

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA**



**AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS DE RECUBRIMIENTO  
METALICO**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRONICO**

**PRESENTADO POR:**

**NIDIA ROSA ACHA DE LA CRUZ**

**PROMOCION : 83-I**

**LIMA-PERU  
2003**

**Agradecimiento a Dios, mis padres, esposo, hermanos e hijos.**

**Mi eterno Agradecimiento al Dr. Arturo Rojas, MSc. Raúl Benítez por sus  
valiosos aportes y consejos.**

**AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE  
RECUBRIMIENTO METALICO**

## **SUMARIO**

El presente Informe trata sobre el diseño de un sistema de control óptimo de temperatura aplicado en la automatización del proceso de cincado, con la finalidad de obtener resultados óptimos en el control de la variable indicada, que permita en un futuro la implementación, y por lo tanto, la mejora de la calidad y productividad de las piezas recubiertas de cinc, previendo los posibles problemas de corrosión. Asimismo se presenta la propuesta de implementación del sistema de control secuencial y los componentes que lo conforman, que conjuntamente con la estructura del control realimentado de temperatura usando la estrategia de control óptimo, conforman el sistema de automatización del proceso de cincado. Debido a que además del control de temperatura en la celda electrolítica, se hace necesario el control de la tensión entre los electrodos para suministrar la energía necesaria para lograr el espesor del recubrimiento óptimo en un tiempo determinado, de acuerdo a las normas establecidas, se ha usado el control proporcional en lazo abierto, considerando para ello un banco de ganancias, que es seleccionado por software de acuerdo a la densidad de corriente necesaria en un determinado caso de recubrimiento.

Por lo tanto, la propuesta de implementación, permitirá disminuir los riesgos de contaminación a que estarían expuestos los trabajadores, y en esta misma dinámica, sugerir el control de los contaminantes químicos, esto sería materia de otro trabajo.

## INDICE

<b>Prologo</b>	01
<b>Capitulo I</b>	
<b>Planteamiento del Estudio</b>	
1.1 Antecedentes	03
1.2 Formulación del problema	05
1.3 Objetivos del Informe de Suficiencia	06
1.4 Objetivo General	06
1.4.1 Objetivo Específico	06
1.5 Alcances del Informe de Suficiencia	07
<b>Capitulo II</b>	
<b>Fundamento Teórico del Estudio</b>	
2.1 Recubrimiento metálico	08
2.1.1 Definiciones	08
2.1.2 Técnicas generales de recubrimiento metálico	16
2.1.3 Técnicas de recubrimiento metálico utilizando cinc	25
2.2 Descripción de los Procesos de una planta de recubrimiento metálico de cincado	27
2.2.1 Etapas	27

2.3	Automatización	46
2.3.1	Objetivos	47
2.3.2	Formulación de la estrategia de automatización	47
2.3.3	Especificación funcional de la estrategia de la Instrumentación	53

## **Capítulo III**

### **Etapas del Proceso de Recubrimiento Metálico de Cincado Alcalino**

3.1	Etapas del proceso de recubrimiento metálico de cincado alcalino en bastidor	58
3.1.1	Etaqa secuencial del sistema de proceso de recubrimiento metálico de cincado en bastidor	60
3.2.1	Selección del elemento actuador para desplazamiento de los objetos a recubrir	61
3.2.2	Motores paso a paso	62

## **Capítulo IV**

### **Modelamiento del Proceso de Cincado en la Cuba Electrolítica**

4.1.	Principios	72
4.2.	Descripción del recubrimiento metálico de cincado en la cuba Electrolítica	73
4.3.	Modelamiento del Proceso	73
4.3.1.	Determinación de la estabilidad del sistema linealizado	83

4.3.2.	Controlabilidad y Observabilidad	85
4.3.3.	Discretización del proceso de cincado en la celda	85
4.3.4.	Simulación de la respuesta del proceso a una entrada escalón	86

## **Capítulo V**

### **Diseño del Sistema de Control Optimo de Temperatura**

5.1	Diseño del Sistema de Control Optimo Proporcional Integral	89
5.1.1	Introducción	89
5.1.2	Control Optimo Cuadrático Estacionario	90
5.1.3	Diseño del Sistema de Control Optimo Proporcional Integral de Temperatura	92
5.1.4	Simulación del Sistema de Control Optimo Proporcional Integral de Temperatura y control proporcional de tensión entre los electrodos	95

## **Capítulo VI**

### **Propuesta de Implementación del Sistema de**

### **Automatización de los Procesos de Recubrimiento**

#### **Metálico de Cincado**

6.1	Estructura del Sistema de Control Secuencial	101
6.1.1.	Diagrama de bloques de implementación del Sistema de Control Secuencial	101
6.1.2.	Hardware del Sistema de Control Secuencial	105
6.2	Estructura del Sistema de Control Realimentado	106
6.2.1.	Diagrama de bloques de implementación del Sistema de	106

Control Optimo Proporcional Integral de Temperatura	
6.2.2. Hardware del Sistema de Control de Temperatura	108
6.3. Propuesta del diagrama de Automatización de los Procesos de Recubrimiento Metálico-Cincado	111

## **Capitulo VII**

### **Evaluación Económica de la Propuesta de Implementación de la automatización de los procesos de recubrimiento metálico de cincado**

7.1 Bases para la evaluación económica	117
7.2 Estimación de costos	117
7.2.1 Costos de Equipo necesario para la instalación de una Planta de cincado	118
7.2.2 Costos de los componentes electrónicos	119
7.2.3 Tarjeta de Adquisición de datos	120
7.2.4 Tarjetas en Circuito Impreso	120
7.2.5 Diseño e Implementación	120
7.2.6 Otros	120
<b>Conclusiones</b>	121
<b>Anexo A-</b> Programa de Simulación del Proceso en Lazo Abierto	123
<b>Anexo B-</b> Programa de Control Optimo Proporcional Integral de Temperatura y de Control Proporcional de Tensión en los electrodos de la Cuba Electrolítica.	125





## **PROLOGO**

El presente Informe abarca la automatización de los procesos de recubrimiento metálico de cincado en bastidores, comprendiendo dos tipos de control. El control secuencial que se encarga de controlar los movimientos horizontal y vertical de las piezas y el sistema de control óptimo Integral de temperatura en la celda electrolítica conjuntamente con el control proporcional en los electrodos, donde se produce la reacción química del recubrimiento. Este Informe está organizado en siete capítulos que tratan los siguientes temas:

En el capítulo **I** se formula el problema a resolver, se presenta la importancia y las perspectivas de la automatización de los procesos de recubrimiento metálico se describe los antecedentes y especificaciones del trabajo, así como también los objetivos de este trabajo.

En el capítulo **II** se presenta el marco teórico del Informe, las técnicas de recubrimiento, asimismo se realiza la descripción de los procesos de automatización de una planta de recubrimiento metálico de cincado.

En el capítulo **III** se ocupa de la estructura y características del proceso de cincado, la estructura y modelo del proceso, definiendo la estructura secuencial del proceso, seleccionando los elementos actuadores, y las interfaces, y el subsistema electrónico del motor paso a paso.

En el capítulo **IV** se presenta el modelado del proceso de cincado en la celda electrolítica proceso de medición de temperatura, se estudia la controlabilidad y

observabilidad del sistema. Asimismo, se presentan simulación de la respuesta del proceso a una entrada escalón.

En el capítulo **V** se ocupa del diseño del sistema de control de temperatura en la celda electrolítica la estrategia de control óptimo, así como la simulación del sistema de control óptimo proporcional integral de temperatura y control proporcional de tensión entre los electrodos, utilizando el programa de Matlab.

En el capítulo **VI** se presenta la propuesta de implementación del sistema de automatización de los procesos de recubrimiento metálico de cincado, el diagrama de bloques y el hardware del sistema de control del proceso secuencial, y del sistema de control de temperatura.

En el capítulo **VII** se presenta la evaluación económica de la propuesta de implementación de la automatización de los procesos de recubrimiento metálico de cincado, se realiza una estimación de costos de los equipos electrónicos, tarjeta de adquisición de datos, tarjetas en circuito impreso, necesarios para la instalación de una Planta de cincado.

Finalmente se presentan las conclusiones y en los anexos se incluyen los programas de simulación del Proceso en Lazo Abierto y el de Control Optimo Proporcional Integral del Sistema.

# **CAPITULO 1**

## **PLANEAMIENTO DE ESTUDIO**

### **1.1. Antecedentes**

Actualmente la pequeña y mediana industria de recubrimiento metálico, denominado galvanotecnia, desarrollan sus procesos en forma manual por los técnicos que generalmente se encuentran sin protección personal y expuestos a los vapores de las reacciones químicas.

El sistema de movimiento de las piezas a recubrir entre cuba y cuba es efectuado por los operarios con ayudas de teclas o directamente son cargados por ellos, debido a esto, el producto terminado no es de alta calidad por presentarse deficiencias en el proceso de recubrimiento, y empleando mas tiempo del requerido para cada proceso.

En algunas plantas semi automatizadas utilizan algunos equipos eléctricos que les permiten manipular las piezas con relativa comodidad, aumentando de esta manera la capacidad de la planta, los tiempos de inmersión de las piezas en las cubas son controlados por el operador en forma manual, estas plantas al igual que las manuales, deben estar equipadas con los equipos de filtración, los de extracción de gases, así como los dispositivos de calentamiento y enfriamiento requeridos, la red de alimentación de agua a las cubas y la red de colección de las aguas residuales. Cuando se tiene que procesar una gran cantidad de piezas o por el tamaño de las mismas y la necesidad de ahorrar tiempo y mano de obra lo justifican, se debe

recurrir a diseñar y construir plantas galvanotécnicas automatizadas, en las que las diferentes operaciones de los tratamientos electrolíticos se realizan sin la intervención de mano de obra para cada proceso, salvo la carga y descarga de los bastidores correspondientes, por ello, el presente estudio esta orientado a presentar una alternativa para automatizar los procesos de las diferentes plantas o talleres de recubrimiento metálico

En este estudio se considera, el control del proceso secuencial de las piezas a recubrir, el proceso de control de temperatura en la cuba electrolítica el cual nos permite lograr el espesor adecuado de recubrimiento de las piezas en tratamiento. para cumplir con lo indicado anteriormente, el proyecto de automatización a definir, considera los siguientes aspectos:

- La proyección de estrategias de control operacional para los distintos procesos de recubrimiento metálico-cincado.
- La proposición de sistemas de automatización de plantas, incluyendo el proceso, su operación y su gestión.
- La definición de un sistema a través de la especificación de equipamiento, interfaces de proceso y de usuarios, que permitan disponer en tiempo real de información oportuna y confiable, mejorando la calidad y oportunidad de las decisiones que se toman en los distintos niveles de gestión de la planta.
- La modernización, en el sentido de especificar la planta de recubrimiento metálico, la instrumentación, el equipamiento (hardware) y software actuales y adecuados a los requerimientos, ya sea para el reemplazo en el

caso de obsolescencia o mal funcionamiento, o tecnología adicional que necesita el sistema de automatización que se especifica.

## **1.2 Formulación del Problema.**

Las tecnologías de control de procesos en la industria nacional por muchos años han estado enmarcadas por el uso de circuitería convencional, caracterizada por ser poco flexible y con limitaciones competitivas en relación con el producto terminado.

La aparición y el empleo cada vez más frecuente de nuevas tecnologías de control, tales como los microcontroladores, DSP's y tarjetas de adquisición de datos, así como también el empleo de estrategias de control avanzado con resultados óptimos comparados con estrategias convencionales, tales como el control ON-OFF, PID, nos permite optimizar el control de temperatura, corriente en la celda electrolítica, tiempos de inmersión de las piezas metálicas en las celdas y medición del PH en el proceso en estudio. El empleo de la tarjeta de adquisición de datos, microcontroladores y la PC como dispositivo de control secuencial y control realimentado, así como el empleo de estrategias de control avanzado para el control de la temperatura, permiten optimizar el proceso de recubrimiento metálico, permitiendo así la obtención de productos de alta calidad y con precios competitivos en el mercado.

Por consiguiente, los problemas a resolver son:

- a) Controlar automáticamente los procesos de recubrimiento metálico-cincado de una planta y medir los parámetros físicos químicos siguientes:
  - Temperatura en la celda electrolítica.
  - Voltaje y corriente en la celda electrolítica

- Tiempos de inmersión en cada celda
- pH en la celda electrolítica.

b) Simulación del sistema de control de temperatura en el proceso de recubrimiento metálico de cincado en la celda electrolítica.

### **1.3 Objetivo del Informe de Suficiencia**

#### **1.3.1 Objetivo General**

El objetivo general de este estudio es:

- Brindar a la pequeña empresa un proceso de automatización de su taller a bajo costo.
- Generar el aumento en la producción de recubrimiento metálico, de calidad en el menor tiempo posible.
- Mejorar la seguridad, tanto del equipo como del personal.
- Reducir los costos de mantenimiento.
- Optimizar la gestión de energía eléctrica.
- Mejorar la calidad y uso de la información de las áreas de producción.

#### **1.3.1. Objetivos Específicos**

El presente estudio tiene por finalidad proporcionar la automatización del proceso de cincado por bastidores, tanto el sistema secuencial para el transporte de las piezas a recubrir, así como el sistema realimentado para el control óptimo proporcional integral de temperatura de la celda electrolítica, así como el control proporcional de la tensión en los electrodos de dicha celda, que permita mejorar la calidad y la producción en la pequeña y mediana empresa.

## **1.4 Alcances del Informe de Suficiencia**

El presente Informe abarca la propuesta de un estudio de automatización de recubrimiento metálico de cincado, describiendo los procesos y sus operaciones, la instrumentación y equipos de control de procesos existentes, generando las especificaciones del sistema de automatización requerido y que cumplan con los objetivos planteados (ver punto 1.3).

En tal sentido, el informe de suficiencia contiene, por una parte, la propuesta del proceso de automatización secuencial para el transporte de las piezas a recubrir, usando para ello dos motores paso a paso para el desplazamiento horizontal y vertical de las piezas durante un tiempo especificado previamente, y por otra parte, el diseño de un sistema realimentado, aplicando la estrategia de control avanzado para el control óptimo de la temperatura. La combinación de ambas estructuras de control hará posible alcanzar resultados óptimos, toda vez que se requiere obtener productos de calidad, competitivos en el mercado interno y externo.



## **CAPITULO II FUNDAMENTO TEORICO DEL ESTUDIO**

### **2.1 Recubrimiento Metálico**

Los procesos de recubrimiento metálico consisten en depositar por vía electroquímica finas capas de metal sobre la superficie de una pieza sumergida en una solución de iones metálicos o electrolitos. Veamos las siguientes definiciones.

#### **2.1.1. Definiciones.**

##### **1) Cuba electrolítica:**

La cuba electrolítica es un conjunto de elementos conformados por el recipiente, la solución (baño electrolítico) y los electrodos (ánodo, cátodo), donde, por acción de cierta cantidad de energía eléctrica externa, se producen una serie de reacciones químicas que dan lugar a la formación de un recubrimiento metálico sobre el cátodo, o simplemente a la formación de una capa de óxido metálico sobre el ánodo, los iones metálicos del ánodo se distribuyen en la solución electrolítica, estos iones se depositan en el cátodo (pieza que va a ser recubierta) formando una capa metálica en su superficie.

La cuba a usarse en la electrolisis va a depender de los baños a realizarse, por ejemplo para los baños calientes se recomienda recipientes de hierro y si el producto a colocar es corrosivo se debe aislar la cuba con PVC o un plástico que resista a la reacción (polietileno).

El diagrama típico de una celda electrolítica se detalla en la figura 2.1

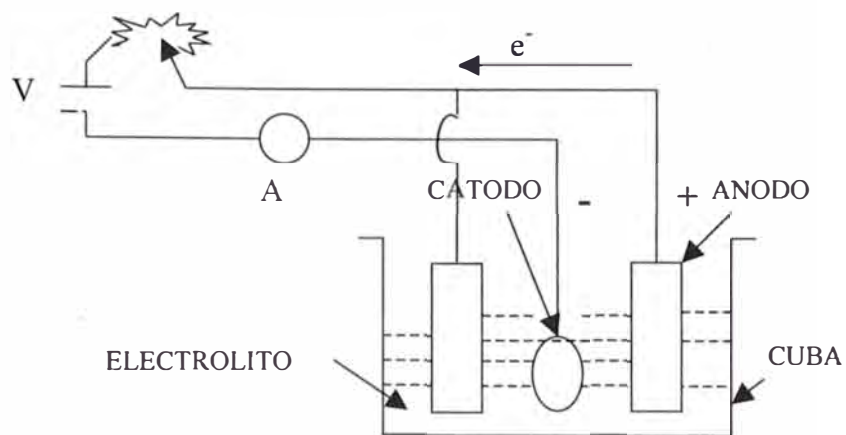


Figura 2.1: Cuba electrolítica y sus componentes

## 2) Electrodeposición:

Es el proceso mediante el cual se realiza un recubrimiento metálico sobre una superficie introducida en una solución electrolítica, al paso de la corriente eléctrica.

- **Principios de la electrodeposición**

Los principios de la electrodeposición fueron investigados por Faraday, expresando en los enunciados siguientes:

El peso ( $w$ ) de un metal depositado es proporcional a la cantidad de electricidad consumida en un tiempo determinado.

$$w = I \times t$$

La intensidad  $I$  se expresa en Amperios y el tiempo  $t$  se expresa en segundos. Para la misma cantidad de corriente, el peso del material depositado es proporcional a sus equivalentes gramos (pesos equivalentes). Peso equivalente es el peso de un elemento o radical que combinara o reemplazara a ocho partes por peso de oxígeno en una reacción química específica. También se considera como equivalente, al peso atómico de un elemento, dividido entre su valencia. La capacidad que tiene un

elemento para combinarse, o sea reemplazar uno o más átomos de hidrógeno en una reacción, se llama Valencia. Un equivalente gramo de cualquier elemento, es depositado al paso de 96500 coulomb. La masa depositada al paso de 1 coulomb recibe el nombre de equivalente electroquímico ( Eq.Elec.=  $\frac{Eq - gr}{96500}$  ) y representa la constante de proporcionalidad de la ecuación que permite cuantificar la masa depositada, así:

$$m = \frac{Eq - gr}{96500} \cdot q, \text{ como } Eq-gr = M/m \text{ y } q = I \times t, \text{ tendremos:}$$

$$m = \frac{M}{96494 n} \cdot I t$$

m = masa depositada, en (gr)

M = Peso molecular o atómico en gramos de la sustancia depositada o liberada (gr)

n = Valencia del elemento

I = Intensidad de corriente en Amperios

t = Tiempo de paso de la corriente, en segundos

### 3) Potencial de celda

El voltaje (V) entre el ánodo y el cátodo de una celda electrolítica se llama potencial de celda que esta constituida por la sumatoria de la diferencia de potencial que existe entre el cátodo y la solución (Ec), el potencial que cae a través de la solución (Es) y la diferencia de potencial entre el ánodo y la solución (Ea). Se puede representar mediante la ecuación siguiente:

$$V = E_c + E_s + E_a$$

La caída de potencial entre el ánodo y el cátodo dependerá de las sales disueltas en la solución. A mayor concentración de sales, la caída de potencial será menor.

La diferencia de potencial entre el cátodo, la solución y el ánodo es factor determinante en el comportamiento químico de los electrodos.

#### 4) **Densidad de la corriente eléctrica.**

Cuando la corriente eléctrica aplicada en un proceso electrolítico es referida a un área específica, se le denomina densidad de corriente; la misma que usualmente se expresa en una cantidad de amperios por el área seleccionada.

La densidad de corriente puede ser expresada en varias unidades de medida, por ejemplo amperios por decímetro cuadrado ( $\text{amp}/\text{dm}^2$ ), o amperios por pulgada cuadrada ( $\text{amp}/\text{sq in}$ ). Los valores de la densidad de corriente que se apliquen durante el proceso están en función del proceso mismo, la composición del baño, la temperatura, la cantidad de piezas; los mismos que deben ser conocidos y tomados en cuenta por el diseñador del proceso y los operadores para una selección correcta, como regla general, la distribución del depósito es más uniforme cuando se trabaja a baja densidad de corriente que dentro de los rangos altos; pero también debe tenerse en cuenta que la velocidad de deposición es mayor cuando se utiliza mayor densidad de corriente.

- **Eficiencia eléctrica.**

Se considera como eficiencia de la corriente a la proporción del total de corriente aplicada, que realmente se consume en el proceso galvánico. Esta puede ser catódica y anódica.

a) La eficiencia catódica es la proporción de corriente que es empleada para la deposición del metal sobre el cátodo. Su cálculo se basa en la medición de la

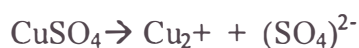
corriente que fluye a través del baño durante el proceso, para lo cual se puede utilizar un culombímetro colocado en serie con la barra catódica. La medición de la corriente consumida durante el proceso, permite calcular el peso teórico que corresponde a dicha lectura; que luego es comparada con el peso real del depósito obtenido en el proceso señalado. De esta manera se obtiene el porcentaje de eficiencia en esas condiciones de trabajo. La eficiencia de la corriente varía también según las condiciones de operación durante el proceso; así por ejemplo influyen en la eficiencia de la corriente que se emplea, el pH del baño, la temperatura de trabajo, la concentración metálica en el baño.

b) La eficiencia anódica, de igual forma puede ser expresada como la relación entre el peso real del ánodo que se disuelve durante el proceso y el peso teórico del mismo que se obtiene como consecuencia de la medición de la corriente eléctrica que fluye por el baño, expresada en porcentaje.

### 5) Reacciones químicas.

Durante el proceso electrolítico, se van a producir una serie de reacciones químicas de oxidación y reducción, dependiendo del tipo de recubrimiento veamos por ejemplo: las reacciones que se producen cuando se realiza un recubrimiento de cobre sobre una superficie metálica sumergida en solución de sulfato de cobre.

Este sulfato de cobre en contacto con el agua, se disocia de acuerdo a la siguiente ecuación:



de igual manera el agua también se disocia dando origen a la siguiente reacción:



Estos iones pueden existir independientemente unos de otros en la solución, pero siempre deberán estar eléctricamente en equilibrio; es decir que el número de cargas positivas y negativas deben ser iguales. Si a esta solución se aplica un potencial de corriente eléctrica continua entre dos electrodos sumergidos, uno de ellos con corriente positiva y el otro con corriente negativa, como muestra la figura 2.2; entonces se producirán cambios en su interior, de modo que los iones efectuarán un desplazamiento dentro de la solución para encontrarse con los electrodos de carga opuesta. Así se podrá observar que los iones cargados positivamente viajarán al cátodo o electrodo negativo, donde se descargan y depositan como metal o forman hidrógeno gaseoso al ganar electrones cedidos por el cátodo; mientras tanto los iones cargados negativamente viajarán al ánodo o electrodo positivo donde completan otras reacciones y ceden para dar origen a los iones metálicos correspondientes, que pasan a la solución. En la figura 2.2 se presenta las reacciones químicas producidas.

