

➤ Control óptimo:

Surgió ante la necesidad de aumentar la eficiencia de los sistemas de control aprovechando el auge y desarrollo de los sistemas computerizados. Se trata de obtener el diseño del controlador óptimo para el sistema en cuestión y en relación a las restricciones que se planteen. Este diseño es un diseño ideal que no siempre se podrá plantear en la realidad pero establece un referente para las soluciones de control que se realicen sobre dicho sistema. La desviación respecto al comportamiento óptimo viene caracterizada por los índices de funcionamiento (IF). Un índice de funcionamiento es una función que devuelve un valor con el que se puede establecer cuánto lejos dista el sistema de control real respecto del sistema de control óptimo. La forma de dicho IF es crucial ya que determina la naturaleza del control óptimo resultante, pudiendo ser lineal o no lineal así como estacionario o transitorio. En este diseño es crucial determinar las limitaciones o restricciones del sistema, normalmente sujetas a restricciones físicas o termodinámicas, así como de los dispositivos empleados, etc.

En un problema de control óptimo se parte de tres tipos de entidades: variables de estado, variables de control y parámetros del sistema. Estos últimos son parámetros que describen propiedades del sistema como, p.e, velocidades de reacción, ... Un sistema óptimo queda formulado correctamente por [Katsuhiko Ogata, 1974,p.814],[The Control Handbook, 1996, p.759]:

1. Ecuación de estado y de salida del sistema
2. Vector de control $u(t)$.
3. Restricciones del problema
4. Índice de funcionamiento (IF)
5. Parámetros del sistema.

El posible problema de control óptimo para un sistema en tiempo continuo se plantea como la determinación del vector de control $u(t)$ que lleva al sistema a un estado óptimo en un tiempo t mínimo para una planta del tipo:

$$y^{(m)}(t) + a_1 y^{(m-1)}(t) + \dots + a_m \dot{y}(t) = b_0 u^{(m)}(t) + \dots + b_{m-1} \dot{u}(t) + b_m u(t) \quad \text{Ec_ G-2}$$

un sistema lineal (SL) SISO invariante en el tiempo de orden m .

Se suele tratar de minimizar una función de la señal de error. Normalmente suele aparecer una restricción que hace referencia a la energía del sistema, que debe ser



acotada. De estas dos características se podría formar, p.e, una índice de funcionamiento de un sistema de control para un intervalo de tiempo $0 \leq t \leq T$ del tipo:

$$J = \left\{ \int_0^T [\mathbf{z}(t) - x(t)] \bullet Q(\mathbf{z}(t) - x(t)) dt \right\} + \mathbf{v} \int_0^T u(t) \bullet R \bullet u(t) dt \quad \text{Ec_ G-3}$$

para Q y R matrices definidas o semidefinidas positivas, donde la expresión entre llaves es el término referente al error mientras que el término que acompaña al multiplicador de Lagrange \mathbf{v} hace referencia a la limitación de energía, siendo $u(t)$ la señal de control para el caso particular en que $f(u(t)^2)$ sea una función energética.

Así la resolución de este sistema da lugar a un compromiso entre minimizar el error integral y minimizar la energía de control. El sistema que minimiza este índice de funcionamiento se denomina, por definición, sistema óptimo.

Cuando el sistema real no sea controlable cabe la posibilidad que no exista solución óptima posible. En este caso se trata de encontrar las condiciones de controlabilidad y observabilidad del sistema.

Para más ejemplos o aplicaciones de la optimización se remite al lector a la bibliografía [Katsuhiko Ogata, 1974, p.814-816]

En este proyecto se ha desestimado esta estrategia de control óptimo debido a:

1. Requiere de un modelo bastante detallado de la planta si se desea un óptimo significativo.
2. Tras encontrar el óptimo por métodos matemáticos complejos se puede llegar a un sistema irrealizable. En este caso no tiene interés encontrar un óptimo sino una solución suficiente al problema
3. Es difícil plantear un problema de optimización para sistemas con parámetros variables.



