

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES



CONTROL DE ESPESOR EN EL PROCESO
DEL GALVANIZADO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA
ESPECIALIDAD EN CONTROL

PRESENTA:

AURORA RAMON CORDOVA

CD. UNIVERSITARIA

Marzo de 1993

TM

Z5853

.M2

FIME

1993

R3



1020070659

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES



CONTROL DE ESPESOR EN EL PROCESO
DEL GALVANIZADO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA
ESPECIALIDAD EN CONTROL

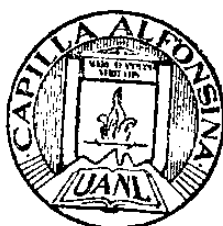
PRESENTA

AURORA RAMON CORDOVA

MONTERREY, N.L.

MARZO, 1993

TM
ZEBER
NL
FUIE
1



FONDO TESIS

24278

**CONTROL DE ESPESOR EN EL PROCESO
DEL GALVANIZADO**

Los miembros del comité aprueban la Tesis
de Maestría de Aurora Ramón Córdova.

Joaquín Collado Moctezuma.

Presidente y Asesor

Edgar Nelson Sanchez Camperos.

Secretario

Jesús de León Morales.

Vocal

Dedicado a

A MIS PADRES

**Aurora Córdova Martínez.
José Heriberto Ramón Salas.**

Por su cariño y comprensión

A MIS HERMANOS

Mary Thelma

Michel Ivone

Mónica

Marga Soledad

Laura Lamar

José Luis

Zoila Esmeralda

Por su cariño y comprensión

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer profundamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT por el apoyo brindado dentro del Programa Doctoral, que hizo posible la culminación de este trabajo como parte de mis metas trazadas.

De igual manera mi agradecimiento a la Universidad Autónoma de Nuevo León así como a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Al Asesor de Tesis Dr. Joaquín Collado M. por la intención para lograr el término de este trabajo, motivación y sugerencias que le dieron el giro adecuado.

Al Dr. Edgar N. Sanchez C. y al Dr. Jesús de León M. por los comentarios sugeridos a esta Tesis.

Al Dr. Oscar Flores Rosales.

Quiero agradecer a todas las personas del Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica, profesores, compañeros de clase y demás por el apoyo que me brindaron a lo largo del trayecto.

A mis amigos por haberme acompañado siempre a lo largo de mi vida como estudiante.

Marzo, 1993.

RESUMEN

CONTROL DEL GROSOR EN EL GALVANIZADO

El presente trabajo enfoca su estudio en disminuir las variaciones de tipo aditivo que se presentan en el proceso de Galvanizado.

El modelo que proponemos para efectos de control consta de dos partes: la primera describe la dinámica de una de las caras en el Galvanizado; consiste en la relación de la masa depositada y las variables: velocidad, presión y distancia. La ecuación que describe esta masa depositada es no lineal. La segunda parte representa el retardo del sistema.

Con respecto a la no linealidad, se propuso una linealización entrada/salida por retroalimentación de estado. (debido a que esta no linealidad se encuentra a la salida del primer bloque.

Referente al retardo se logró encontrar una mejor aproximación de Padé a la normalmente usada, con un error menor en el sentido de sus normas 1, 2 ó ∞ para aproximaciones de orden dos o mayor.

En la actualidad, el problema de Control para el proceso de Galvanizado, no está resuelto satisfactoriamente, la importancia de este trabajo es el control de grosor del Zinc en lazo cerrado, ya que toma incertidumbres que en lazo abierto serían imposibles de controlar.

INDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO

1.	INTRODUCCION.	1
	<i>1.1 Formulación del Problema.</i>	3
2.	DESCRIPCION DEL GALVANIZADO.	5
3.	FORMULACION MATEMATICA.	14
4.	SIMPLIFICACIONES DEL MODELO.	22
	<i>4.1 Linealización E/S por retroalimentación de E.</i>	23
	<i>4.2 Aproximación del Retardo.</i>	33
5.	ESQUEMAS DE CONTROL Y SIMULACIONES.	40
	<i>5.1 PID</i>	41
	<i>5.2 Predictor de Smith.</i>	42
	<i>5.2.1 Aproximación del Retardo.</i>	43
	<i>5.2.2 Retardo puro.</i>	47
	<i>5.3 Asignación de polos.</i>	48
	<i>5.3.1 Caso continuo.</i>	48
	<i>5.3.2 Caso discreto.</i>	51
6.	CONCLUSIONES.	55
	APENDICE.	57
	REFERENCIAS.	83

LISTA DE FIGURAS

1.1	Descripción del proceso de galvanizado en caliente	2
2.1	Descripción de la línea de galvanizado	13
3.1	Boquillas de aire	16
3.2	Configuración de tres rodillos	18
3.3	Descripción del modelo utilizado	20
4.1	Aproximación de Padé primer orden —orden relativo 0 y 1—	36
4.2	Aproximación de Padé tercer orden —orden relativo 0 y 1—	37
4.3	Aproximación de Padé quinto orden —orden relativo 0 y 1—	38
5.1	Descripción de un sistema con retardo	41
5.2	Esquema del Predictor de Smith	42
5.3	Esquema con el modelo linealizado tipo Predictor de Smith	45
5.4	Masa depositada para el esquema 5.3 con aproximación	46
5.5	Ruido blanco inyectado	46
5.6	Señal de referencia	47
5.7	Masa depositada para el esquema 5.3 con retardo puro	48
5.8	Masa depositada para el esquema 5.9 con aproximación	49
5.9	Esquema con el modelo linealizado con k	50
5.10	Masa depositada para el esquema 5.12 con retardo puro	51
5.11	Ruido blanco inyectado —discreto—	52
5.12	Esquema con el modelo linealizado y retardo discretizado	53

LISTA DE FIGURAS (continuación)

A.1	Gráfica del error con respecto Aprox. de Padé primer orden —0.	59
A.2	Gráfica del error con respecto Aprox. de Padé primer orden —1.	60
A.3	Gráfica del error con respecto Aprox. de Padé tercer orden —0.	62
A.4	Gráfica del error con respecto Aprox. de Padé tercer orden —1.	64
A.5	Gráfica del error con respecto Aprox. de Padé quinto orden —0.	66
A.6	Gráfica del error con respecto Aprox. de Padé quinto orden —1.	68
A.7	Aproximación de Padé sexto orden —orden relativo 0 y 1—	70
A.8	Aproximación de Padé séptimo orden —orden relativo 0 y 1—	70
A.9	Aproximación de Padé octavo orden —orden relativo 0 y 1—	71
A.10	Aproximación de Padé noveno orden —orden relativo 0 y 1—	71

CAPITULO 1

INTRODUCCION

En la actualidad el problema de control en la capa de Zinc, no está resuelto satisfactoriamente. Trabajos previos como el de Landau [6] el cual reporta: un modelo linealizado alrededor de un punto de operación, identifica parámetros del modelo discretizado para distintas velocidades de la lámina, tales parámetros son: ganancia estado estacionario, magnitud del retardo y dos polos. Utiliza un controlador adaptable en lazo abierto que es hecho con respecto a la velocidad de la lámina, distancia entre cuchillas de aire y la lámina. Por otro lado el rango de la velocidad y de la distancia, se dividen en tres regiones, las cuales dan un total de 9 puntos de operación, donde el operador manualmente cambia a cada punto de operación, dependiendo de la velocidad y grosor de la lámina.

Estudios como el de Jacobs [7], utiliza un modelo unidimensional, en el cual identifica la ganancia, utiliza un controlador adaptable en el que varía un parámetro.

El objetivo de este trabajo es el de disminuir la variación ante perturbaciones aditivas en el proceso de Galvanizado.

Pasaremos a mencionar la parte principal del proceso de Galvanizado donde se realiza el control de la capa de Zinc para posteriormente formular el problema del Galvanizado.

Los componentes son los siguientes: paila o baño de Zinc, rodillo del fondo, primer rodillo después de la salida del baño, boquillas de aire y medidor de la masa depositada de Zinc, que se encuentra mas allá del primer rodillo.

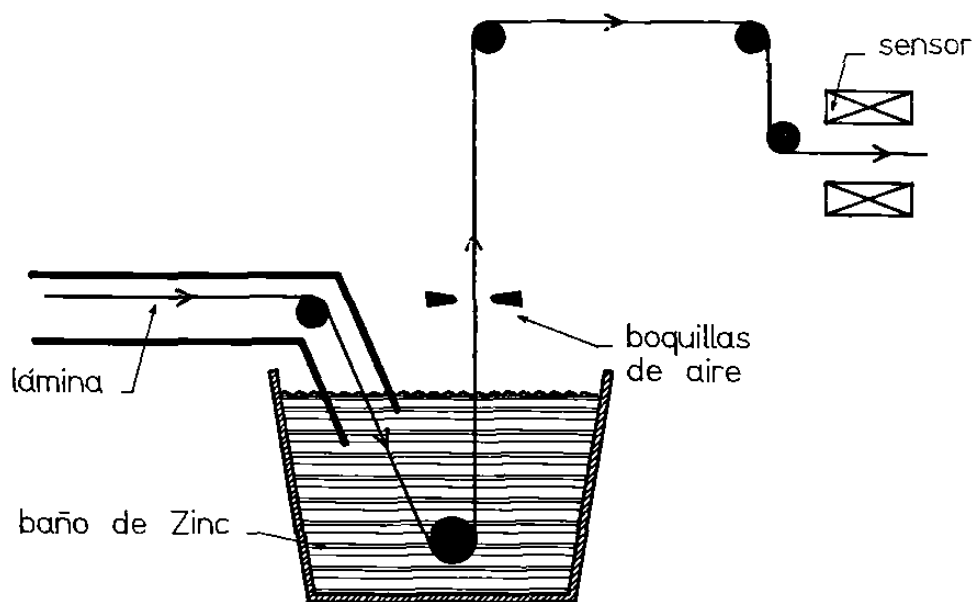


Figura 1.1 Descripción del proceso.

1.1 Formulación del Problema.

La lámina de acero tiene medidas del orden de 1 mt. de ancho por 1 mm. de grosor, (existen otras medidas de anchos y grosores, pero para efectos de este estudio son irrelevantes) es precalentada y pasada a velocidades, que depende del calibre de la lámina, (aproximadamente 1 m/seg) a través de una solución de Zinc fundido a una temperatura de 450 - 485 °C. Una capa de Zinc se adhiere a la lámina a medida que pasa por la paila. El proceso de enfriamiento y solidificación de la lámina se realiza apartir de la salida del baño de Zinc en una distancia aproximada de 15 m. que es donde se encuentra el primer rodillo. Después de estos procesos, se guía a una sección donde es cortada o enrollada.

El grosor nominal del Zinc depositado es de 100 gm/m². Si se presenta un sobrante de depósito dá por resultado un uso excesivo del Zinc, si se dá un depósito inferior al requerido se tiene como resultado un producto no satisfactorio. El control de masa de Zinc depositada es proporcionado por unas cuchillas de aire que consisten de un par de boquillas localizadas justo arriba de la paila, en ambos lados de la lámina que se desplaza verticalmente. Estas boquillas deliveran aire horizontalmente, lo cual permite devolver el flujo del líquido de Zinc sobrante. Las mediciones en línea de la masa depositada es proporcionada por un sistema de rayos X que detecta el espesor de la capa de Zinc en cada cara independientemente. [5]

Como esta medición no puede ser lograda a altas temperaturas, se observa como consecuencia un retardo variable de acuerdo a la velocidad o espesor de la lámina; no obstante el retardo es conocido.

El presenta trabajo se desarrolla de la siguiente forma:

El capítulo 2 da un panorama general sobre la línea de Galvanizado, se presentan las partes principales en las que se divide y las funciones que se realizan en cada una de ellas.

El capítulo 3 establece un modelo no lineal para regular, en una de las caras, la masa depositada m por medio de la presión p que es la variable de control. El proceso tiene un retardo de tiempo θ , debido a que no pueden ser tomadas medidas de grosor a la temperatura con la que sale de la paila. Por lo que el modelo para efectos de control es no lineal y con un retardo.

El capítulo 4 consiste esencialmente de dos puntos: primeramente se transformó de un modelo no lineal en la salida (sin retardo) a un modelo lineal mediante: un cambio de coordenadas y retroalimentación de estado. Enseguida, se simplificó el retardo por un sistema de dimensión finita.

En el capítulo 5 se simularon esquemas en tiempo continuo como el PID, Predictor de Smith y Asignación de Polos en tiempo continuo y discreto. A cada uno de estos esquemas se le suministró ruido aditivo para la planta ya linealizada.

CAPITULO 2

DESCRIPCION DEL GALVANIZADO

El proceso de recubrimiento consiste en sumergir objetos de Hierro o Acero a través de una paila con Zinc fundido. Este recubrimiento se logra a medida que pasa por esta paila.

A tal proceso se le llama *Galvanizado*, algunas veces también se conoce como *Galvanizado en Caliente o Inmersión en Caliente*.

El proceso básicamente consta de tres secciones:

- **Entrada**
- **Proceso.**
- **Salida**

SECCION DE ENTRADA

En esta sección se realizan las siguientes operaciones: se desenrolla la lámina conforme avanzan los rodillos, se realiza la operación de soldar la parte final de un rollo con el inicio

de otro, lograndose así la continuidad del proceso, y se elimina el exceso de bordes que pudiera traer de la operación anterior de soldado. Una vez realizadas, se pasa la lámina al acumulador de entrada, en donde se almacena para entrar en proceso.

A continuación se describen cada una de las partes:

Portarrollos desenrollador

Son dos portarrollos que actúan como desenrolladores de la lámina a medida que avanza el proceso; un portarrollos sostiene al que se encuentra en línea y el otro portarrollo se encuentra preparado con otro para ser unidos por medio de soldadura y de esta manera obtener continuidad en el proceso. La capacidad típica de cada portarrollo es de 15 ton. aproximadamente.

Soldador

Aquí se realiza la unión de la parte final de un rollo con el inicio del otro. La operación es de unos cuantos segundos, variando de acuerdo al calibre de la lámina y la velocidad de los rodillos. Durante este tiempo, se detiene el acceso de lámina a la sección de entrada, mientras continua el flujo de lámina en la sección de proceso. Esto se logra por medio del acumulador de entrada que se encuentra en posición de lleno.

Una vez terminada la operación de soldar, se pone en marcha la sección de entrada, a una velocidad mayor que la sección de proceso, esto se hace con el fin de que el carro acumulador de entrada se llene otra vez y así estar listo para continuar repitiendo su operación. Una vez lleno el acumulador, las velocidades de entrada y de proceso se igualan otra vez.

Acumulador de Lámina Negra

Aquí se acumula la lámina que viene de la operación de soldar y se llama de lámina negra porque al ser unido un rollo con otro, por la soldadura adquiere el color negro.

Desorillador

Generalmente la lámina debe contar con las condiciones de ancho requeridas al proveedor, sin embargo puede tener excesos en ancho en alguno o en ambos lados de la lámina, por lo que aquí se regula el ancho de la lámina.