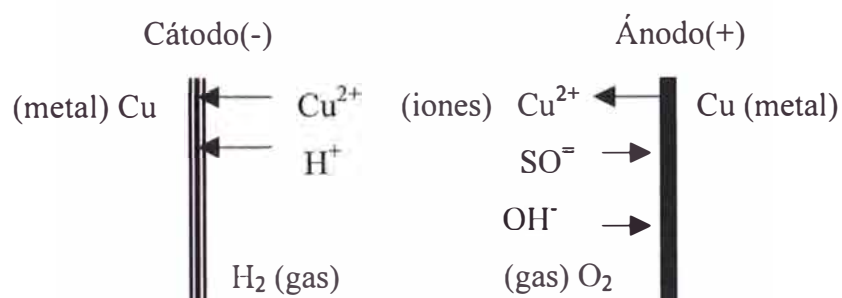


Figura 2.2: Reacciones químicas

Los iones de ( $\text{Cu}^{2+}$ ) se descargan en el cátodo mediante una reacción química de reducción en la cual dichos iones ganan dos electrones. Esta reacción se puede representar mediante la siguiente ecuación:



Este cobre descargado sobre el cátodo forma una capa metálica cuya estructura se adhiere fuertemente a la pieza. Los iones de hidrógeno que son atraídos sobre el cátodo gana electrones proporcionados por la corriente eléctrica, descargándose en forma de gas que finalmente asciende hasta la superficie de la solución. Esta reacción se puede representar mediante las siguientes ecuaciones:



Es de particular importancia el hecho de que parte de este hidrogeno gaseoso que se forma en el cátodo, aunque en pequeña escala, puede ser incluido dentro de la estructura del deposito, lo cual puede causar disturbios en el acabado final hasta hacerlo frágil y quebradizo, según la cantidad de gas atrapado.

## 7) **pH de una solución**

El pH es una forma conveniente de expresar la concentración del ión hidrógeno libre en una solución, por consiguiente es la manera de medir su acidez o alcalinidad. La escala de medición del pH es convencional y se extiende de 0 a 14, considerándose como neutro el valor de pH 7, que a su vez corresponde al pH del agua, cuya concentración de iones de hidrógeno activo es de 0.0000001 gramos/litro.

El incremento de iones de hidrógeno activos en el agua, a causa de algún ácido que se agregue, produce el correspondiente incremento de la acidez, lo cual significa que el agua modifica sus propiedades y por lo tanto deja de comportarse como tal, para convertirse en una solución ácida. También puede convertirse en una solución alcalina cuando por efecto de alguna sustancia disminuye su concentración de iones hidrógeno expresado en la siguiente manera:

$$pH = -\log_{10} (H^+)$$

Por consiguiente sí el pH  $\approx$  0.0000001 iones por litro. De esta manera se crea las escalas correspondientes, el rango del 0 al 6.999, el pH será ácido y el rango del 7.001 al 14 el pH será alcalino; siendo mayor su acidez a medida que se acerca a 0.

- **Soluciones tampón**

Conocidas como buffers. Son compuestos químicos que se disocian parcialmente en la solución. Se utilizan en galvanotecnia para reducir los cambios bruscos que se puedan prestar cuando se agregan ácidos o álcalis fuertes a las soluciones con la finalidad de controlar el pH, produciendo un efecto de autorregulación de la solución, y actuando fundamentalmente en las zonas donde se producen los cambios con mayor rapidez, como son las proximidades del cátodo donde se produce el hidrógeno como gas y por consecuencia se desprende de la solución enrareciéndola de iones de hidrógeno.

### 8) **Tiempo y velocidad de la electrodeposición**

Para obtener un espesor deseado de electrodeposito, es posible calcular el tiempo requerido conociendo la eficiencia catódica y la velocidad de deposición; así es posible calcular también, la cantidad de amperios-minuto por aplicarse para obtener dicho espesor. La eficiencia catódica y la velocidad de deposición dependen de la composición del baño, temperatura, densidad de corriente, etc. Por ejemplo, si se trata de cromar una superficie de 1 decímetro cuadrado( $\text{dm}^2$ ), hasta lograr un espesor de deposito de  $1\mu$  (micrón) se puede efectuar los siguientes cálculos:

$$\text{Volumen del deposito} = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 0.001 \text{ mm} = 10 \text{ mm}^3$$

Entonces, conociendo que la densidad del cromo de  $6.92 \text{ gr/cm}^3$ , se tiene que

$$10\text{mm}^3 \text{ de cromo} = 69.2 \text{ mg de peso}$$



Para un cálculo teórico sobre el baño de cromo en el cual; se considera hipotéticamente una eficiencia de 100%, cuya deposición se estima en 356 mg/hr, al aplicar 1 amperio de corriente/dm<sup>2</sup> durante 1 minuto, la deposición de cromo sería de:

$$1 \text{ amperio-minuto} = 356/60 = 5.93 \text{ mg de cromo}$$

de donde se desprende que para depositar los 69.2 mg que pesa 1 dm<sup>2</sup> de una capa de cromo con un espesor de 1μ, y con 1 amperio de corriente se necesita 11.67 minutos ( 11.67 amperios-minutos). Sin embargo en la practica, la eficiencia de la corriente en el cromado es de 19%, por lo que seria necesario(11.67x0,19)61.42 amperio-minutos; pero si se aplica 40 amperios en lugar de 1, entonces el tiempo requerido para depositar el mismo espesor de 1 μ será de (61.42/40)1.32 minutos, ósea 1 minuto con 32 segundos. Estos cálculos, aunque teóricos, son de aplicación practica, con las modificaciones que introducen las variables de rendimiento o eficiencia que a su vez están acondicionados por la composición del baño, la temperatura, en forma similar se pueden aplicar a otro tipo de recubrimiento electrolítico.

## **2.1.2 Técnicas generales de recubrimiento metálico**

### **2.1.2.1 Anodizado (oxidación anódica del Aluminio)**

Mediante este proceso se forma una capa de óxido de aluminio en la superficie de la pieza tratada, a efectos de proteger y decorar la superficie.

Se introduce la pieza en una disolución electrolítica de ácido sulfúrico y aluminio disuelto, como componentes principales.

### **2.1.2.2 Galvanizado (inmersión en caliente)**

Es un proceso mediante el cual se obtienen recubrimientos de cinc, sobre hierro o acero, por inmersión en un baño de cinc fundido. Previamente debe someterse la pieza a un mordentado o tratamiento con una mezcla de cloruro de cinc y cloruro amónico, para limpiar la superficie del metal y mejorar las propiedades de la pieza para la fijación del cinc.

### **2.1.2.3 Galvanotecnia (recubrimiento electrolítico)**

La pieza se protege de la corrosión o se decora realizando depósitos metálicos en su superficie por vía electrolítica. Los metales utilizados para la protección del hierro son el cinc, cadmio y estaño, mientras que con fines decorativos se utilizan el níquel, cobre, cromo, y plata.

Existen diferentes tipos de recubrimientos: cobreado, niquelado, cromado, cincado y químicos por deposición de níquel o por deposición de cobre. Realicemos una breve descripción de los tipos de recubrimientos metálicos electrolíticos más usados:

#### **1) Cobreado**

Los electrolitos de cobre más empleados son aquellos en base cianuro y en base sulfato. El electrolito cianurado (cianuro potásico o sódico) apenas contiene aditivos orgánicos, al contrario del cobreado ácido que necesita una variedad de aditivos importante y un control exhaustivo para conseguir las propiedades de dureza, nivelación y brillo. El cobreado cianurado es el primer recubrimiento de los sistemas multicapas de gran protección anticorrosivo, que se realizan habitualmente

sobre zamak y/o acero como material base. La figura 2.3 muestra las fases de cobreado.

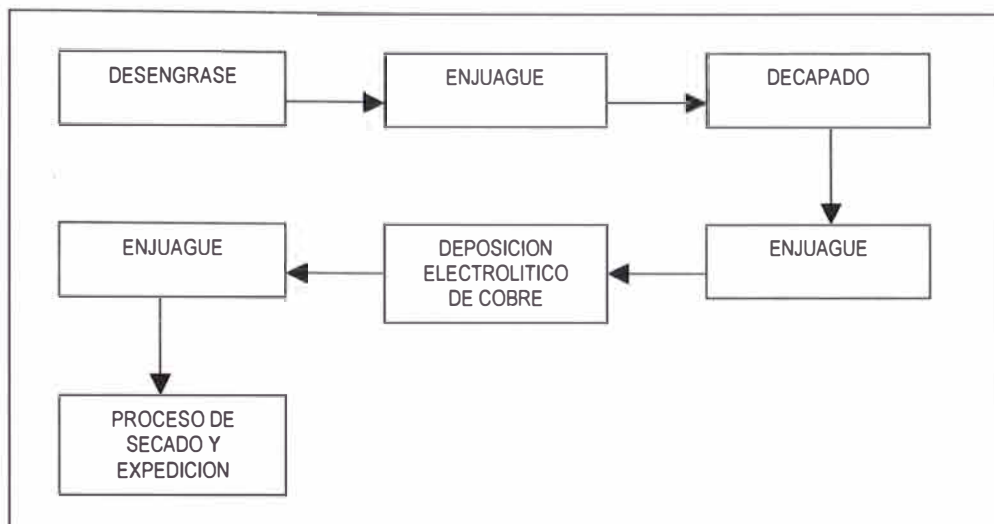


Figura 2.3: Fases del proceso de Cobreado

## 2) Niquelado

El electrolito de níquel más empleado es el denominado watts que contiene cloruro, sulfato, ácido bórico y aditivos orgánicos en su composición. Existen diferentes variedades en función de sus aditivos y abrillantantes. Los principales son el níquel semibrillante y el níquel brillante.

Los recubrimientos de níquel son una base muy apropiada para la mayoría de recubrimientos decorativos como el cromo, el latón, la plata, el oro y otros más específicos. A partir de ciertos espesores presenta buenas propiedades anticorrosivas. Por ello se utiliza tanto en aplicaciones decorativas, como la cerrajería y grifería, como en aplicaciones anticorrosivos y funcionales como son los componentes del automóvil y las herramientas.

En la figura 2.4 se muestran las fases del proceso de niquelado.

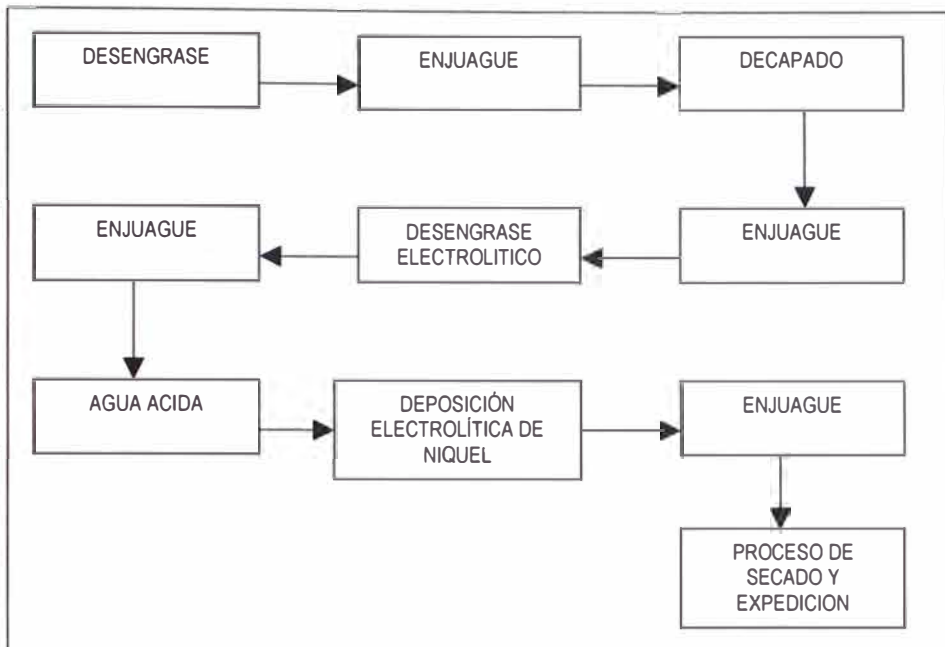


Figura 2.4: Fases del Proceso de Niquelado

### 3) Cromado

El cromado se emplea como recubrimiento final. Generalmente y con anterioridad, la pieza ha pasado por otro tipo de recubrimiento como el niquelado, o cobreado que confieren a ésta un mayor efecto metálico y protección frente a agentes externos. Los cromados se caracterizan porque confieren a las piezas brillo, dureza y poder anticorrosivo.

Los electrolitos de cromo contienen ácido crómico, pequeñas cantidades de ácido sulfúrico y según su composición catalizadores que pueden ser fluorados. Si se aplica en bajos espesores en acabados decorativos y funcionales sobre depósitos de níquel se denomina cromo decorativo y cuando se aplica sobre acero en grandes

espesores como es el caso de los amortiguadores y similares se habla de cromo duro. El rendimiento de los baños es muy reducido por lo que se generan numerosas burbujas de hidrógeno que producen aerosoles en cantidades relevantes. En los cromados duros se acumula una importante cantidad de calor debido asimismo al bajo rendimiento.

El proceso del cromado también lleva asociado una serie de operaciones comunes a todos los recubrimientos descritos. A continuación se muestra un esquema general del cromado de una pieza.

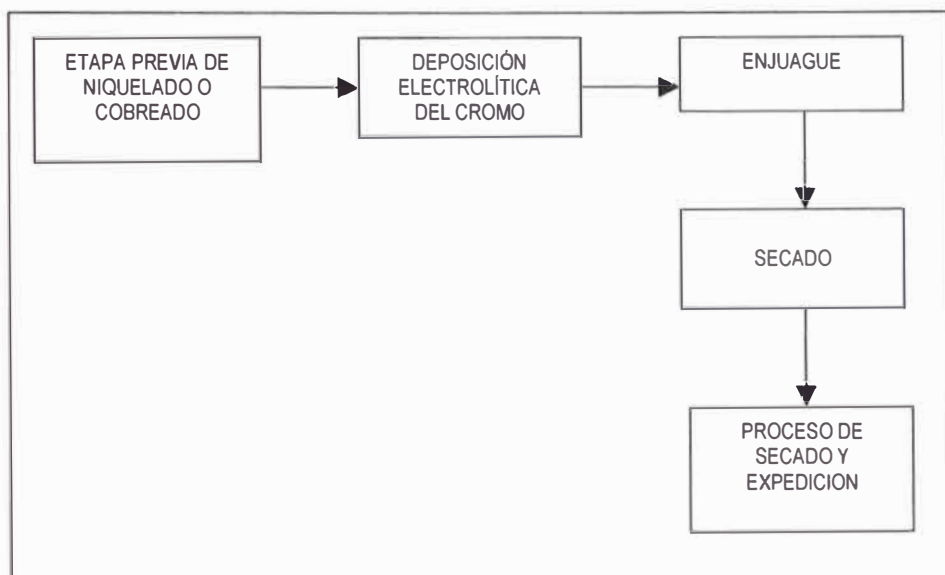


Figura 2.5: Fases del Proceso de Cromado

#### 4) Cincado

El cincado consiste en la aplicación por vía electrolítica de un recubrimiento de cinc, sobre las superficies de las piezas, que previamente se encuentran preparados, las piezas pueden ser: pernos, tuercas, tornillos, clavos, u otras piezas de mayor tamaño, los objetos de hierro y acero necesitan el revestimiento de cinc, como protección anticorrosiva y se deben trabajar con sumo cuidado.

Existen numerosos tipos de electrolitos de cinc, los más utilizados son los cincados cianurados de alta y media concentración de cianuro que poseen una buena tolerancia a la contaminación orgánica y buena penetración del cincado, se utilizan también cincados alcalinos exentos de cianuro que combinan gran parte de las cualidades de los electrolitos cianurados con un tratamiento de bajo costo para las aguas residuales.

Los recubrimientos de cinc por tener propiedades anticorrosivas son usados en el sector de componentes del automóvil y ferretería.

El cincado recibe un tratamiento posterior (llamado Pasivado) que puede ser del color azul, amarillo o negro, presentando un acabado final brillante y de buen color de las piezas.

Se realiza una selección de las piezas de acuerdo a su geometría y tamaño, para ser procesados en formas diferentes. Las piezas que son pequeñas y de diseños simples, se tratan a granel en tambores rotativos por ejemplo: tornillos, tuercas, remaches. Las piezas más grandes o de geometría complicada deben ser procesadas en bastidores o gancheras, en lo que se denomina baños quietos. La empresa estudiada tiene una línea de producción que opera con dos baños de cinc para realizar el cincado de piezas en bastidores, con una capacidad útil de 3m de largo 0.6 m de ancho y 1.20 m de profundidad en las cubas o bateas.

En la figura 2.6 se muestran la secuencia de operaciones y procesos del cincado en los talleres donde se controlan generalmente en forma manual los parámetros del proceso.

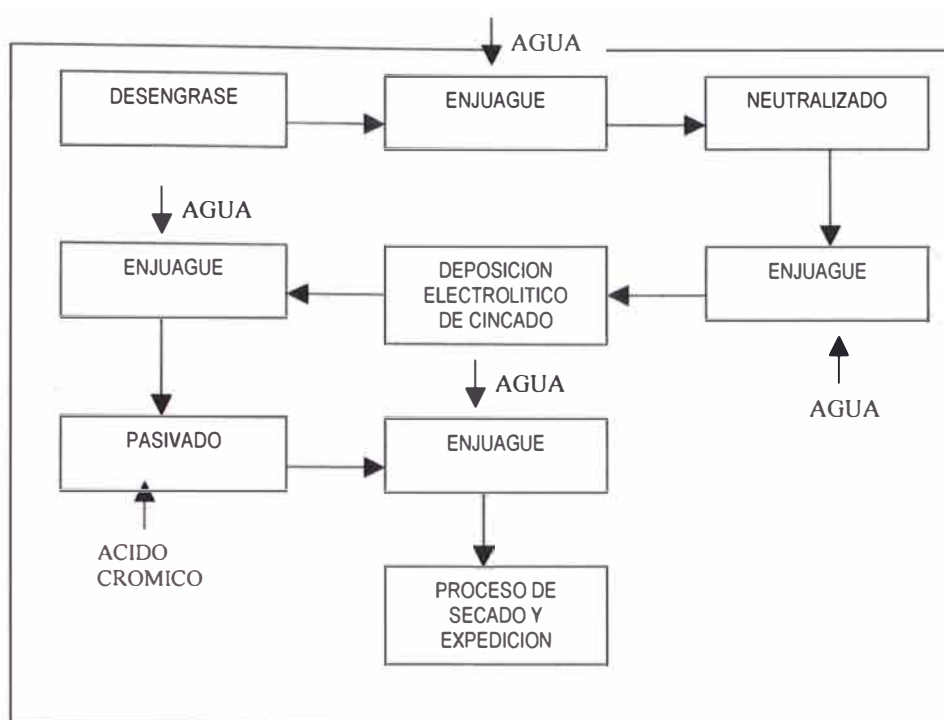


Figura 2.6: Secuencia de Operaciones y Procesos del Cincado

En la figura 2.7, figura 2.8, figura 2.9 se muestran las piezas medianas, pequeñas y grandes cincadas, pasivadas amarillas y blanco, dependiendo del acabado requerido por el usuario.

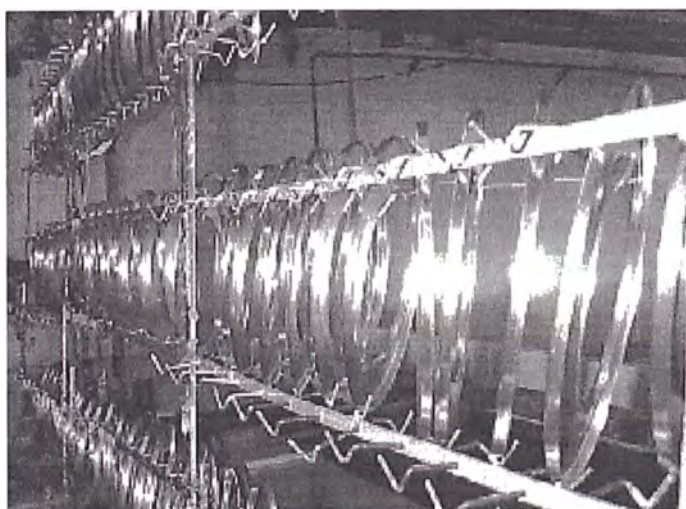


Figura 2.7: Piezas medianas recubiertas con cinc

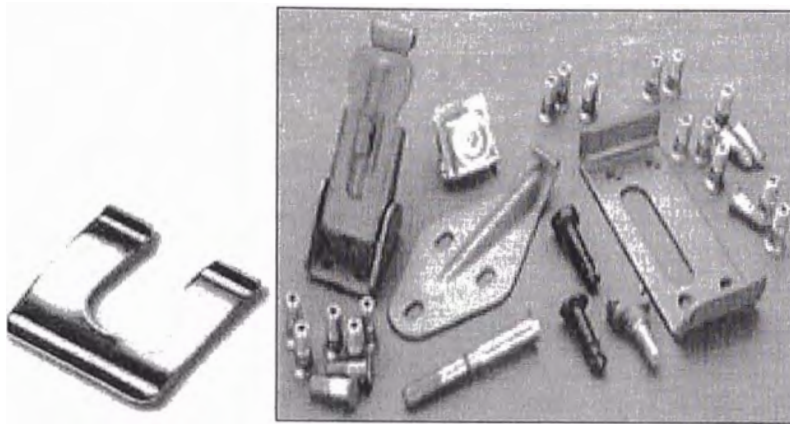


Figura 2.8: Piezas pequeñas recubiertas con cinc alcalino, pasivados.



Figura 2.9: Piezas grandes recubiertas con cinc alcalino.

En la tabla 2.1 se muestra los campos de aplicación de los recubrimientos metálicos:



Tabla 2.1: . Principales campos de aplicación de los recubrimientos electrolíticos y químicos en función del tipo de revestimiento. Fuente [12]: *Ihobe*

<b>CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS METALICOS</b>					
Tipos de recubrimiento	Decora- tivos	Protección anticorro- siva	Recubrimientos funcionales		
			Antifricción	Electrotecnia	Soldadura
Plomo					+
Aleaciones de plomo-estaño		+	+	+	+
Cromo	+	+	+		
Oro y aleaciones de oro	+	+		+	+
Cobre	+			+	+
aleaciones de cobre	+				+
Níquel (electrolítico)	+	+	+	+	+
Níquel (químico)	+	+	+		+
Níquel	+	+	+		+
Plata	+			+	+
Cinc		+			
Estaño		+		+	+

### **2.1.3 Técnicas de recubrimiento metálico utilizando cinc**

#### **1) El galvanizado.**

Es uno de las técnicas que se utilizan para mejorar la resistencia a la corrosión del acero (y de las aleaciones de hierro) mediante un pequeño recubrimiento sobre la superficie.

El galvanizado permite el recubrimiento de piezas de acero o de hierro fundido mediante su inmersión en un baño de cinc fundido. En función de las características que deba presentar la protección anticorrosivo, se aplican diferentes técnicas de protección basándose en cinc:

##### **1.1) Galvanizado por inmersión en caliente.**

Las piezas a tratar se sumergen, habiendo limpiado previamente su superficie, en un baño de cinc fundido que suele estar a una temperatura de 460° C-490° C. El cinc reacciona con el hierro, o el acero, formando capas de aleación sobre la superficie. La capa más externa suele ser cinc dúctil no aleado. El cinc se une metalúrgicamente al metal base para formar un recubrimiento protector que posee una excelente resistencia a la corrosión.

##### **1.2) Cincado electrolítico.**

Esta técnica consiste en depositar sobre la pieza una capa de cinc mediante corriente continua a partir de una solución salina que contiene cinc. El proceso se utiliza para proteger piezas más pequeñas, cuando requieren un acabado más uniforme que proporciona el galvanizado.

