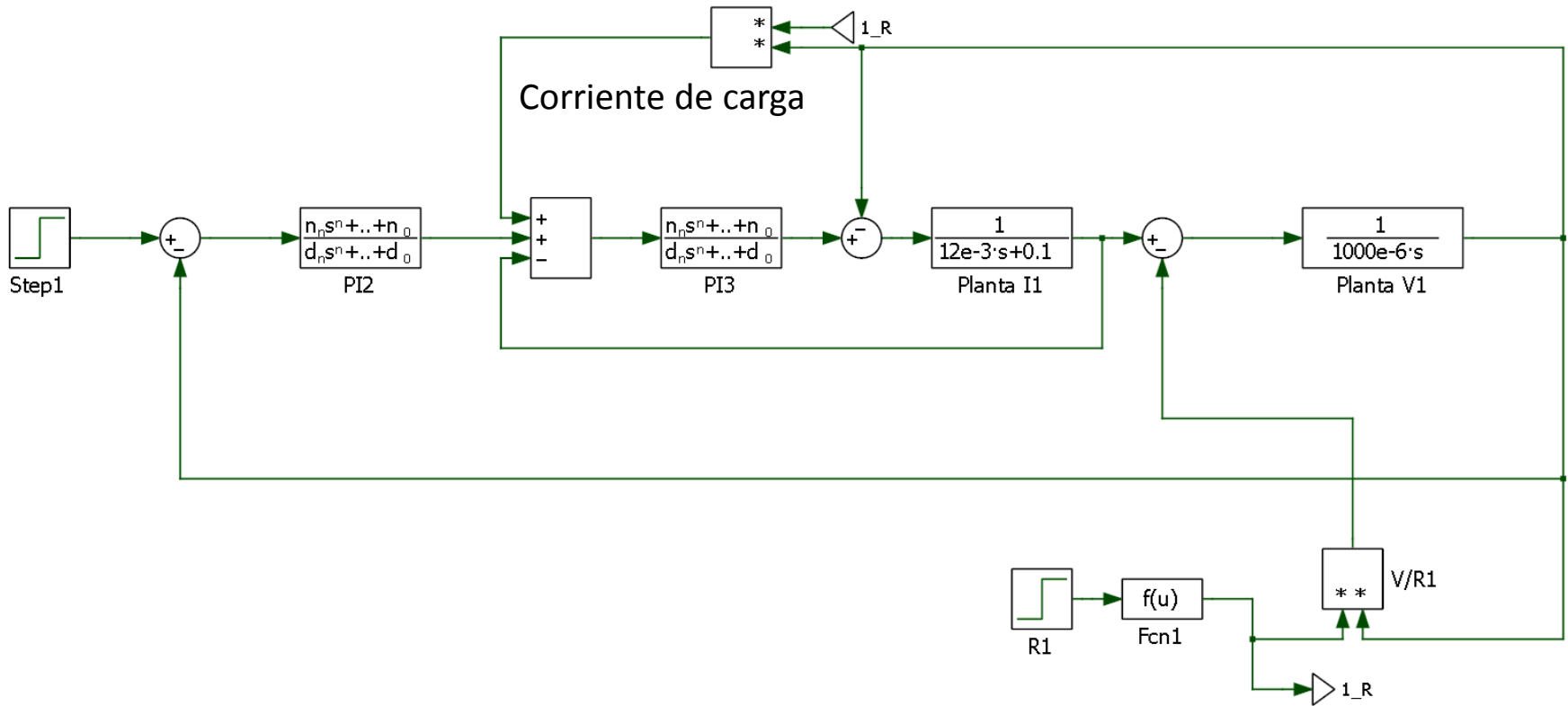
Control Feedforward

Sistema de Control sin control Feed-forward