➤ Sistema de control con modelo de referencia:

Esta técnica se emplea con modelos matemáticos simulados en ordenador y es muy útil para sistemas complicados de controlar debido a sus no linealidades o a parámetros variables en el tiempo. Se trata que el sistema controlado siga el comportamiento de un modelo para lo que se ha de sintetizar una señal de control que haga converger la respuesta de la planta a la del modelo para una cierta señal de entrada [Katsuhiko Ogata, 1974, p.850], [The Control Handbook, 1996, p.847]:

Resumiendo esta técnica:

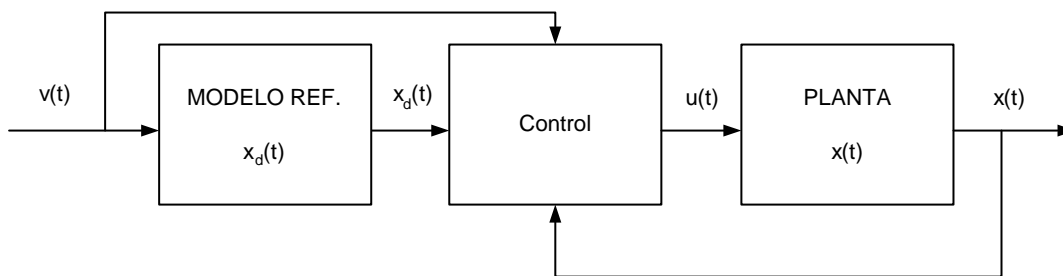


Ilustración G.I3 Esquema de sistema de control por modelo de referencia

Sea la planta un SNL del tipo

$$\dot{x}(t) = f(x, u, t) \quad \text{Ec_ G-4}$$

y sea el modelo de referencia un SL invariante y estable del tipo:

$$\dot{x}_d(t) = Ax_d(t) + Bv(t) \quad \text{Ec_ G-5}$$

donde $\dot{x}_d(t)$ es el vector de estados de dimensión n , v el vector de entradas de dimensión r , A una matriz invariante real $n \times n$ de valores propios negativos y B otra matriz invariante real $n \times r$. La condición de valores propios negativos garantiza que el modelo sea estable.

Sea la señal de error:

$$e(t) = x_d(t) - x(t) \quad \text{Ec_ G-6}$$

la diferencia entre variables de estado del modelo respecto los de la planta real.

El criterio a emplear es la de minimizar el error. Para ello se diseña una ley de control $u(t)$ que lleva el sistema a un punto de equilibrio que se cumple cuando se



minimiza la señal de error, $e(t)$. Sea $\dot{e}(t) = e(t) = 0$ el objetivo, por lo tanto. De las tres ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\dot{e}(t) = \dot{x}_d(t) - \dot{x}(t) = Ax_d(t) + Bv(t) - f(x, u, t) = Ae(t) + Ax(t) - f(x, u, t) + Bv(t) \quad \text{Ec_ G-7}$$

Una posibilidad de diseño es mediante la función de Liapunov. Sea, p.e, del tipo:

$$V(e(t)) = e^*(t)Pe(t) \xrightarrow{\frac{\partial V(e(t))}{\partial t}} \dot{V}(e(t)) = \dot{e}(t)^*Pe(t) + e(t)^*P\dot{e}(t) \quad \text{Ec_ G-8}$$

donde P es una matriz simétrica real y definida positiva. Desarrollando esta última expresión:

$$\dot{V}(e(t)) = e(t)^*(A^*P + PA)e(t) + 2M \quad \text{Ec_ G-9}$$

donde $M = e(t)^*P[Ax(t) - f(x, u, t) + Bv(t)]$ para $M(t)$ es una magnitud escalar.

Finalmente se trata de escoger $u(t)$ tal que se verifique que $V(e(t))$ sea función de Liapunov, esto es:

Sea Q una matriz simétrica real definida positiva:

1. $V(e(t)) > 0$
2. $(A^*P + PA) = -Q$ una matriz definida negativa.
3. M es un escalar negativo. Este criterio es el que ha de verificar $u(t)$

Estos dos últimos puntos hacen referencia a $\dot{V}(e(t)) < 0$. En este caso el sistema controlado será localmente estable. Si además $V(e(t)) \rightarrow \infty$ cuando $\|e(t)\| \rightarrow \infty$, es decir sistema radialmente no acotado, la estabilidad será global.