## 2) **Sherardización.**

Las piezas preparadas de hierro o acero se calientan con una mezcla de polvo de cinc y arena en tambores rotatorios a temperatura por debajo del punto de fusión del cinc (380° C-400° C), hasta que éste forma un recubrimiento cerrado sobre la superficie de la pieza, el recubrimiento es muy uniforme.

El recubrimiento en piezas pequeñas(mate gris) es muy dificultoso, dependiendo del área y espesor requerido, efectuándose los proceso con cuidado para logra la pieza recubierta.

## 3) **Recubrimientos con polvo de cinc.**

En esta técnica de recubrimiento se emplea un polvo de cinc muy fino que se halla en suspensión en un aglutinante orgánico o inorgánico. Las técnicas de aplicación de este tipo de revestimientos son similares a las empleadas para la aplicación de laca (por ejemplo: proyección, inmersión). Las capas de polvo de cinc presentan una conductividad limitada, ya que el cinc no se encuentra por toda la superficie en contacto con el material base y tampoco forma en las zonas limítrofes aleaciones de cinc-hierro.

## 4) **Protección anticorrosivo catódica.**

Un metal en estado de corrosión se disuelve anódicamente. En la protección anticorrosiva catódica se impide la corrosión haciendo del metal a proteger un cátodo. Esto se consigue disponiendo un elemento de cortocircuito compuesto del material de la pieza a proteger y de una aleación metálica menos noble; estos dos materiales presentan una conexión conductora metálica. Al sumergir la pareja de materiales en un electrolito (por ejemplo, el agua de mar), se disuelve el metal

menos noble, disociándose en iones y electrones. Los iones pasan al electrolito, mientras que los electrones pasan a través de la conexión metálica a la superficie del metal más noble. La protección anticorrosivo catódica se utiliza, por ejemplo, como protección exterior de la parte sumergida de barcos, pasarelas, muelles, rompeolas, estacas, puertas de esclusas, boyas y equipos submarinos que son usados estos equipos en la extracción de petróleo y gas natural.

## **2.2 Descripción de los procesos de una planta de recubrimiento metálico de cincado**

### **2.2.1 Etapas**

El proceso de recubrimiento electrolítico del cincado se divide en tres etapas fundamentales como son:

#### **Etapa 1:**

##### **Tratamiento previo (preparación de superficie)**

Las piezas no se llevan directamente al proceso electrolítico sin antes de efectuar el acondicionamiento previo, sea para quitarle la rebaba o escoria remanente de la fabricación, o para quitarle la grasa que arrastran de las operaciones de fabricación o de almacenamiento, como para alisarlo y pulirlo hasta que las piezas queden adecuadamente listas para el tratamiento final y para el proceso electrolítico.

Se pueden utilizar el equipo de vibrador para pulir con mayor perfección las piezas las cuales se mezclan con abrasivos. En la siguiente figura 2.10 mostramos el equipo vibrador y en la figura 2.11 se muestra los abrasivos que deben las formas de las piezas a pulir.



Figura 2.10: Equipo vibrador que produce un giro de las piezas al pulir.

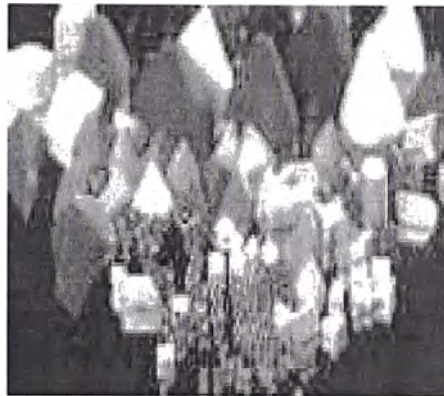


Figura 2.11: Elementos abrasivos que tienen la forma de las piezas a pulir.

Los procedimientos de preparación preliminar son numerosos y diversos, son seleccionados en función a los diferentes factores que determinan el planeamiento de las operaciones a seguir. Estos factores son a consecuencia tanto del estado de las piezas como del producto final que se desea obtener. Entre ellos se pueden señalar los siguientes:

- 1.1) El grado de pulido o tersura superficial que se desea (liso, ligeramente rugoso)

1.2) La composición química de la cual están constituidas las piezas a procesar, la cual se identifica como tipo de material; por ejemplo hierro y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, cinc y sus aleaciones.

1.3) Las imperfecciones que tenga el material a procesar, como son las escorias, calaminas, rebabas, grasa.

1.4) El proceso electrolítico que se va emplear, tal como cincado, niquelado, cadmiado, cromado, anodizado, electropulido.

En la preparación preliminar de las piezas, se pueden identificar entonces las siguientes operaciones fundamentales:

a) **Desbastado**, llamado también esmerilado, alisa y uniformiza la superficie de las piezas.

b) **Pulido**, se realiza el alisado fino de la superficie hasta lograr el acabado de tersura deseado.

c) **Decapado**, cuando la pieza se encuentra oxidada, o con escorias, éstas deben ser removidas de cada pieza. Este tratamiento se divide en :

**c.1) Decapado mecánico o arenado**

Consiste en la eliminación de los óxidos mediante la proyección de partículas abrasivas a gran velocidad sobre la superficie metálica.

**c.2) Decapado químico**

Se elimina los óxidos por medio del ataque de productos químicos corrosivos sin aplicación de corriente eléctrica.

### c.3) Decapado electrolítico

Es el decapado en el cual, además de la acción corrosiva de la solución decapadora, se aplica también corriente eléctrica para acelerar el proceso. La pieza puede actuar como ánodo o como cátodo, generalmente se recomienda el procedimiento anódico.

Con este sistema se remueven óxidos o escoria depositados sobre las piezas ferrosas. La mayoría de los baños está compuesto por ácidos. Las piezas ya desengrasadas se sumergen en un baño con la siguiente fórmula: 100 cm<sup>3</sup> de ácido sulfúrico 60 Be y 6 Grs. de ácido crómico por litro, el tiempo de operación es de 30-60 segundos el voltaje de 6 voltios y la corriente de 5 Amp/dm<sup>2</sup>

### d) Desengrase

Es la etapa en la que se elimina toda la grasa remanente que pudiera existir sobre la superficie de las piezas en tratamiento. El desengrase de las piezas se efectúa de diversas maneras, entre ellas tenemos:

- Desengrase físico-químico
- Desengrase electrolítico
- Desengrase por medio electrolítico.

Estas operaciones de preparación no son necesariamente realizadas en su totalidad, o de manera igual para todos los casos; por lo que dependiendo del estado del material, se pueden omitir algunas operaciones.

En la siguiente tabla N° 2.2 se muestran las fórmulas de distintos componentes para el desengrase profundo de las piezas pulidas.

Tabla 2.2.: Componentes de las formulas para el desengrase de las piezas metálicas

<b>Metales</b>	<b>Productos</b>	<b>Concentración g / l</b>	<b>Temperatura ° C</b>
Aluminio	Fosfato trisodico	13	82 a 93
	Metasilicato de sodio	25	
Bronce media dureza	Soda cáustica	13	82 a 93
	Carbonato de sodio	25	
	Fosfato trisodico	13	
	Metasilicato de sodio	25	
Bronce de baja dureza	Fosfato trisodico	25	82 a 93
	Metasilicato de sodio	6	
Cobre	Carbonato de sodio	38	Ambiente
	Soda cáustica	6	
	Fosfato trisodico	13	
	Cianuro de sodio	13	
	Metasilicato de sodio	6	
	Humectantes	2	
Acero alta dureza	Soda cáustica	50	82 a 93
	Carbonato de sodio	25	
	Fosfato de trisodico	6	
	Humectante	2	
Estaño	Silfito de sodio	53	93
	Carbonato de sodio	90	
Cinc	Metasilicato de sodio	19	93
	Fosfato trisodico	19	



Dependiendo el tipo de recubrimiento metálico, se considera bajar el tiempo de operación se debe aplica una corriente catódica de 2 a 5 Amp/dm<sup>2</sup>, y un voltaje de 6 voltios, el burbujeo que se va producir mejora el funcionamiento.

En el caso del cobre y sus aleaciones (latón alpaca) es conveniente pasarlo por un baño frío electrolítico y los tiempos de operación van de 2-3 minutos.

En la siguiente tabla N° 2.3 se presentan las fórmulas recomendadas para las tensiones de 4 a 12 voltios y la corriente de 1 a 25 Amp/dm<sup>2</sup>, la operación de recubrimiento dura 2-3 minutos.

Tabla 2.3: Fórmulas recomendadas para el tratamiento de decapado con tensiones, y corrientes especificadas.

<b>Metales</b>	<b>Productos</b>	<b>Dosis g / l</b>	<b>Voltios</b>	<b>Amp/dm<sup>2</sup></b>	<b>Temp. °C</b>	<b>Anódico Catódico</b>
Latón	Carbonato de sodio	32	6 a 12	19 a 25	80 a 93	An Ca
	Fosfato trisódico	15				
	Fosfato de sodio	90				
	Soda cáustica	10				
Plomo Estaño	Carbonato de estaño	31	4	2	93 a 99	Ca
	Fosfato trisódico	6				
Magnesio	Ácido crómico	300	6	16	45	Ca
Magnesio	Ácido fluorhídrico	30%	45	43	Ambiente	Ca
Níquel	Carbonato de sodio	57	4	23	60 a 90	Ca plomo
	Fosfato trisódico	38				
	Soda cáustica	4				
Níquel	Carbonato de sodio	13 a 25	6	1	100	CA

## **Etapa 2:**

### **Recubrimiento electrolítico**

Los procesos de recubrimientos electrolíticos o químicos consisten en depositar por vía electroquímica finas capas de metal sobre la superficie de una pieza sumergida en una solución de iones metálicos o electrolito. En este proceso se usan productos químicos relativamente puros, sales y metales, de forma que durante la operación se depositan completamente los metales empleados sobre las piezas. Los procesos electrolíticos pueden ser divididos en dos grupos:

- a) Electrólisis efectuadas con soluciones acuosas a temperaturas que no excedan a los 70 °C, algunos ejemplos: la refinación electrolítica de metales; en la cual se utiliza un ánodo soluble del metal que se desea refinar, la precipitación electrolítica de metales a partir de las soluciones de lixiviación, en las cuales se utiliza ánodos insolubles, el recubrimiento de un material metálico o no, por una película metálica, con el fin de protegerlo de la corrosión o mejorar su aspecto. Se usan soluciones de sales previamente preparadas y ánodos que pueden ser solubles o insolubles, de acuerdo al tipo de recubrimiento
- b) Electrólisis a altas temperaturas con soluciones fundidas de ciertas sales anhidras (baño ígneo). Se utilizan recipientes de tratamiento para baños estacionarios, denominados cubas, tinas o tanques, las cuales son de naturaleza muy diversas que deben soportar adecuadamente los dispositivos eléctricos, de temperatura y controles de baño.

### **Etapa 3:**

#### **Control de calidad**

Si bien es cierto que un operador de taller con experiencia conoce muchas veces los efectos que puede tener el baño determinado por la observación del comportamiento del mismo, o la evaluación de las piezas procesada en busca de anomalías o indicadores del funcionamiento, es también cierto, que esa manera de efectuar el control del estado de los electrolitos no es 100% efectiva; por cuanto se requiere también, del conocimiento del estado de composición de los baños en un momento determinado. En la medida que envejecen los baños resulta indispensable conocer la composición de las soluciones para diagnosticar en todo momento su comportamiento distinto del baño, muchas veces con resultados indeseados que afectan la calidad de los productos terminados.

Las pruebas de los baños electrolíticos se realizan rápidamente sobre la base de lecturas directas de ciertos instrumentos que se ponen en contacto con la solución. Entre ellos podemos citar el pH, densidad y la tensión superficial.

Otra forma de realizar los ensayos para conocer el estado de los baños electrolíticos para electro recubrimientos, es mediante el empleo de la Célula de Hull, lo cual permite reproducir en pequeño las condiciones de trabajo que experimentan los baños en su estado normal de operación con la ventaja de que gracias a su diseño, se puede apreciar en un mismo ensayo el comportamiento de la deposición sobre el cátodo a diferentes densidades de corriente de manera simultánea. Esta diversidad de amperaje simultáneo que actúa sobre la misma placa de ensayo, permite apreciar rápidamente el aspecto de brillo para las diferentes

densidades de corriente, además del efecto de temperatura, voltaje, pureza del baño; así como las concentraciones de los componentes.

Dentro del proceso de cincado alcalino se tiene las siguientes líneas:

- Línea de cincado alcalino en tambor
- Línea de cincado alcalino en bastidor.

### **2.2.1.1. Proceso de la línea de cincado alcalino en tambor**

La línea de cincado alcalino en tambor, que recubre a partes iguales piezas de acero y zamack, está compuesta por varias etapas similares a las descritas en los procesos anteriores de cobreado, niquelado y son:

- Desengrase químico
- Decapado
- Desengrase electrolítico
- Neutralizado
- Cincado alcalino
- Pasivado azul
- Pasivado amarillo (como alternativa)
- Pasivado negro y/o verde (excepcionalmente)

En la siguiente figura 2.12 se muestra la planta de procesos de recubrimiento metálico por tambor.

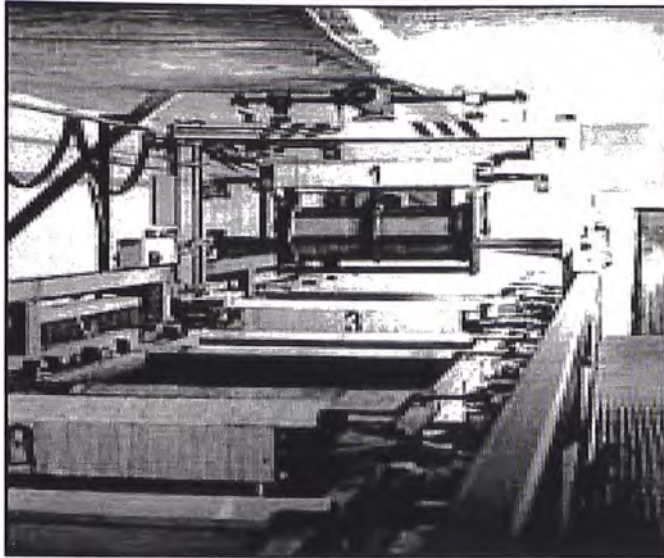


Figura 2.12: Planta de cincado alcalino en tambor

### **2.2.1.2 Proceso de la línea de cincado alcalino en bastidores**

La línea de cincado alcalino en bastidor presenta muchas similitudes con la línea en bastidor en general, sin embargo cabe destacar que la variabilidad de piezas en cuanto a tamaño y geometría es alta. El material base recubierto es exclusivamente acero, en contraposición a la línea de tambor.

La línea de cincado alcalino en bastidor tiene las siguientes etapas de procesos:

- Desengrase químico
- Decapado
- Desengrase electrolítico
- Neutralizado
- Cincado alcalino
- Enjuague

- Pasivado azul (o pasivado amarillo alternativamente)
- Sellado

En la siguiente figura 2.13 se muestra la planta de recubrimiento metálico de cincado alcalino en bastidores.

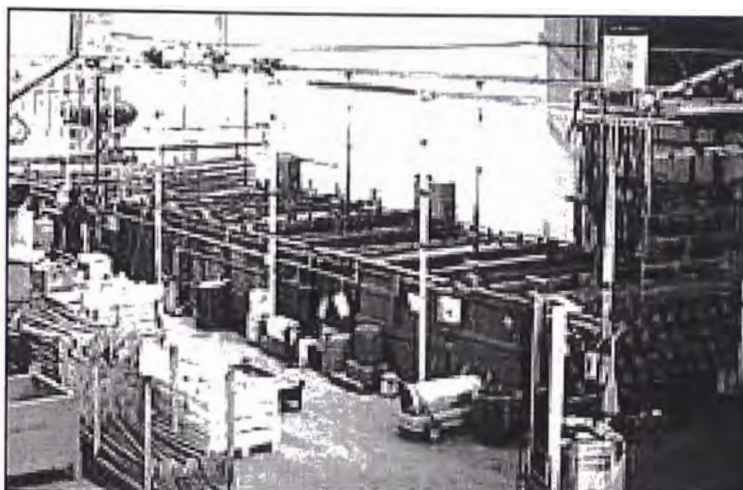


Figura 2. 13: Planta de cincado alcalino en bastidor.

El proceso a considerar para el informe es el proceso de cincado alcalino en bastidores, el cual presenta las siguientes etapas:

- Tratamiento previo,
- Desengrase anódico
- Enjuague (agua)
- Neutralizado (con ácido sulfúrico al 10 %)
- Enjuague (agua)
- Cincado (solución alcalina)
- Enjuague (agua)
- Pasivado (amarillo o azul)
- Enjuague (agua)

- Secado
- Sellado

El diagrama de flujo del proceso de cincado alcalino en bastidores se muestra en la figura 3.1 (ver capítulo III).

Veamos algunos procesos complementarios del proceso de cincado alcalino en bastidores: En los procesos de recubrimientos electrolíticos se usan productos químicos relativamente puros, sales y metales, de forma que durante la operación se depositan completamente los metales empleados sobre las piezas.

Una vez fijada la película de cinc sobre la pieza, se produce un par electroquímico donde el cinc actúa como ánodo, sacrificándose por el metal base que resulta ser el cátodo. Generalmente se aplica de 100 a 200 gramos de cinc para recubrir una superficie de un metro cuadrado, lo que corresponde a un espesor de 14 a 28 micras.

En la siguiente tabla 2.4 se tiene la clasificación entre el tipo de material a recubrir, las condiciones de servicio y el espesor de recubrimiento mínimo.

Tabla 2.4: Relación entre el tipo del material a recubrir y el espesor de recubrimiento mínimo de acuerdo a la norma ASTM (+) B633 - 78

CLASIFICACION	CONDICION DEL SERVICIO	ESPESOR MINIMO( $\mu$ )	DENSIDAD (A/dm <sup>2</sup> )	TIEMPO TEORICO (Segundos)
Fe/Zn 25	SC4 (Muy severo)	25	5	738.50
Fe/Zn 13	SC3 (Severo)	13	5	384.00
Fe/Zn 8	SC2 (Moderado)	8	5	236.40
Fe/Zn 5	SC1 (Suave)	5	2	369.00

Veamos la clasificación de las condiciones de servicio en las que pueden encontrarse expuestos los materiales, que nos permitan seleccionar el espesor mínimo para recubrir las piezas de metal.

**SC4 – Muy severo.**- Expuesto a condiciones severas o sujetos frecuentemente a exposiciones húmedas, limpieza, y soluciones salinas, más daños por abolladura, rasguños, o desgaste por abrasión.

**SC3 – Severo.**- Expuestos a condensación raramente humedecido por lluvia y lavado.

**SC2 – Moderado.**- Expuestos comúnmente a ambientes internos secos, pero sujetos ocasionalmente a condensación desgaste o abrasión.

**SC1 – Interiores.**- Expuestos a atmósferas internas con condensación esporádica y sujeto a mínimo desgaste o abrasión.

El tiempo de vida de una película de cinc es una función del espesor y del tipo de atmósfera a la cual está expuesta. Las condiciones de exposición y usos del objeto recubierto son variadas que no es posible predecir exactamente la vida de un artículo protegido por una película de un espesor dado. Se puede analizar en la tabla 2.5 la velocidad de corrosión según el tipo de atmósfera.

Tabla 2.5: Velocidad de corrosión según el tipo de atmósfera.

<b>Atmósfera</b>	<b>Velocidad de corrosión</b>
Industrial	5.6 micras / año
Urbana	1.5 micras / año
Suburbana	1.3 micras / año
Rural	0.8 micras / año
Interiores	0.5 micras / año



El principal constituyente de las soluciones alcalinas de cinc es el tetracianuro de sodio y cinc ( $\text{Na}_2\text{Zn}(\text{CN})_4$ ), la solución contiene además cincato de sodio ( $\text{Na}_2\text{ZnO}_2$ ) y cianuro de sodio e hidróxido de sodio libre. La ecuación química que explica la formación de estos complejos es la siguiente:



El control de esta solución se basa en la relación del cianuro de sodio y el cinc expresado ambos en gramos por litros, la amplitud de esa relación esta entre 2.5 y 3.

$$R = \frac{\text{g/l}(\text{NaCN})}{\text{g/l}(\text{Zn})}$$

#### **Formulación:**

Hidróxido de sodio	100 g/l
Cianuro de sodio	50 g/l
Oxido de cinc	20 g/l
Aditivos	(*)

#### **Preparación:**

Se llena la cuba con agua caliente las dos terceras partes del volumen total a preparar y luego se disuelven por partes el hidróxido de sodio, cianuro de sodio, y el oxido de cinc, finalmente se completa con agua hasta el volumen de trabajo y se deja enfriar antes de empezar a trabajar.

#### **Cubas.**

Se utilizan cubas de fierro con revestimiento interno de PVC (para evitar la corrosión) o sin revestimiento. Dentro de estos elementos se colocan las piezas para ser procesadas. En la siguiente figura 2. 14, se muestra la vista superior de la cuba.

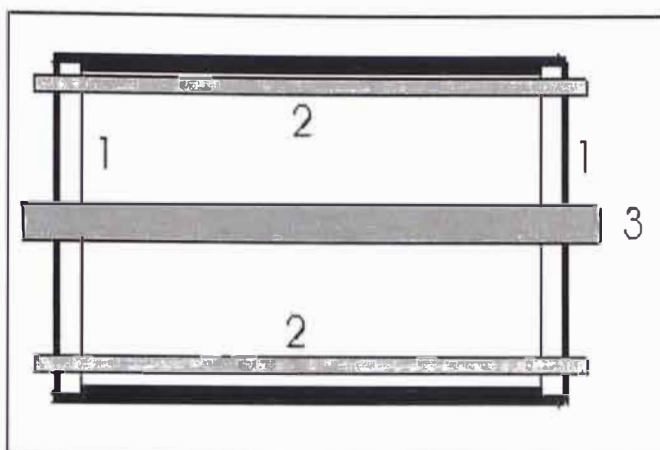


Figura 2.14: Esquema de una cuba electrolítica

En todas las etapas en las que las piezas reciban corriente las cubas se componen de

1 = Barras aislantes de Acrílico

2 = Barras de cobre para colgar los electrodos de acuerdo a cada baño

3 = Barra central donde se cuelgan las piezas en forma individual o en gancheras

Las dos barras N° 2 van unidas entre sí y la polaridad depende del recubrimiento a efectuar. En la figura 2.15 se puede presentar los electrodos y gancheras.

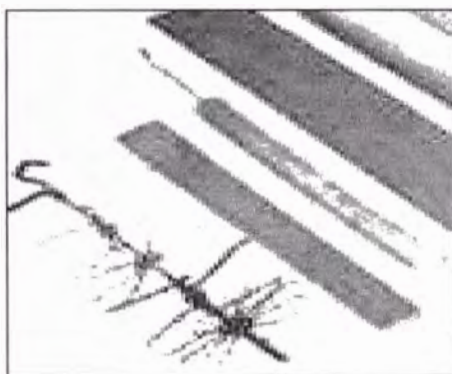


Figura 2.15: Conjunto de electrodos y gancheras

**Temperatura.**

La temperatura de operación varia entre 15-25 °C como máximo, debiéndose prever un sistema de refrigeración con agua, debido al calentamiento de la solución durante el trabajo.