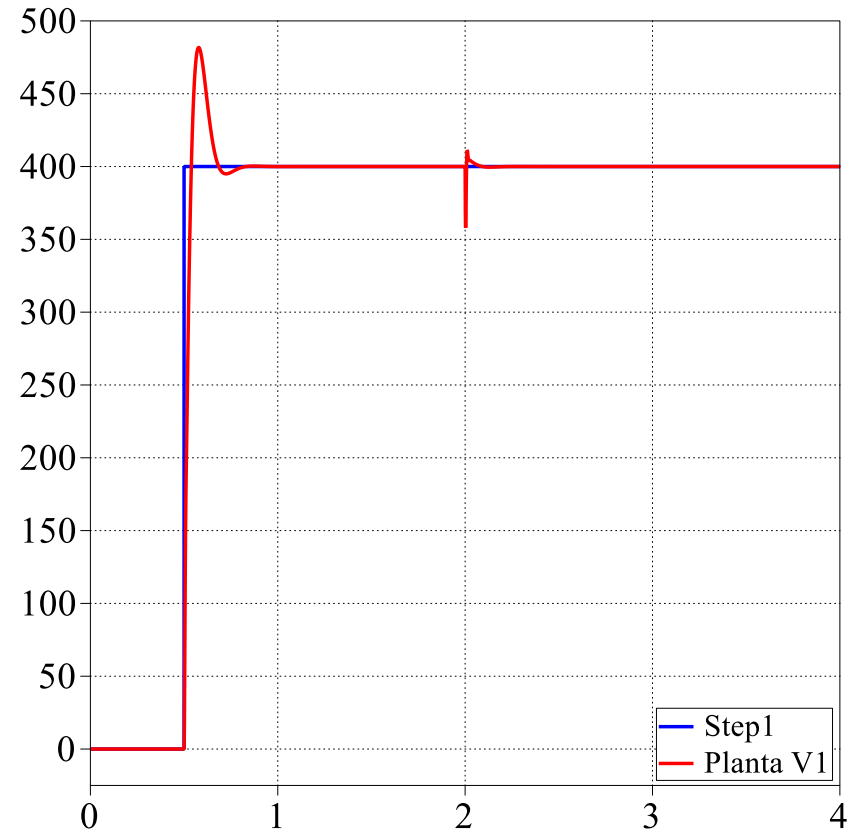
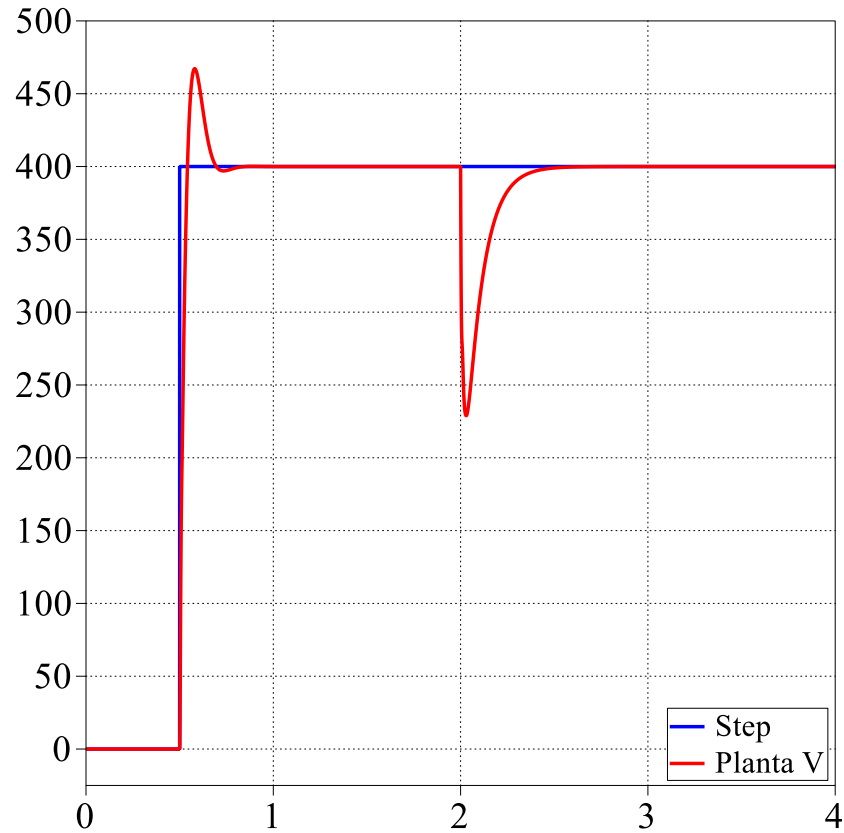