Acumulador de Entrada

Realiza una función muy importante a la hora en que se realiza la operación de soldar, ya que mientras se realiza tal operación y que la sección de entrada se detiene, el acumulador proporciona la lámina a la sección de proceso.

Rodillos de Entrada

Fijan la velocidad de la lámina; algunas de sus otras funciones son: centrar la lámina, transportarla y mantenerla centrada.

SECCION DE PROCESO

Consiste primordialmente en el acondicionamiento de la lámina para ser sometida al Galvanizado. El principal componente de esta sección es el Horno y es donde se logra este acondicionamiento. Este Horno consta de 4 zonas:

- Precalentado
- Recocido
- Enfriamiento
- Mantenimiento de Temperatura

Precaentado

El precaentado se hace a fuego directo, (lograndose con esto una oxidación en la superficie de la lámina), a una temperatura entre 1220 - 1300 °C, para quitar las impurezas que la lámina pueda traer como: grasa, aceite, humedad, etc. Se obtiene así una superficie limpia.

La temperatura de la lámina alcanzada a pesar de la temperatura del Horno, es de aproximadamente 550 °C debido al corto tiempo que tarda en pasar por esta zona. El control de esta temperatura depende de la velocidad y del grosor de la lámina.

Recocido

La temperatura en esta zona está entre 800 - 1000 °C y se logra por medio de tubos radiantes que transmiten calor por radiación a la lámina. Aquí se elimina la oxidación provocada en la etapa anterior y se realiza el proceso de reducción que consiste en quitar el oxígeno a los metales. La temperatura alcanzada por la lámina está entre 650 - 750 °C y depende de los factores mencionados anteriormente: velocidad del proceso y grosor de la lámina.

Enfriamiento

La temperatura en esta zona está entre 650 - 750 °C; su función es la de bajar la temperatura de la lámina del Horno para que al salir y entrar en la paila tenga las condiciones óptimas de galvanizado (450 °C).

Hasta aquí se le ha dado a la lámina el tratamiento térmico adecuado y se han obtenido las características en cuanto a preparación de superficie y propiedades físicas.

Mantenimiento de Temperatura

Aquí se ha de mantener a la lámina con una temperatura alrededor de los 450 °C. Esta

zona tiene una función importante cuando se tiene un calibre grueso y que la velocidad es baja. Al momento de pasar por los enfriadores puede bajar la temperatura más de lo conveniente y es cuando entran en acción las resistencias eléctricas para impedir que la temperatura baje de los 450 °C. En modo contrario si se trabaja con un calibre delgado, la velocidad es alta y el paso por los enfriadores es más rápido y estos deberán enfriar a mas capacidad y lograr la temperatura deseada.

Rodillos de Proceso

Cumplen varias funciones tales como transportar a la lámina, mantenerla centrada y tensionarla.

GALVANIZADO

Paila

Aquí se recubre a la lámina al paso por esta paila y que consiste de un baño con medidas típicas de 2.50 mts. de profundidad, con una capacidad de 60 tons. de Zinc fundido a una temperatura que está alrededor de los 450 °C.

Los factores importantes en la paila son:

- Calidad del Zinc
- Temperatura del Baño de Zinc
- Nivel del Baño

Calidad del Zinc

La calidad del Zinc dependerá primordialmente de los porcentajes adecuados que se agregan al Zinc de otros elementos para lograr las propiedades físicas deseables como la dureza, la maleabilidad, etc. necesarios para lograr un buen Galvanizado.

Temperatura del Baño de Zinc

La temperatura habitual es de 450 °C pero puede variar hasta 485 °C; algunas consecuencias de esta variación de temperatura son disminuir la adherencia de la capa así como la resistencia a la corrosión.

Nivel del Baño

Tiene una consecuencia importante sobre el control del grosor en la lámina, puesto que las cuchillas de aire deben de estar justo arriba del nivel del baño (aproximadamente 10 cm.) para lograr por medio de la presión quitar el exceso de Zinc. Además el nivel del baño debe mantenerse sobre el tubo de bajada que viene del final del Horno al baño de Zinc, para evitar corrientes de aire al interior del Horno.

Rodillo de Fondo

Se encuentra en el interior del Zinc y sirve para centrar la lámina, al mismo tiempo de apoyo al pasar por la paila. En líneas nuevas de galvanizado ya se cuenta con los rodillos estabilizador y corrector que presentan una lámina mas plana al paso por las boquillas.

Boquillas

El aire es suministrado a las boquillas independientemente, de tal manera que nos permite obtener diferentes espesores de Zinc en cada cara, en caso que se requiera. Las boquillas están justo arriba de la paila, para que al ir saliendo la lámina del baño de Zinc, estando aún éste en estado líquido, se quite el exceso, quedando así una capa uniforme sobre la lámina de Acero.

Sobre las cuchillas de aire podemos tener acciones correctoras como variar la presión del aire o bien variar la distancia de las boquillas a la cara de la lámina o ambas cosas a la

vez. Esta distancia y presión van de acuerdo a la velocidad de la línea y grosor deseado.

Torre de Enfriamiento

Su función es la de solidificar y enfriar la capa de Zinc, lográndose a base de ventiladores y/o por convección, variándose de esta forma la temperatura de la lámina de las condiciones a la salida de la paila a condiciones ambientes.

Medición

Puesto que la lámina ha bajado de temperatura, es posible medir la masa depositada y realizar los cambios que se requiera en caso que se presente sobre depósitos o faltantes de depósitos. Esta medición se realiza aproximadamente 15 seg. después del control de la presión del aire, es decir, que de aquí proviene el retardo físico que justifica el modelo matemático usado.

Al final de esta sección, la lámina ya está galvanizada y puede ser sometida a otros tratamientos o pasar a la sección de salida.

SECCION DE SALIDA

Es la parte final de todo el proceso; la lámina puede cortarse para posteriormente almacenarse en hojas o enrollarse.

Nivelador

Son rodillos que tensionan la lámina para eliminar cualquier pandeo que se presente. La velocidad de estos rodillos está controlada independientemente por motores a una velocidad mayor que los rodillos de entrada o que los de proceso.

Acumulador de Salida

Su posición original es vacío y es aquí donde se almacena la lámina galvanizada que sale de

proceso.

Enrollador

Aquí se enrolla el producto terminado, teniendo un devanador para evitar que se deformen las orillas; los rollos ya formados alimentan las líneas de corte.

Corte

En caso de que la lámina fuera a ser cortada en hojas, el flujo es desviado a las cuchillas que cortan la lámina en lugar de pasar al enrollador.

Sellador

Antes de ser acumuladas en paquetes, cada hoja es sellada con la marca, el calibre del que se trate, número de identificación y especificación.

Rodillos de Salida

Proporciona a la lámina la tensión necesaria para extraer el rollo y no dañarlo.

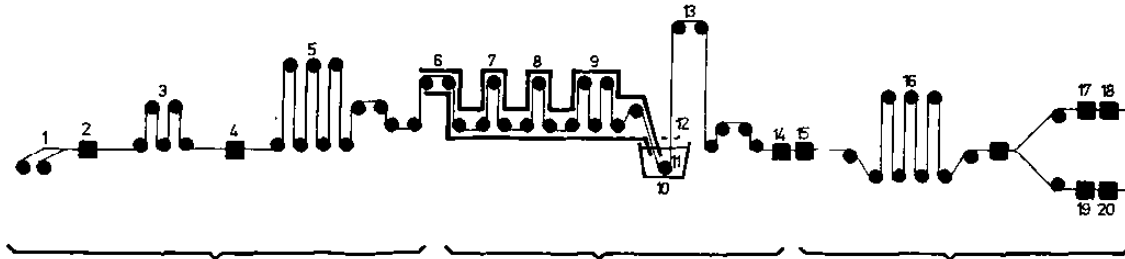


Figura 2.1 Descripción de la línea de galvanizado.

ENTRADA	PROCESO	SALIDA
1 Portarollos desenrollador	6 Precalentado	15 Nivelador
2 Soldador	7 Recocido	16 Ac. de Salida
3 Ac. de lámina negra	8 Enfriamiento	17 Enrollador
4 Desorillador	9 Mto. de Temp.	18 Sellador
5 Ac. de entrada	10 Paila	19 Corte
	11 Rodillo de Fondo	20 Sellador
	12 Boquillas	
	13 Torre de enfriamiento	
	14 Medición	

Conclusión.

En este capítulo referente a la descripción del proceso: se da un panorama general sobre la línea de galvanizado, se presentan las partes principales en las que se divide y las funciones que se realizan en cada una de ellas.

CAPITULO 3

FORMULACION MATEMATICA

En esta sección se presenta un modelo que permite el control de la masa depositada en una de las caras de la lámina. Se pudo observar que generalmente el modelo que representa el control de estas caras en el galvanizado es no lineal. Además de esto, como ya lo mencionamos se presenta un retardo muy importante que proviene de la medición realizada después del proceso de enfriamiento de la lámina. Por lo que el modelo para efectos de control es no lineal y con retardo.

Se han desarrollado modelos algebraicos de la masa depositada de Zinc en función de la presión p del aire, la distancia d de las boquillas a la lámina y la velocidad v de la lámina; tal como lo representa la siguiente ecuación algebraica no lineal: [5]

$$m = kd \sqrt{\frac{v}{p} + \xi} \quad (3.1)$$

donde:

- m masa depositada,
- v velocidad de la lámina,
- p presión del aire en las boquillas,
- d distancia de la lámina a las boquillas,
- k constante de proporcionalidad,
- ξ incertidumbre,

donde k y ξ son fuentes de incertidumbre asociada con las cuchillas de aire y fenómenos no considerados en el modelo (3.1) cuando no se considere ξ y se mantiene k constante.

Al hablar de incertidumbre podemos mencionar dos tipos: aditivas y multiplicativas.

Las incertidumbres aditivas son representadas en el siguiente modelo:

$$m_1 = kd \sqrt{\frac{v}{p} + \xi_1} \quad (3.2)$$

y son consideradas como aditivas aquellos fenómenos no modelados.

De igual forma las incertidumbres multiplicativas pueden ser representadas como:

$$m_2 = k(1 + \xi_2)d \sqrt{\frac{v}{p}} \quad (3.3)$$

éstas provienen de variaciones en la velocidad, distancia, presión y variaciones de k para distintos puntos de operación.

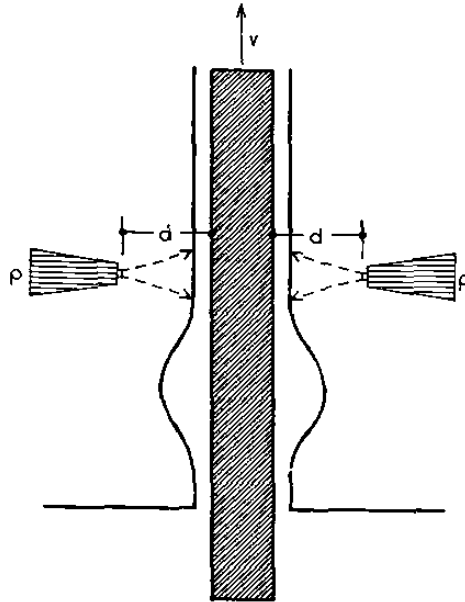


Figura 3.1 Boquillas de aire.

Dinámica en d

El ajuste de la distancia entre la lámina y las cuchillas se logra a base de actuadores localizados en ambos lados controlados por un servomotor, teniéndose típicamente una constante de tiempo τ_1 de 10 seg. [5]

Para representar tal comportamiento se propone una ecuación diferencial lineal estable invariante en el tiempo de la siguiente forma:

$$Dd_r = \frac{d_u}{\tau_1} - \frac{d_r}{\tau_1} \quad (3.4)$$

donde:

D operador derivada (d/dt)

d_r distancia real

d_u distancia de entrada

τ_1 constante de tiempo

En nuestro trabajo, consideramos constante la distancia d . Es decir, no consideraremos la ecuación diferencial, debido a que en la mayoría de las Fábricas no existe control automático de esta variable y su implementación es costoso, además de ser difícil de medir.

Los factores que pueden ocurrir en un momento dado en la lámina debido a d son:

Variabilidad en la distribución de la masa a lo largo de la lámina

Se puede tener un exceso o un faltante a lo largo de la lámina.

Oscilaciones

Se presentan al pasar la lámina a través de las cuchillas, ya que al salir ésta del baño de Zinc recorre una distancia aproximada de 15 mts. hasta el primer rodillo. La distancia entre soportes genera oscilaciones que tiene una frecuencia del orden de 1 Hz. y una magnitud de hasta 2 cm en el punto donde se encuentran las boquillas de aire.

Con respecto a estas oscilaciones, en la figura (3.2) se presenta una configuración de rodillos que atenúan estas oscilaciones sin eliminarlas por completo. [8]

Su operación es como sigue: El rodillo sumergido del fondo y el rodillo estabilizador

están prácticamente fijos y sin movimientos laterales; el rodillo corrector ayuda a que la lámina se desplace correctamente hacia las boquillas de aire. Además sirven para reducir la distancia entre soportes, desde el rodillo del fondo al primer rodillo después de salir de la paila.

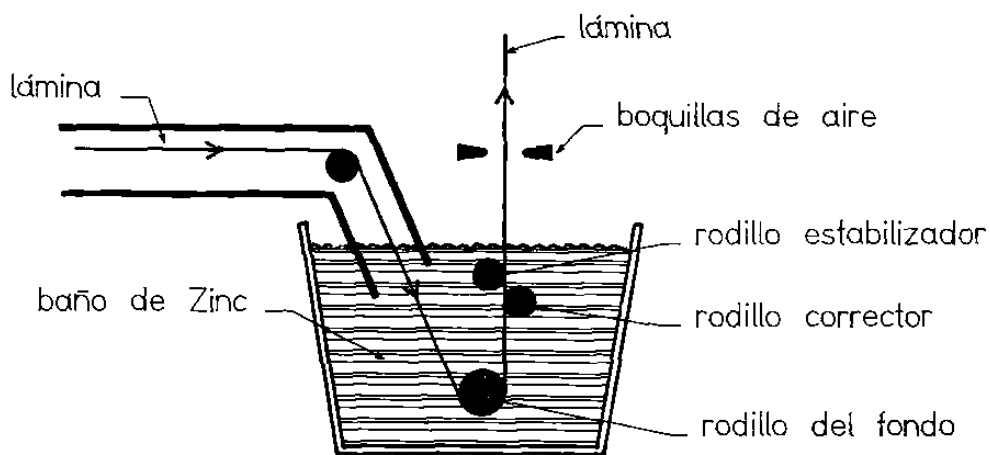


Figura 3.2 Configuración de tres rodillos.

Dinámica en p

El ajuste de la presión en las boquillas es en base de reguladores de presión en ambos lados de la lámina, con una constante de tiempo τ_2 aproximado del orden de 5 seg. [5] A falta de un modelo dinámico de p_r se propone una ecuación diferencial lineal invariante en el tiempo como veremos a continuación:

$$Dp_r = \frac{p_u}{\tau_2} - \frac{p_r}{\tau_2} \quad (3.5)$$

donde:

D operador derivada (d/dt)

p_r presión real

p_u presión de entrada

τ_2 constante de tiempo

Se pueden tener incertidumbres sobre p que pueden ser debidas a imperfecciones en la apertura de las boquillas o a que el Zinc fundido salpique sobre las boquillas.