Esta estrategia se ha desestimado ya que no existe un modelo de referencia claro y definido para el comportamiento a seguir por el sistema. Otro motivo importante para desestimar esta solución, tal y como sucede con la técnica de AIMC, es que esta técnica también requeriría la programación del posible modelo de comportamiento.



➤ Control adaptativo:

Se dice que un sistema de control es adaptativo cuando continuamente y de forma autónoma mide características dinámicas de la planta comparándolas con las características deseadas y por diferenciación varía parámetros ajustables del sistema [Katsuhiko Ogata, 1974, p.855], [The Control Handbook, 1996, p.824]. Si el sistema es más complejo, a esta acción se añade un lazo de supervisión de su propia acción mediante índices de comportamiento estableciendo la corrección de la misma.

Un sistema que adapta parámetros mediante medición directa del medio no se consideraría, según esta definición, como sistema adaptativo. Así un modelo como la ilustración de se muestra a la izquierda no es adaptativo ya que se puede esquematizar como la ilustración de la derecha.

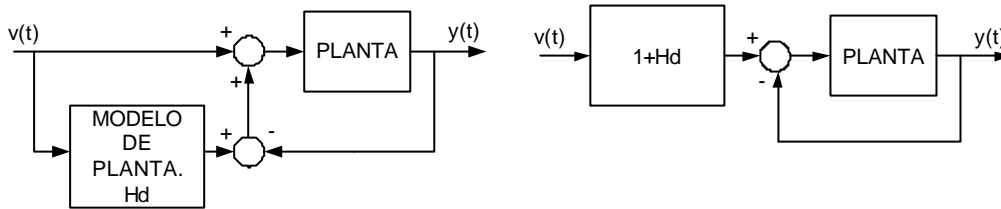


Ilustración G.I4. Ejemplo de sistema “aparentemente” adaptativo.

Se pueden resumir las características de cualquier control adaptativo según los siguientes puntos:

1. Identificación continua de características dinámicas de la planta
2. Toma de decisiones en base a la identificación de la planta
3. Decisión y acción correctora.

Un posible diagrama de control adaptativo es:

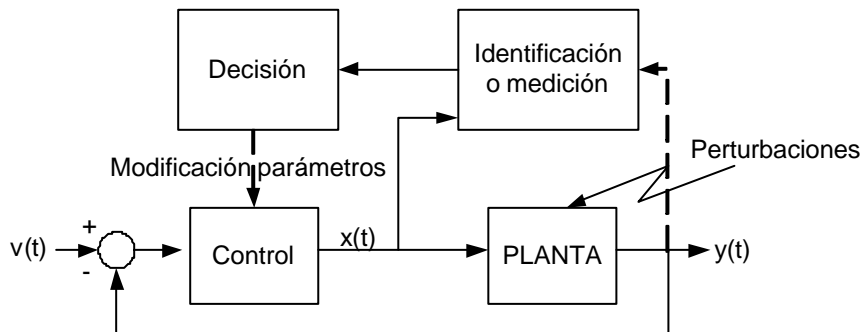


Ilustración G.I5. Esquema de control adaptativo.



Esta técnica es muy empleada en sistemas que presentan gran variabilidad. En un sistema de tiempo continuo el lazo superior o de toma de decisiones suele implementarse con elementos electrónicos o computadoras con lo que las señales son muestreadas aunque en sistemas con cambios muy rápidos este lazo se implementa en tiempo continuo.

Esta estrategia requiere de la identificación de características dinámicas de la planta. Evidentemente esta identificación no se puede realizar insertando al sistema señales escalón o impulsivas ya que distorsionarían el sistema y podrían provocar inestabilidades. Para dicha identificación se utilizan señales estocásticas que mediante correlación cruzada se pueden analizar a la salida de la planta para así determinar la dinámica de la misma. Estas señales se distribuyen en un ancho de frecuencia tal que minimice el efecto sobre el sistema. Esta técnica se emplea en el control adaptativo de tipo explícito.

Existe otro tipo de control adaptativo, denominado implícito. En dicho tipo de control la planta se encuentra bastante determinada y es bien conocida con lo que no se requieren de señales de identificación estocásticas. Únicamente midiendo algún parámetro o índice de comportamiento se puede determinar la dinámica de planta. En el caso particular de poder identificar la dinámica por un índice de comportamiento el sistema se denomina adaptativo optimizante.