**Densidad del baño.**

Se controla con un densímetro, ecómetro, flotador 15 – 20 °Bé

**Ánodos.**

Se emplea sin electrolítico (99.99%) cuya superficie debe ser igual al área catódica, recomendándose el doble. Los ánodos deben de retirarse de la solución cuando se deja de trabajar para evitar la disolución química y el enriquecimiento no deseado de cinc en el electrolítico.

**Densidad de corriente.**

Para artículos en bastidor: 2 – 5 Amp. / dm<sup>2</sup> (3 - 6 voltios).

Para artículos en tambor: 0.5 – 2 Amp. / dm<sup>2</sup> (11 - 12 voltios).

**Velocidad de electro deposición.**

Considerando un rendimiento de corriente de 90 - 95 % y una densidad de corriente de 3 Amp. / dm<sup>2</sup>, la velocidad de electro deposición es de 1.5 – 1.6 micras / minuto.

En la tabla 2.6 se presenta los datos experimentales( efectuados en Laboratorio de Química de la FIC-UNI, considerando un 100 % de eficiencia en el recubrimiento), de las densidades de corriente (Amperios / área a recubrir), los tiempos(minutos) de inmersión de la las piezas metálicas, y el espesor (micras) de recubrimiento.

Tabla 2.6: Espesor de los depósitos de cinc a partir de una solución

Tiempo (minutos)	Espesor (micras)		
	Densidad de corriente( Amp. / dm <sup>2</sup> )		
	2	3	5
3.9	1.99	2.99	4.90
5	2.56	3.84	6.41
6.2	3.17	4.76	7.94
8	4.10	6.15	10.25
10	5.12	7.69	12.81

Con la finalidad de preservar por mas tiempo los objetos cincados, estos se pasivan, transformando la superficie de la película de cinc por inmersión en soluciones que contienen cromatos. De esta manera logramos dar mayor protección frente a la corrosión y a su vez mejoramos el aspecto de presentación con variados tonos de color (blanco, azul, amarillo-iridizado).

### Pasivado azul

Esta solución transforma la superficie de la película de cinc en cromatos, dando origen a recubrimientos azulados. En la tabla 2.7 se muestran las especificaciones para el pasivado azul.

Tabla 2.7: Formulación, especificaciones del pasivado azul

Formulación	Cuba	Temperatura	Tiempo	PH
Sal (pasivado azul) - 3g / l Ácido nítrico (36 °Be) - 3ml / l	Se usan cubas de fierro con revestimiento interno de PVC o fibra de vidrio	15 – 25 °C	5 – 10 segundos	(*) 1 - 1.5

(\*) Si el pH aumenta, adicionar de 1 a 2 ml / l de ácido nítrico y de 1 a 2 g / l de la sal.

### **Pasivado Amarillo**

Esta solución da origen a películas con tonalidad amarilla (iridisada), sobre películas brillantes de cinc. En la siguiente tabla 2.8 se especifica la formulación, del pasivado amarillo.

Tabla 2.8: Formulación, especificaciones del pasivado amarillo.

<b>Formulación</b>	<b>Cuba</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (Segundos)</b>	<b>PH</b>
Sal (pasivado azul) - 10 g / l Ácido nítrico (36 °Be)- 6 ml / l	Se usan cubas de fierro con revestimiento interno de PVC o fibra de vidrio	15 – 25	5 – 10	1 - 1.5

Dichas especificaciones que nos van a permitir utilizar las estrategias de control de los tiempos en las cuales las piezas deben encontrarse en la celda electrolítica, control óptimo integrador de temperatura, control proporcional de tensión entre electrodos (indirectamente se controla la corriente), que nos van a permitir controlar el espesor óptimo de la deposición del cinc sobre la pieza a recubrir.

En las siguientes figuras 2.16, 2.17, 2.18 se presentan las piezas con protección anticorrosivo cromatizado final, pudiendo ser amarillo, blanco o verde dependiendo de la protección y matiz que queramos obtener.

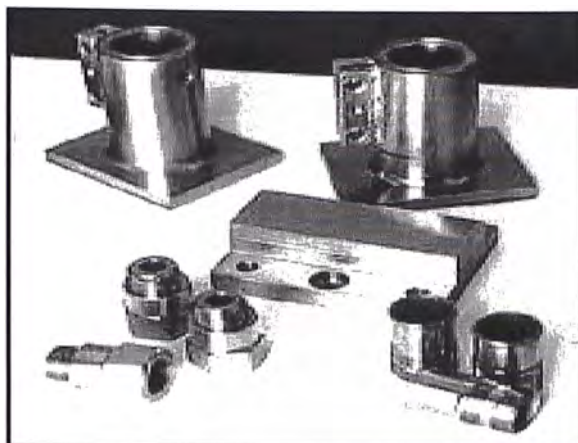


Figura 2.16: Piezas pasivadas de color amarillo-verdoso



Figura 2.17: Piezas pasivadas de color blanco.



Figura 2.18: Piezas pasivadas de color verdoso.

## 2.3 Automatización

En principio todos los procesos de recubrimiento metálico fueron controlados manualmente por un operador (actualmente existe todavía en algunas empresas este tipo de control); la labor de un operador consistía en observar lo que estaba sucediendo (caso el descenso o aumento de la temperatura) y realizaba algunos ajustes (como abrir la válvula de vapor o de agua, basado en instrucciones de manejo y en la propia habilidad y conocimiento del proceso por parte de este operador. Este lazo-proceso a sensor, a operador, a válvula, a proceso se mantiene como un concepto básico en el control del proceso.

En años siguientes, la aparición de los controladores locales permitió al operador manejar varios lazos de control, pero subsistía el aun el problema de recolección de datos. Los controladores locales aun son muy útiles, pero requiere realizar mantenimientos y ajustes en los instrumentos a usar demandando mucho tiempo.

El desarrollo de los dispositivos neumáticos marcó un avance en el control de los procesos. Las variables son convertidas en señales neumáticas y transmitidas a controladores, utilizando la señal de referencia (set point) y la variable del proceso para ajustar adecuadamente el elemento de control final.

Luego aparecen los dispositivos electrónicos, como alternativa de reemplazo de los controladores neumáticos. Los controladores electrónicos analógicos son rápidos y precisos.

Después, se desarrolló los microprocesadores permitiendo el desarrollo de los controladores digitales, así como los controladores lógicos programables (PLC), además de sistemas especializados como las máquinas de control numérico

computarizado. Actualmente se utilizan los computadores digitales con sistemas de control digital directa, utilizando el control distribuido, lo cual permite controlar un gran numero de procesos y variables, recopilización de datos, análisis y optimización de diversas unidades y plantas, permitiéndonos otras actividades como planificación de mantenimiento, control de calidad, inventario.

### **2.3.1 Objetivos**

La automatización nos permite:

- Mejorar la supervisión y control de los distintos procesos (aumentar la capacidad de procesamiento, mejorar la calidad de los productos, y mejorar la eficiencia de los procesos).
- Reducir costos (de mantención, de producción, y de administración)
- Mejorar la calidad y uso de la información de la planta.
- Mejorar la seguridad de equipos y personal.

### **2.3.2 Formulación de la estrategia de automatización**

#### **2.3.2.1 Niveles de la estrategia de automatización**

Las estrategias de automatización consideran los siguientes niveles:

- Supervisión del proceso y la operación
- Control directo del proceso
- Control supervisor del proceso
- Supervisión y coordinación de operaciones
- Apoyo a la gestión

Una descripción resumida de estos niveles de la estrategia de automatización es la siguiente:



### 1) **Supervisión del proceso y la operación**

El disponer de instrumentación que está adquiriendo información en tiempo real de variables del proceso y estados operacionales de los equipos, entrega a los operadores un nivel básico de automatización de la planta, el cual le facilita su operación.

La estrategia de automatización debe considerar la configuración de límites que definen rangos adecuados para las variables de proceso, de modo que estos sean alarmados cuando no se cumplan. También debe entregar el estado operacional de los equipos de proceso de la planta, de modo de disponer de esta información para la coordinación de las operaciones.

### 2) **Control directo**

En este nivel, se deben controlar las variables relevantes de los procesos, mediante las variables manipuladas (variables de comando) disponibles. El objetivo en este caso es mantener las variables de salida del proceso (variables controladas) en rangos de operación adecuados, frente al efecto producido por las perturbaciones. Esto se logra a través de lazos de control aislados que controlan una variable del proceso.

Para el estudio tenemos el control secuencial (desplazamientos y tiempos) del movimiento de piezas, el control óptimo integral de la temperatura y el control proporcional de tensión entre los electrodos en la celda electrolítica.

### 3) **Control supervisor**

El control supervisor para los procesos, puede ser aplicado para cumplir distintas funciones, tales como:

- Entregar sugerencias a operadores sobre la operación de los procesos, después de realizar un análisis de comportamiento. En este caso los algoritmos de control supervisor analizan principalmente la evaluación de variables del proceso y estados operacionales.
- Modificar automáticamente referencias de lazos de control directo, de acuerdo a los cambios que se están produciendo en las perturbaciones y variables de salida de los procesos, así como en la operación de los procesos.

De esta forma el control supervisor del proceso permite incorporar a los sistemas de control de la planta, el conocimiento que se tiene sobre el proceso y su operación, lográndose con ello la supervisión y control permanente. El control supervisor puede ser implantado del tipo de proceso y el de riesgos involucrados.

#### **4) Supervisión y coordinación de operaciones**

Este nivel permite disponer y mostrar en forma adecuada y oportuna la información que facilita la operación de procesos y su coordinación. Esta función se realiza mostrando a los operadores información como la siguiente:

- Información sobre estados de operación. Estado actual de avance de los procesos.
- Información sobre las alarmas del proceso.
- Información para programación de operaciones (composición de la alimentación, composición de productos, disponibilidad de insumos del proceso, disponibilidad de equipos del proceso).

#### **5) Apoyo a la gestión**

Este nivel permite realizar una gestión eficiente de la planta, a través de un mejoramiento en la disponibilidad y oportunidad de la información, así como de la

calidad de las decisiones que se toman a partir de ella. El nivel de gestión debe permitir el disponer de información procesada, orientada a los distintos niveles jerárquicos de la planta. El grado de procesamiento de la información dependerá de los distintos niveles de administración de la planta (operadores, Jefes de turno, Jefes de división, Superintendentes, Gerente), entregando a cada uno la información de interés y que se requiere para su gestión. A continuación, se formulan soluciones de automatización para los distintos procesos de la planta de recubrimiento metálico de cincado, las cuales pueden ser clasificadas en los niveles de automatización descritos anteriormente y que permitan obtener los objetivos de automatización que se han planteado.

### **2.2.3.2 Automatización de las áreas de una planta de Procesos de recubrimiento Metálico de cincado**

Las áreas que se definen para este proceso de recubrimiento metálico de cincado son las siguientes:

- 1) Área de montaje de piezas en bastidores o tambor, las piezas se montan en bastidores o tambores, los que a su vez se sujetan a las barras porta piezas y estas son llevadas por los carros de transporte mediante horquillas apropiadas, que permitan sumergir y dejar los bastidores con las piezas en los baños del mismo modo pueden izar nuevamente su carga y retirar de cada baño de acuerdo a los tiempos previamente programados. Los bastidores son apoyados sobre los soportes que se instalan en los bordes de ellas. Estos soportes a su vez sirven de contacto para transmitir la corriente eléctrica de baja tensión a las piezas cuando se encuentran sumergidas en el baño.

2) Área de Tratamiento previo, desengrase y activación de la pieza, previas al recubrimiento las piezas deben ser limpiadas y alisadas. Esta limpieza puede ser realizada por vía física o química. Dicho tratamiento deberá responder a las funciones específicas requeridas. Para que estas operaciones se realicen en buenas condiciones se deberán tener en cuenta que las piezas estén lo mas limpias posible, y que las piezas presenten un número razonable de defectos. En la tabla 2.9 podemos ver que de acuerdo a la superficie de la pieza a tratar se utiliza la sustancia adecuada.

Tabla 2.9: Eliminación de impurezas en la superficie de la pieza tratada.

<b>Impurezas, defectos en la superficie</b>	<b>Tipo de tratamiento previo</b>	<b>Sustancias empleadas</b>
Asperezas, defectos en la superficie	Rectificado, pulido, chorreado	Muela abrasiva y de pulir y abrasivos (productos para la proyección)
Grasas, aceites	Desengrase	Álcalis, silicatos, emulsionantes, tenso activos, disolventes orgánicos para determinadas tareas especiales
Óxidos, sales	Decapado, mordentado, activado	Ácidos

3) Área de electrorecubrimiento, anodizado o electropulido, explicado en el capítulo II (2.2.1.(b)).

4) Área de tratamiento final de enjuagues, sellado de las piezas. Después de finalizado el proceso electrolítico, las piezas se encuentran expuestas al velado o manchado si no se aplica adecuadamente la operación de secado; inclusive puede producirse cierta oxidación del material si es que no se ha efectuado bien el enjuague

previo y el tiempo de secado es demasiado prolongado. Tecnologías más recientes han introducido el secado por medio de hornos o estufas calentados por combustión de gas, o por resistencias eléctricas y circulan de aire; o en otros casos utilizan los túneles de secado con rayos infrarrojos, por donde circulan las piezas en un período de tiempo calculado de acuerdo a las condiciones del material y el tratamiento electrolítico recibido.

5) Área de desmontaje de las piezas., en este caso las piezas después de haber pasado por los procesos anteriores se dejan listos para pasar al área de ventas o logística.

6) Área de control de calidad (laboratorio), se desarrolla más ampliamente en capítulo II (2.2.1( c )).

El presente informe estudiará específicamente las siguientes fases de automatización de los procesos de recubrimiento metálico de cincado:

a) Estrategia de Control secuencial de desplazamiento horizontal y vertical de los metales (piezas a recubrir), desde el área (a) hasta el área (e), programándose los tiempos de cada operación de transporte y tratamiento calculado, a fin de garantizar la buena calidad de los productos dentro de las normas establecidas, para ello se utilizan dispositivos electrónicos y electromecánicos de control que son gobernados por la computadora.

Los movimientos de operación automática requerida de esta planta serían:

- Toma del bastidor por el carro de transporte.
- Elevación sobre el nivel del baño hasta la posición que pueda desplazarse sobre las tinas.
- Desplazamiento sobre la tina de trabajo

- Descenso e inmersión de los bastidores con las piezas en el baño, donde puede quedar por el tiempo de tratamiento fijado.
- Toma del bastidor nuevamente y elevación hasta el nivel de deslazamiento sobre las tinas.

b) Estrategia de control en lazo cerrado, empleando el control óptimo integral de temperatura y un control proporcional de la tensión entre electrodos (lazo abierto), que deriva en un control de corriente en la celda electrolítica, de acuerdo al espesor de recubrimiento que se desea.

### **2.3.3 Especificación funcional de la estrategia de la instrumentación**

Trataremos sobre los dispositivos usados en la instrumentación del sistema de recubrimiento metálico de cincado.

#### **2.3.3.1 Sensor**

Es un dispositivo que capta la señal física como presión, temperatura, pH y emite una señal eléctrica de salida correspondiente, sin embargo esta señal de salida puede tener un margen de error propio de la naturaleza del sensor, por lo que es necesario disponer de un circuito de compensación. Usamos el término transductor para referirnos al conjunto formado por el sensor y su circuito de compensación correspondiente, el cual tiene sus márgenes de error aceptables. La señal debe ser acondicionada antes de ingresar al dispositivo de procesamiento.

Los acondicionadores de señal realizan amplificación, filtrado y verifican la forma de la onda de la señal de salida del transductor. El sensor utilizado en la celda electrolítica para el control de temperatura que se ha tomado es el de buena respuesta de operación.

### **2.3.3.2 Amplificador de señal**

Una forma de acondicionar la señal para combatir el ruido es incrementar la intensidad de las señales de bajo nivel (amplificar) antes de su transmisión. Estos diseños son útiles para amplificar señales analógicas relativamente lentas.

### **2.3.3.3 Tarjeta de adquisición de datos**

La adquisición de datos del proceso, se efectúa a través de un componente de hardware y una de software que lee los datos, supervisa su consistencia y deja el dato a disposición para el sistema. Otra parte de la información (no medida directamente mediante instrumentación), se ingresa manualmente por los operadores, mediante terminal. En cuanto a tarjeta de adquisición de datos, se propone el uso de la tarjeta LAB-PC+ de NATIONAL INSTRUMENTS; sin embargo, la implementación física puede hacerse mediante microcontroladores y DSP's.

### **2.3.3.4 Convertidor análogo/digital**

La información analógica de temperatura, luego de ser acondicionada convenientemente, deberá pasar por un convertidor analógico/digital, que permita su conversión a código digital para ser leído por la tarjeta de adquisición de datos insertada en la computadora.

Se sugiere usar un convertidor de 16 bits que permita una buena resolución en la conversión.

### **2.3.3.5 Computadora (PC)**

Sería conveniente el uso de un procesador de 32 bits, con memoria, disco y unidad de respaldo (diskett o cinta) suficiente para que el software de automatización

pueda ejecutarse con una performance aceptable para la operación de una planta de recubrimiento metálico de cinc de bastidores. En la figura 2.20 se representa un modelo de computadora.

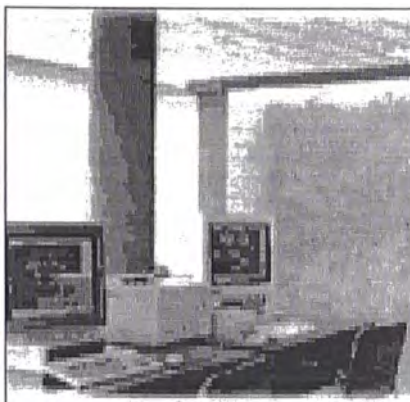


Figura 2.20: Computadora

### **2.3.3.6 Software de automatización**

Para la simulación del sistema de control óptimo proporcional integral (control realimentado) se ha usado el código MATLAB 5.3.

Para la implementación del control secuencial y realimentado en tiempo real se propone el uso del lenguaje C ++ . Si se implementara con microcontroladores o DSP's, entonces tendría que usarse el software apropiado (normalmente en assembler ó Lenguaje C++).

### **2.3.3.7 Motores paso a paso**

Se utilizaran para realizar el control de los movimientos secuenciales, tanto horizontal como vertical de la pieza a recubrir. Los detalles sobre los motores paso a paso se tratan en el capítulo III. En la siguiente figura 2.21, se muestra el motor paso a paso.



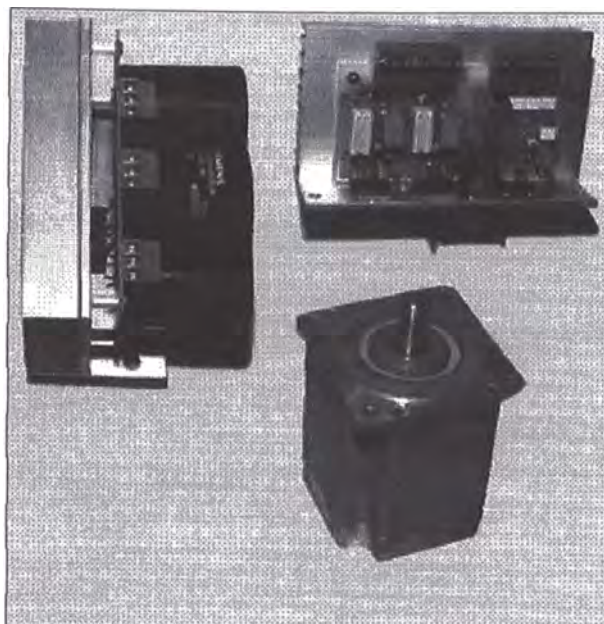


Figura 2.21: El motor paso a paso

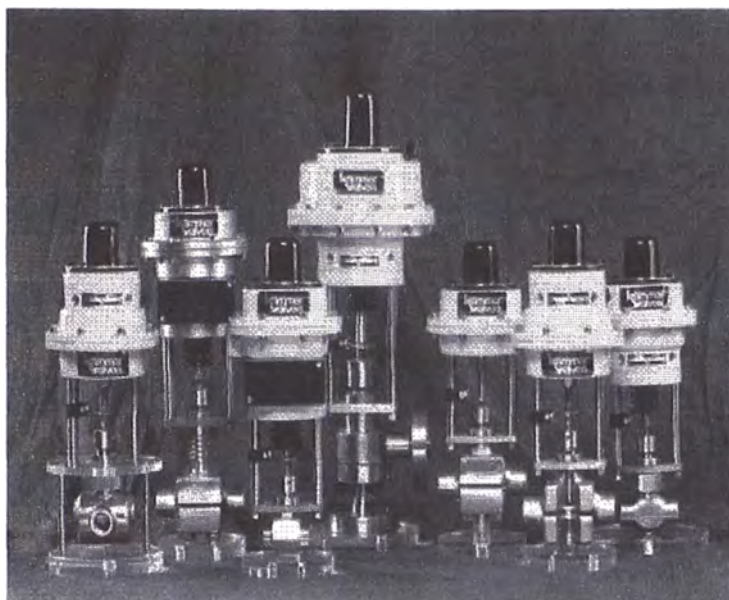
### 2.2.1.1 Válvulas

La función de toda válvula es la de regular el paso del caudal mediante la variación del orificio. Las válvulas se clasifican por el tipo de asiento (compuerta, globo, bola, mariposa), por las características de flujo (creciente, decreciente o lineal), Una válvula de control es aquella que hace parte del bucle cerrado de control como elemento final del proceso.

El controlador envía una señal a la válvula de 4 a 20 mA, la válvula seleccionada para este caso sería de cuerpo bipartido globo, ángulo Y tres vías (con el fin de prever los posibles golpes de ariete) 1" - 2" , que requiere un transductor neumático de señal que convierta la señal de corriente en señal de presión de 3 a 15 Psi.

En la figura 2.22 mostramos los diversos tipos de válvulas de tres vías, de los cuales se seleccionarían, dependiendo de la cantidad de agua a utilizar para el

enfriamiento de la solución y lograr finalmente el control de la temperatura que se requiere para un buen acabado en el recubrimiento de la pieza a recubrir.



**Figura 2.22:** Válvula tipo globo de tres vías.

## **CAPITULO III**

### **ETAPAS DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO METALICO DE CINCADO ALCALINO**

#### **3.1 Etapas del proceso de recubrimiento metálico de cincado alcalino en bastidor**

En el capítulo II (2.2) se realizó una descripción teórica de las etapas del proceso de recubrimiento metálico de cincado alcalino en bastidor y en la figura 3.1 se representa este proceso mediante un diagrama de flujo.

Las condiciones técnicas consideradas en este proceso de recubrimiento son: Tomando en cuenta las condiciones de servicio y la exposición en las que se va encontrar las piezas basándose en las normas técnicas ASTM(+) B633-78, sería:

- Fe/Zn 8 (SC2-moderado) el espesor mínimo es de 8 micras, la velocidad de corrosión ( para zona urbana) 1.5 micras/ año y la densidad de corriente se encontraría en el rango de: 2-5 Am / dm<sup>2</sup> (asumiendo, 3 Amp / dm<sup>2</sup>).
- Asimismo el voltaje entre los electrodos es de:3-6 voltios
- Temperatura de operación: 20-25 °C
- Área aproximada de las piezas: 100-200 dm<sup>2</sup>
- Se utilizara un sistema de refrigeración con agua fría a 17 °C (intercambiador enfriador – serpentín), para evitar la elevación de la temperatura en la cuba, que podría ocasionar el deterioro del recubrimiento de las piezas.