Control Feedforward

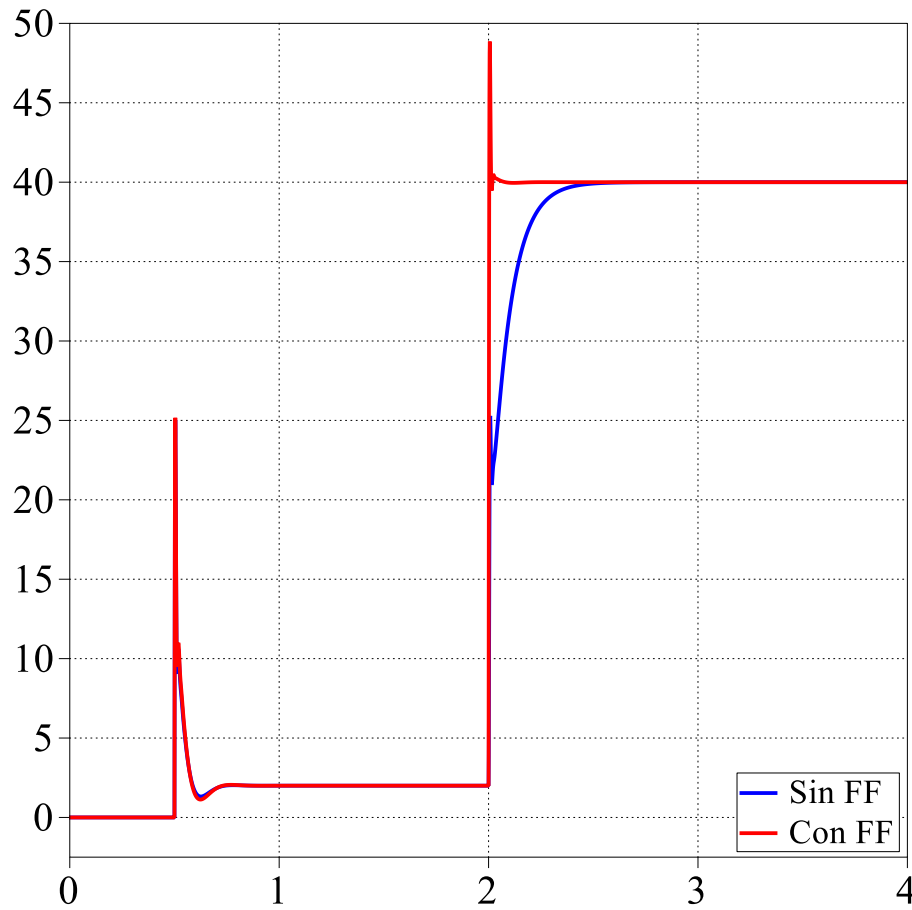
Sistema de Control considerando control Feed-forward



Control Feedforward



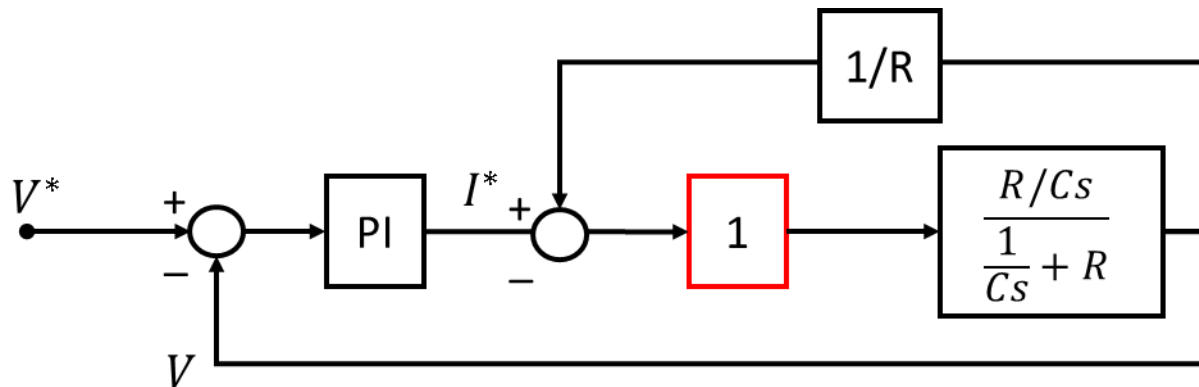
Control Feedforward



Cuando se considera FF, la corriente de carga es medida y retroalimentada al lazo de corriente. De esta forma se tiene un cambio inmediato en la referencia de corriente al producirse el escalón de carga. Cuando feed-forward no es considerado el efecto de la perturbación es controlado en su totalidad por el lento lazo de voltaje. En cambio cuando feed-forward es utilizado la mayor parte del esfuerzo de control es realizado por el rápido lazo de corriente.