Una vez tomada una decisión se actúa sobre el controlador. En este ámbito caben dos posibilidades:

1. modificación de parámetro del control: la acción ajusta directamente los parámetros del controlador.
2. síntesis de señal de control: la acción consiste en sintetizar la señal de control óptima junto con el índice de comportamiento y la respuesta transitoria deseada.

No se ha empleado el control adaptativo en este sistema debido a que la técnica de “gain scheduling” es bastante más simple, requiere de menos recursos en el sistema distribuido y es el que se emplea con mayor difusión en la industria química para este tipo de sistemas recirculados.



➤ Control neuronal;

El control neuronal trata del diseño de un sistema de control capaz de reconocer patrones y llevar a cabo un proceso de aprendizaje. Un control neuronal se reduce a una función no lineal de varias variables y unos procesos de aprendizaje. Estas funciones disponen de parámetros o pesos que no son más que ponderaciones de los valores del conjunto de variables de la función. [The Control Handbook, 1996, p.1017]

Para un esquema de una neurona, tal y como muestra la siguiente ilustración, se puede establecer la siguiente función genérica:

$$y = f\left(\sum_{k=1}^m w_k \bullet u_k\right) \tag{Ec_ G-10}$$

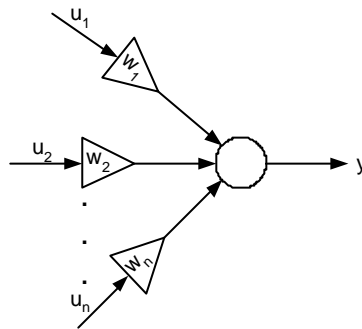


Ilustración G.I-6. Esquema de una neurona simple.

Los pesos (w_i) indican con qué grado incide cada variable en la salida de la célula. Estos pesos son los que se deben calcular para un comportamiento determinado del controlador.

La función f que se ha planteado en la anterior ecuación es bien conocida y responde a una función sigmoide, cuya expresión es:

$$f(x) = \frac{e^{ax} - e^{-ax}}{e^{ax} + e^{-ax}} \tag{Ec_ G-11}$$

donde a es un parámetro.

Existen varias opciones para formar redes neuronales, una de ellas da lugar a las denominadas redes neuronales en “feedforward”. Este tipo de red consiste en organizar



neuronas en capas conectadas entre sí de manera que las salidas de las neuronas de una capa son entradas de las neuronas de la capa siguiente. De esta manera una red neuronal se asemeja a una función no lineal de varias variables.

Finalmente se trata el proceso de aprendizaje de una red. Este proceso consiste en aislar la red e ir insertándoles señales de entrada así como señales de salidas deseadas. Con estas señales la red va reajustando sus pesos hasta que se consigue una red que responda como se desea para la variedad de señales que se ha introducido.

En este proyecto se ha desestimado emplear este tipo de control por varios motivos:

1. El proceso dispone de muchos puntos de equilibrio así como de perturbaciones debidos a cualquier alteración en planta, estos últimos no estimables en su totalidad. Por esto no es práctico realizar una red neuronal ya que el proceso de aprendizaje de la misma no está bien definido.

2. En plantas químicas y, más concretamente en procesos recirculados, se emplean técnicas más simples y de menor coste de recursos como la técnica de “gain scheduling”.

3. Dificultad de implementar una red neuronal en el sistema distribuido Rosemount de la empresa.

➤ Control difuso;

La señal de entrada de un control difuso puede ser una señal continua o discreta. Esta señal se ha de traducir en las denominadas como variables lingüísticas, mediante un proceso de difusión. El número de estas variables suele ser pequeño, del tipo: mayor, menor, menor o igual, igual, positivo, negativo,... . Estas variables se emplean por varias funciones que, siguiendo unas reglas lógicas, establecen un valor de salida, también una variable lingüística. Estas funciones se representan como conjuntos difusos dando lugar a solapamientos en sus valores. Finalmente se establece una regla para, en función del valor que devuelva cada una de estas funciones, establecer una única salida del sistema. Esta salida del sistema pasa por un proceso de definición por el que vuelve a recuperar



un valor no lingüístico. Este proceso de definición se puede hacer por valores medios con lo que se aplica [The Control Handbook, 1996, p.1001]:

$$x_0 = \frac{\int x f_A(x) dx}{\int f_A(x) dx} \quad \text{Ec_ G-12}$$

para una variable lingüística A que pertenezca a la función $f_A(x)$.