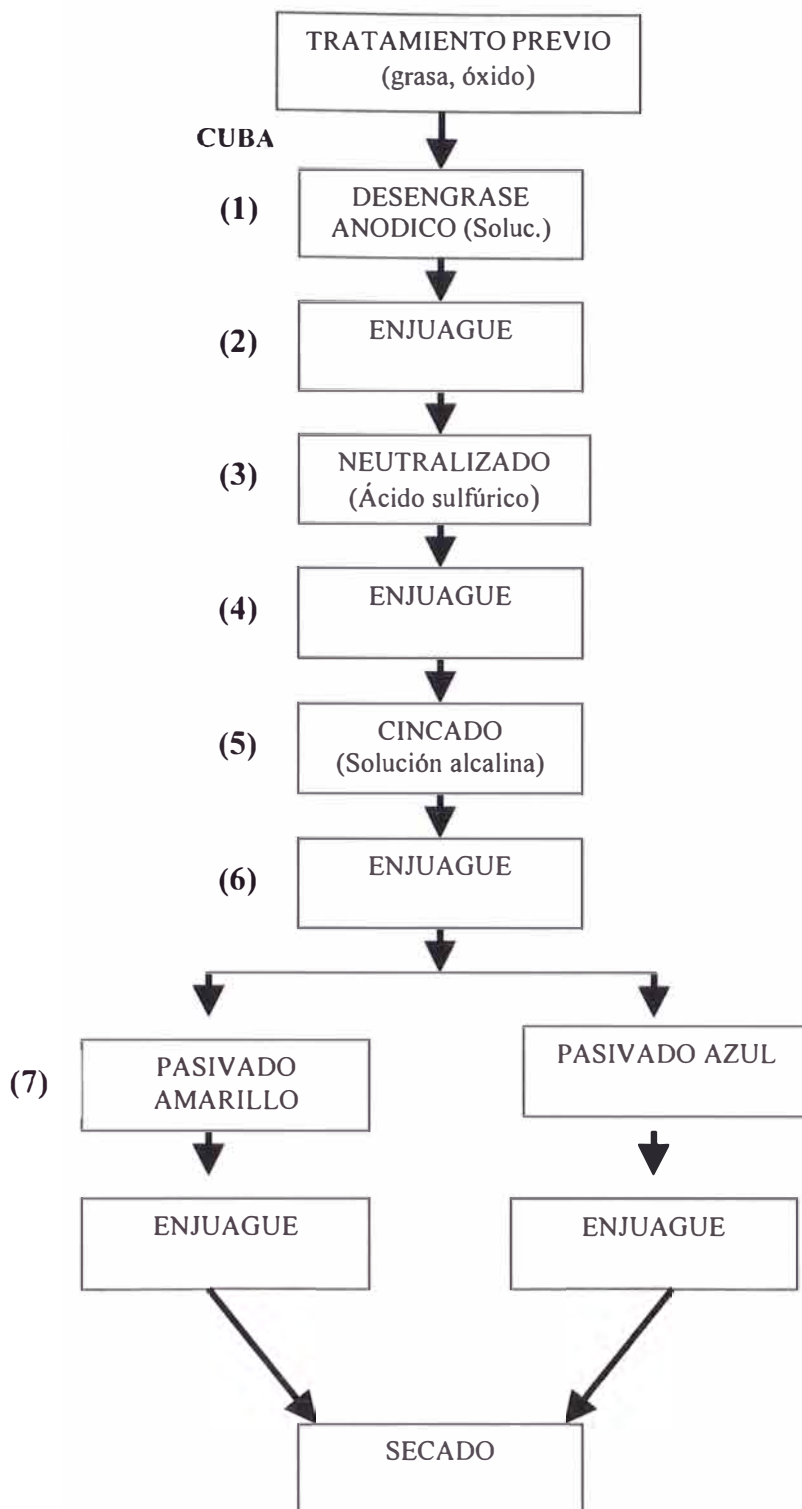


Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso de cincado alcalino en bastidores.

### 3.2 Etapa secuencial del sistema de proceso de recubrimiento metálico de cincado en bastidor.

El proceso comprende una serie de tareas secuenciales, según se muestra en el diagrama de flujo de la figura 3.1, que en forma resumida son:

- a) Desplazamiento horizontal de las piezas a recubrir hasta llegar a la altura de la cuba 1.
- b) Desplazamiento vertical (de bajada) de las piezas a recubrir hasta ingresar a la cuba 1.
- c) Recubrimiento metálico durante un determinado tiempo ( $t_1$ ) de acuerdo al tipo de recubrimiento.
- d) Desplazamiento vertical (de subida) a partir de la cuba 1, de las piezas.
- e) Avanza a la cuba 2, luego repetir los pasos (a) hasta (d) sucesivamente hasta ingresar a la cuba 8 y salir de ella, para continuar con el proceso de secado.

En la tabla 3.1 se resume las secuencias de las operaciones, como los movimientos verticales, horizontales y los tiempos de permanencia de las piezas a recubrir.

Tabla 3.1 Resumen de las secuencias de operaciones

CUBA	DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL	DESPLAZAMIENTO VERTICAL		TIEMPO DE PERMANENCIA EN CADA CUBA
		BAJADA	SUBIDA	
1	$x_1$	$y_1$	$y_1$	$t_1$
2	$x_2$	$y_2$	$y_2$	$t_2$
3	$x_3$	$y_3$	$y_3$	$t_3$
4	$x_4$	$y_4$	$y_4$	$t_4$

En la figura 3.2, se muestra el desplazamiento horizontal y vertical de las piezas en las diferentes cubas.

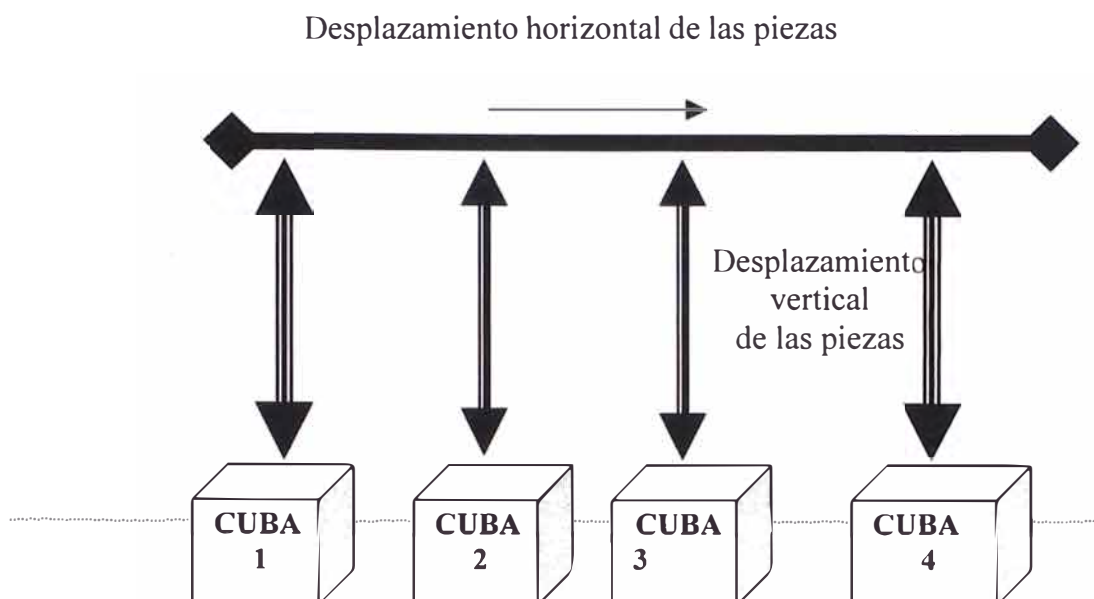


Figura 3.2: Disposición de las cubas y desplazamientos de las piezas

Se controlaran los movimientos secuenciales (los tiempos de avance horizontal, vertical y los tiempos de inmersión de las piezas en cada celda), de acuerdo a las normas ASTM (+) B633 – 78, y se controlara la temperatura optima de operación requerida para el recubrimiento de las piezas.

### 3.2.1 Selección del elemento actuador para desplazamiento de las piezas a recubrir.

En el desplazamiento de las piezas a recubrir, los motores de paso son ideales, ya que permiten realizar este trabajo con una precisión de una centésima de milímetro. Esta condición es difícil de obtener con los motores normales DC pues aunque se desenergize el motor muy rápido, la inercia del rotor continuará girando el eje hasta una posición casual.

En un motor de paso el eje se detiene siempre en la posición necesaria y en esta posición permanece bloqueado hasta que no sé de una nueva orden para hacerlo girar en el sentido que queramos. A continuación se explican en forma resumida aspectos relacionados al motor paso a paso.

### **3.2.2 Motores Paso a Paso**

El motor paso a paso es un dispositivo usado para convertir pulsos eléctricos en movimientos rotacionales discretos, poseen ciertas características que los hacen idóneos para algunas aplicaciones e inadecuadas para otras, no son muy rápidos en términos de RPM ( revoluciones por minuto), en comparación con los demás tipos de motores eléctricos, en el mejor de los casos este motor tiene una velocidad de 1000 pasos por segundo, con 150 RPM el motor gira 1.8 grados por paso.

El motor paso a paso no se puede conectar directamente a una fuente de energía, necesita de un circuito especial para gobernarlo. Este motor se puede usar para controlar adecuadamente las diferentes posiciones de un objeto, pues no necesita una constante de realimentación (lazo cerrado).

Se utilizan por su precisión, ya que se pueden mover en incrementos muy pequeños, característica que no es posible en otros tipos de motores, haciéndolos muy idóneos.

El motor paso-paso, es un componente electromecánico muy importante para la electrónica y, sobre todo, para aparatos utilizados en procesos de automoción. A diferencia del típico pequeño motor eléctrico, el paso-paso (stepper motor) no gira linealmente sino que puede ser controlado a saltos y detenido en una determinada posición angular. Se trata en la práctica de una «máquina eléctrica» funcionando en corriente continua pero desprovista de escobillas. Dispone en su estator de cuatro devanados en dos núcleos con las correspondientes expansiones polares, cada uno de

los cuales tiene un par de terminales con cables accesibles desde el exterior de la carcasa. El rotor está constituido por un imán permanente, puesto en movimiento al variar el sentido de la corriente en los devanados del estator. Cada bobina sirve para el avance o el bloqueo del árbol, que según el tipo de «máquina» puede cumplir un determinado número de pasos. En la figura 3.3.se presenta el motor paso a paso para el control de los movimientos horizontal y vertical de las piezas



Figura 3.3: Motor paso-paso utilizado para la puesta a punto de nuestro sistema secuencial.

Para el control de los desplazamientos secuenciales se necesita dos motores de 300 pasos y 1,8 grados cada uno, por su precisión de trabajo.

Los elementos distintivos de un motor paso paso son el número de pasos en un giro, o bien los grados para cada paso, la configuración de los devanados y, naturalmente, la tensión y la corriente absorbidas por cada solenoide, con lo referente a la configuración se especifica que la distinción se hace basándose en las conexiones de los cables y al flujo de la corriente en los devanados. En la figura 3.4 se muestra el esquema de conexión teórico de un motor paso a paso.



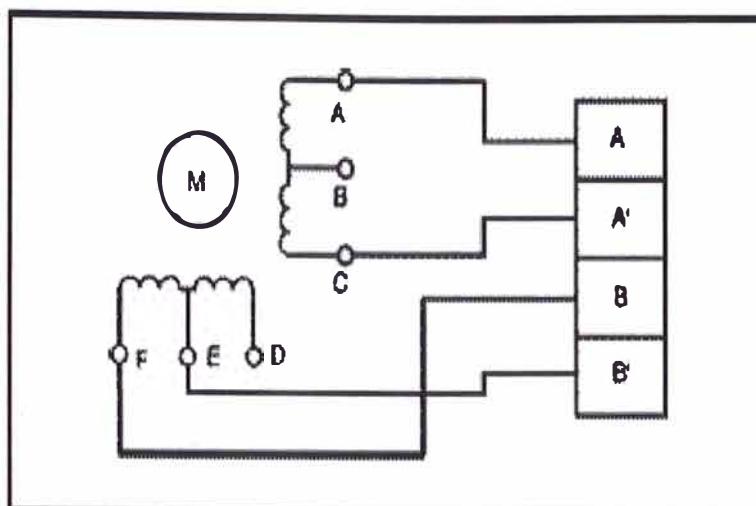


Figura 3.4: Esquema de conexión de un motor paso-paso.

Si el motor funciona en modo bipolar, los devanados están conectados en serie dos a dos, de manera que fluya corriente eléctrica en ambos sentidos, mientras que en la modalidad unipolar las bobinas son recorridas en un solo sentido. En el primer caso, el control se realiza mediante un circuito en puente, capaz de invertir la polaridad entre los terminales de la serie, mientras que en el otro caso es suficiente una etapa push-pull compuesta, por ejemplo, por transistores NPN con los emisores a masa y los colectores libres. El punto central de cada solenoide del motor se conecta al borne positivo de la alimentación, es como si se tuviese un transformador con el primario con toma central.

En la figura 3.5 se puede mostrar el motor paso paso con los devanados conectados en serie de dos en dos, de forma que fluya corriente eléctrica en ambos, la precisión de posicionamiento de cada paso es del 5%, mientras que la resolución máxima es de 1,8 grados por paso.

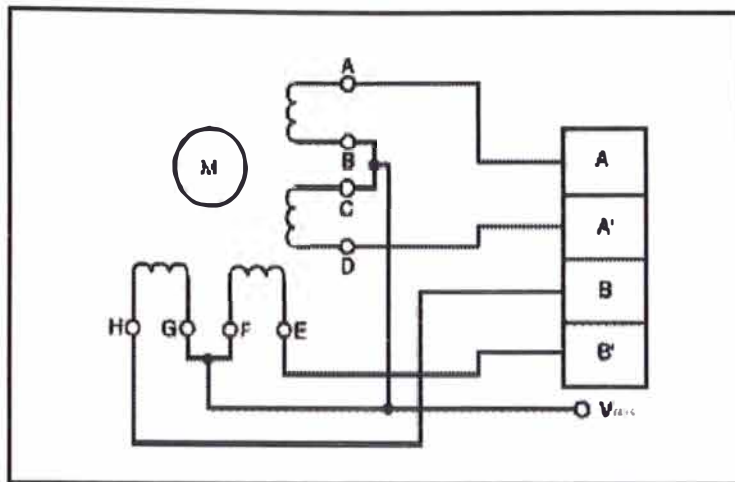


Figura 3.5: Funcionamiento unipolar del motor.

Esto permite definir los parámetros fundamentales útiles para la elección no sólo del tipo de componente, sino también del circuito que debe controlarlo y de las correspondientes conexiones. En efecto, cada bobina tiene dos cables de los que salen ocho hilos, que deben reducirse a cuatro en la modalidad bipolar y a seis en la unipolar. En el primer modo basta unir los cables internos y dejarlos desconectados del resto de la circuitería, llevando al driver solamente los extremos del primer devanado, del segundo, del tercero y del cuarto; mientras que en la segunda configuración es necesario siempre unir los conductores centrales, y llevarlos por tanto junto con los cuatro extremos hacia el driver push-pull, con lo que se obtienen seis cables. Para hacer que gire el motor es necesario pilotar con impulsos los diversos conductores, para modificar la polaridad del campo electromagnético del estator en sentido horario o antihorario, mientras que para bloquearlo es suficiente mantener la polaridad en el momento en que se detenga.

El funcionamiento del motor paso a paso bipolar de la figura 3.6, se observa que los interruptores son en realidad los dispositivos activos (mosfet o transistores

bipolares) que, trabajando en conmutación, alimentan o aíslan los respectivos cables, específicamente, A aplica el positivo al contacto 1 y el negativo al 2, B hace lo contrario C hace positivo 3 respecto a 4, mientras que cerrando D se invierte la polaridad. Al principio, los solenoides son alimentados con corrientes de sentido opuesto, de manera que si el Norte del rotor está a la derecha, el polo que tiene frente a él es N y el opuesto Sur; por el contrario, el de arriba debe ser N y el inferior S. De este modo el rotor es atraído hacia todas las partes y tiende a girar en sentido horario, deteniéndose en el punto en el que la polaridad del campo magnético es tal que no determina más atracción. Dado que las corrientes en los devanados tiene la misma intensidad el árbol se detiene a 1/4 de giro, porque el Norte del rotor se aleja del N de la derecha y es atraído por el S de la parte inferior, manteniéndose en la posición de mismo signo. Para hacer que funcione de nuevo, es preciso invertir las fases, o bien el sentido de las corrientes. Ahora la expansión polar N del rotor es atraída hacia la izquierda y la S a la derecha, por lo que el árbol gira todavía 1/4 y luego se detiene, aplicando una corriente de sentido contrario en 3-4 respecto a la presente en el primer paso. Para hacerlo avanzar, bastará anular la tensión 1- 2, invertir la 3-4 y nuevamente la 1-2. Así se llega a 3/4 de giro. El ciclo se completa con una sucesiva anulación de la corriente en 3-4, la inversión en 1-2 y un nuevo cambio de la polaridad 3-4.

En figura 3.6 se puede ver el esquema de conexión. del motor paso a paso bipolar.

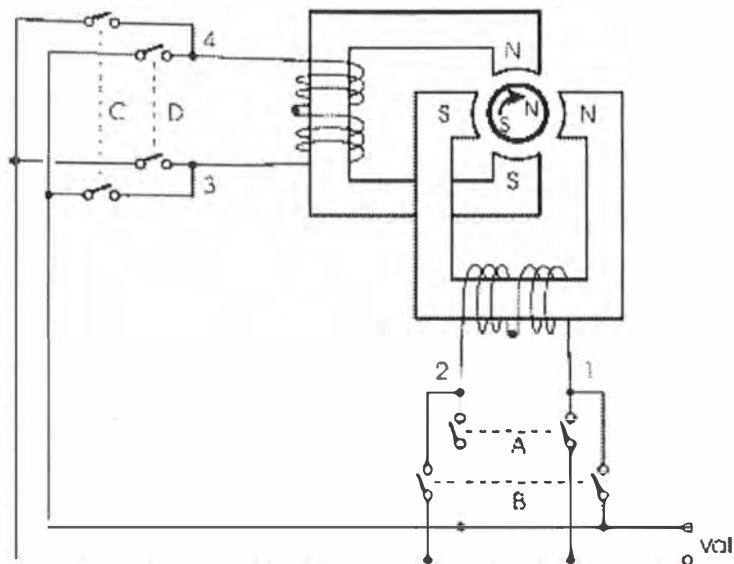


Figura 3.6: Esquema de conexión motor bipolar.

### 3.1.2.1 Tipos de Motores de Paso a Paso

Existen dos variedades de motores de paso a paso.

- Motores de imán permanente.
- Motores de reluctancia variable.

Se puede diferenciar estos dos tipos de motores, de la siguiente manera:

Al hacer girar el eje de los motores (sin conexión a la fuente), los motores de imán permanente muestran resistencia, en cambio los motores de reluctancia variable giran libremente.

Los motores de paso a paso de imán permanente, tienen dos devanados independientes sin TAP central (se les denomina motores bipolares) y con TAP central (llamados motores unipolares), podemos observar en la siguiente la figura 3.7

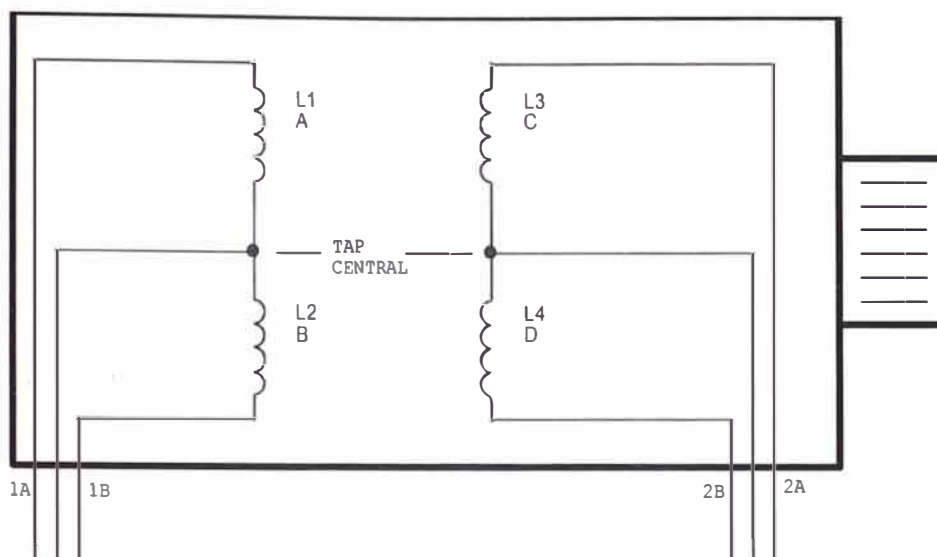


Figura 3.7: Motor imán permanente unipolar con TAP central

### 3.1.2.2 Control de Motores de Paso a Paso

En el control de los motores paso a paso, se va a utilizar un microcomputador que es un sistema al que se le envía a través de un puerto, una secuencia de señales digitales ordenadas por un programa, este dispositivo resulta ideal para controlar uno o varios motores paso a paso.

En el control de Motores Paso a Paso, se debe considerar los siguientes parámetros:

- ***Pasos (step)***

La mayoría de motores de paso tienen un paso entre  $7.5^\circ$  y  $1.8^\circ$ . Esto se traduce en 48 a 200 pasos por revolución respectivamente. Con un paso menor se puede conseguir mejores resoluciones.

- ***PULL -in Y PULL -out rate***

El PULL in rate es la máxima velocidad con la cual puede arrancar un motor con carga sin perder pasos. El PULL in rate es siempre menor al PULL out rate. Si se

quiere llevar un motor a su máxima velocidad sin perder pasos es necesario acelerar desde una velocidad menor.

- Resonancia

Ciertas frecuencias de operación pueden hacer resonar el motor, esto produce perdidas de paso, debiéndose controlar estas frecuencias de operación.

Al operar un motor sin carga, en un rango de frecuencias, se detectaran (mediante sensores o audiblemente) una o más frecuencias de resonancia, debiéndose agregar un factor de amortiguamiento externo, de mayor inercia o un driver controlador adecuado, para solucionar este problema.

El diagrama de bloques de nuestro sistema de control secuencial es como se muestra en la figura 3.8. Aquí es posible considerar los motores de paso a `paso como elementos actuadores para realizar el desplazamiento de las piezas a recubrir, en la modalidad de lazo abierto.

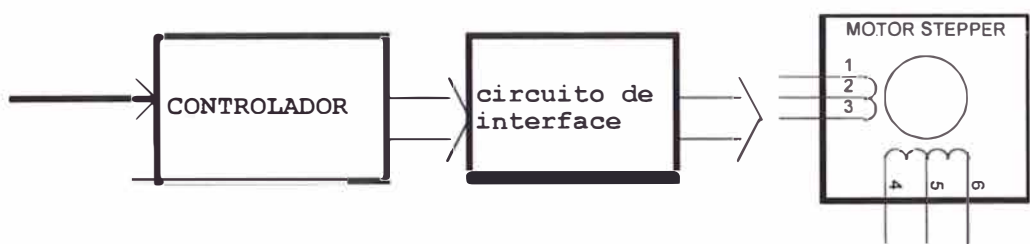


Figura 3.8: Diagrama de bloques del control secuencial

Existen dos formas o modos de circuitos de interfase, una con circuitos integrados especializados que requiere de pocas líneas de control por parte del microcomputador y otra donde se maneja cada bobina con un bit independiente en el puerto de salida. Para nuestro caso utilizaremos la segunda interfaz, en donde se

controlan directamente las bobinas por medio de un circuito implementado por buffer amplificador de potencia (transistores darlington).