Control Feedforward

Efecto del control feedforward



Calcular la función de transferencia V (salida) vs I^* (entrada)

Agenda

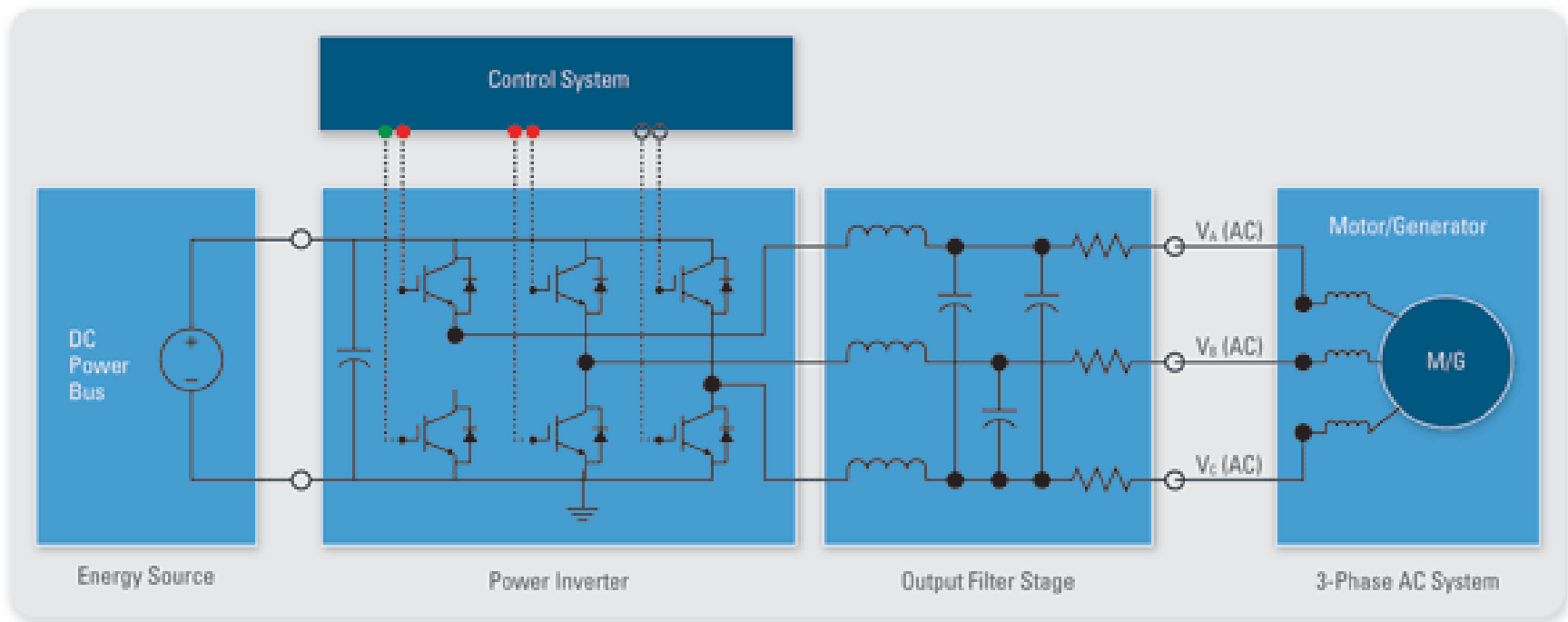


- PROGRAMACIÓN PARTE FINAL DEL CURSO
- SISTEMAS DE CONTROL EN CASCADA
- CONTROL FEED-FORWARD
- **CONTROL DIGITAL**

Control Digital



Los elementos típicos de un Sistema Digital de energía eléctrica incluyen: Fuente de energía, actuador de electrónica de potencia, filtros y cargas.