Este tipo de control se tuvo en consideración al inicio del proyecto pero finalmente se optó por otra solución.

G.II Control en cascada

El diseño de un sistema de control en cascada consiste, a grandes rasgos, en encadenar diseños de controladores más simples. Esta técnica es ampliamente empleada en la industria química debido a la lentitud de la mayoría de los procesos que en ella tienen lugar. Esta técnica es muy útil para procesos que presentan elevados tiempos muertos y/o constantes de tiempo, es decir, sistemas de dinámica lenta [F.G.Shiskey, 1979, p139].

Con esta técnica se establecen más de un lazo de realimentación o "feedback". Normalmente esta técnica consiste en que los controladores incluidos en los lazos de realimentación más internos reaccionen de manera más rápida ante cambios en el sistema mediante el tratamiento de señales que varían más rápidamente en el interior del mismo. Así se puede llegar a conseguir que los lazos feedback más externos apenas detecten cambios en el sistema con lo que se mejora el control global. Si no se empleara esta técnica, una variación detectable de una variable de proceso que pueda variar rápidamente no sería corregida por un controlador de lazo feedback interno. La consecuencia de la variación rápida de esta variable interna sería la que podría captar el controlador de lazo feedback externo con lo que debería actuar sobre la entrada del sistema. El problema es que cuanto más lenta es la dinámica del lazo externo más tarda el controlador en reaccionar con lo que el sistema puede devenir incluso inestable.

Normalmente se deben cumplir unos requisitos para utilizar esta técnica:



1. Existir una relación clara entre la variable primaria y secundaria mesurables.
2. Las variaciones más significativas deben quedar comprendidas en los lazos feedback internos
3. Los lazos internos han de ser de respuesta más rápida que los externos.
4. Debe ser posible implementar controladores de ganancia elevada en los lazos feedback más internos.

Un esquema de control en cascada típico sería el siguiente:

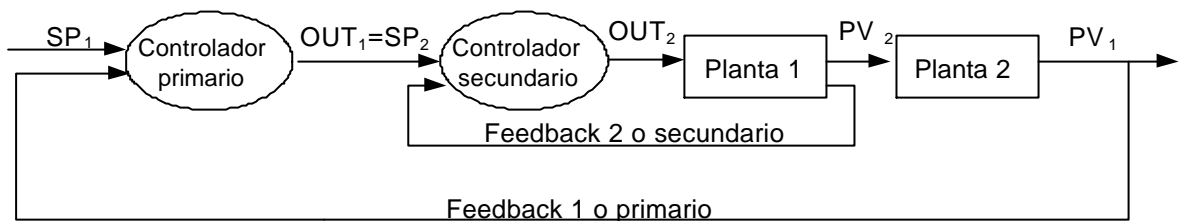


Ilustración G.II-1. Esquema de un diseño de control en cascada

Esta técnica se ha empleado en el diseño del sistema de control de planta.

G.III Control por “feedforward”

Esta técnica se puede emplear cuando se estudia un sistema cuyas perturbaciones son medibles. Se trata de eliminar sus efectos para minimizar el error que se calcula en un lazo “feedback”. En resumen, se trata de avanzar la acción de control ya que un lazo “feedback” proporciona una acción a posteriori, siendo incapaz de avanzar a los cambios del sistema [The Control Handbook, 1996, p.208,p.825].

Los requisitos básicos para utilizar control por “feedforward” son dos:

1. Señal de perturbación medible o estimable



2. Exista un modelo matemático del proceso.

Este es el caso que ocupa a este proyecto por lo que se emplea este control “feedforward”.