### **3.1.2.3 Criterios de Selección de Motores de Paso a Paso**

En este informe se propone el uso de los motores paso a paso de imán permanente bipolar con las dos tomas medias anidadas entre sí y conectadas (a la alimentación positiva de Vcc) por su bajo costo, su precisión de generación de pulsos (frecuencia), resonancia y su aplicación para el control de posicionamiento que involucra el control de la velocidad máxima o mínima del sistema.

Los parámetros para seleccionar un motor paso a paso que cumplen con los requerimientos para el desarrollo óptimo del proceso son:

- Torque de fricción en m Nm .
- Carga inercial en  $gr \times m^2$ .
- Angulo que se quiere mover en grados.
- Tiempo en que se quiere alcanzar dicho ángulo por paso.
- Velocidad en pasos por segundo.
- Aceleración y desaceleración.
- Fuente de alimentación disponible.
- Sistema controlador ( unipolar ó bipolar).
- Tamaño, peso, forma y consideraciones de montaje.

El motor adecuado en nuestro estudio es el de paso completo, ya que cada secuencia del rotor gira un determinado ángulo que es definido por el fabricante del motor, el cual nos permite medir los tiempos del control secuencial.

En la tabla 3.2 se muestra las fases de las señales que se debe aplicar al motor.

Tabla 3.2: Secuencia de señales en el motor paso a paso

FASE A	FASE B	FASE C	FASE D
ON(1)	OFF(0)	ON(1)	OFF(0)
ON(1)	OFF(0)	OFF(0)	ON(1)
OFF(0)	ON(1)	OFF(0)	ON(1)
OFF(0)	ON(1)	ON(1)	OFF(0)

Las secuencias de las señales del motor paso a paso bipolar podemos mostrarlo en el siguiente diagrama tiempos (Ver la figura 3.9).

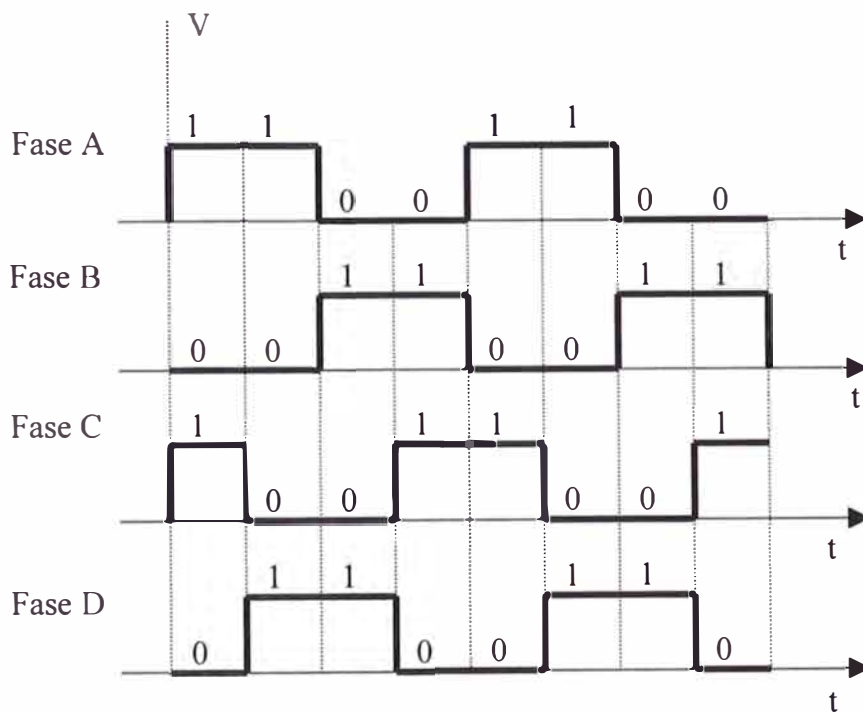


Figura 3.9: Diagrama de tiempos del motor paso a paso.



# CAPITULO IV

## MODELAMIENTO DEL PROCESO DE CINCADO EN LA CUBA ELECTROLÍTICA

### 4.1 Principios

El presente capítulo trata sobre el modelamiento matemático del proceso de cincado, en el que la variable de salida es la temperatura que se incrementa al paso de la corriente entre los electrodos y la variable de entrada es la tensión en la electroválvula, que a su vez va a controlar el caudal de agua necesaria para el enfriamiento del sistema. En tal sentido, este proceso es de una entrada y una salida (SISO), en el que la variable de salida (temperatura) es la que se desea controlar.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama esquemático del proceso de cincado en la cuba electrolítica.

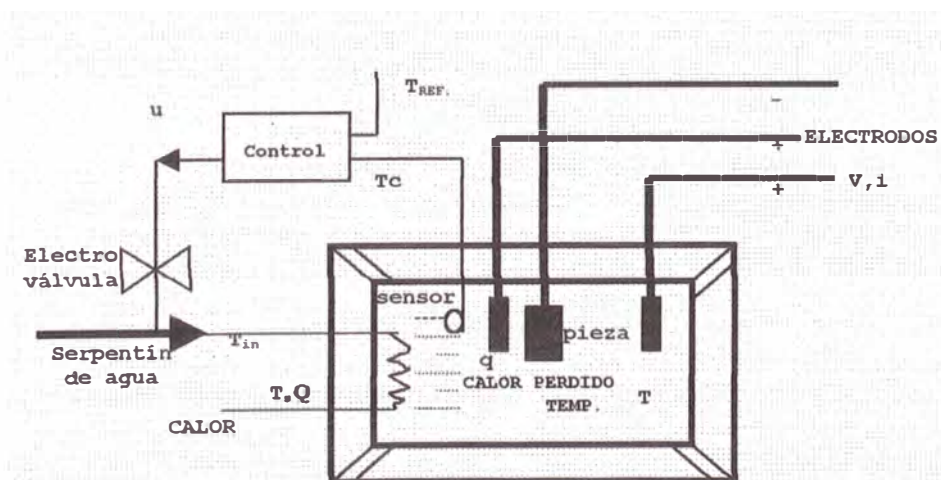


Figura 4.1: Diagrama esquemático del proceso de cincado en la cuba electrolítica.

## 4.2 Descripción del recubrimiento metálico de cincado en la cuba electrolítica.

El proceso de cincado en la cuba electrolítica consta de:

- Una cuba en el que se realiza la reacción electrolítica al paso de la corriente permitiéndose el recubrimiento metálico.
- Un sistema de enfriamiento que funciona al elevarse la temperatura en la cuba electrolítica que es detectado por el sensor de temperatura y transmitido al controlador, que permite accionar la válvula que regula el caudal de agua necesaria para obtener la temperatura adecuada.

## 4.3 Modelamiento del proceso

Considerando que en la cuba electrolítica mostrada en la figura 4.1 se realiza el proceso de cincado, es importante sensor la temperatura con precisión, por lo que es necesario conocer las características térmicas de la celda.

La cantidad de calor por unidad de tiempo que se produce por el paso de la corriente eléctrica y que debe ser removido del baño, es calculado por la siguiente ecuación:

$$q_t = \frac{V i}{3.4} = \frac{\text{voltios} \times \text{amperios}}{3.4} = \frac{\text{BTU}}{\text{Hora}} \quad (4.1)$$

La ecuación (4.1) se puede representar en función de otros parámetros que van a influir en el control de la temperatura.

De acuerdo a la Ley de Faraday, el espesor del recubrimiento de las piezas metálicas es definido por:

$$e = \frac{itM \times 10^2}{A \rho F n(\eta)} \text{ micras}$$

donde:

e: espesor de la pieza a recubrir (micras)

i: corriente (amperios)

M: peso molecular del cinc (65.4 g /mol)

A: área a recubrir (dm<sup>2</sup>)

$\rho$ : densidad del cinc (7.15g /cm<sup>3</sup>)

n: valencia del cinc (2)

F: 96500 coulomb ( Amperios x segundo)

$\eta$ : eficiencia del proceso de cincado (0.7)

V: voltaje en los electrodos (voltios)

i: intensidad de corriente (Amperios)

t: tiempo (segundos)

reemplazando los datos se tiene:

$$e = \left( \frac{65.4 \times 10^2}{7.15 \times 96500 \times 2 \times 0.7} \right) \frac{it}{A} \text{ micras}$$

$$e = 0.006770 \frac{it}{A} \text{ micras}$$

donde:  $k_1 = 0,006770$ ;

$$e = k_1 \frac{it}{A} \text{ micras} \quad (4.2)$$

Despejando la corriente de la ecuación (4.2) se tiene:

$$i = 147.7011 \frac{eA}{t} \text{ amperios}$$

Si,  $k_2 = 147.7011$  tenemos:  $i = k_2 \frac{eA}{t}$  *amperios*; reemplazando esta corriente en la ecuación (4.1); obtendremos el calor en la cuba electrolítica:

$$q_1 = \frac{Vi}{3.4} = \frac{147.7011 Ve A}{3.4} \frac{BTU}{t \text{ Hora}}$$

$$q_1 = \frac{43.4415 Ve A}{3600} \frac{BTU}{t \text{ Segundos}}$$

$$q_1 = 0.0120671 \frac{Ve A}{t} \frac{BTU}{\text{Segundos}} \quad (4.3)$$

Si se toma como base  $t = 1$  segundo, el calor es:

$$q = 0.0120671 \frac{Ve A}{t} \text{ BTU} \quad (4.4)$$

Para remover este calor ( $q$ ) en el baño de cincado, y por consecuencia sus efectos perjudiciales para el proceso se utilizan una camisa de agua circulante en doble tanque o serpentín de enfriamiento. Utilizando una masa fría que circula para el enfriamiento; el líquido de enfriamiento normalmente es agua a la temperatura ambiente.

La ecuación de transferencia de calor estará dada como:

$$q = m_{H_2O} C_{p_{H_2O}} (T_C - T_{in}) \text{ calorías} \quad (4.5).$$

Donde:

$q$ : calor ganado por el agua del serpentín(calorías)

$m_{H_2O}$ : masa del agua (g)

$C_{p_{H_2O}}$ : calor específico del agua (1 calorías/g-°C; a 20 °C)

$T_C$ : temperatura de la solución en el interior de la cuba (°C)

$T_{in}$ : temperatura del agua (°C)

1 caloría = 0.003966 BTU

$$\text{Entonces: } q = 0.003966 m_{H_2O} C_{p_{H_2O}} (T_c - T_{in}) \text{ BTU} \quad (4.6)$$

Asumiendo que el calor interno dentro de la cuba es igual en todo el recinto, y utilizando un sistema de enfriamiento (serpentín) e igualando el calor perdido por la solución de la cuba (ecuación 4.4), con el calor ganado por la masa de agua circulante por el serpentín (ecuación 4.6), la ecuación quedaría expresado por:

$$q = 0.0120671 \frac{V_e A}{t} = 0.003966 (m_{H_2O} C_{p_{H_2O}} (T_c - T_{in}) \text{ BTU} \quad (4.7)$$

despejando de la ecuación (4.7) la masa de agua se tiene:

$$m_{H_2O} = \frac{0.0120671}{0.003966} \frac{V_e A}{t C_{p_{H_2O}} (T_c - T_{in})} \text{ g}$$

$$m_{H_2O} = 3.0426374 \frac{V_e A}{t (T_c - T_{in})} \text{ g} \quad (4.8)$$

Asimismo la masa del agua en función de la densidad y su volumen es:

$$m_{H_2O} = D_{H_2O} \times V_{H_2O}, \quad D_{H_2O} = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$V_{H_2O} = m_{H_2O} / D_{H_2O}$$

de la ecuación (4.8) se tiene el volumen del agua igual a:

$$V_{H_2O} = 3.0426374 \frac{V_e A}{t (T_c - T_{in}) D_{H_2O}} \text{ cm}^3$$

Haciendo  $k_3 = 3.0426374$ ; el volumen del agua requerido es:

$$V_{H_2O} = k_3 \frac{V_e A}{t (T_c - T_{in})} \text{ cm}^3 \quad (4.9)$$

Realizando un cambio de variable en la ecuación (4.9), con la finalidad de dar mayor viabilidad en la resolución del problema.

$$k = k_3 \frac{VAe}{t} \quad (4.10)$$

Si hacemos:  $\Delta T = (T_c - T_{in})$ ; entonces la ecuación (4.9) quedaría como:  $V_{H_2O} = \frac{k}{\Delta T}$

derivando esta ecuación con respecto al tiempo obtenemos el caudal (Q).

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta T(0) - k \dot{\Delta T}}{\Delta T^2} = -\frac{k \dot{\Delta T}}{\Delta T^2} \quad (4.11)$$

Asimismo es necesario controlar el caudal de agua necesaria a fin de controlar la temperatura adecuada para el proceso de recubrimiento de cincado, según las especificaciones técnicas [13], las relaciones del actuador para abrir o cerrar la válvula con un cierto grado de apertura y con ello originar un caudal a través del serpentín, se presenta la siguiente tabla 4.1 con datos experimentales de apertura versus caudal(m<sup>3</sup>/s).

Tabla 4.1 Caudal de salida en función del Grado de Anertura

$\theta$	Q (m <sup>3</sup> /s)
10	0.00
20	0.20
30	0.50
40	1.00
50	1.80
60	3.00
70	5.00
80	9.00
90	10.00

Estos datos se pueden observar en la figura 4.2, la curva característica caudal-apertura de la válvula es no lineal, como se puede ver, se linealiza por tramos la cual es procesado por el microprocesador. La apertura es sensada mediante un potenciómetro, este se encuentra en un rango de 0 a 5V, que luego es digitalizado

utilizando un conversor análogo digital, cuando este valor ingresa al microprocesador se busca dentro de una tabla el correspondiente valor linealizado.

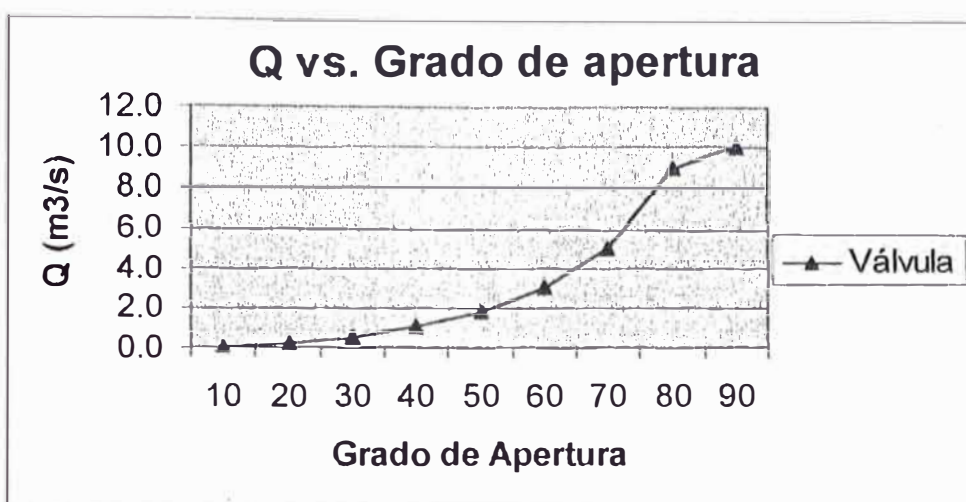


Figura 4.2 Q vs. Grado de Apertura de la Válvula

Teniendo en cuenta los datos experimentales se obtiene: Q (caudal) en función del grado de apertura  $\theta$ , y la ecuación para la válvula es:

$$Q = 0.0021\theta^2 - 0.0836\theta + 0.8357 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (4.12)$$

donde:

Q: caudal (m<sup>3</sup>/s)

$\theta$  : grado de apertura ( ° )

de las especificaciones técnicas se tiene:

$$\theta - U \text{ mbar}$$

Además de la tabla 4.1  $\theta$  Vs U(presión), se tiene que:

$$U = \theta \quad (4.13)$$

Reemplazando la ecuación (4.13) en la ecuación (4.12)

$$Q = 0.0021U^2 - 0.0836U + 0.8357 \quad (4.14)$$

Por otro lado en la ecuación (4.11) se puede reemplazar  $\Delta T = T_C - T_{in}$

Por otro lado en la ecuación (4.11) se puede reemplazar  $\Delta T = T_C - T_{in}$

$$V_{H_2O} = \frac{k}{\Delta T} = \frac{k}{T_C - T_{in}}$$

$$Q = \frac{dV}{dT} = -k \frac{\dot{\Delta T}}{\Delta T^2} = -K \frac{(\dot{T}_C - T_{in})}{(T_C - T_{in})^2} = -K \frac{(\dot{T}_C - 0)}{(T_C - T_{in})^2}$$

$$Q = -K \frac{\dot{T}_C}{(T_C - T_{in})^2} \quad (4.15)$$

Igualando la ecuación (4.15) y (4.14) se tiene:

$$Q = -K \frac{\dot{T}_C}{(T_C - T_{in})^2} = 0.0021 U^2 - 0.0836 U + 0.8357$$

Despejando  $\dot{T}_C$ , se obtiene la ecuación de estado no lineal.

$$\dot{T}_C = -\frac{0.0021}{k} (T_C - T_{in})^2 U^2 + \frac{0.0836}{k} (T_C - T_{in})^2 U - \frac{0.8357}{k} \Delta T^2 \quad (4.16)$$

Asumiendo,  $\bar{T}_C = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $T_{in} = 17 \text{ } ^\circ\text{C}$

Reemplazando  $T_{in} = 17 \text{ } ^\circ\text{C}$  en la ecuación (4.16) se tiene que la ecuación de estados no lineal del proceso viene a ser:

$$\dot{T}_C = -\frac{0.021}{k} (T_C - 17)^2 U^2 + \frac{0.0836}{k} (T_C - 17)^2 U - \frac{0.8357}{k} (T_C - 17)^2 \dots f(T_C, u) \quad (4.17)$$

y la ecuación de salida es:

$$y = h = T_C \quad (4.18)$$

Para efectos de linealización de la ecuación (4.15) podemos definir las siguientes variables residuales:

$$T_c = T_C - T_C \quad u = U - U$$



Entonces, la ecuación linealizada empleando el jacobiano para el punto de operación, resulta:

$$\dot{T}_c = AT_c + Bu \quad (4.19)$$

que tiene la siguiente forma:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

donde:

A = Matriz de estado de dimensión  $n \times n$  ( $1 \times 1$ )

B = Matriz de control de dimensión  $n \times m$  ( $1 \times 1$ )

E = Matriz de disturbios de dimensión  $n \times n$  ( $1 \times 1$ )

C = Matriz de salida de dimensión  $r \times n$  ( $1 \times 1$ )

D = Matriz de transmisión directa de dimensión  $r \times m$  ( $1 \times 1$ )

Dichas matrices del sistema linealizado son A, B, C, D, que se encuentran en función de  $k$ , cuyo valor varía de acuerdo al área, espesor, y otros factores de las piezas a recubrir. Aplicando el jacobiano, el proceso linealizado resulta:

$$A = \frac{\partial f_1}{\partial T_c} =$$

$$\frac{-0.0021}{k} \times 2\bar{T}_c \bar{U}^2 + \frac{0.0021 * 2 * 17}{k} \bar{U}^2 + \frac{0.0836}{k} \times 2\bar{T}_c \bar{U} - \frac{0.0836 * 2 * 17}{k} \bar{U} - \dots$$

$$- \frac{0.8357}{k} \times 2\bar{T}_c + \frac{0.8357 * 2 * 17}{k}$$

Los valores de A varían de acuerdo a los valores de  $k$ .

$$B = \frac{\partial f_1}{\partial u} = \frac{-0.0021}{k} \times 2 \times \bar{T}^2 \bar{U} + \frac{0.0836}{k} \frac{\Delta T^2}{\Delta U} \Big|_{\substack{\Delta T=8 \\ \bar{U}=30}}$$

$$B = \frac{\partial f_1}{\partial U} = \frac{-0.0021}{k} 2(64)(30) + \frac{0.0836}{k} (64)$$

Los valores de B varían de acuerdo al valor de k.

$$C = \frac{\partial h}{\partial \Delta T} = 1, \quad D = [0]$$

La ecuación de salida sin la presencia de disturbios ( $v = w = 0$ ) se puede obtener de:

$$y = CTc$$

En la siguiente tabla 4.2 se presentan los resultados teóricos de los espesores mínimos de acuerdo a las Normas Técnicas ASTM(+) B633-78, con una eficiencia del 0.7, para el proceso de cincado.

Tabla 4.2: Valores de densidad, tiempo para espesores de recubrimientos mínimos de acuerdo a las **NORMAS TÉCNICAS ASTM(+) B633-78**

CONDICION DE SERVICIO	CONSTANTE k1	DENSIDAD DE CORRIENTE (D) Amp/dm <sup>2</sup>	TIEMPO (t) (segundos)	ESPESOR (E) (micras)
SC1(Suave)	0.0067700	2	369.00	5.00
SC2(moderado)	0.0067700	3	393.80	8.00
SC2(moderado)	0.0067700	5	236.40	8.00
SC3(Severo)	0.0067700	5	384.00	13.00
SC4(muy severo)	0.0067700	5	738.50	25.00

En la tabla 4.3 se presentan los datos experimentales desarrollados al nivel de laboratorio para el cincado alcalino, llevado a cabo en la Facultad de Ciencias Laboratorio de Investigación, tomando como base las **NORMAS TÉCNICAS ASTM(+) B633-78**, identificamos: el tipo de servicio en el que se va encontrar expuesta la pieza, los tiempos necesarios para el recubrimiento, las densidades de corriente necesarias y espesores a recubrir la pieza para evitar la corrosión.

Tabla 4.3: Valores experimentales obtenidos al nivel de laboratorio de la densidad, tiempo para espesores de recubrimientos metálico de cincado alcalino.

CONDICION DE SERVICIO	CONSTANTE $k_1$	DENSIDAD DE CORRIENTE (D) $\text{Amp}/\text{dm}^2$	TIEMPO (t) (segundos)	ESPESOR (E) (micras)
SC1(Suave)	0.00677000	2	300	4.06
SC1(Suave)	0.00677000	2	480	6.50
SC1(Suave)	0.00677000	2	600	8.12
SC1(Suave)	0.00677000	3	300	6.09
SC1(Suave)	0.00677000	3	480	9.75
SC2(moderado)	0.00677000	3	600	12.19
SC2(moderado)	0.00677000	5	300	10.16
SC3(Severo)	0.00677000	5	480	16.25

En las siguientes tablas (4.4), (4.5) se muestran los valores de  $k$ , para los diferentes casos de voltaje, y requerimientos que cumplan con las normas técnicas de recubrimiento

Tabla 4.4: Valores de la constante  $k$ , en función de los parámetros especificados en la ecuación (4.10)

TIPO DE SERVICIO	CONST $k_2$	TIEMPO (t) (segundos)	ESPESOR R (e) (micras)	AREA (A) ( $\text{dm}^2$ )	VOLT. (V) (Voltios)	INTENS. DE CORRIENTE (I) (Amperios)	CONST $k_3$	CONST $k$
SC1(Suave)	147.701	369.00	5.00	100	2	400.27	3.0426	4.12281
SC2(modera do)	147.701	393.80	8.00	100	3	900.16	3.0426	6.18108
SC2(modera do)	147.701	236.40	8.00	100	4	1999.34	3.0426	10.2965
SC3(Severo)	147.701	384.00	13.00	100	5	2500.15	3.0426	10.3005
SC4(muy severo)	147.701	738.50	25.00	100	6	3000.02	3.0426	10.3000

Tabla 4.5: Valores Experimentales de la constante k, en función de los parámetros especificados en la ecuación (4.10).