Debido a que el modelo es puntual, a lo ancho de la lámina, no se consideran variaciones.

En suma el modelo utilizado tiene la siguiente estructura:

$$\begin{aligned} \dot{p}_r &= -\frac{P_r}{\tau_2} + \frac{P_u}{\tau_2} \\ \dot{d}_r &= -\frac{d_r}{\tau_1} + \frac{d_u}{\tau_1} \\ m &= kd \sqrt{\frac{v}{p} + \xi_1} \\ md &= m(t - \theta) \end{aligned} \tag{3.6}$$

donde:

- md masa con retardo,
- θ retardo de tiempo.

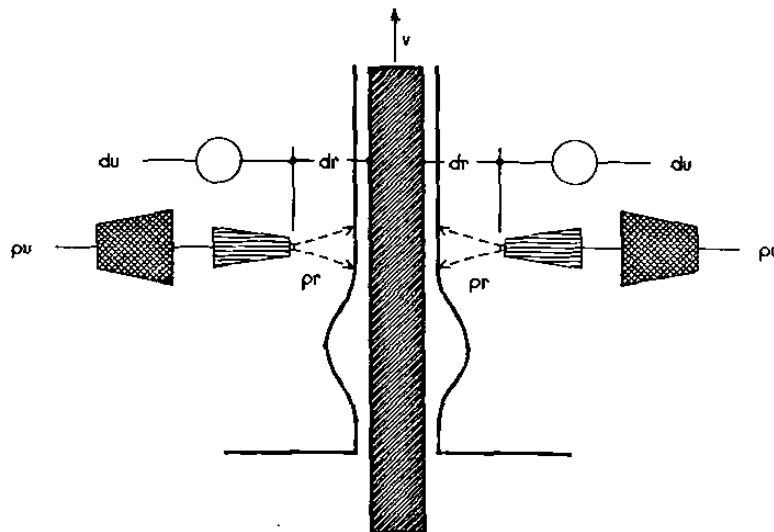


Figura 3.3 Descripción del modelo utilizado.

Conclusión.

En esta sección se estableció un modelo adecuado para regular, en una de las caras, la masa depositada m por medio de la presión p (variable de control). Dado que el modelo es puntual, las variaciones de p a lo largo de la boquilla no se consideran.

Como mencionamos anteriormente el proceso tiene un retardo de tiempo θ , debido a que no pueden ser tomadas medidas de grosor a la temperatura con la que sale la lámina de la paila. El objetivo es regular m (no lineal y sin retardo) a través de las mediciones md (con retardo).

Cabe mencionar que debido a la simetría del proceso, el modelo presentado se usa solo para controlar una de las caras y la otra cara se controla exactamente igual.

CAPITULO 4

SIMPLIFICACIONES DEL MODELO

Una vez obtenido el modelo que representa el proceso que deseamos controlar: grosor de la masa depositada (ver ec. 4.1) se puede observar que existe una no linealidad en la salida de m sin retardo.

Existen dos caminos por los cuales se puede resolver el problema de simplificar el modelo por uno que sea lineal y aproximar el retardo por un sistema de dimensión finita.

El primero consiste en primero linealizar, por el método deseado (linealización entrada-salida, realizando un cambio de coordenadas y una retroalimentación de estado o una linealización entrada-estado, etc.), y luego aproximar el retardo por un sistema de dimensión finita. Por otro lado, se puede discretizar (eliminando de esta manera el problema del retardo), y posteriormente linealizar. [4]

Este trabajo procede al primero de ellos.

4.1 Linealización E/S por Retroalimentación de Estado.

En nuestro siguiente análisis no se considerará el retardo del sistema.

Dado el sistema no lineal Σ_{NL} :

$$\begin{aligned} \dot{p}_r &= f(p_r) + g(p_r)p_u = -\frac{p_r}{\tau_2} + \frac{p_u}{\tau_2} \\ y &= h(x) = kd \sqrt{\frac{v}{p_r}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

donde:

- f, g son campos vectoriales,
- $h_i(x)$ son funciones de C^∞ $i=1, \dots, n$,
- p_u presión de entrada,
- p_r presión real,
- k constante de proporcionalidad,
- v velocidad de la lámina,
- y masa sin retardo,
- τ_2 constante de tiempo,

se busca, por medio de un cambio de coordenadas no lineal y retroalimentación de estado, transformarlo en un sistema lineal de la forma Σ_L :

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= A\xi + Bv \\ y &= C\xi \end{aligned} \quad (4.2)$$

Un sistema no-lineal de ecuaciones diferenciales ordinarias se puede transformar en otro sistema mediante un cambio de coordenadas. Esta nueva estructura es fácil de

reconocer en el caso de sistemas lineales, en las cuales encontramos formas controlables u observables, las cuales llamaremos *canónicas*. El punto de partida será la obtención de esta forma canónica controlable. Para explicar como esta forma canónica, puede ser obtenida, necesitamos primero introducir algunos conceptos y notaciones.

Sea x el vector de estado dado por:

$$x = (x_1, \dots, x_n)^T \quad (4.3)$$

y una función h valuada, $h \in C^\infty$ tal que:

$$h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p \quad (4.4)$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ h_p(x) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Además, a cada punto de la variedad M , está asociado un espacio tangente de dimensión n y de elementos $f(x)$. Designemos por $E(M)$ el conjunto de parejas $(x, f(x))$.

DEFINICION: Un campo vectorial es una aplicación de M en $E(M)$ ($x \rightarrow (x, f(x))$) que le asocia todo punto $x \in M$, un vector tangente en este punto. Por simplicidad $M = \mathbb{R}^n$, pero en general, $M \subset \mathbb{R}^n$.

donde

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, \dots, x_n) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

DEFINICION: Sea $L_f h(x)$ la derivada de $h(x)$ con respecto a x a lo largo del campo vectorial $f(x)$, la cual está dada por la siguiente expresión:

$$L_f h(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial h}{\partial x_i} f_i(x_1, \dots, x_n)^T = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) \quad 1 \leq i \leq n \quad (4.7)$$

donde:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \left(\frac{\partial h}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial h}{\partial x_n} \right) \quad (4.8)$$

La función $L_f h(x)$ es llamada *Derivada direccional de $h(x)$ a lo largo de $f(x)$ o Derivada de Lie*.

De manera general, podemos definir para todo $f_i(x)$ campo vectorial $i=1, \dots, n$, la siguiente operación:

$$L_{f_i} L_{f_j} (h(x)) = L_{f_i} \left(\frac{\partial h(x)}{\partial x} f_j \right) \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad (4.9)$$

$$L_{f_i} L_{f_j}(h(x)) = \frac{\partial}{\partial(x)} \left(\frac{\partial h(x)}{\partial x} f_j \right) f_i \quad \forall i, j \quad (4.10)$$

□

Ahora, considere el sistema no lineal Σ_{NL} de la forma afín en el control:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (4.11)$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$ y $u \in \mathbb{R}$. Se desea transformar el sistema no lineal Σ_{NL} , mediante un cambio de coordenadas no lineal, en un sistema Σ_T de la forma:

$$\dot{z} = Az + \psi(z, u) \quad (4.12)$$

donde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & & & & & \\ \cdot & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

y

$$\Psi(z,u) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ b(z) + a(z)u \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Además, utilizando un control linealizante, Σ_T finalmente se transforma en un sistema lineal controlable de la forma:

$$\dot{z} = Az + Bv \quad (4.15)$$

donde

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

DEFINICION: Sea $\Phi: U \subset M \rightarrow V$ una aplicación, donde U es una vecindad de x_0 , V es una vecindad de $\Phi(x_0)$ y $V \subset \mathbb{R}^n$, $U \subset \mathbb{R}^n$, Φ es un difeomorfismo C^k (k veces diferenciable), si Φ es de clase C^k y es una biyección, además Φ^{-1} existe y es de clase C^k . \square

El hecho de que Φ sea invertible nos permite pasar del sistema transformado Σ_T al sistema original Σ_{NL} . Además el Jacobiano dado por $(\partial\Phi/\partial x)$ debe ser no singular en una vecindad U de x_0 , lo cual es una condición suficiente para determinar la transformación.

Un concepto importante es el siguiente:

DEFINICION: El sistema Σ_{NL} (4.12) tiene grado relativo r en x_0 si:

$$\begin{aligned} \text{i) } L_g L_f^k h(x) &= 0 \quad \forall x \in U \text{ y } \forall k \leq r-1 \\ \text{ii) } L_g L_f^{r-1} h(x_0) &\neq 0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

donde U es una vecindad de x_0 . [4] □

OBSERVACION: Una interesante interpretación de grado relativo es: *Diferenciar la salida con respecto al tiempo hasta obtener un término donde la entrada u aparezca explícitamente.*

Por otro lado, el grado relativo r en un sistema lineal se define como la diferencia entre el grado del polinomio del denominador y el grado del polinomio del numerador de su función de transferencia, es decir, sea $H(s)$ la función de transferencia dada por:

$$\begin{aligned} H(s) &= c(sI - A)^{-1}b = \frac{n(s)}{d(s)} \\ r &= \text{grado } [d(s)] - \text{grado } [n(s)] \end{aligned} \quad (4.18)$$

□

Haciendo uso del siguiente cambio de coordenadas $L_f^i h(x) = z_{i+1}$ para $i = 0, \dots, n-1$

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f^0 h(x(t)) \\ \cdot \\ \cdot \\ L_f^{n-1} h(x(t)) \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

donde $L_f^0(h(x)) = h(x)$ y $L_f^i(h(x)) = L_f(L_f^{i-1}h(x))$

Además, si Σ_{NL} es de grado relativo r , entonces por medio de la transformación $z = \Phi(x)$, el sistema Σ_{NL} se transforma en el sistema no lineal de la forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dots \\ \dot{z}_{r-1} \\ \dot{z}_r \\ \dot{z}_{r+1} \\ \dots \\ \dot{z}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_2 \\ z_3 \\ \dots \\ z_r \\ b(z(t)) + a(z(t))u \\ q_{r+1}(z) \\ \dots \\ q_n(z) \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

donde $z \in \mathbb{R}^n$, $u, y \in \mathbb{R}$, $q_i(z)$ funciones, $a(z) = L_g L_f^{r-1}(h(x))$, $b(z) = L_f^r(h(x))$

Para $r=n$, el sistema se reduce a la forma siguiente:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dots \\ \dot{z}_{n-1} \\ \dot{z}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_2 \\ z_3 \\ \dots \\ z_n \\ b(z) + a(z)u \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Seleccionando la siguiente *Ley de Control Linealizante por retroalimentación de estado* de la forma:

$$u = \frac{1}{a(z)} [-b(z) + v] \quad (4.22)$$

donde $a(z) \neq 0$ la cual está definida en una vecindad de z_o , donde $z_o = \Phi(x_o)$.

El sistema en lazo cerrado resultante, en su forma canónica controlable, está dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dots \\ \dot{z}_{n-1} \\ \dot{z}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_2 \\ z_3 \\ \dots \\ z_n \\ v \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Donde la retroalimentación de estado en función de las coordenadas del sistema original Σ_{NL} es de la forma:

$$u = \frac{1}{a(\Phi(x))} [-b(\Phi(x)) + v] \quad (4.24)$$

Los resultados obtenidos en el sistema linealizado pueden ser aplicados al sistema original mediante la transformación inversa.

De modo que, expresando el sistema (4.16) en las coordenadas originales, se obtiene lo siguiente:

Derivando $z = \Phi(x)$ se tiene:

$$\dot{z} = \left(\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \right) \dot{x} \quad (4.25)$$

de donde

$$\dot{x} = \left(\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \right)^{-1} \dot{z} \quad (4.26)$$

reemplazando en la ec. (4.16) resulta:

$$\dot{x} = \left(\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \right)^{-1} (Az + Bv) \quad (4.27)$$

o

$$\dot{x} = \left(\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \right)^{-1} A\Phi(x) + \left(\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \right)^{-1} Bv \quad (4.28)$$

y

$$v = a(z) + b(z)u = a(\Phi(x)) + b(\Phi(x))u \quad (4.29)$$

se obtiene el sistema original.

Descripción del Sistema

En esta sección aplicaremos las técnicas antes vistas a nuestro modelo de Galvanización. Recordemos que nuestro modelo está dado por las ecuaciones siguientes sin considerar el retardo.

$$\begin{aligned}\dot{p}_r &= f(p_r) + g(p_r)p_u = -\frac{p_r}{\tau_2} + \frac{p_u}{\tau_2} \\ y &= h(p_r) = kd \sqrt{\frac{v}{p_r + p_o}}\end{aligned}\quad (4.30)$$

i) Cambio de Coordenadas.

Se deriva la salida y hasta que aparezca explícitamente la entrada p_u , tenemos que solamente necesitamos derivar una sola vez, por lo que el *grado relativo para nuestro caso es 1*.

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= \frac{-1}{2\tau_1} kd\sqrt{v}(\Phi^{-1}(z_1) + p_o)^{-\frac{3}{2}} \Phi^{-1}(z_1) - \frac{1}{2\tau_1} kd\sqrt{v}(\Phi^{-1}(z_1) + p_o)^{-\frac{3}{2}} p_u \\ y &= z_1\end{aligned}\quad (4.31)$$

donde $\Phi^{-1}(z) = \phi^{-1}(z_1)$

ii) Retroalimentación de Estado.

$$p_u = -\Phi^{-1}(z_1) - \frac{2\tau_1}{kd\sqrt{v}(\Phi^{-1}(z_1) + p_o)^{-\frac{3}{2}}} pv \quad (4.32)$$

sustituyendo la p_u propuesta tenemos:

$$\begin{aligned}\Sigma: \dot{z}_1 &= pv \\ y &= z_1\end{aligned}\quad (4.33)$$

donde Pv es la variable de control.

4.2 Aproximación del Retardo.

Muchos Procesos Industriales contienen retardos de tiempo; la presencia de retardos en Procesos incrementa mucho la dificultad del Control. Para obtener una solución se analizan las condiciones iniciales en todo el intervalo de tiempo desde $-\theta$ a 0 , donde θ es el retardo de tiempo. Esto significa un número infinito de condiciones y además no contable, es decir es un sistema de dimensión infinita.