Un esquema de control por “feedforward” es el siguiente:

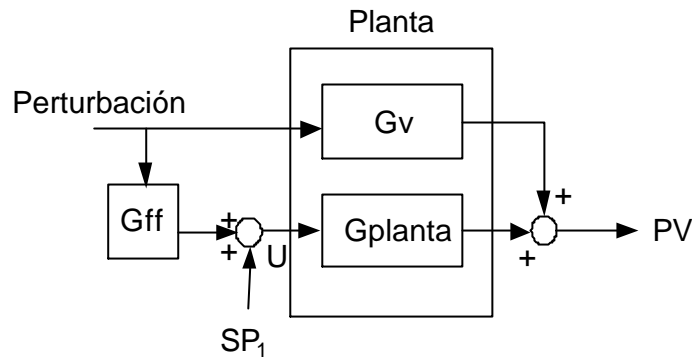


Ilustración G.III-1. Esquema de control Feedback.

Las ecuaciones de este proceso se describen, utilizando transformada de Laplace:

$$Y(s) = Gplanta(s)U(s) + Gv(s)P(s) \tag{Ec_ G-13}$$

$$Y(s) = Gplanta(s) \cdot SP_1(s) + Gplanta(s) \cdot Gff(s) \cdot P(s) + Gv(s) \cdot P(s) \tag{Ec_ G-14}$$

siendo $Y(s)$ la transformada de Laplace de la salida $PV(t)$, $U(s)$ la transformada de Laplace de la entrada al bloque $Gplanta$, $Gplanta(s)$ la función de transferencia que relaciona la variable de control con la salida, $Gv(s)$ la función de transferencia de la perturbación de planta y $P(s)$ la transformada de Laplace de la perturbación se ha supuesto no existe el bloque Gff , bloque de “feedforward”.

Con esta técnica se desea eliminar el efecto de la perturbación $P(s)$ sobre la salida $Y(s)$:

$$Y(s) = Gplanta(s) \cdot SP_1(s) \tag{Ec_ G-15}$$

$$Gplanta(s) \cdot Gff(s) \cdot P(s) = -Gv(s) \cdot P(s) \tag{Ec_ G-16}$$

con lo que se obtiene la función de transferencia para el controlador:

$$Gff(s) = -\frac{Gv(s)}{Gplanta(s)} \tag{Ec_ G-17}$$



G.IV Estrategias “gain scheduling” (GS)

El diseño por GS de un controlador es una técnica extendida en problemas de procesos no lineales, procesos con variaciones en el tiempo o sistemas que simplemente planteen alguna variación en el controlador según el punto de funcionamiento [The Control handbook, 1996, p.393,p. 824].

Normalmente para sistemas que requieren variaciones en los parámetros de los controladores según varíe el punto de funcionamiento del sistema, si existe la posibilidad de medir una variable del sistema que sea significativa, es decir, se puede establecer una variable de “scheduling” (VS), entonces esta estrategia es la más adecuada debido a su simplicidad y su robustez. Sin embargo, si dicha variable no es asumible no se puede aplicar esta técnica debiendo recurrir a otras alternativas de control.

Una forma de proceder muy extendida consiste en aproximar el SNL en varios puntos de funcionamiento por sistemas lineales (SL). Posteriormente se diseñan generadores residuales para los puntos linealizados localmente. Finalmente se aplica una relación para la combinación de dichos generadores residuales para dar lugar a un generador residual no lineal.

Como se ha mencionado se partirá de un SNL y se utilizará la técnica de GS para la obtención de, en este caso, el controlador primario. La ventaja de esta estrategia es que permite el diseño de controladores simples, diseñados para un SL que no es más que el sistema que se obtiene de la linealización entorno a un punto de trabajo del SNL. La peculiaridad de dicho SL es que incluye algunos parámetros o VS que, para dicho punto de funcionamiento escogido, se consideran como invariantes.

Tras el diseño del controlador mediante la determinación de sus parámetros para dicho punto de funcionamiento, se generaliza dicha VS para los distintos puntos de funcionamiento posibles.

La estrategia de GS es muy empleada en sistemas con parámetros variables como por ejemplo los sistemas “lineal parameter varying” (LPV) del tipo:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), \mathbf{I}) \\ \mathbf{I} &= \mathbf{I}(x(t), u(t)) \end{aligned}$$

o lo que sería lo mismo:

Ec_ G-18



$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\mathbf{I})x(t) + B(\mathbf{I})u(t) \\ y(t) &= C(\mathbf{I})x(t) + D(\mathbf{I})u(t) \\ \mathbf{I} &= \mathbf{I}(x(t), u(t)) \end{aligned} \quad \text{Ec_ G-19}$$

para un sistema SISO en tiempo continuo como es el caso.