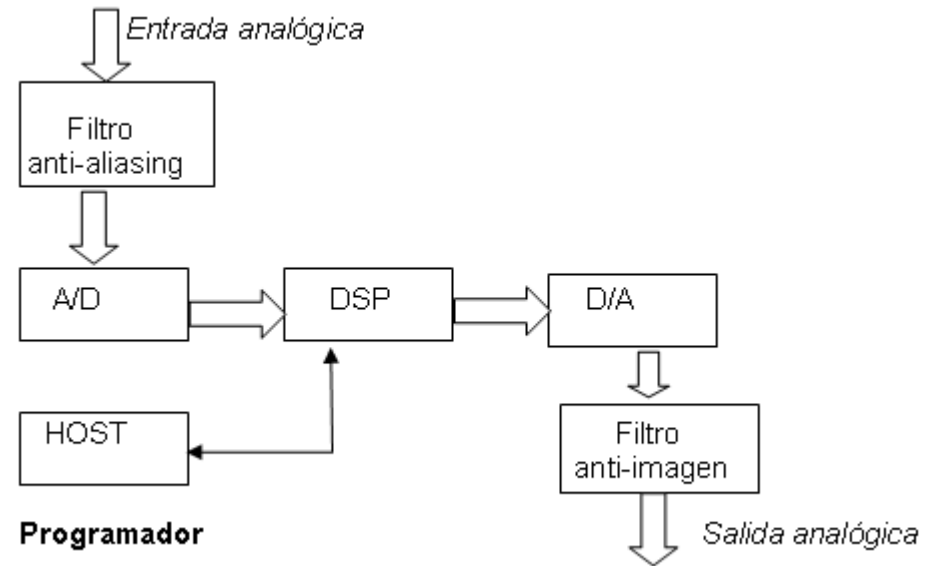


Control Digital



Control System

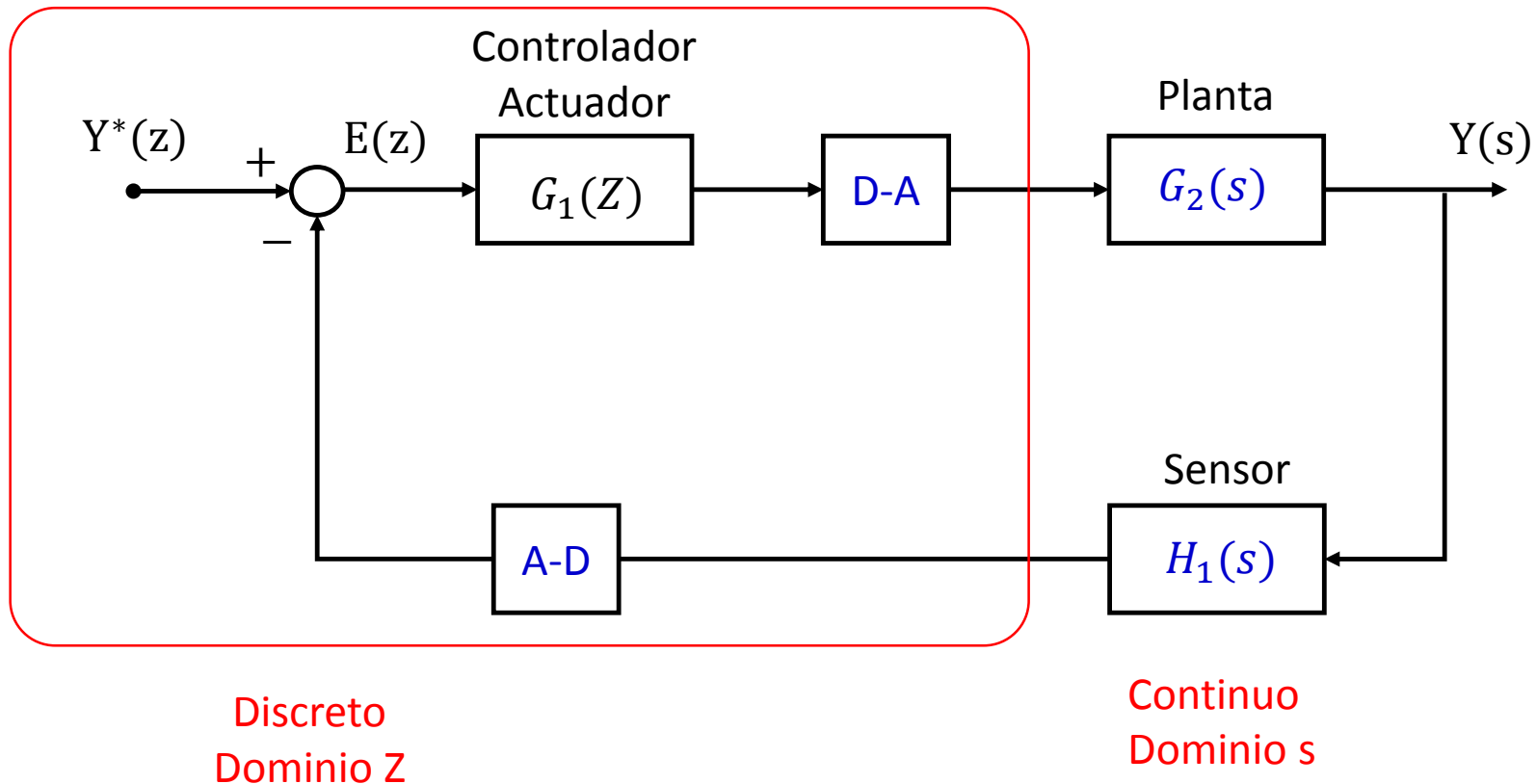
- DSP
- Microprocesadores
- Computadores
- FPGAs
- CPLDs