Para aproximar la función de transferencia del retardo $e^{-s\theta}$ por un sistema de dimensión finita existen varias técnicas tales como [2]:

i) *Expansión de la Serie de Taylor*

$$e^{-s\theta} \approx 1 - s\theta + \frac{(s\theta)^2}{2!} - \frac{(s\theta)^3}{3!} + \dots \quad (4.34)$$

ii) *Aproximación de Padé (orden uno)*

$$e^{-s\theta} \approx \frac{1 - \frac{s\theta}{2}}{1 + \frac{s\theta}{2}} \quad (4.35)$$

iii) *Transformada z equivalente (para sistemas discretos)*

$$e^{-s\theta} \approx z^{-nh} \quad (4.36)$$

$$nh = \theta$$

h período de muestreo

n entero positivo

iv) *Control Clásico* (filtro pasa bajo)

$$e^{-s\theta} \approx \frac{1}{\left(1 + \frac{s\theta}{n}\right)^n} \quad (4.37)$$

En nuestro trabajo proponemos una aproximación de Padé de orden q en el numerador y de orden p en el denominador, (orden relativo 1) donde $q = p-1$. A continuación analizaremos la diferencia entre la aproximación de Padé comunmente utilizada con $p=q$ (orden relativo 0).

Para una mejor comprensión llamaremos Caso I para las aproximaciones de Padé de orden 0 y Caso II para las aproximaciones de Padé de orden 1. [4]

Caso I (orden relativo 0)

$$e^{-s\theta} = \frac{N_p}{D_p} \quad (4.38)$$

donde:

$$N_p = \sum_{j=0}^p \frac{(2p-j)! p!}{(2p)! j! (p-j)!} (-s\theta)^j \quad D_p = \sum_{j=0}^p \frac{(2p-j)! p!}{(2p)! j! (p-j)!} (s\theta)^j \quad (4.39)$$

Caso II (orden relativo 1)

$$e^{-s\theta} = \frac{N_q}{D_p} \quad (4.40)$$

donde: $q=p-1$

$$N_{p-1} = \sum_{j=0}^q \frac{(2p-j-1)! p!}{(2p-1)! j! (p-j)!} (-s\theta)^j \quad D_p = \sum_{j=0}^p \frac{(2p-j-1)! (p-1)!}{(2p-1)! j! (p-1-j)!} (s\theta)^j \quad (4.41)$$

Se dice que una aproximación es mejor que otra en el sentido de alguna norma.

La norma de un elemento $x(t)$ $0 \leq t < \infty$ en un espacio $L^p [0, \infty)$ [10] está definida como:

$$\|x\|_p = \left[\int_0^{\infty} |x(t)|^p dt \right]^{\frac{1}{p}} \quad (4.42)$$

donde $1 \leq p < \infty$

Los casos analizados fueron para $p=1$ y $p=2$, que representa energía de la señal.

La norma de un elemento $x(t)$ $0 \leq t < \infty$ en un espacio $L^\infty [0, \infty)$ [10] está definida como:

$$\|x\|_\infty = \sup_t |x(t)| \quad t \in [0, \infty) \quad (4.43)$$

En las siguientes gráficas se observa la respuesta de la aproximación ante un escalón unitario, con retardo de 1 seg.

En el apéndice se podrá encontrar mas información referente a: la representación gráfica del error, obtención del error y aproximaciones distintas a las que se mostrarán.

Las gráficas que comienzan en el origen son las propuestas en este trabajo.

Es fácil poder apreciar gráficamente, la diferencia entre estos dos tipos de casos.

Ejemplo 1.

Aproximación de Padé primer orden.

—orden relativo 0 y 1—

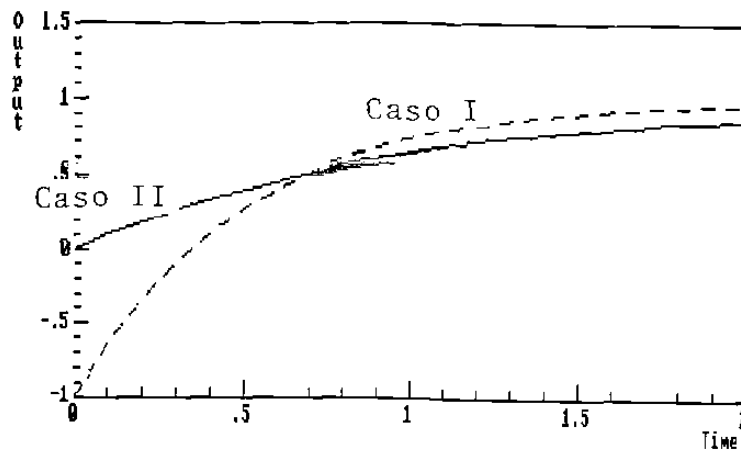


Figura 4.1

$$\frac{N_1}{D_1} = \frac{-0.5s+1}{0.5s+1} \quad (4.44)$$

$$\|e\|_1 = 0.5775 \quad \|e\|_2 = 0.5203 \quad \|e\|_\infty = 1.0000$$

$$\frac{N_o}{D_1} = \frac{1}{s+1} \quad (4.45)$$

$$\|e\|_1 = 0.7290 \quad \|e\|_2 = 0.4855 \quad \|e\|_\infty = 0.6086$$

El error corresponde a las normas 1, 2 e ∞ , observese que el error en la norma uno para la aproximación de orden relativo 0 es menor que la aproximación de orden relativo

1.

Cabe mencionar que el retardo en el dominio del tiempo se pasó al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Laplace, (función de transferencia e^{-s τ}). Esta se aproxima por una función racional de orden relativo 1.

Ejemplo 2.

Aproximación de Padé tercer orden.

—orden relativo 0 y 1—

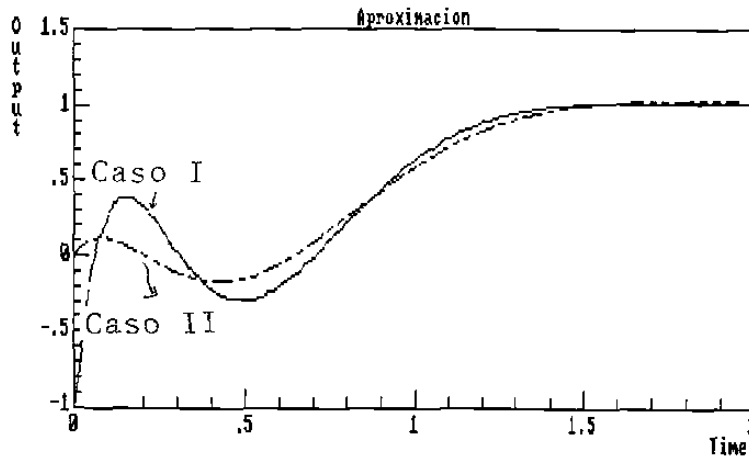


Figura 4.2

$$\frac{N_3}{D_3} = \frac{-8.3333E-03s^3 + 0.1s^2 - 0.5s + 1}{8.3333E-03s^3 + 0.1s^2 + 0.5s + 1} \quad (4.46)$$

$$\|e\|_1 = 0.3243 \quad \|e\|_2 = 0.3271 \quad \|e\|_\infty = 1.0000$$

$$\frac{N_2}{D_3} = \frac{1 - \frac{2}{5}s + \frac{1}{20}s^2}{1 + \frac{3}{5}s + \frac{3}{20}s^2 + \frac{1}{60}s^3} \quad (4.47)$$

$$\|e\|_1 = 0.2610 \quad \|e\|_2 = 0.2627 \quad \|e\|_\infty = 0.4142$$

Ejemplo 3.

Aproximación de Padé quinto orden.

—orden relativo 0 y 1—

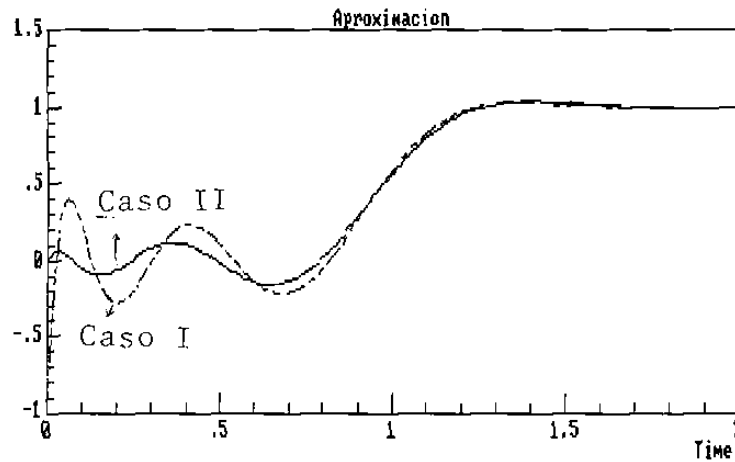


Figura 4.3

$$\frac{N_5}{D_5} = \frac{-s^5 + 30s^4 - 420s^3 + 3360s^2 - 15120s + 3024}{s^5 + 30s^4 + 420s^3 + 3360s^2 + 15120s + 30240} \quad (4.48)$$

$$\|e\|_1 = 0.2411 \quad \|e\|_2 = 0.2564 \quad \|e\|_\infty = 1.0000$$

$$\frac{N_4}{D_5} = \frac{1 - \frac{4}{9}s + \frac{1}{12}s^2 - \frac{1}{126}s^3 + \frac{1}{3024}s^4}{1 + \frac{5}{9}s + \frac{5}{36}s^2 + \frac{5}{252}s^3 + \frac{5}{3024}s^4 + \frac{1}{15120}s^5} \quad (4.49)$$

$$\|e\|_1 = 0.1776 \quad \|e\|_2 = 0.2260 \quad \|e\|_\infty = 0.4923$$

donde $\|e\|_p$ representa los errores de aproximación en la norma p para $p = 1, 2$ e ∞ .

Conclusión.

Este capítulo consiste esencialmente de dos puntos: Primeramente se transformó de un modelo no lineal en la salida (sin retardo) a un modelo lineal: mediante un cambio de coordenadas y retroalimentación de estado. Enseguida, se simplificó el retardo por un sistema de dimensión finita y se propuso una aproximación la cual tiene un error en norma 1, 2 ó ∞ menor a la normalmente usada, cuando el orden de la aproximación de Padé es mayor o igual a 2.

CAPITULO 5

ESQUEMAS DE CONTROL Y SIMULACIONES

En este capítulo se analizan esquemas de control tales como: PID, Predictor de Smith y Asignación de polos (versión en continuo y discreto). El análisis se realizó mediante simulaciones que muestran su comportamiento ante perturbaciones aditivas.

El proceso de control de grosor del Zinc está dividido en la dinámica del sistema sin retardo y el retardo puro. Si se tuviera acceso directo a la variable m , ver figura (5.1), la retroalimentación de ésta podría ser utilizada, sin tomar en cuenta el retardo. [2] Desde luego esto no puede ser hecho en un sistema físico. Para poder tener acceso a la variable que se desea controlar m , se han diseñado esquemas como los que se mostrarán posteriormente.

Puesto que todos los esquemas de control propuestos son para sistemas lineales, la planta ya está linealizada.

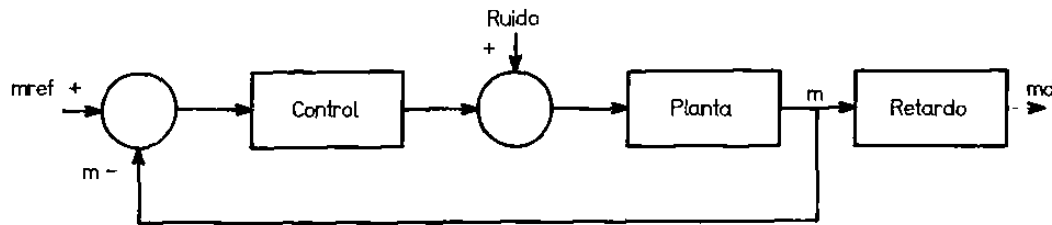


Figura 5.1 Sistema con retardo.

donde:

$$md(t) = m(t - \theta) \quad (5.1)$$

5.1 PID.

Con respecto a este tipo de controlador se realizaron simulaciones donde un ruido aditivo fue inyectado a proceso. Se pudo observar que este ruido pasa tal como si no hubiese controlador PID; esto es debido a la ganancia tan baja del controlador. Si se trata de aumentar la ganancia para mejorar el desempeño, el sistema se hace inestable.

Función de transferencia del controlador PID [1]:

$$\frac{mref(s)}{e(s)} = kp \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (5.2)$$

5.2 Predictor de Smith.

El esquema de control Predictor de Smith, tiene la siguiente estructura:

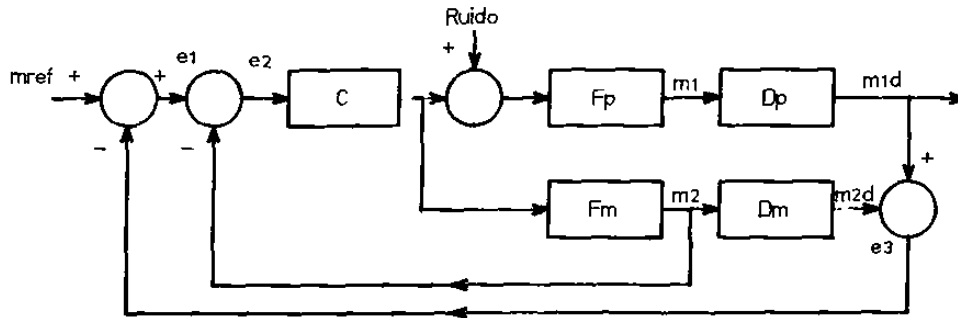


Figura 5.2 Predictor de Smith.

donde cada recuadro representa:

m_{ref} referencia

F_p dinámica de la planta sin retardo

D_p retardo de la planta

F_m modelo de la dinámica de la planta

D_m modelo del retardo de la planta

m_{1d} salida de la planta

m_{2d} salida del modelo

m_1 variable ficticia (no medible)

m_2 señal de retroalimentación

e_3 error entre la salida del modelo y la salida de la planta

La diferencia entre la figura (5.1), con respecto al Predictor de Smith, figura (5.2), es que en esta última estructura, se tiene un modelo de la planta para poder tener acceso a la variable de retroalimentación m_2 ; además se logra hacer una retroalimentación entre la salida del modelo y la planta. Con esta estructura se elimina el retardo del denominador de la función de transferencia de lazo cerrado.

La función de transferencia en lazo cerrado del sistema, para ruido cero, es:

$$\frac{m1d(s)}{mref(s)} = \frac{CF_p D_p}{1 + CF_m - CF_m D_m + CF_p D_p} \quad (5.3)$$

si $F_m = F_p$ y $D_m = D_p$ esto se reduce a:

$$\frac{m1d(s)}{mref(s)} = \frac{CF_p D_p}{1 + CF_m} \quad (5.4)$$

Podemos observar que los efectos del retardo de tiempo han sido removidos del denominador de la función de transferencia. [2]

5.2.1 Aproximación del retardo.

Se realizaron una serie de simulaciones referentes a la figura 5.3, donde el bloque del retardo de tiempo es sustituido primeramente por una realización de la aproximación de Padé tipo II —como ya explicamos en el capítulo 4— suministrándole un ruido blanco tipo aditivo, para observar si la estructura propuesta es capaz de rechazar este tipo de perturbaciones. Para efectos de estudio es equivalente situar el ruido antes del retardo o después del retardo, pero se observó que si el ruido se situaba antes del retardo, la

aproximación lo filtraba y no se podía apreciar si realmente funcionaba esta estructura ante perturbaciones de este tipo, por lo que se decidió situarlo después del retardo y observar su respuesta.