TIPO DE SERVICIO	CONST k2	TIEM. (t) (seg)	ESPESOR (e) (micras)	AREA (dm <sup>2</sup> )	VOLT. (V) (Voltios)	INTENS. DE CORRIENTE (I) (Amperios)	CONST k3	CONST k
SC1 (Suave)	147.701	300	4.06	100	2	399.97	3.0426	4.11973
SC2 (moderado)	147.701	480	6.50	100	3	599.96	3.0426	4.11973
SC2 (moderado)	147.701	600	8.12	100	4	799.95	3.0426	4.11973
SC2 (moderado)	147.701	300	6.09	100	5	1499.90	3.0426	6.17959
SC4 (muy severo)	147.701	480	9.75	100	6	1799.89	3.0426	6.17959
SC3 (Severo)	147.701	600	12.19	100	6	1799.89	3.0426	6.17959
SC3 (Severo)	147.701	300	10.16	100	6	2999.81	3.0426	10.29932
SC4 (muy severo)	147.701	480	16.25	100	6	2999.81	3.0426	10.29932

### 4.3.1 Determinación de la estabilidad del sistema linealizado

Para que el sistema sea estable, los valores propios de la ecuación característica deben tener la parte real negativa. Esta condición puede obtenerse usando la representación de entrada /salida del proceso o usando la representación en espacio de estado.

#### Estabilidad aplicado al modelo de función de transferencia

La matriz de transferencia del sistema linealizado se obtiene utilizando la ecuación:

$$Y(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D]U(s);$$

$$\rightarrow \frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (4.20)$$

Para el caso en que  $A = 100 \text{ dm}^2$ , espesor de 6.10 micras, un tiempo de cincado de 480 segundos y tensión en los electrodos de 3 voltios las matrices de linealizados A, B, C y D son:

$$A = -0.2818, B = -0.2195, C = 1, D = [0]$$

Reemplazando los valores de A, B, C en la matriz de transferencia se tiene:

$$\begin{aligned} G(s) &= C(sI - A)^{-1} B \\ &= (1)(s + 0.2818)^{-1} (-0.2195) \\ &= \frac{-0.2195}{s + 0.2818} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Debido a que nuestro sistema es SISO, la matriz de transferencia se convierte en una simple función de transferencia. Entonces, la ecuación característica del proceso es:

$$s + 0.2818 = 0$$

de donde obtenemos la raíz del proceso  $s = -0.2818$ , que nos indica que dicho proceso es estable.

### **Estabilidad aplicado al modelo de espacio de estado**

La ecuación característica del proceso es:

$$\det[sI - A] = 0$$

$$|sI - A| = |s + 0.2818| = 0$$

Obteniéndose un valor propio o raíz localizado en  $s = -0.2818$ , verificándose una vez más que el proceso es estable, debido a que la raíz tiene un valor negativo.

### 4.3.2 Controlabilidad y Observabilidad

#### Controlabilidad

Un proceso dinámico lineal se dice que es controlable, si al aplicarse una señal de control  $\mathbf{u}$  es posible trasladar el estado del proceso desde un estado inicial  $\mathbf{x}(t_0)$  hacia cualquier estado final  $\mathbf{x}(t_N)$ . Para determinar si un proceso es completamente controlable, el rango de la matriz de controlabilidad  $\mathbf{M}$  debe ser igual al orden del proceso. Es decir:

$$\text{Rango}[\mathbf{M}] = \text{rango}[\mathbf{B} \quad \mathbf{AB} \quad \mathbf{A}^2\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}] = n \quad (4.22)$$

Reemplazando los valores de A y B en la ecuación (4.22) se obtiene el  $\text{Rango}(\mathbf{M})=1$  y este valor es igual el orden del proceso  $n = 1$ , donde se puede ver que el sistema es totalmente controlable, para este caso.

#### Observabilidad

Un proceso lineal dinámico con salida  $y(t)$  se denomina observable si los estados del proceso  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ , ... $x_n(t)$  pueden ser obtenidos o medidos a la salida de dicho proceso.

La condición que debe cumplirse para la observabilidad, es que el rango de la matriz de observabilidad debe ser igual al orden del proceso, es decir:

$$\text{Rango}[\mathbf{N}] = [\mathbf{C} \quad \mathbf{CA} \quad \dots \quad \mathbf{CA}^{n-1}]^T = n \quad (4.23)$$

En nuestro caso, el  $\text{rango}[\mathbf{N}] = 1$  y es igual al orden del proceso, entonces, el sistema es totalmente observable.

### 4.3.3 Discretización del proceso de cincado en la celda

Para un tiempo discreto  $k = t/T$  y asumiendo que entre muestras la señal de control  $\mathbf{u}$  es constante, entonces para una señal de entrada:

$$u(t) = u(kT), \quad kT < (k+1)T.$$

Obtenemos las ecuaciones de estado y de salida discretas:

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k) \quad (4.24)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (4.25)$$

donde:

$$G = \phi(T) = e^{AT}; \quad H = \left[ \int_0^T \phi(\lambda) d\lambda \right] B \quad (4.26)$$

Las matrices C y D en tiempo discreto son las mismas que en tiempo continuo.

Una manera práctica de calcular las matrices G, H, C, y D, es usando el siguiente comando de MATLAB:  $[G,H,C,D] = c2dm(A,B,C,D,Ts,'zoh')$ .

Los conceptos de controlabilidad y observabilidad en tiempo discreto son similares a los de tiempo continuo, así, las condiciones para controlabilidad y observabilidad son:

$$Rango(M) = rango[H \quad GH \quad G^2H \quad \dots \quad G^{n-1}H] = n \quad (4.27)$$

$$Rango(N) = rango[C \quad CG \quad CG^2 \quad \dots \quad CG^{n-1}] = n \quad (4.28)$$

En nuestro caso, el rango de la matriz de controlabilidad y observabilidad son  $n=1$ , verificándose lo que se había obtenido en tiempo continuo.

#### 4.3.4 Simulación de la respuesta del proceso a una entrada escalón.

La determinación de la controlabilidad, la observabilidad, las matrices en tiempo discreto y la respuesta del proceso a una entrada escalón, se determinan usando el programa **celda.m**, que se presenta a continuación, y que además se presenta en el Anexo A.

```

% Celda.m %Programa de simulación en lazo abierto
clear all
% PARAMETROS DEL PROCESO
% V=3, 5, 6 voltios; A=100 dm^2;
% PARA LA SIMULACION ACTIVAR SOLO UNO DE LOS SIGUIENTES CASOS:
% SELECCIONANDO:

% CASO A)
A=100; e=6.50; t=480; V=3;

% CASO B)
% A=100; e=6.09; t=300; V=5;

% CASO C)
% A=100; e=9.75; t=480; V=6;

% n=2; nu=0.7; ro=7.15; roh=1; F=96500; M=65.4; cph=1; Tent=17;
KK=(3.0426374*V*A*e)/t;
% ECUACION DE ESTADO DEL PROCESO EN TIEMPO CONTINUO
% dTeta(t)/dt = Ac*Teta(t) + Bc*vc(t) + E*Teta_o

% MATRICES DE ESTADO EN TIEMPO CONTINUO
Ac = (-0.0021*2*1+0.0021*2*1)*(25-17)/KK+(0.0836*2*1)*(25-17)/KK-(0.8357*2)*(25-17)/KK;
Bc = -0.0021*2*1*(25-17)/KK+0.0836*(25-17)/KK;
Cc = 1; Dc = 0;

% CHEQUEAR CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD
rAB = rank(ctrb(Ac,Bc)); % rAB = 1 => COMPLETAMENTE CONTROLABLE
rAC = rank(observ(Ac,Cc)); % rAC = 1 => COMPLETAMENTE OBSERVABLE
% rank(M)=rank(N)=n=1 => COMPLETAMENTE CONTROLABLE Y OBSERVABLE

% CONVERSION A TIEMPO DISCRETO
T = 0.1;
[G,H,C,D] = c2dm(Ac,Bc,Cc,Dc,T,'zoh');

% SIMULACION
[yc,xc,t]=step(Ac,Bc,Cc,Dc);
[yd,xd]=dstep(G,H,C,D);
tt=linspace(0,size(yd,1)*T,size(yd,1));
subplot(211)
plot(t,yc); grid
title('Respuesta del proceso a un escalón unitario')
xlabel('tiempo en segundos')
ylabel('yc (salida continua)')
subplot(212)
plot(tt,yd); grid
xlabel('tiempo en segundos')
ylabel('yd (salida discreta)')

```

el resultado gráfico se muestra en la figura 4.2



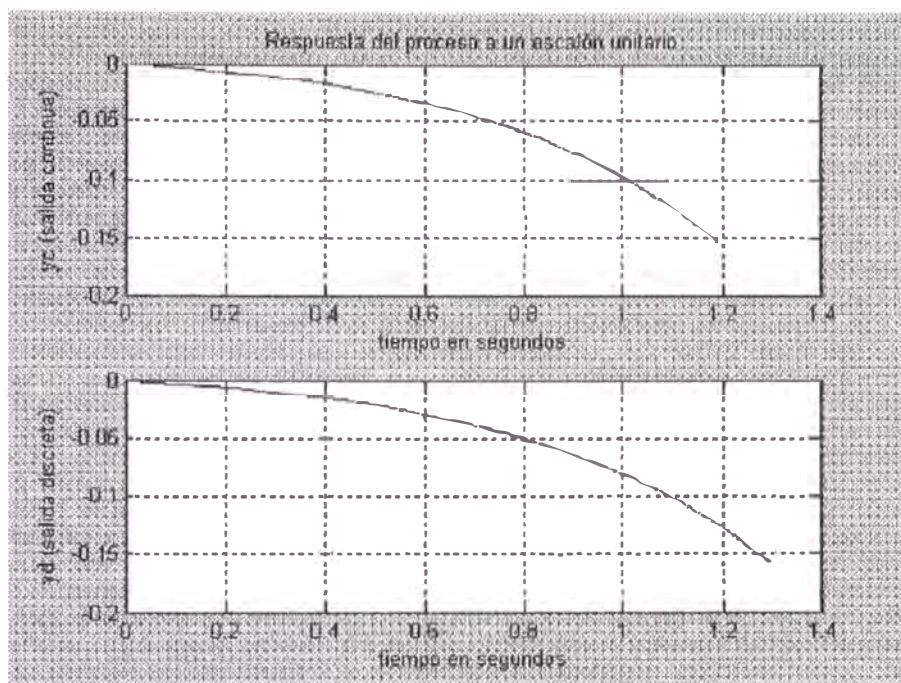


Figura 4.2. Respuesta del proceso al escalón unitario.

## CAPÍTULO V

### DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL OPTIMO DE TEMPERATURA

#### 5.1 Diseño del Sistema de Control Optimo Proporcional Integral

##### 5.1.1 Introducción

El objetivo del Control Optimo es el de determinar una ley de control óptima  $u$  que minimice la función de costo  $J$ . En la mayoría de los casos, sin embargo, la búsqueda de la función de costo involucra procedimientos de error y corrección; esto significa que no siempre podremos estar seguros acerca de la forma exacta que debería poseer la función de costo.

Para sistemas de control discretos, la función de costo generalmente posee la forma siguiente:

$$J = \sum_{k=0}^N L(x(k), r(k), u(k)) \quad (5.1)$$

donde:  $\mathbf{k}$  = tiempo discreto

$N$  = tiempo discreto final

$\mathbf{x}(\mathbf{k})$  = vector de estado

$\mathbf{r}(\mathbf{k})$  = vector de referencia

$\mathbf{u}(\mathbf{k})$  = vector de control óptimo (denominada también fuerza o señal de control).

Para aplicaciones prácticas, el vector de control  $\mathbf{u}$  debe estar siempre acotado.

En la figura 5.1 se presenta el esquema general del sistema de control proporcional integral de temperatura para el proceso de recubrimiento metálico de cincado.

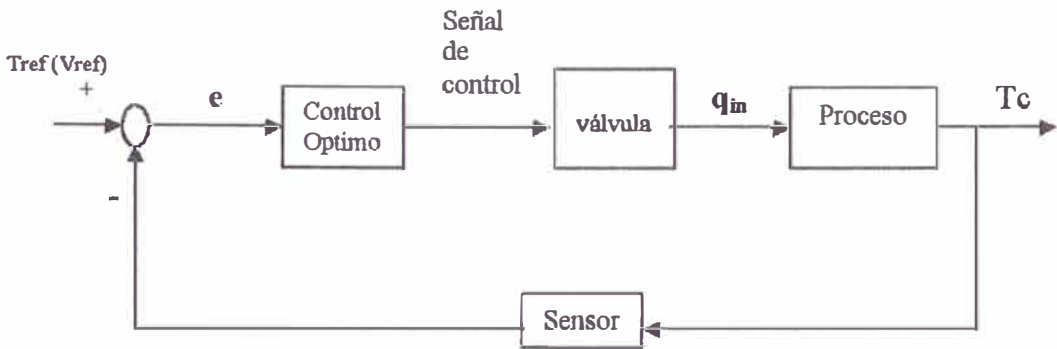


Figura 5.1: Diagrama general del sistema de control óptimo de temperatura.

### 5.1.2 Control Óptimo Cuadrático Estacionario

Cuando la dinámica del sistema de control evoluciona hasta un tiempo  $N$  infinito, la solución del control óptimo cuadrático pasa a ser una solución de estado estacionario. En este caso, la ganancia  $K(k)$  se convierte en una matriz constante  $K$ . Para  $N$  infinito, el término  $x^T(N)Sx(N)$  de la ecuación (4.4) ver [3] desaparece debido a que  $x(\infty) = 0$ .

A continuación se presentan, a manera de resumen, un conjunto de ecuaciones del control óptimo estacionario en el modo de regulación, debido a que tales ecuaciones serán de utilidad en el diseño del control óptimo proporcional integral:

**Función de costo:**

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)] \quad (5.2)$$

**Ecuación de Riccati en estado estacionario:**

$$P = Q + G^T P G - G^T P H [R + H^T P H]^{-1} H^T P G \quad (5.3)$$

**Matriz de ganancia del controlador:**

$$K = [R + H^T P H]^{-1} H^T P G \quad (5.4)$$

**Ley de control óptima:**

$$u(k) = -K x(k) \quad (5.5)$$

**Función de costo mínima:**

$$J_{\min} = \frac{1}{2} x^T(0) P(0) x(0) \quad (5.6)$$

El diagrama de bloques del sistema del regulador óptimo de estado estacionario se representa en la figura 5.2, en donde se asume que todos los estados se encuentran disponibles. Para operación satisfactoria del sistema de lazo cerrado mostrada en dicha figura, todas las raíces de su ecuación característica:

$$\det[zI - G + HK] = 0 \quad (5.7)$$

deben posicionarse dentro del círculo unitario.

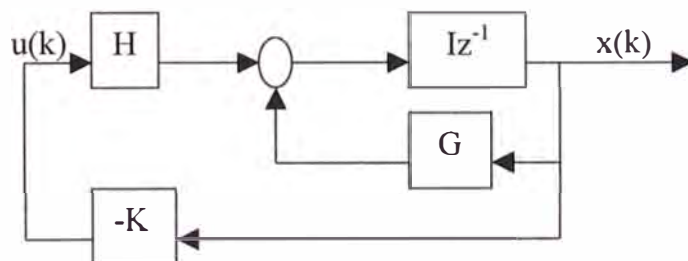


Figura 5.2: Sistema de control óptimo a lazo cerrado.

### 5.1.3 Diseño del Sistema de Control Óptimo Proporcional Integral de Temperatura.

Para procesos que no poseen propiedades integradoras, la inclusión de acción integral en el sistema de control permite obtener un error estacionario nulo. La figura 5.3 ilustra un controlador óptimo para sistemas univariados.

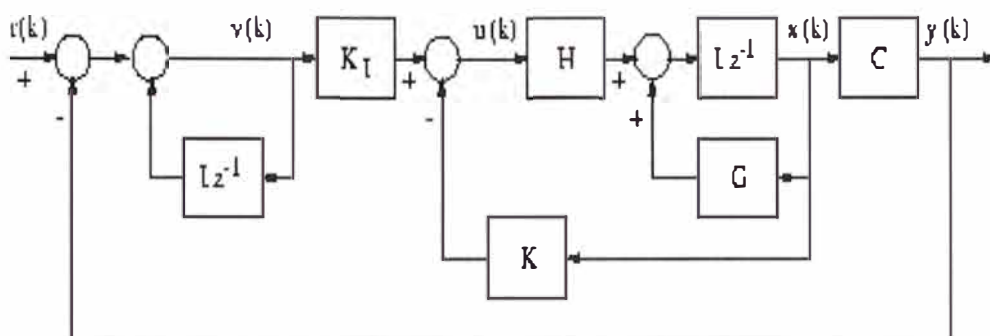


Figura 5.3 Diagrama de bloques del sistema de control óptimo proporcional integral

de la figura 5.3 se obtiene un conjunto de ecuaciones del sistema, que se pasa a resumir:

#### Ecuaciones de estado y de salida del proceso:

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k); \quad (5.8)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (5.9)$$

#### Ley de control:

$$u(k) = -Kx(k) + K_I v(k) \quad (5.10)$$

#### Matriz de ganancia del controlador:

$$K = [K_1 \quad K_2 \quad \dots \quad K_n] \quad (5.11)$$

#### Ecuación para el integrador:

$$v(k) = v(k-1) + r(k) - y(k) \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow v(k+1) &= v(k) + r(k+1) - y(k+1) \\ &= v(k) + r(k+1) - C[Gx(k) + Hu(k)] \\ &= (1 - CHK_1)v(k) + (-CG + CHK)x(k) + r(k+1) \end{aligned} \quad (5.13)$$

Reemplazando la ecuación (5.10) en (5.8) obtenemos:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Gx(k) + H[-Kx(k) + K_1v(k)] \\ &= (G - HK)x(k) + HK_1v(k) \end{aligned} \quad (5.14)$$

y de las ecuaciones (5.13) y (5.14) deducimos:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ v(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G - HK & HK_1 \\ -CG + CHK & 1 - CHK_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(k+1) \quad (5.15)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

En el estado de equilibrio (para  $k \rightarrow \infty$ ), los valores de  $x(k)$ ,  $u(k)$  y  $v(k)$  toman valores estacionarios  $x(\infty)$ ,  $u(\infty)$  y  $v(\infty)$ . Así la ecuación (5.15) se convierte en:

$$\begin{bmatrix} x(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G - HK & HK_1 \\ -CG + CHK & 1 - CHK_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ r \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Si definimos:

$$x(k) - x(\infty) = x_e(k) \quad (5.18)$$

$$v(k) - v(\infty) = v_e(k) \quad (5.19)$$

y restamos ahora la ecuación (5.17) de (5.15), y luego usando las relaciones (5.18)

y (5.19) obtenemos:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_e(K) \\ V_e(K) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} G - HK & HK_I \\ -CG + CHK & 1 - CHK_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(K) \\ v_e(K) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} G & 0 \\ -CG & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(K) \\ v_e(K) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H \\ -CH \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -K & K_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(K) \\ v_e(K) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.20)$$

La ecuación (5.20) puede ser escrita como:

$$\xi(k+1) = \bar{G} \xi(k) + \bar{H} \omega(k) \quad (5.21)$$

donde:

$$\begin{aligned} \omega(k) &= -\tilde{K} \xi(k); \quad \xi(k) = \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix}; \quad \tilde{G}(k) = \begin{bmatrix} G & 0 \\ -CG & I \end{bmatrix} \\ \tilde{H}(k) &= \begin{bmatrix} H \\ -CH \end{bmatrix}; \quad \tilde{K}(k) = [K \quad -K_I] \end{aligned} \quad (5.22)$$

Observar que la inclusión de un integrador en el sistema de control aumenta en uno el orden del sistema. En otras palabras, el vector de estado  $x(K)$  del sistema original posee dimensión  $n$ , mientras que el vector de estado  $\xi(K)$  del regulador proporcional integral posee dimensión  $(n+1)$ .

Teniendo en cuenta las relaciones anteriores, podemos definir la siguiente función de costo:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [\xi(k)^T (k) \tilde{Q} \xi(k) + \omega^T(k) \tilde{R}] \quad (5.23)$$

Debemos calcular una matriz  $K$  adecuada de forma tal que minimice la función costo dada en la (5.23), para ello se tiene calcular primeramente la matriz  $P$  de la ecuación de Riccati, tal como sigue:

$$P = \tilde{Q} + \tilde{G}^T P \tilde{G} - \tilde{G}^T P \tilde{H} [\tilde{R} + \tilde{H}^T P \tilde{H}]^{-1} \tilde{H}^T P \tilde{G} \quad (5.24)$$

$$\tilde{K} = [\tilde{R} + \tilde{H}^T P \tilde{H}]^{-1} \tilde{H}^T P \tilde{G} \quad (5.25)$$

Para nuestra aplicación, se consideran las siguientes matrices de ponderación ampliadas para los estados y para la señal de control, respectivamente:

$$\tilde{Q} = \begin{pmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 300 \end{pmatrix}; \quad R = [10000] \quad (5.26)$$

#### 5.1.4 Simulación del Sistema de Control Proporcional Integral de temperatura y Control Proporcional de Tensión entre los electrodos.

Haciendo uso de un programa en código Matlab, denominado contop.m, obtenemos las matrices aumentadas del sistema, así como, los resultados gráficos del sistema de control óptimo proporcional integral. Dentro de este programa se han considerado algunas líneas para implementar un control proporcional en lazo abierto para controlar el nivel de tensión en los electrodos de la celda electrolítica, necesario para tener la corriente necesaria para el recubrimiento metálico de acuerdo al espesor de la pieza a recubrir. A continuación se presenta en forma parcial el programa ya mencionado.

```
% CONVERSION A TIEMPO DISCRETO
T =1;
[G,H,C,D] = c2dm(Ac,Bc,Cc,Dc,T,'zoh');
Gtilde = [G zeros(1,1)
          -C*G eye(1,1)]; % DEBE SER DE ORDEN n+1=2
Htilde = [H
          -C*H];

% PONDERACION
Q = [1000 0; 0 300]; % PONDERA EL VECTOR DE ESTADO x(k)
R = 10000; % PONDERA LA SEÑAL DE CONTROL u(k)

% CALCULO DE LA GANANCIA DEL CONTROLADOR OPTIMO
[Ktil,Ptil,E] = dlqr(Gtilde,Htilde,Q,R); % Ktil: GANANCIA OPTIMA
K = Ktil(1); KI = -Ktil(2);

% CONDICIONES INICIALES Y REFERENCIA
x = [0]; yi=0; v=0;
N = 20000;
```



```

r=25; % referencia de temperatura: 25 grados centigrados

% RESPUESTA A UNA REFERENCIA DE 25 GRADOS CENTIGRADOS
% Y CONTROL PROPORCIONAL DE LA TENSION ANODICA
for k=1:N
v = v + r - yi;
u(k) = -K*x + KI*v;
x = G*x + H*u(k);
y(k) = x; yi = y(k);

ua(k)=1.4; % Voltaje de control aplicado a la entrada del
amplificador
% Va=A*ua(k); % Voltaje entre electrodos comprendido entre 3 a 6
voltios
% A1, A2, A3 : Banco de ganancias del amplificador
% CASO A)
% Si I=599.96 Amp para un espesor de: 6.50 micras
A1=2.1428; Va(k)=A1*ua(k); Va=Va(k); % ua(k) es la tensión de
control proveniente del controlador

% CASO B)
% Si I=1499.90 Amp para un espesor de: 6.09 micras
% A2=3.5714; Va(k)=A2*ua(k); Va=Va(k);

% CASO C)
% Si I=1799.89 Amp para un espesor de: 9.75 micras
% A3=4.2857; Va(k)=A3*ua(k); Va=Va(k);
end

% GRAFICOS
t = linspace(0,T*N,N);
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(t,y); grid on;
ylabel('T (°C)')
title('Control Optimo Proporcional Integral de Temperatura')
subplot(2,1,2)
plot(t,u); ylabel('u (bar)'); grid on;
xlabel('Tiempo (seg)')
%print -deps -f

figure(2)
plot(t,Va); grid on;
title('Control Proporcional de Tensión anódica')
ylabel('Va (Voltios)')
xlabel('Tiempo (seg)')

```

mostrando el resultado de la respuesta del control optimo proporcional de temperatura del caso A, en la figura 5.4 y el resultado del control proporcional de lazo abierto de la tensión en el ánodo, se muestra en la figura 5.5.