Como se puede observar estos sistemas se caracterizan por incluir un parámetro variable en el tiempo. Dicho parámetro, λ en las expresiones anteriores, se denomina variable de “scheduling” (VS) .

Existen diversas técnicas de GS de las que se van a comentar dos de forma breve.

La primera consiste en determinar varios puntos de funcionamiento del sistema, puntos de referencia, y para cada uno de estos linealizar el SNL. Para cada sistema linealizado se determinan controladores mediante técnicas para SL de forma simple. Finalmente se establece una tabla de puntos de referencia y el controlador establecido para cada uno. La forma de actuar es la de salto entre puntos de referencia con lo que, según el estado de funcionamiento del sistema y atendiendo a la VS, se determina cual es el punto de referencia más próximo y el controlador pasa a tomar los valores de configuración del controlador diseñado para dicho punto. Existen varias técnicas para escoger dicho punto, como p.e.: utilización de residuales o utilización de índices de funcionamiento.

Una función residual se utiliza para detectar disfunciones del sistema a modo de diagnosis. Para un sistema descrito según la Ec_ G-19 una función residual lineal podría ser:

$$r = \frac{A(p) \bullet y(t) + B(p) \bullet u(t)}{C(p)} \quad \text{Ec_ G-20}$$

donde A , B y C son polinomiales del tipo:

$$X(p) = I_m \bullet p^m + \dots + I_1 \bullet p + I_0 = \sum_{b=1}^m I_b \bullet p^b \quad \text{Ec_ G-21}$$



para $X \in [A, B, C]$ y siendo p el denominado como operador derivativo [Marcus Klein & Lars Nielsen]

Esta estrategia es interesante para sistemas con pocos puntos de funcionamiento aunque introduce una ambigüedad importante en el transitorio que se genera por el cambio de punto de referencia. En dicho transitorio un sistema estable podría llegar a devenir inestable.

En el caso de este proyecto el sistema tiene infinitos puntos de funcionamiento ya que en realidad se dispone de un rango continuo de los mismos. Esto, añadido a la peligrosidad de producir alguna inestabilidad en el sistema, desaconseja emplear esta metodología. Un ejemplo de aplicación de esta técnica según lo planteado se puede encontrar en [Tesis doctoral, p.61]

La segunda estrategia que se mencionará es una evolución de la anteriormente planteada. Se trata de generalizar la metodología para cualquier punto de equilibrio, planteando una evolución continua en el tiempo. Con esto se evitan los transitorios en el salto entre puntos de referencia así como las oscilaciones y posibles inestabilidades que pudieran conllevar estos saltos.

Se trata de definir una ley continua que varíe los parámetros del controlador en función de la variación continua en el tiempo de la VS. Existen varias soluciones posibles como la utilización de funciones residuales continuas, índices de funcionamiento continuos,... .En este proyecto se utilizará esta segunda estrategia de GS aunque la ley continua que se planteará no obedecerá a funciones residuales.

En el caso particular del controlador primario, controlador de la sala de células, se empleará un diseño GS unido a un diseño de "feedforward" debido al conocimiento de parte de las perturbaciones y para suplir de alguna manera la lentitud de dicha sala.



G.V Utilización de PI y PID

En el proyecto se ha implementado un controlador primario tipo PID mientras que para el controlador secundario se ha diseñado uno del tipo PI.

En este segundo caso se ha omitido la parte derivativa del PID debido a que no se aprecia ninguna mejora significativa en el sistema controlado simulado en Simulink. La omisión de este término es frecuente en muchas ocasiones, especialmente en sistemas cuya dinámica se asemeje a la de un sistema de primer orden. La omisión de la parte derivativa permite un proceso de calibración de parámetros, “tuning”, mucho más sencilla ya que la existencia de la parte derivativa conlleva oscilaciones así como un mayor sensibilidad del sistema a perturbaciones o ruido.

En una solución PI como la propuesta para el secundario, se puede destacar que la función de la parte P, proporcional, permite una respuesta adecuada del sistema en transitorios mientras que la parte I, integral, permite minimizar el “offset” o error estático del sistema.