Dentro de los programas que se realizaron para simular el esquema de control (5.3) realizados en SIMNON se utiliza:

- Modelo linealizado,
- Controlador PI,
- Se obtuvo una realización canónica controlable para la aproximación del retardo, (tercer orden, orden relativo 1 en el dominio del tiempo),
- Ruido blanco aditivo (media cero y desviación estandar de 0.01)

Para todos los esquemas de control las variables observadas fueron la magnitud de la masa depositada antes del retardo, el ruido blanco proporcionado y la masa de referencia.

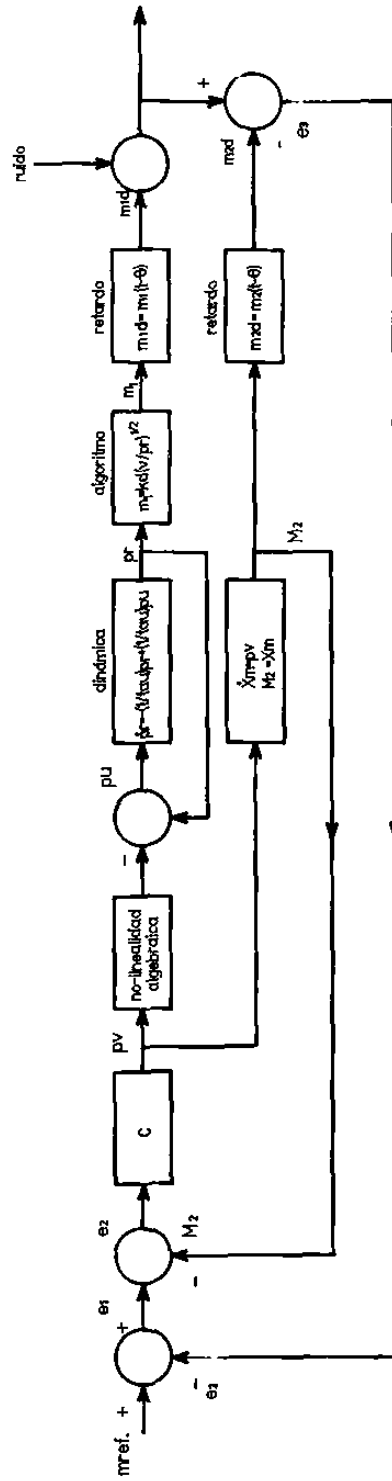


Figura 5.3

Las gráficas de la masa depositada y del ruido, se presentan en escalas iguales, para poder apreciar la disminución del ruido dentro del esquema, la reducción de la desviación estandar en la masa depositada es del orden del 87 %, esta reducción se considera optimista con respecto al sistema real, debido a la aproximación del retardo.

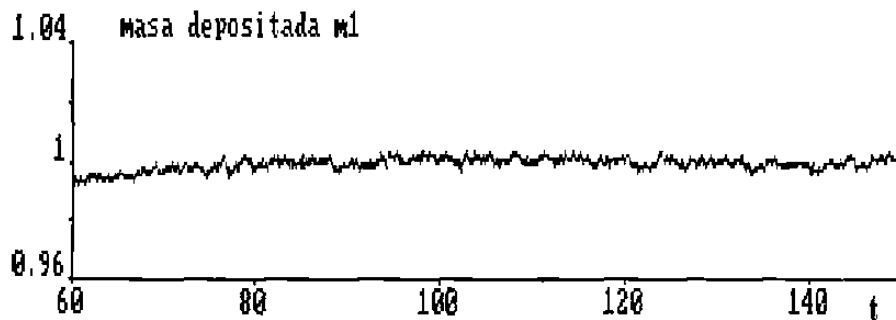


Figura 5.4

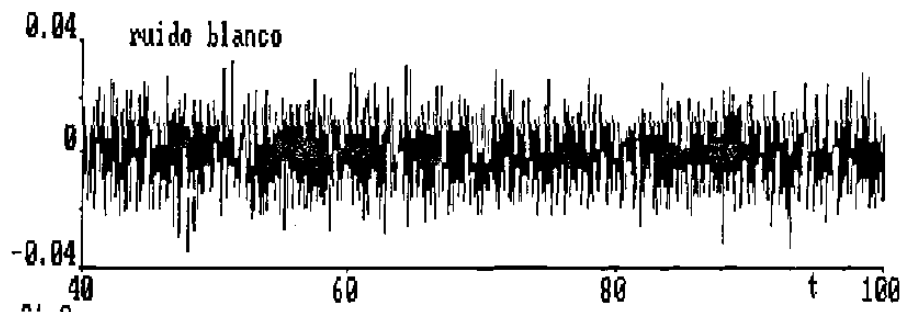


Figura 5.5

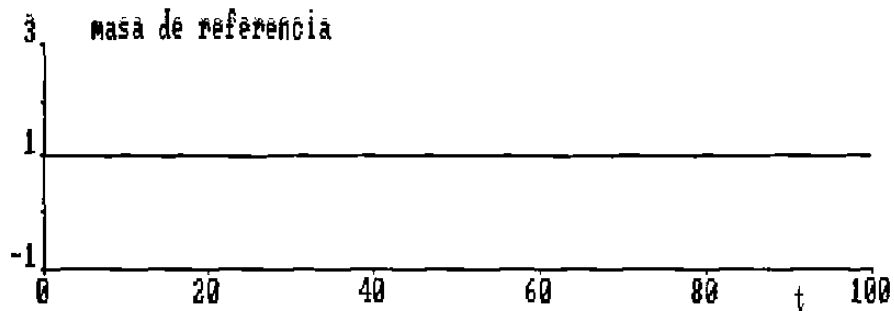


Figura 5.6

5.2.2. Retardo puro.

Primero observamos el comportamiento del esquema donde el retardo era sustituido por una aproximación; en esta parte el retardo será representado por un retardo puro. Esta simulación tiene condiciones similares a las especificaciones anteriores con la diferencia que este retardo puro es proporcionado por una instrucción del SIMNON llamada DELAY.

Debido a la forma de acceder esta instrucción, al simular todo el esquema 5.3 la computadora absorbe una memoria tal que no permite hacer retardos grandes.

El retardo que se utilizó es de 1 seg; se considera que para efectos de estudio lo importante es observar si la estructura propuesta da buenos resultados.

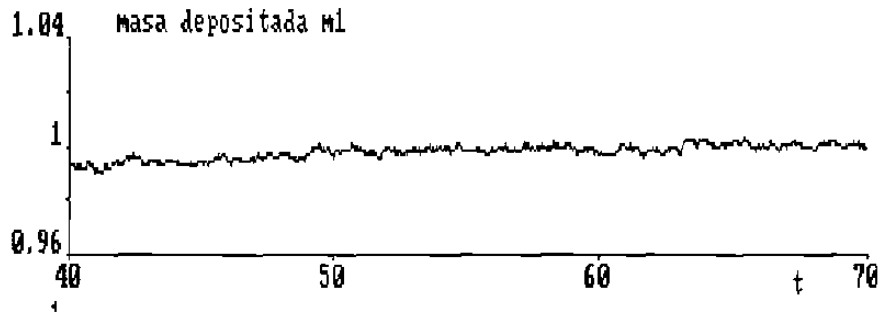


Figura 5.7

La reducción de ruido es del orden de un 82 %, esto depende primordialmente de como se realiza la instrucción del DELAY dentro del SIMNON.

5.3 Asignación de polos por retroalimentación de estado.

5.3.1 Caso Continuo.

Esta simulación se realizó de acuerdo a la figura (5.9), con las siguientes consideraciones:

- Modelo linealizado,
- Se sustituye el retardo por una aproximación de quinto orden para un retardo de un segundo.
- Se obtiene una k de retroalimentación que reasigna los polos cercanos a los de la realización.
- Se tiene la misma intensidad de ruido y misma masa de referencia.

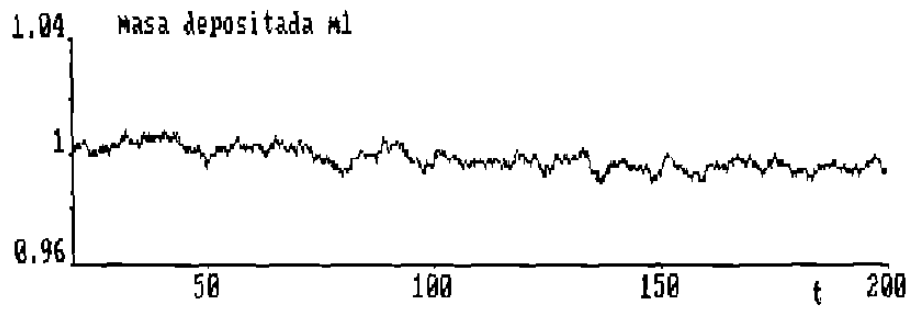


Figura 5.8

En esta estructura se pudo observar también un rechazo a las perturbaciones aditivas con un factor de reducción del 77 %

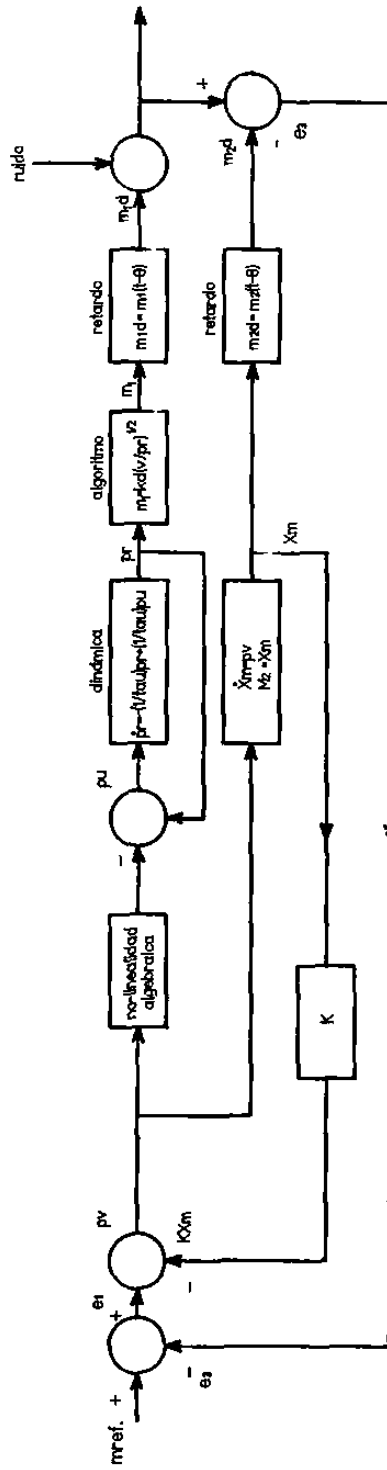


Figura 5.9

5.3.2 Caso discreto.

El modelo utilizado para realizar estas versiones, están basadas en la estructura de la figura (5.12) Los programas que ejecutan estas simulaciones se pueden encontrar en el apendice con las siguientes consideraciones:

- Modelo linealizado,
- Retardo puro de 50 seg.

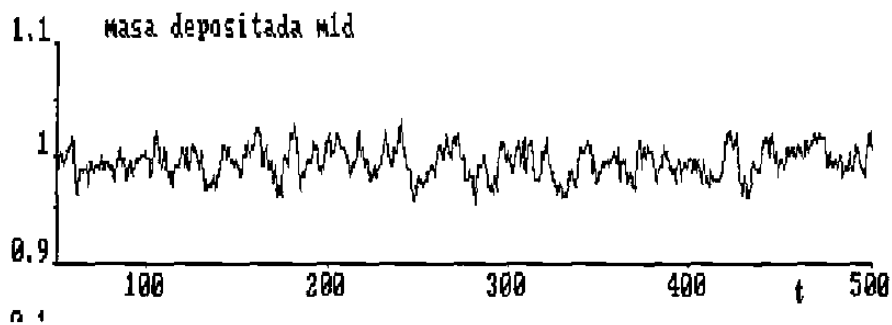


Figura 5.10

Con esta estructura podemos observar que se logra reducir el ancho de banda del ruido, sin embargo la magnitud del ruido permanece.

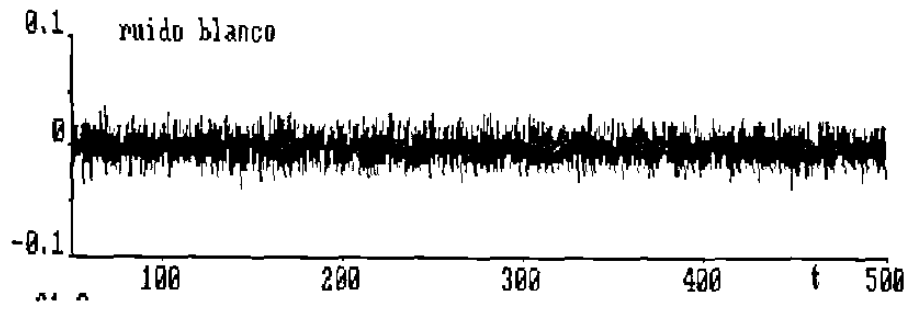


Figura 5.11

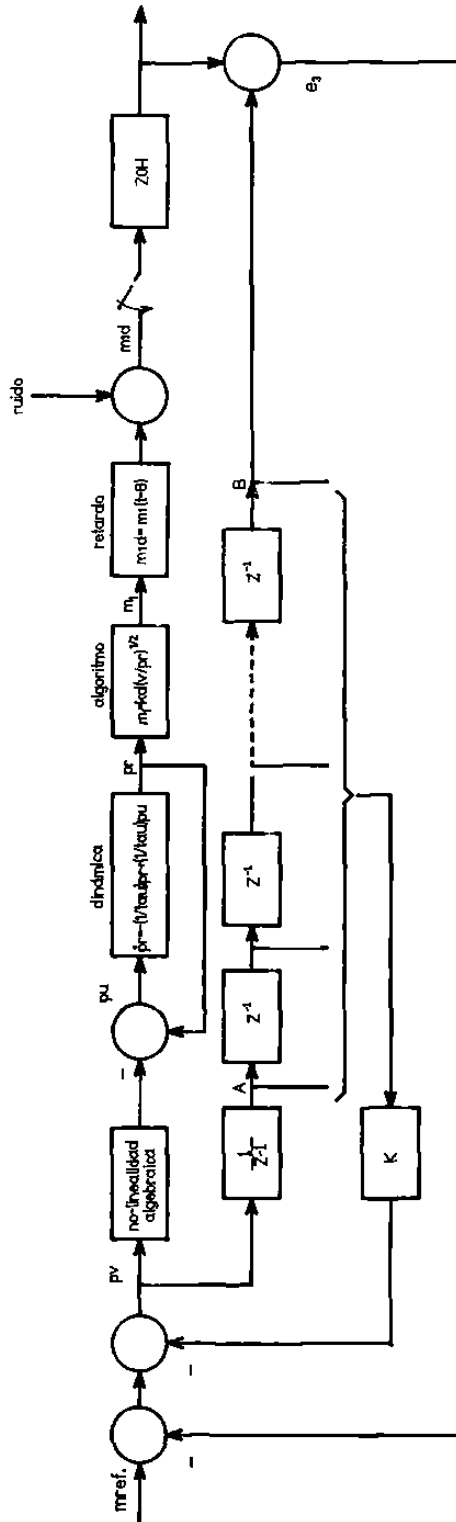


Figura 5.12

Conclusión.