Control Digital



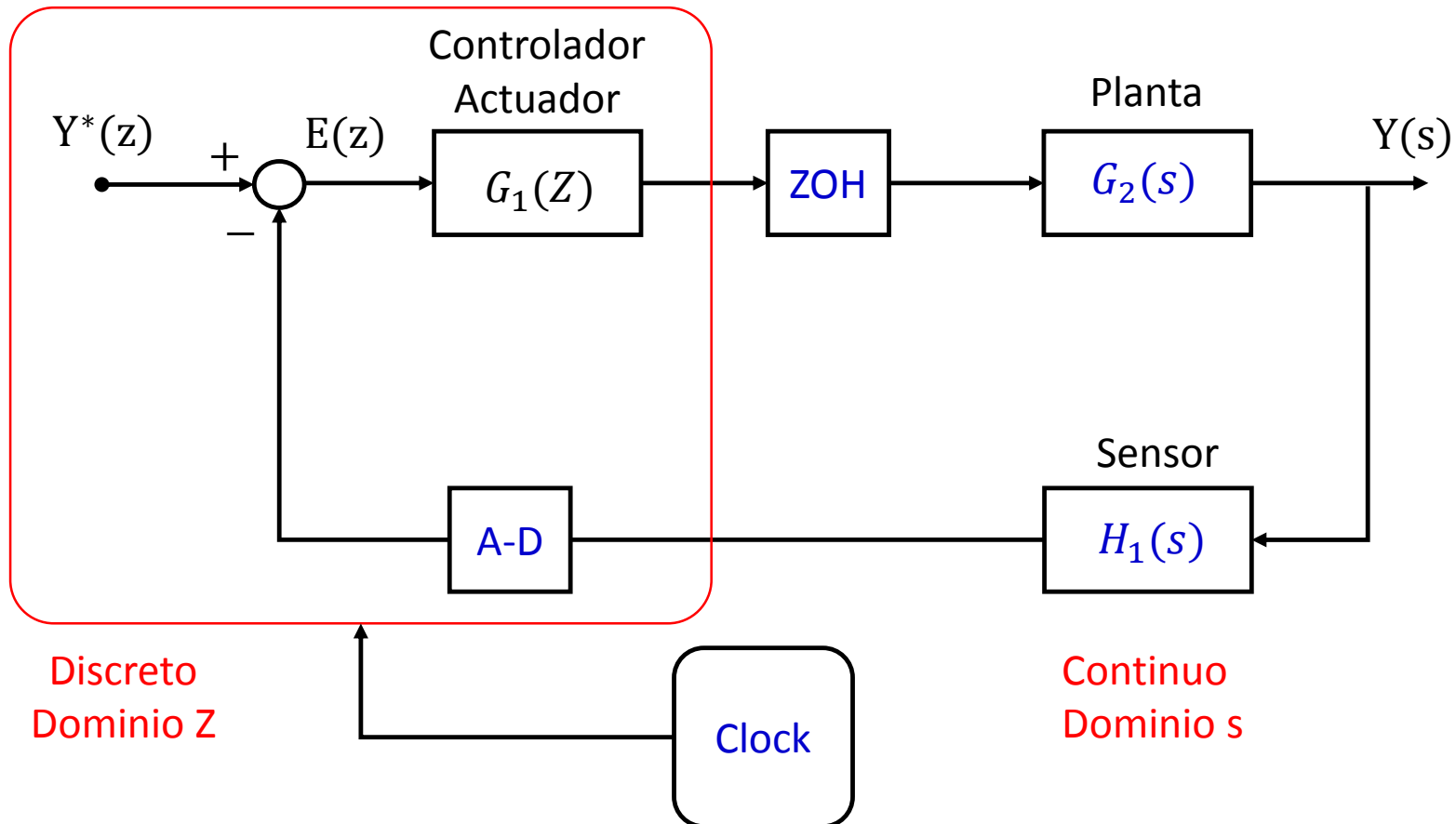
Un sistema de control digital típicamente se compone de los siguientes elementos:



Control Digital

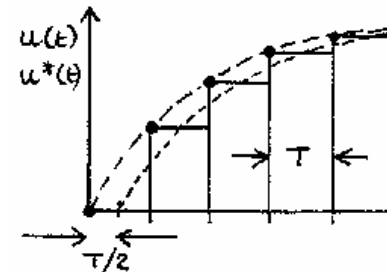
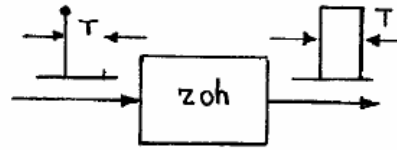


Un sistema de control digital típicamente se compone de los siguientes elementos:



Control Digital

El retentor de orden cero o reconstructor, tiene la función de convertir los pulsos a la salida del controlador digital en señales como las que se muestran en las siguientes figuras

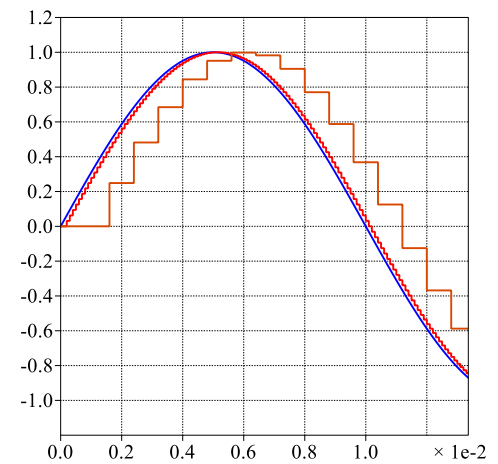
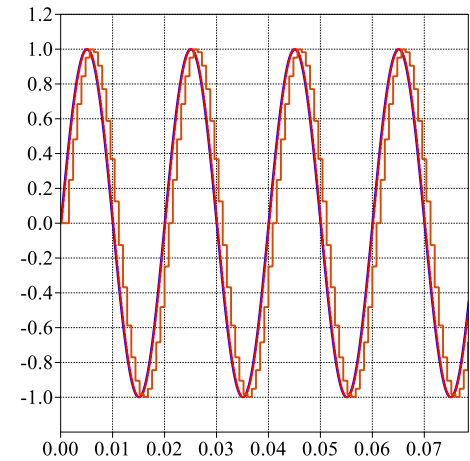
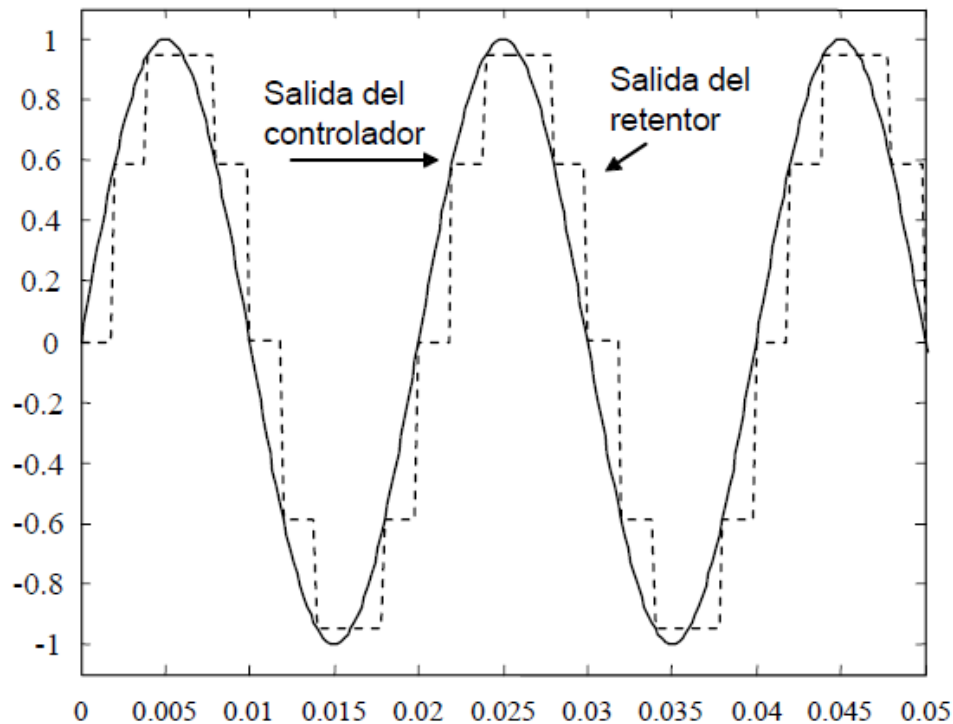