En una solución PID como la propuesta para el primario, se justifica la necesidad de la parte D, derivativa, en base a la lenta dinámica de la sala de células objeto de control. En efecto, la parte derivativa es aconsejable en aquellos sistemas de dinámica lenta ya que permite aumentar la velocidad de respuesta. Sin embargo, es totalmente contraproducente en sistemas de dinámica rápida debido a que un salto tipo step pronunciado o un efecto impulsional en el sistema comporta que la parte derivativa se dispare, al reaccionar proporcionalmente con la pendiente de evolución de la señal de “setpoint”.

Para procesos de orden mayor o que no se puedan reducir de orden, es aconsejable la utilización de estrategias más predictivas más complejas que la simple inclusión de una parte derivativa al controlador, como p.e, predictor de Smith, ...

Tampoco tiene sentido la utilización de soluciones PID en sistemas oscilatorios salvo en aquellos que tengan una oscilación predominante [K.Aström & T.Hägglund, 1995, p.66]



H. "datasheet" de intercambiadores de calor tipo S-302

AL MADRID
ED. 1

PAG

MEDIOS	->MEDIA I	=>MEDIA II
CAUDAL		
PROG. DE TEMP.	A	A
CAIDA DE PRESION		
 VOLUMEN DE LIQUIDO	 546.0 L	 546.0 L
LOCALIZ. DE CONEXIONES		
ENTRADA	S1	S3
SALIDA	S2	S4
 MATERIAL DE LAS CONEX.		
 MATERIAL DE LAS PLACAS	 TITANIUM	
ESPESOR	0.6 MM	
ACABADO		
 MATERIAL DE LAS JUNTAS	 BUTILO	
 SUPERF. DE TRANSMISION DE CALOR	 157.21 M2	 G
 X AGRUPAMIENTO DE PLACAS	 71 AM202 + 29 AM201	 + 1 (
	<hr style="width: 100%; border: 0.5px solid black;"/>	
	100 AM202	





OFERTA Nº: 600.3315 Rev.2
ESPECIFICACION TECNICA ET-1
 Cliente : SOLVAY
 Proyecto : Ref. SALMUERA
 Servicio :

Fecha : 6/11/98
 Realizado : EE
 Planta : MARTORELL
 Item : M20M-330 m3/h

Intercambiador de Calor de Placas Alfa Laval - Modelo: **M20M-FM**

		Lado Caliente	Lado Frío
Fluido		NaCl	Water
Caudal volumétrico	m ³ /h	330.0	200.0
Temperatura - Entrada	°C	65.0	33.0
- Salida	°C	60.0	55.1
Pérdida de carga	mca	4.88	1.57
Dirección relativa de los fluidos		Contracorriente	

Densidad	kg/m ³	1164	988.3
Calor específico	kcal/kg.°C	0.796	0.997
Conductividad térmica	kcal/m.h.°C	0.533	0.548
Viscosidad - Entrada	cP	0.856	0.751
- Salida	cP	1.058	0.494

Calor intercambiado	Mcal/h	4571
L.M.T.D.	K	12.5
C.G.T.C. - Limpio	kcal/m ² .h.°C	3615
- Servicio	kcal/m ² .h.°C	3286

Area efectiva	m ²	111.4
Número de placas		133
Material de placas		Titanium
Tipo de juntas		CLIP-ON
Material de juntas	EPDM	
Tipo de conexiones		DIN
Material de conexiones	Titanium	
Dimension de conexiones	mm	200/200
Conexiónado (Entrada --> Salida)		S1 -> S2

Código de recipientes a presión		SA
Presión Diseño / Prueba	atg	5,1/6,6
Temperatura de diseño	°C	65

Dimensiones (Largo (C)/Ancho/Alto)	mm	2070 / 780 / 2160
Volumen de líquido	dm ³	242.2
Peso vacío	kg	1612



Alfa Laval S.A.
 Antonio de Gabezón 27
 28034 Madrid.

Madrid
 Tel. 91 375 06 00
 Fax. 91 356 17 87

Barcelona
 Tel. 93 225 04 80
 Fax. 93 225 05 05

Jáen
 Tel. 953 290 093
 Fax. 952 291 707

Sevilla
 Tel. 05 425 24 59
 Fax. 95 489 82 42

N.I.F. ES A23081602 R.M. Madrid t:4774 158 t:1276 83.ª