Se analizan esquemas como: PID, donde se lograron resultados poco satisfactorios, Predictor de Smith que a través de su estructura logra eliminar los efectos del retardo, permite tener acceso a una señal de retroalimentación. Dentro de este esquema se simularon representaciones del retardo, la primera consiste en sustituir el retardo por un retardo puro y la segunda por una aproximación. Ambas respuestas son muy semejantes: se logra reducir la magnitud del ruido inyectado, regular la salida con respecto a la masa de referencia, además de mantener estabilidad.

Otra técnica de control utilizada fue por medio de Asignación de polos, con una estructura semejante a la del regulador de Smith, donde también pudimos observar el rechazo ante este tipo de perturbaciones aditivas. En la estructura del modelo de Asignación de polos, caso discreto, se logra reducir el ancho de banda del ruido, sin embargo su magnitud no se reduce.

Se llevaron a cabo simulaciones con ruido multiplicativo, observándose una sensibilidad del proceso de linealización a cambios de ganancia estática de la planta, por lo que se propone como trabajo futuro incluir un controlador adaptable de un solo parámetro que compense estos cambios de ganancia.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo fue el de disminuir la variabilidad de la masa depositada ante perturbaciones que se pudieran presentar en el proceso. Si las perturbaciones se modelan aditivamente, los resultados son satisfactorios. En el caso de perturbaciones multiplicativas se deberá escoger un controlador mas sofisticado. Cabe aclarar que ambas perturbaciones: aditivas y multiplicativas, se presentan en el proceso. Sin embargo nuestro estudio se enfocó solo en las perturbaciones aditivas.

Partimos de un modelo propuesto que consiste en describir esencialmente dos fenómenos. Primeramente definir del proceso de Galvanizado, la dinámica de la masa depositada en una de las caras de la lámina; esta descripción poseé una no linealidad.

Segundo, debido a que las mediciones de esta masa no pueden ser tomadas a la salida de la paila por la temperatura que posee la lámina, se presenta como consecuencia un retardo.

Debido a que no existe una técnica general para diseño de controladores de sistema no lineales y con retardo se propusieron la siguiente transformación y simplificaciones:

- Se realizó una linealización entrada/salida por retroalimentación de estado, que consiste en un cambio de coordenadas y retroalimentación del estado.
- Se propuso una aproximación de Padé para el retardo (con orden relativo 1) la cual tiene un error en norma 1, 2 o ∞ menor que la normalmente usada (con orden relativo 0) cuando el orden del sistema aproximado es mayor o igual a 2.

En todos los esquemas vistos se usó una linealización entrada/salida para usar técnicas de sistemas lineales en el diseño; pudimos observar que al suministrar ruido aditivo:

- Se redujo la magnitud de ese ruido en tiempo continuo.
- Se redujo el ancho de banda del ruido en tiempo discreto.

Trabajos Futuros.

Como trabajo futuro, nos permitimos hacer las siguientes sugerencias:

- En el caso de ruido multiplicativo se observó que la linealización entrada/salida es sensible a cambios en la ganancia del sistema por lo que propone incluir un controlador adaptable de un solo parámetro que compense los cambios de ganancia.
- Validar el modelo contra mediciones reales en la planta.

APENDICE

A.1 Gráficas y cálculo del error.

Metodología para la obtención de la gráfica del error:

- Se obtiene una realización canónica controlable para cada aproximación, con entrada escalón unitario.
- Se integra la función en un intervalo propuesto, (tiempo inicial 0, tiempo final 5). Si $t < 1$, el error = función (salida de la aproximación), si $t > 1$, el error = función - 1 (salida de la aproximación menos uno).

Metodología para el cálculo del error:

- Se pasa del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo (mediante la transformada inversa de Laplace), la aproximación por un escalon.
- Una vez obtenido esto, se procede a integrar la función. Si $t < 1$, error = función (en el

tiempo), si $t > 1$, error = función - 1.

- Calcular las normas 1, 2 e ∞

$$\|e(t)\|_1 = \int_0^1 |f(t)| dt = \int_0^5 |f(t)| dt + \int_1^5 |f(t) - 1| dt \quad (\text{A.1})$$

$$\|e(t)\|_2 = \left[\int_0^5 |f(t)|^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\int_0^1 |f(t)|^2 dt + \int_1^5 |f(t) - 1|^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.2})$$

$$\|f(t)\|_\infty = \sup_t |f(t)| \quad 0 \leq t \leq 5 \quad (\text{A.3})$$

La integración de estas funciones, se realizó con la función *quad* del MATLAB.

Aproximación de Padé primer orden.

—orden relativo cero—

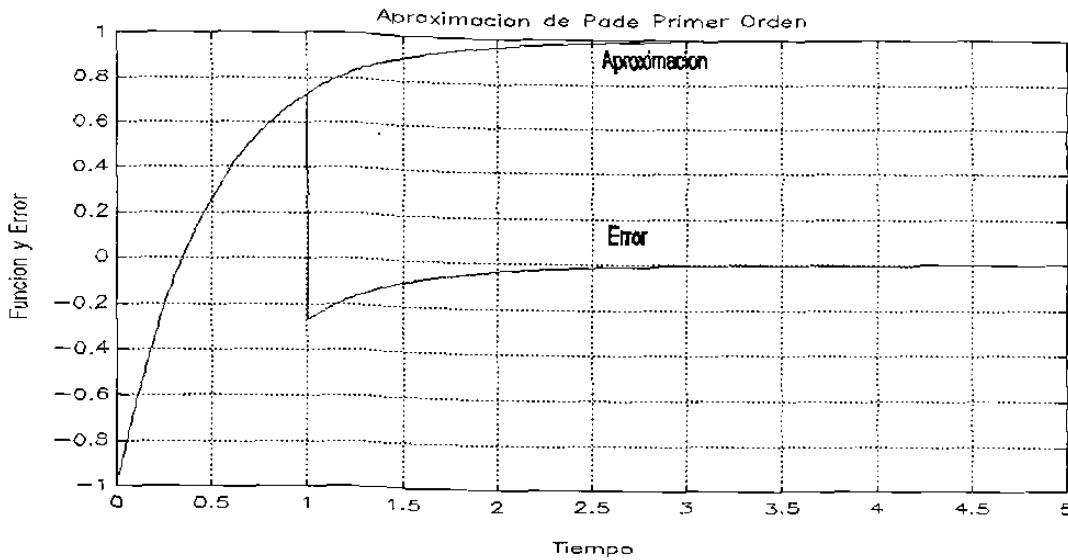


Figura A.1

Forma canónica controlable de la aproximación de primer orden.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \left[\frac{-2}{T} \right] x_1 + u \\ y &= \left[\frac{4}{T} \right] x_1 - u \end{aligned} \tag{A.4}$$

Programa en MATLAB

```
clear
t0 = 0;
tf = 5;
x0 = [0]';
[t,x] = ode23('ner1',t0,tf,x0);
y = 4*x(:,1) - 1;
l = length(t);

function xdot = ner1(t,x);
u = 1;
xdot(1) = -2*x(1) + u; end
```

```

for k = 1:l
if t(k)<1
e(k) = y(k);
end
if t(k) >= 1
e(k) = y(k)-1 ;
end
end
end
plot(t,y,t,e);
end
    
```

Aproximación de Padé primer orden.

—orden relativo uno—

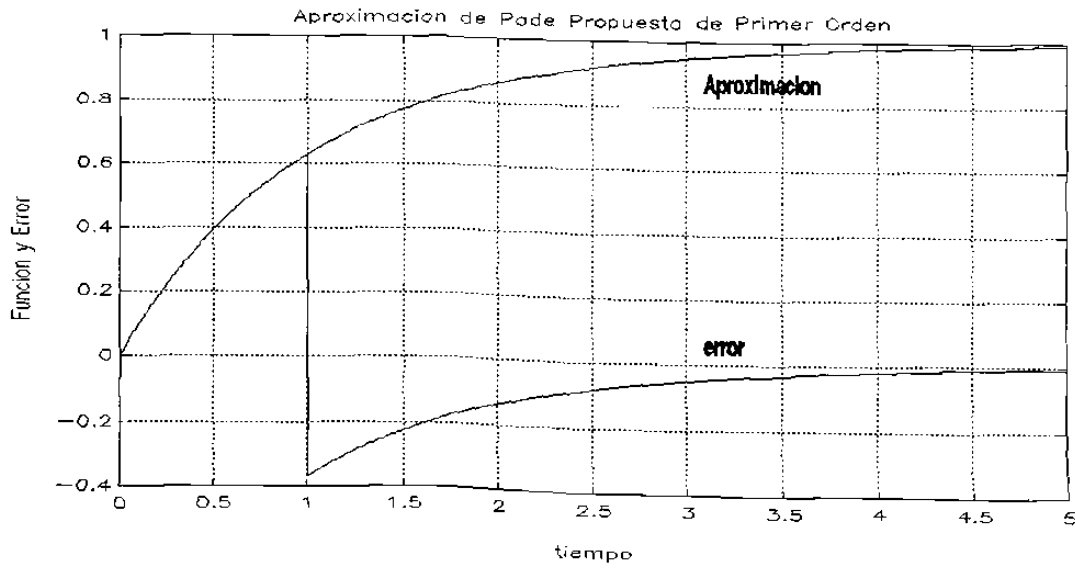


Figura A.2

Forma canónica controlable de la aproximación de primer orden.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \left[\frac{-1}{T} \right] x_1 + u \\ y &= \left[\frac{1}{T} \right] x_1 \end{aligned} \tag{A.5}$$

Programa en MATLAB

```

clear
t0 = 0;
tf = 5;
x0 = [0]';
[t,x] = ode23('er1',t0,tf,x0);
y = 1*x(:,1);
l = length(t);
for k = 1:l
    if t(k)<1
        e(k) = y(k);
    end
    if t(k) >= 1
        e(k) = y(k)-1 ;
    end
end
end
plot(t,y,t,e);
end
function xdot = er1(t,x);
u = 1;
xdot(1) = - x(1) + u; end

```

Aproximación de Padé tercer orden.

—orden relativo cero—

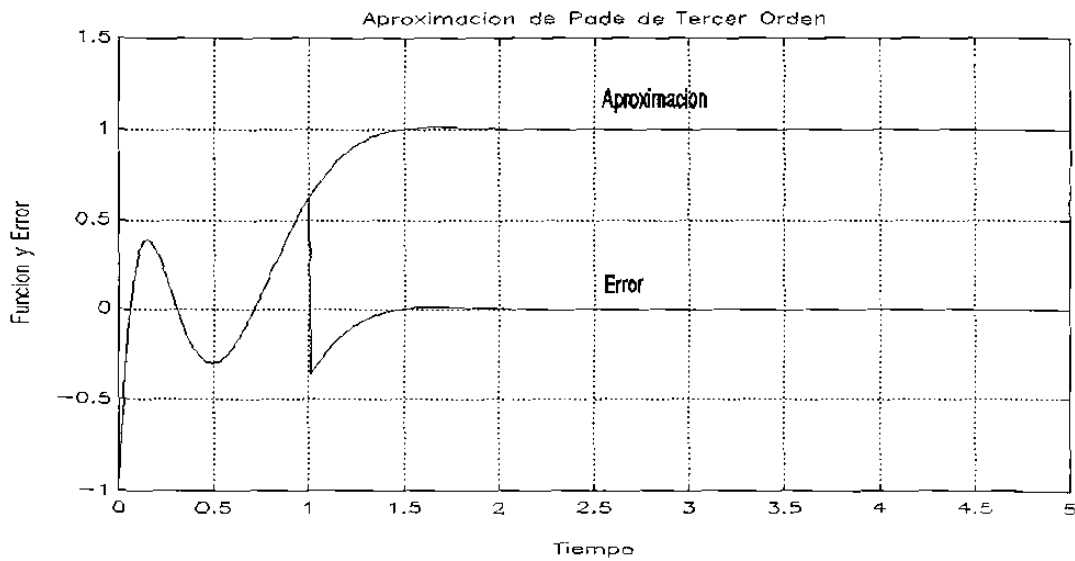


Figura A.3

Forma canónica controlable de la aproximación de tercer orden.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{120}{T^3} & -\frac{60}{T^2} & -\frac{12}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (\text{A.6})$$

$$y = \begin{bmatrix} \frac{240}{T^3} & 0 & \frac{24}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} - u \quad (\text{A.7})$$

Programa en MATLAB

```
clear
t0 = 0;
tf = 5;
x0 = [0 0 0];
[t,x] = ode23('er3',t0,tf,x0);
y = 240*x(:,1) + 24*x(:,3) - 1;
l = length(t);
for k = 1:l
if t(k)<1
    e(k) = y(k);
end
if t(k) >= 1
    e(k) = y(k)-1 ;
end
end
end
plot(t,y,t,e);
end
```

```
function xdot = er3(t,x);
u = 1;
xdot(1) = x(2);
xdot(2) = x(3);
xdot(3) = - 120*x(1) - 60*x(2) -12*x(3) + u;
end
```

Aproximación de Padé tercer orden.

—orden relativo uno—

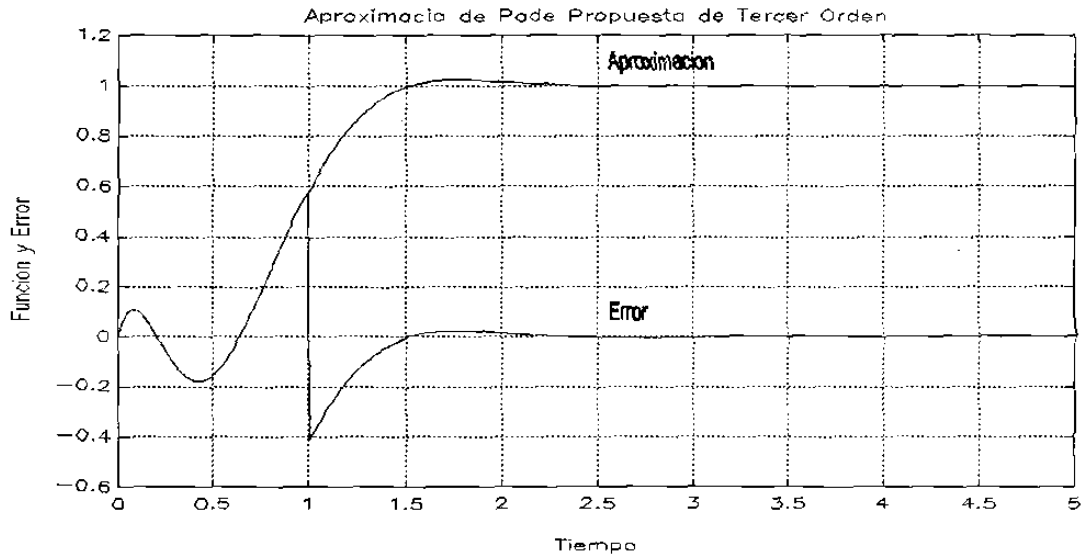


Figura A.4

Forma canónica controlable de la aproximación de tercer orden.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{60}{T^3} & -\frac{36}{T^2} & -\frac{9}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (\text{A.8})$$

$$y = \begin{bmatrix} \frac{60}{T^3} & -\frac{24}{T^2} & \frac{3}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

Programa en MATLAB

```

clear
t0 = 0;
tf = 5;
x0 = [0 0 0]';
[t,x] = ode23('ner3',t0,tf,x0);
y = 60*x(:,1) - 24*x(:,2) + 3*x(:,3);
l = length(t);
for k = 1:l
    if t(k)<1
        e(k) = y(k);
    end
    if t(k) >= 1
        e(k) = y(k)-1 ;
    end
end
plot(t,y,t,e);
end

function xdot = ner3(t,x);
u = 1;
xdot(1) = x(2);
xdot(2) = x(3);
xdot(3) = - 60*x(1) - 36*x(2) - 9*x(3) + u;
end

```

Aproximación de Padé quinto orden.