La función de transferencia del retentor de orden cero

$$G_{zoh} = \frac{1 - e^{Ts}}{s}$$

Control Digital

Efecto de la frecuencia de muestreo





Definición de transformada Z

$$z = e^{sT_s}$$

Una forma alternativa es:

$$z = \frac{e^{\frac{sT_s}{2}}}{e^{-\frac{sT_s}{2}}} \approx \frac{1 + \frac{sT_s}{2}}{1 - \frac{sT_s}{2}}$$

Por lo tanto:

$$s \approx \frac{2}{T_s} \frac{z - 1}{z + 1}$$

Reemplazando “Z” en un controlador PI

$$G_c(s) = k_p \frac{(s+a)}{s} \Rightarrow G_c(z) = k_p \frac{\left(\frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} + a\right)}{\frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}} = k_p \left(1 + \frac{aT}{2}\right) \frac{\left(z + \frac{\frac{aT}{2} - 1}{\frac{aT}{2} + 1}\right)}{z-1}$$

Se obtiene un controlador PI “discreto”

$$G_c(z) = \frac{k_{pz}(z - a_z)}{z - 1} = k_{pf} + k_{if} \frac{z}{z - 1}$$

$$k_{pf} = k_{pz}a_z, k_{if} = k_{pz}(1 - a_z)$$



Reemplazando “Z” en un controlador PI

$$G_c(s) = k_p \frac{(s+a)}{s} \Rightarrow G_c(z) = k_p \frac{\left(\frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} + a\right)}{\frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}} = k_p \left(1 + \frac{aT}{2}\right) \frac{\left(z + \frac{\frac{aT}{2} - 1}{\frac{aT}{2} + 1}\right)}{z-1}$$

Se obtiene un controlador PI “discreto”

$$G_c(z) = \frac{k_{pz}(z - a_z)}{z - 1} = k_{pf} + k_{if} \frac{z}{z - 1}$$

$$k_{pf} = k_{pz}a_z, k_{if} = k_{pz}(1 - a_z)$$



Este PI discreto se programa en cualquier plataforma (microprocesador, DSP, etc), de la siguiente manera

$$\text{Error} = y^* - y;$$

$$O_1 = O_0 + k_i * \text{Error};$$

$$U = O_1 + k_p * \text{Error};$$

If (U > MAX)

$$U = \text{MAX};$$

Elseif (U < MIN)

$$U = \text{MIN};$$

Else

$$O_0 = O_1;$$