—orden relativo cero—

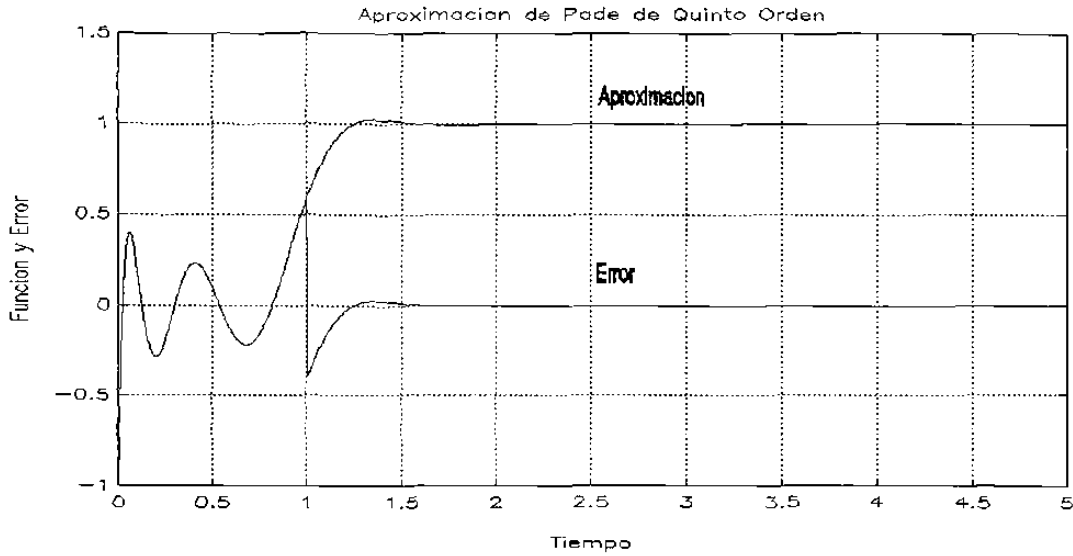


Figura A.5

Forma canónica controlable de la aproximación de quinto orden.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{30240}{T^5} & -\frac{15120}{T^4} & -\frac{3360}{T^3} & -\frac{420}{T^2} & -\frac{30}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \tag{A.10}$$

$$y = \begin{bmatrix} \frac{60480}{T^5} & 0 & \frac{6720}{T^3} & 0 & \frac{60}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} - u \quad (\text{A.11})$$

Programa en MATLAB

```

clear
t0 = 0;
tf = 5;
x0 = [0 0 0 0 0]';
[t,x] = ode23('er5',t0,tf,x0);
y=60480*x(:,1)+6720*x(:,3)+60*x(:,5) - 1;
l = length(t);
for k = 1:l
    if t(k)<1
        e(k) = y(k);
    end
    if t(k) >= 1
        e(k) = y(k)-1 ;
    end
end
plot(t,y,t,e); end

function xdot = er5(t,x);
u = 1;
xdot(1) = x(2);
xdot(2) = x(3);
xdot(3) = x(4);
xdot(4) = x(5);
xdot(5)=-30240*x(1)-15120*x(2)-3360*x(3)-420*x(4)-30*x(5) + u;
end
    
```

Aproximación de Padé quinto orden.

—orden relativo uno—

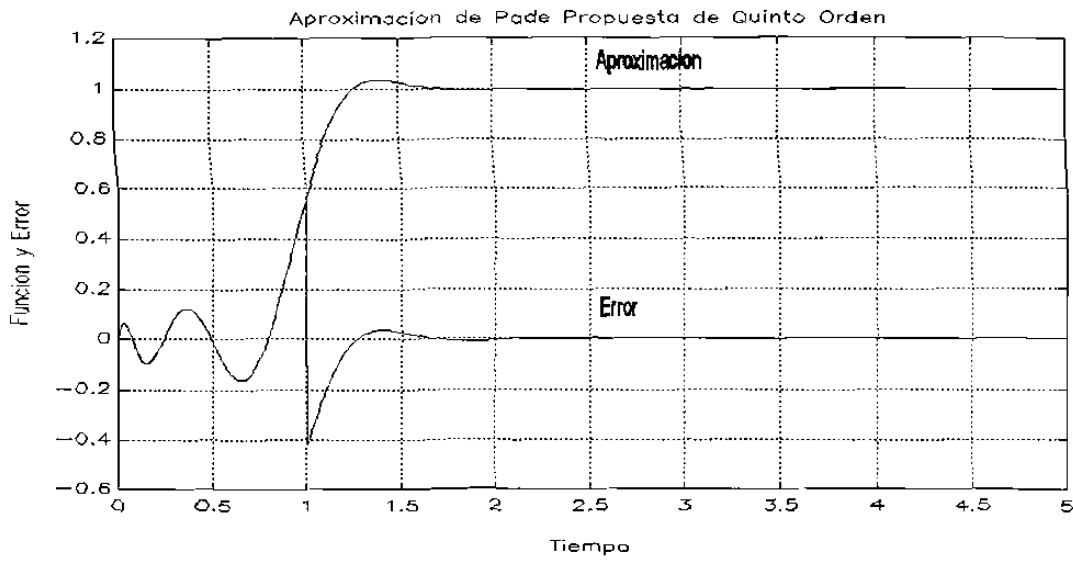


Figura A.6

Forma canónica controlable de la aproximación de quinto orden.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{15120}{T^5} & -\frac{8400}{T^4} & -\frac{2100}{T^3} & -\frac{300}{T^2} & -\frac{25}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \tag{A.12}$$

$$y = \begin{bmatrix} \frac{15120}{T^5} & -\frac{6720}{T^4} & \frac{1260}{T^3} & -\frac{120}{T^2} & \frac{5}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

Programas en MATLAB

```
function xdot = ner5(t,x);
u = 1;
xdot(1) = x(2);
xdot(2) = x(3);
xdot(3) = x(4);
xdot(4) = x(5);
xdot(5)=-15120*x(1)-8400*x(2)-2100*x(3)-300*x(4)-25*x(5) + u;
end

clear
t0 = 0;
tf = 5;
x0 = [0 0 0 0 0]';
[t,x] = ode23('ner5',t0,tf,x0);
y=15120*x(:,1)-6720*x(:,2)+1260*x(:,3)-120*x(:,4)+5*x(:,5);
l = length(t);
for k = 1:l
if t(k)<1
    e(k) = y(k);
end
if t(k) >= 1
    e(k) = y(k)-1 ;
end
end
end
plot(t,y,t,e);
end
```

A.2 Aproximaciones de orden mayor a las anteriores.

Las aproximaciones que comienzan en cero son las propuestas; obsérvese que el número de veces que cruza por cero es el orden de la aproximación.

Aproximación de Padé sexto orden.
—orden relativo 0 y 1—

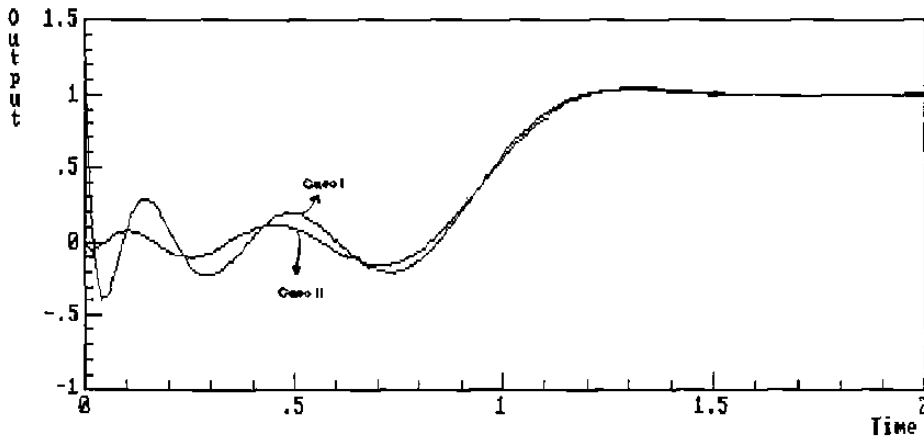


Figura A.7

Aproximación de Padé séptimo orden.
—orden relativo 0 y 1—

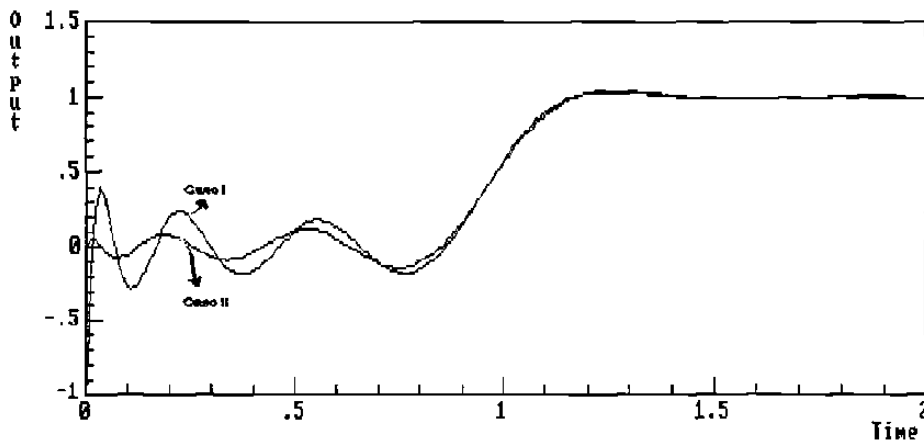


Figura A.8

Aproximación de Padé octavo orden.

—orden relativo 0 y 1—

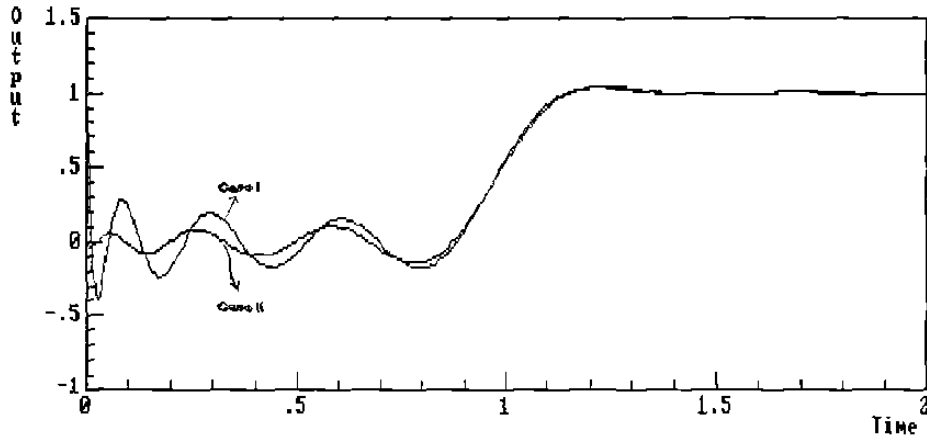


Figura A.9

Aproximación de Padé noveno orden.

—orden relativo 0 y 1—

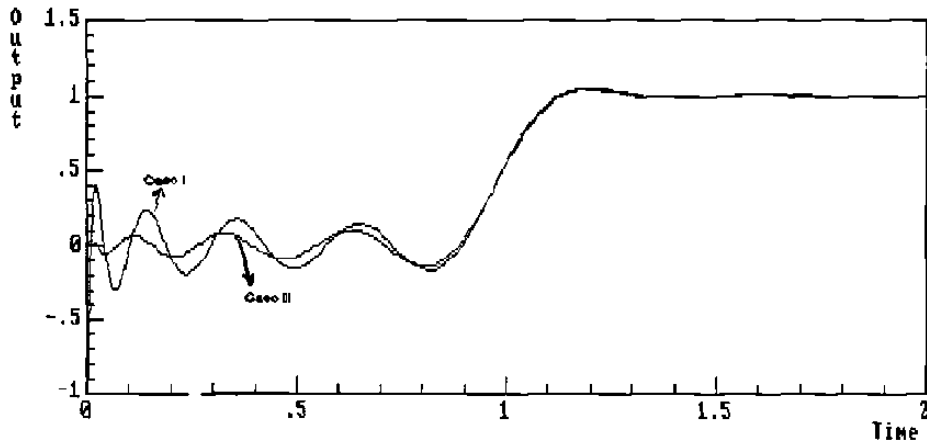


Figura A.10

A.3 Programas en SIMNON para realizar las simulaciones de los esquemas 5.3 con aproximación.

Todas las variables utilizadas coinciden con las de los esquemas mencionados; las restantes se consideran como variables auxiliares.

```

MACRO FROG1
"
turn seed 117
syst AAA kpv alea1 pdelay cpv
store m1[aaa] m2[aaa] mref E3[PDELAY] al[alea1]
"
END

CONTINUOUS SYSTEM AAA
"
" Bloque que abarca hasta salidas de las masas m1 m2 sin retardo del esquema 5.3
"
INPUT PV
OUTPUT M1 M2           " salidas m1 de la planta y m2 del modelo
STATE PR               " estado
STATE Y               " Y = m2
DER DPR DY
TIME T
DPR = -PR/TAU + PU/TAU
DY = CHIS*(PR -PU)
M1 = ((ko*do*sqrt(v))/(SQRT(PR+PO)))
M2 = Y
CHIS = do*ko*sqrt(v)/(2*TAU*(SQRT(PO+PR) ^ 3))
PU = PR -PV/CHIS
v:1500
ko:55
do:1
PR:0                   " condiciones iniciales
Y:21.3
PO:10000
TAU:5                  " constante de tiempo del regulador
"
END

CONTINUOUS SYSTEM PDELAY
"
" Aproximacion de Padé tercer orden. —tipo II—
"

```

```

input M1 M2 al
output e3 m1d m2d
state r1 r2 r3 p1 p2 p3           "estados de la aproximación
der dr1 dr2 dr3 dp1 dp2 dp3
time t
dr1 = r2
dr2 = r3
dr3 = -(60*r1)/(d*d*d)-(36*r2)/(d*d)-(9*r3)/(d)+M
dp1 = p2
dp2 = p3
dp3 = -(60*p1)/(d*d*d)-(36*p2)/(d*d)-(9*p3)/(d)+M2
m1d = (60*p1)/(d*d*d)-(24*p2)/(d*d)+(3*p3)/d + al
m2d = (60*r1)/(d*d*d)-(24*r2)/(d*d)+(3*r3)/d
e3 = m1d-m2d
p1:0
p2:0
p3:0
r1:0
r2:0
r3:0
d:15           " retardo de tiempo
"
END

```

CONTINUOUS SYSTEM KPV

```

"
" Controlador PI
"
input M2 e3 mref
output pv           " nueva variable de control al realizar la linealización
state p1
der dp1
time t
dp1 = e2
e1 = mref-e3
e2 = e1-M2
pv = (kp1/Ti1)*p1+Kp1*e2
Kp1:3
Ti1:15
p1:0
"
END

```

CONTINUOUS SYSTEM ALEA1

" Ruido blanco.

```

OUTPUT AL
time t
al = STDEV*NORM(t) + MEAN
MEAN:0
STDEV:0.01
"
END

```

CONNECTING SYSTEM CPV

```

" Conexiones del programa para esquema 5.3

mref[kpv] = 1           " masa de referencia
e3[kpv]   = e3[pdelay]
M2[KPV]   = M2[AAA]
al[pdelay] = al[alea1]
pv[AAA]   = pv[kpv]
M[pdelay] = M[AAA]
M2[pdelay] = M2[AAA]
"
END

```

Programas en SIMNON para las simulaciones realizadas con RETARDO PURO de la figura 5.3.

Condiciones similares a los programas anteriores, con la diferencia de la instrucción DELAY para realizar el retardo.

```

MACRO MA1
"
turn seed 117
SYST A1 A2 A4 CA1
STORE M1[A1] M2[A1] MREF E3[A1] al[a4]
"
END

```

CONTINUOUS SYSTEM A1

```

" Programa que abarca hasta masa m1 m2 sin retardo del esquema 5.3

INPUT PV al

```



```

OUTPUT M2 e3
STATE PR
STATE Y
DER DPR DY
TIME T
DPR = -PR/TAU + PU/TAU           " estado
DY  = CHIS*(PR -PU)
M1  = (ko*do*sqrt(v))/(SQRT(PR+PO))
M2  = Y
m1d = delay(m1,1) + al           " masa de la planta con retardo de 1 seg.
m2d = delay(m2,1)               " masa del modelo con retardo de 1 seg.
e3  = m1d - m2d
CHIS = do*ko*sqrt(v)/(2*TAU*(SQRT(PO+PR) ^ 3))
PU   = PR -PV/CHIS
v:1500
ko:55
do:1
PR:0
Y:21.3                           " condiciones iniciales
PO:10000
TAU:5                             " constante de tiempo del regulador de presión
"
END

```

CONTINUOUS SYSTEM A2

```

" Controlador PI

input M2 e3 mref
output pv
state p1
der dp1
time t
dp1 = e2
e1  = mref - e3
e2  = e1-M2
pv  = (kp1/Ti1)*p1 + Kp1*e2      " controlador PI utilizado dentro del esquema 5.3
Kp1:3
Ti1:9
p1:0
"
END

```

CONTINUOUS SYSTEM A4

```
" Ruido blanco

OUTPUT AL
TIME t
AL = STDEV*NORM(t) + MEAN
MEAN:0
STDEV:0.01
"
END
```

CONNECTING SYSTEM CA1

```
" Conexiones del programa para esquema 5.3

TIME T
al[A1] = al[A4]
pv[A1] = pv[A2]
MREF[A2] = 1           " masa de referencia
M2[A2] = M2[A1]
E3[A2] = E3[A1]
"
END
```

Programas en SIMNON para realizar las simulaciones con ASIGNACION DE POLOS (Caso continuo) de la figura 5.9

```
MACRO MM1
"
turn seed 117
SYST M1 M2 M3 M4 ALEA1 CM1
STORE m1[m1] m1d[m4] m2d[m2] al[alea1] e3[m4]
"
END
```

CONTINUOUS SYSTEM M1

" Bloque que abarca hasta salida m1 del esquema 5.9 sin retardo.

input pv "nueva variable de control al realizar la transf.

```

output m1
state pr
der dpr
time t
dpr = -(pr/tau)+(pu/tau)
m1 = (ko*do*sqrt(v))/(sqrt(pr+po)) "masa depositada
chis = do*ko*sqrt(v)/(2*tau*(sqrt(pr+po) ^ 3))
pu = pr - pv/chis
pr:0
v:1500
po:10000 " condiciones iniciales
do:1
ko:55
tau:5
"
END

```

CONTINUOUS SYSTEM M2

" Forma canónica diagonal equivalente de la aproximación de quinto orden y planta linealizada.

```

input pv
output kx m2d
state x1 x2 x3 x4 x5 x6
der dx1 dx2 dx3 dx4 dx5 dx6
dx1 = - 3.65*x1 + 6.54*x2 + 0.548*x6
dx2 = - 6.54*x1 - 3.65*x2 + 0.836*x6
dx3 = - 5.70*x3 + 3.21*x4 - 0.910*x6
dx4 = - 3.20*x3 - 5.70*x4 - 0.413*x6
dx5 = - 6.28*x5 + 16.53*x6
dx6 = pv
m2d = 57.7*x1 + 329.4*x3 + 16.53*x5 " masa con retardo
kx = 3.5*x1 - 7.343*x2 - 1.822*x3 + 2.3256*x4 + .079*x5 - .68*x6 " k de retroalimentación
x1:0
x2:0
x3:0
x4:0
x5:0
x6:21.30
"
END

```

CONTINUOUS SYSTEM M3

" Conexiones del esquema 5.9

```
input kx mref e3
output pv
time t
e2 = ga*mref
e1 = e2 - e3
pv = e1 - kx
ga:0.3731343284
"
END
```

CONTINUOUS SYSTEM M4

" Transformación equivalente de la aproximación de quinto orden.

```
input m1 m2d al
output e3 m1d
state r1 r2 r3 r4 r5
der dr1 dr2 dr3 dr4 dr5
dr1 = - 3.65*r1 + 6.54*r2 + 0.548*m1
dr2 = - 6.54*r1 - 3.65*r2 + 0.836*m1
dr3 = - 5.70*r3 + 3.21*r4 - 0.910*m1
dr4 = - 3.20*r3 - 5.70*r4 - 0.413*m1
dr5 = - 6.28*r5 + 16.53*m1
m1d = 57.70*r1 + 329.4*r3 + 16.53*r5 + al " masa con retardo mas ruido aditivo
e3 = m1d - m2d
r1:0
r2:0
r3:0
r4:0 " condiciones iniciales
r5:0
"
END
```

CONTINUOUS SYSTEM ALEA1

" Ruido blanco

```
OUTPUT AL
time t
al = STDEV*NORM(t) + MEAN
MEAN:0
STDEV:0.01
" END
```

CONNECTING SYSTEM CM1

" Conexiones del programa para el esquema 5.9

```

pv[M1] = pv[M3]
al[M4] = al[ALEA1]
pv[M2] = pv[M3]
kx[M3] = kx[M2]
mref[m3] = 1
e3[M3] = e3[M4]
m1[M4] = m1[M1]
m2d[M4] = m2d[M2]
"
END

```

Programas realizados en SIMNON para realizar las simulaciones de Asignación de Polos (caso discreto) de la figura 5.12

MACRO MD1

```

"
turn seed 117
SYST D1 Dp D3 D4 ALEA CONREG
STORE A B M1[d1] M1D[Dp] MREF E3[D3] al[alea]
"
END

```

CONTINUOUS SYSTEM D1

" Programa que abarca hasta la salida m1 del recuadro 5.12 sin retardo.

```

INPUT PV
OUTPUT M1
STATE PR
DER DPR
TIME T
DPR = -PR/TAU + PU/TAU
M1 = (KO*DO*SQRT(V))/(SQRT(PR+PO))           " masa depositada
CHIS = DO*KO*SQRT(V)/(2*TAU*(SQRT(PO+PR)^3))
PU = PR -PV/CHIS
V:1500
KO:55
DO:1
PR:0
PO:10000

```

```
TAU:5          " constante de tiempo del regulador de presión
"
END
```

CONTINUOUS SYSTEM Dp

" Masa con retardo

```
INPUT M1 al
OUTPUT M1D
m1d = delay(m1,50) + al          " masa depositada con retardo de 50 seg. mas ruido
"
END
```

DISCRETE SYSTEM D3

" Forma canónica para retardo de 50 seg.

```
INPUT PV M1D
OUTPUT KX E3 A B
STATE x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9 x10 x11 x12 x13 x14
STATE x15 x16 x17 x18 x19 x20 x21 x22 x23 x24 x25
STATE x26 x27 x28 x29 x30 x31 x32 x33 x34 x35
STATE x36 x37 x38 x39 x40 x41 x42 x43 x44
STATE x45 x46 x47 x48 x49 x50 x51
NEW nx1 nx2 nx3 nx4 nx5 nx6 nx7 nx8 nx9 nx10
NEW nx11 nx12 nx13 nx14 nx15 nx16 nx17
NEW nx18 nx19 nx20 nx21 nx22 nx23
NEW nx24 nx25 nx26 nx27 nx28 nx29 nx30
NEW nx31 nx32 nx33 nx34 nx35 nx36 nx37
NEW nx38 nx39 nx40 nx41 nx42 nx43 nx44
NEW nx45 nx46 nx47 nx48 nx49 nx50 nx51
TIME t
TSAMP ts
nx1 = x1 + h*PV
nx2 = x3
nx3 = x4
nx4 = x5
nx5 = x6
nx6 = x7
nx7 = x8
nx8 = x9
nx9 = x10
nx10 = x11
nx11 = x12
nx12 = x13
```

```

nx13 = x14
nx14 = x15
nx15 = x16
nx16 = x17
nx17 = x18
nx18 = x19
nx19 = x20
nx20 = x21
nx21 = x22
nx22 = x23
nx23 = x24
nx24 = x25
nx25 = x26
nx26 = x27
nx27 = x28
nx28 = x29
nx29 = x30
nx30 = x31
nx31 = x32
nx32 = x33
nx33 = x34
nx34 = x35
nx35 = x36
nx36 = x37
nx37 = x38
nx38 = x39
nx39 = x40
nx40 = x41
nx41 = x42
nx42 = x43
nx43 = x44
nx44 = x45
nx45 = x46
nx46 = x47
nx47 = x48
nx48 = x49
nx49 = x50
nx50 = x51
nx51 = A

```

" retardo discretizado

A = X1

" masa sin retardo

B = X2

" masa con retardo

TS = T + H

KX = 0.25*x1

" k de retroalimentación

E3 = MID - B

X1:21.3

H:1

"

END

CONTINUOUS SYSTEM D4

" Conexiones para esquema 5.12

```
input kx mref e3
output pv
time t
e1 = g*mref
e2. = e1 - e3
pv = e2 - kx
g:0.25
"
END
```

DISCRETE SYSTEM ALEA

" Ruido blanco discreto

```
OUTPUT AL
TIME t
TSAMP TS
AL = STDEV*NORM(t) + MEAN
TS = T + 0.1
MEAN:0
STDEV:0.01
"
END
```

CONNECTING SYSTEM CONREG

" Conexiones para programa del esquema 5.12

```
PV[D1] = PV[D4]
m1[dp] = m1[d1]
AL{dp} = AL[ALEA]
PV[D3] = PV[D4]
M1D[D3] = M1D{Dp}
E3[D4] = E3[D3]
KX[D4] = KX[D3]
MREF[D4] = 1
END
```


R E F E R E N C I A S

- [1] Åström K.J. and T. Hagglund (1988). "*Automatic Tuning of PID Controllers*". Instrument Society of America.
- [2] Bahill T.A. (1983). "*A Simple Adaptive Smith-Predictor for Controlling Time-Delay Systems*", Control Systems Magazine, IEEE, May, Vol. 3, No. 2, pp. 16-22
- [3] DeCarlo A. (1989). "*Linear Systems*", Prentice Hall.
- [4] Isidori A. (1985). "*Nonlinear Control Systems*", Second Edition, Springer-Verlag.
- [5] Jacobs O.L.R. and Chen D.S. (1991). "*Regulation of Deposited Zinc in Hot-Dip Galvanising*", European Control Conferencia, Grenoble, France, July, pp. 773-778
- [6] Landau I.D., Fenot C., Rolland F. & Vigneron G. (1992). "*Open Loop Adaptive Feedback Control of Deposited Zinc in Hot-Dip Galvanizing*", IFAC ACASP/92, Grenoble, France, July, pp. 229-234
- [7] Luenberger D. (1968). "*Optimization By Vector Space Methods*", John Wiley & Sons, Inc.
- [8] Wynne D.C., Vickers A.L. & Graham F. (1987). "*Galvanizing developments in the U.K.*", Iron and Steel Engineer, July, pp. 40-47

BIBLIOGRAFIA

- [i] Hmamed A.(1986). "*On The Stability of Time-Delay Systems: New Results*", Int. J. Control, Vol. 43, No. 1, pp. 321-324

- [ii] Ichikawa K. (1985). "*Frequency-Domain Pole Assignment and Model-Matching for Delay Systems*", Int. J. Control, Vol. 41, No. 4, pp. 1015-1024
- [iii] Karny M., Halouskova A. & Nagy I. (1988). "*Modelling, Identification and Adaptive Control of Cross-Direction Basis Weight of Paper Sheets*", IEE Conf. Control 88, Oxford, pp. 159-164
- [iv] Kojima A. and Ishijima S. (1992). "*Robust Stabilization Problem for Time Delay Systems Based on Spectral Decomposition Approach*", ACC, Boston, Jun, pp. 998-1003
- [v] Morari M. and Zafiriou E. (1989). "*Robust Control Process*", Prentice-Hall.
- [vi] Ogata K. (1987). "*Discrete-Time Control Systems*", Prentice Hall.
- [vii] Prett M.D. and García E.C. (1988). "*Fundamental Process Control*", Butterworths Series in Chemical Engineering.
- [viii] Thornton J.A. and H.F. Graff (1976). "*An Analytical Description on the Jet Finishing Process for Hot-Dip Metallic Coatings on Strip*", Metallurgical Transactions, Dec, Vol 7B, pp. 607-618
- [ix] Wang J. and B. W. Wan (1982). "*Control Approaches for Processes with Large Time Delays: A review*", ISA Transactions, Vol 27, No.4, pp. 61-65
- [x] Wittenmark B. and Åström K.J. (1990). "*Computer Controlled Systems: Theory and Design*", Prentice Hall
- [xi] Youcef-Toumi K. and Reddy S. (1992). "*Analysis of Linear Time Invariant Systems with Time Delay*", ACC, Boston, Jun, pp. 1940-1944