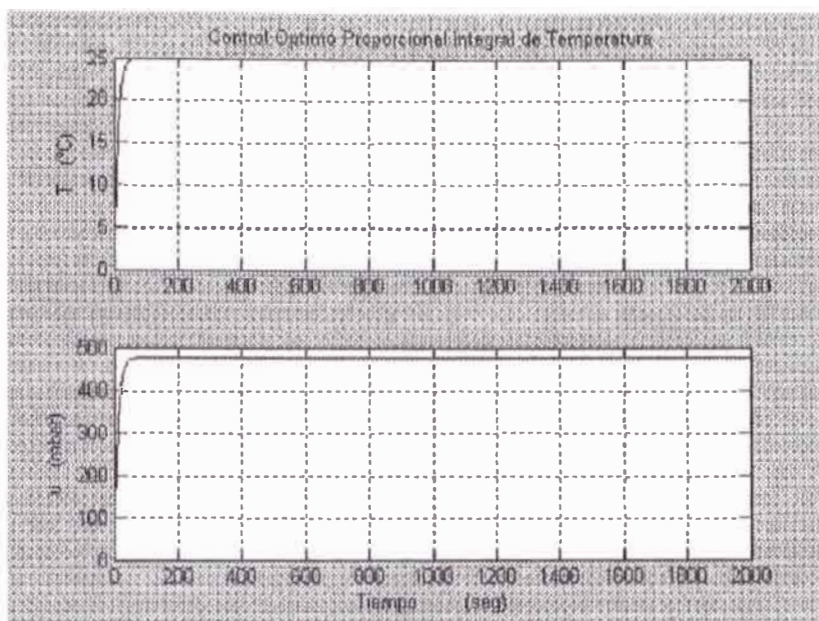


Figura 5.4: Temperatura óptima en la cuba electrolítica y señal de control respectivo para el caso A.

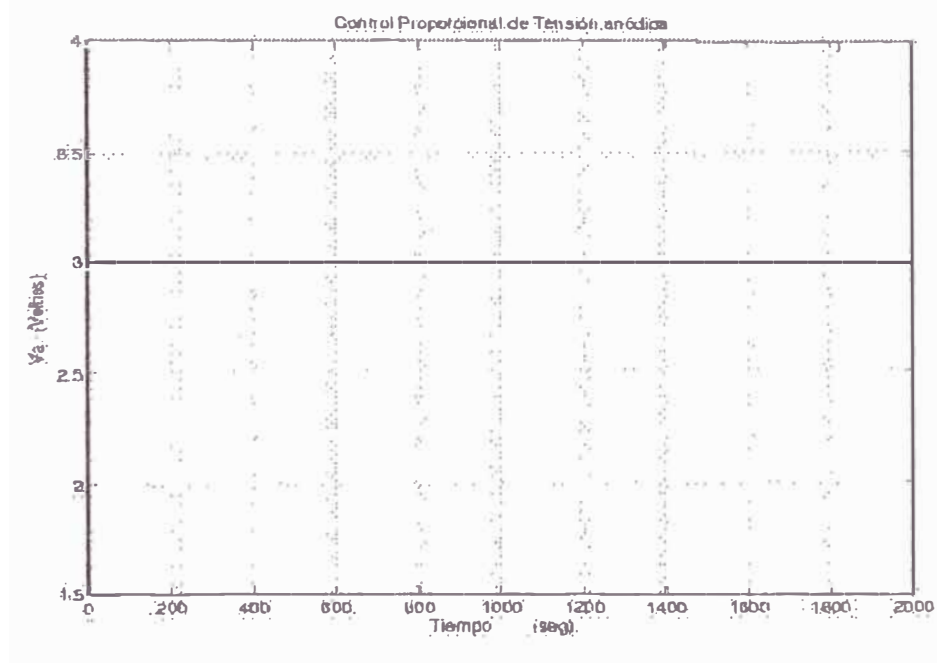


Figura 5.5: Tensión en los electrodos de la cuba electrolítica para el caso A.

Los tres casos (A, B y C) de recubrimiento metálico cumplen con las Normas Técnicas ASTM(+) B633-78. Habiéndose corrido el programa en Matlab se obtienen los siguientes resultados mostrados en las figuras 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9.

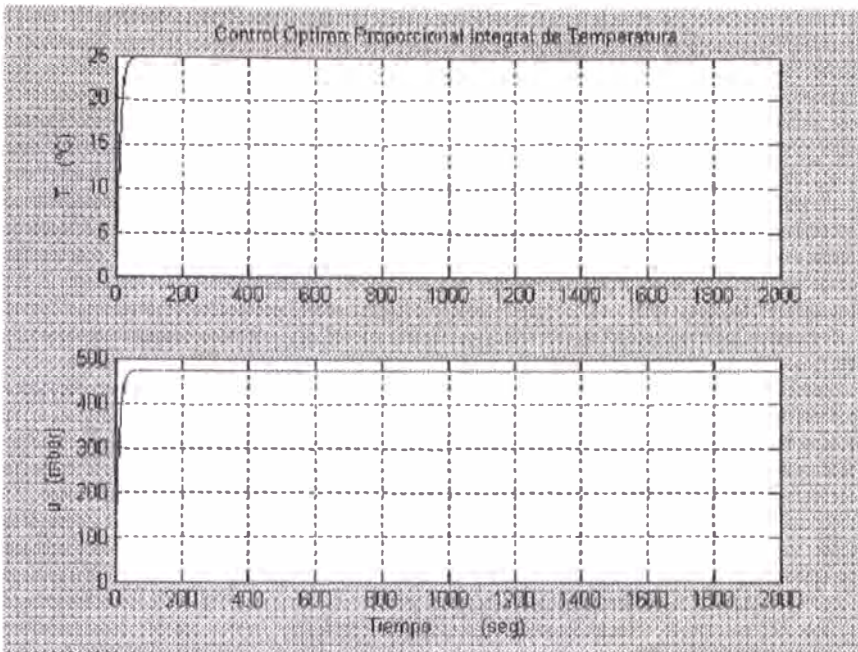


Figura 5.6: Temperatura óptima en la cuba electrolítica y señal de control respectivo para el caso B.

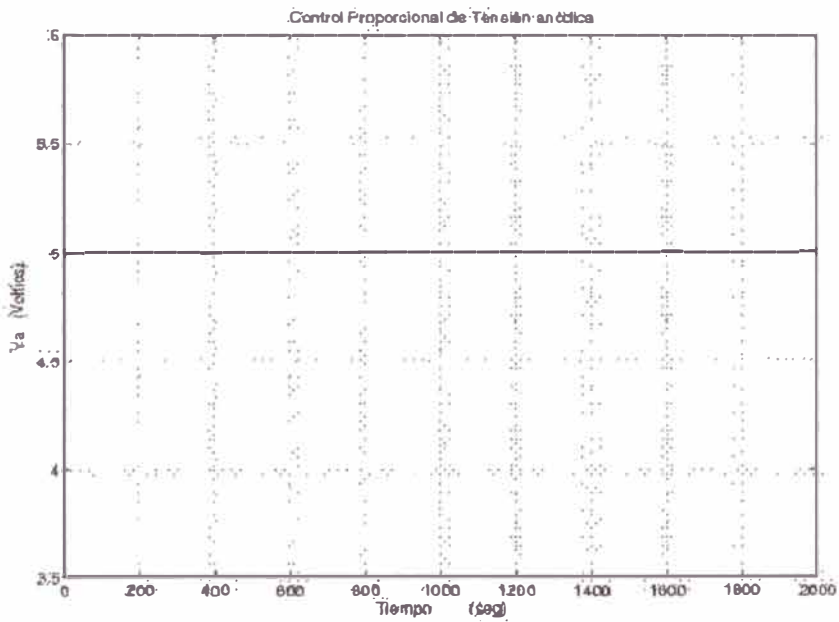


Figura 5.7: Tensión en los electrodos de la cuba electrolítica para el caso B.

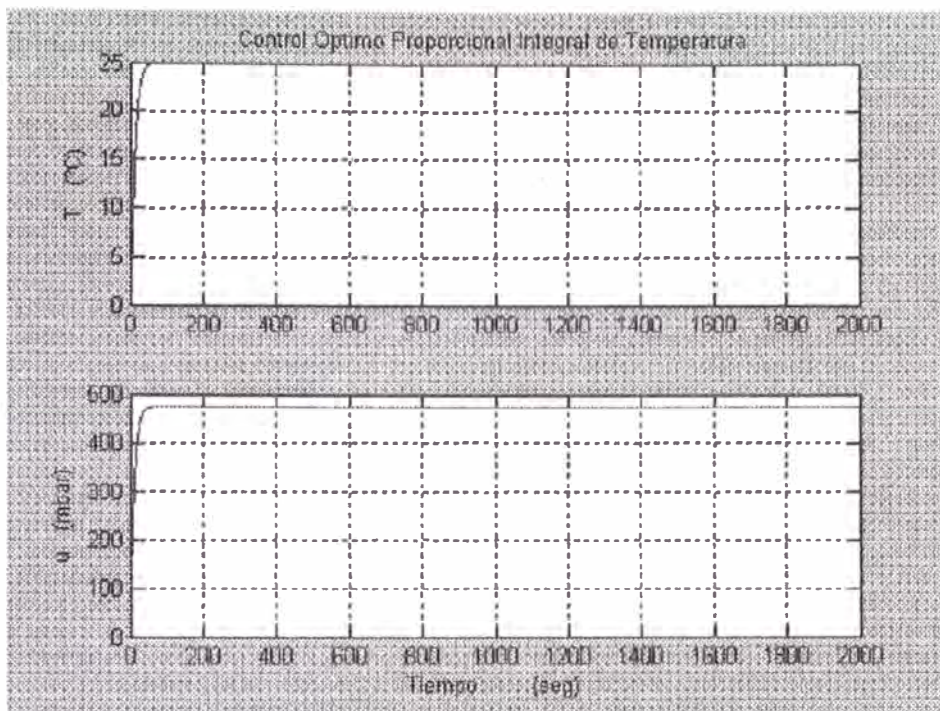


Figura 5.6: Temperatura óptima en la cuba electrolítica y señal de control respectivo para el caso C.

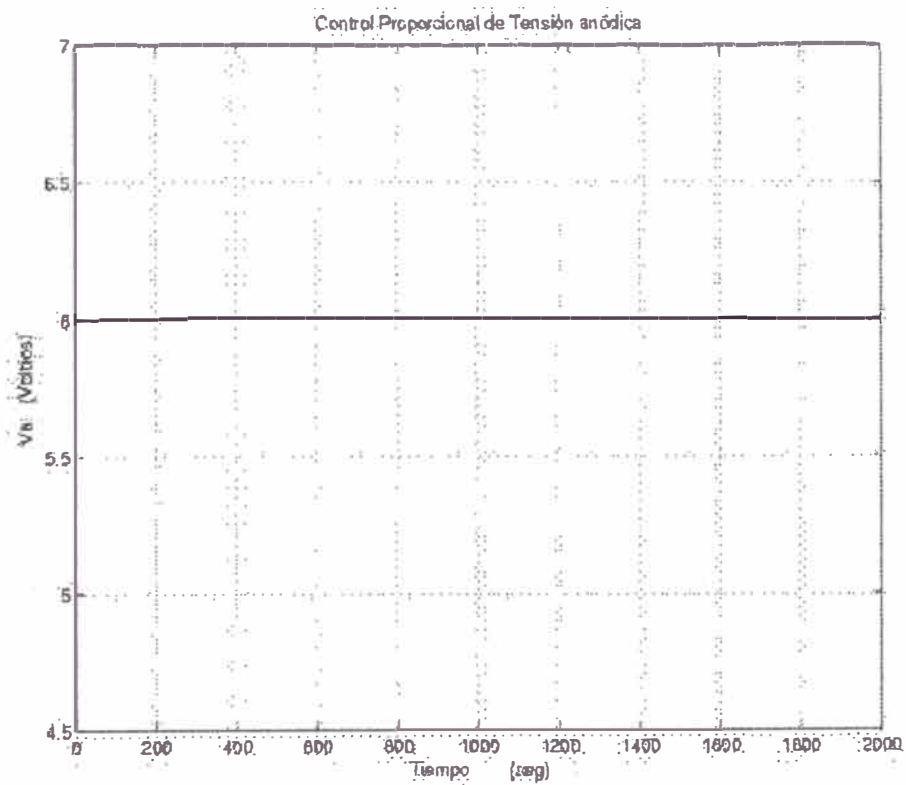


Figura 5.9: Tensión en los electrodos de la cuba electrolítica para el caso C.

De las graficas, observamos que el tiempo de respuesta del control de la temperatura para los tres casos es menor de 100 segundos, que están acorde con los datos establecidos por la Norma Técnica ASTM(+) B633-78 para los recubrimientos metálicos de cincado.

## **CAPITULO VI**

### **PROPUESTA DE IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE RECUBRIMIENTO METALICO DE CINCADO**

En este capítulo proponemos la implementación del sistema de automatización de los procesos de recubrimiento metálico de cincado utilizando la tecnología de instrumentación moderna, en la cual se plantea la estructura del control secuencial de las piezas a recubrir y el control de la temperatura en las celdas.

#### **6.1 Estructura del Sistema de Control Secuencial**

##### **6.1.1 Diagrama de bloques de implementación del sistema de control secuencial**

Para el diseño del sistema de control secuencial se propone utilizar la tarjeta Lab-PC+ de National Instrument, insertada en el slot de la PC. En la figura 6.1 se puede observar un diagrama de implementación de este sistema en los cuales el puerto digital PB de la tarjeta LAB-PC+ esta configurada como salida, donde la información digital de 8 bits ingresa a un buffer con optoacopladores permitiendo así un aislamiento entre la PC y la planta (motores paso a paso). Las salidas del buffer ingresan en códigos de cuatro bits independientes hacia unos drives para cada motor, los cuales permitirán el ingreso de la secuencia de códigos a cada motor paso a paso para el desplazamiento horizontal y vertical de las piezas a recubrir durante tiempos programados para cada celda.

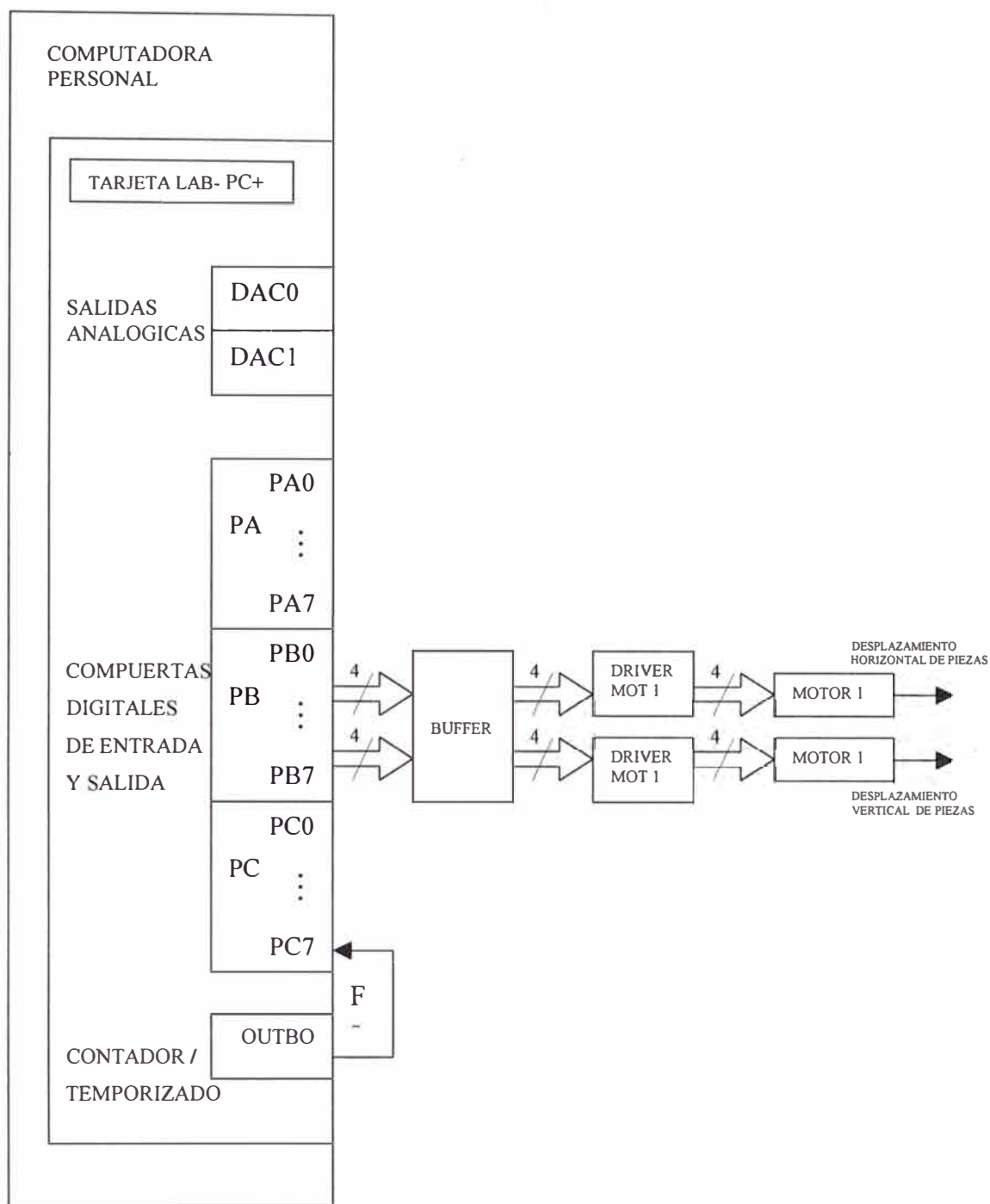


Figura 6.1: Diagrama de implementación del sistema de control secuencial

El diagrama de flujo del sistema de control secuencial se muestra en la figura 6.2.

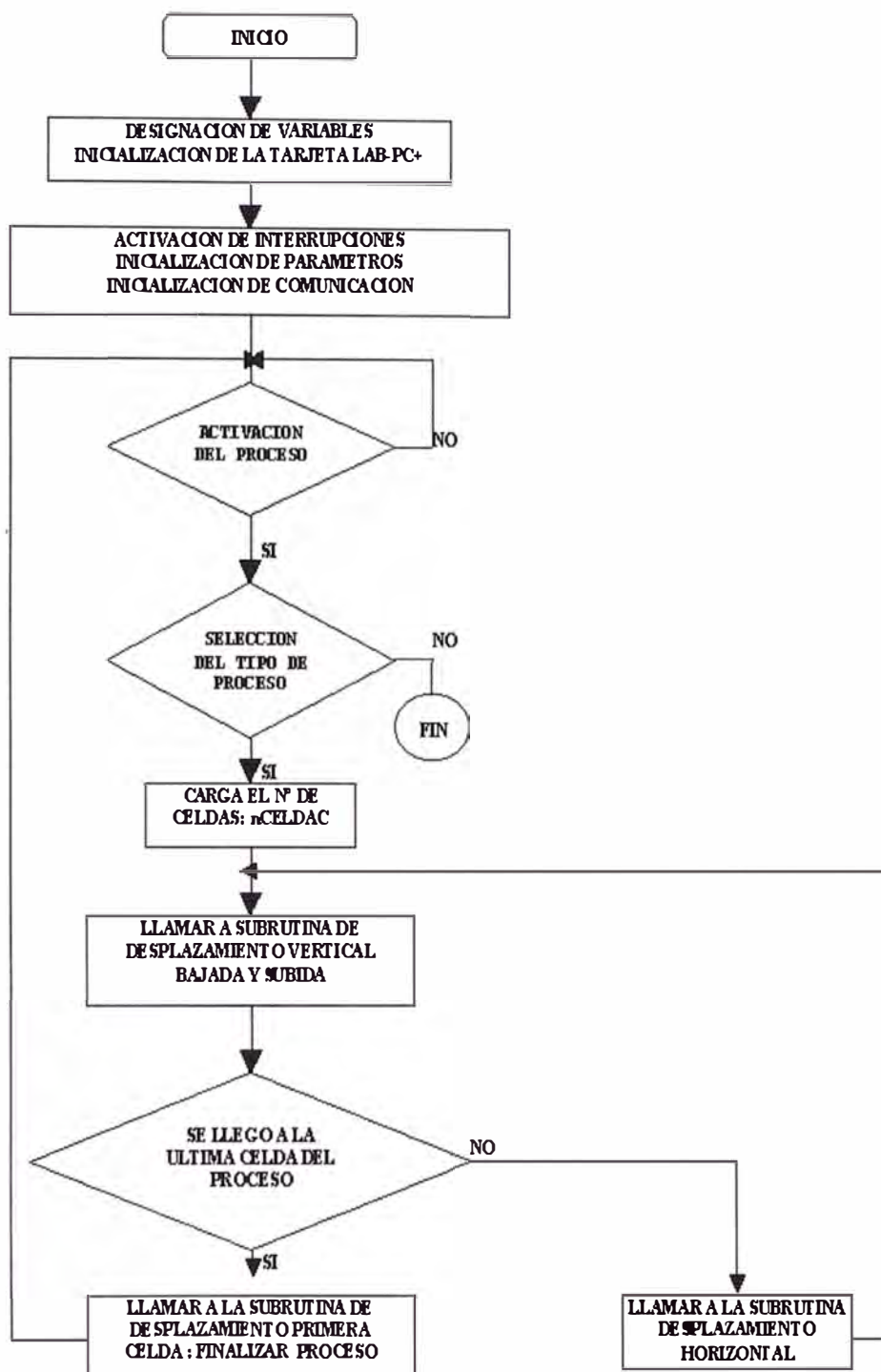


Figura 6.2: Diagrama de flujo del algoritmo de control del sistema secuencial

Asimismo el diagrama de flujo correspondiente tan solo al desplazamiento vertical (subida y bajada) de la pieza a recubrir se muestra en la figura 6.3.



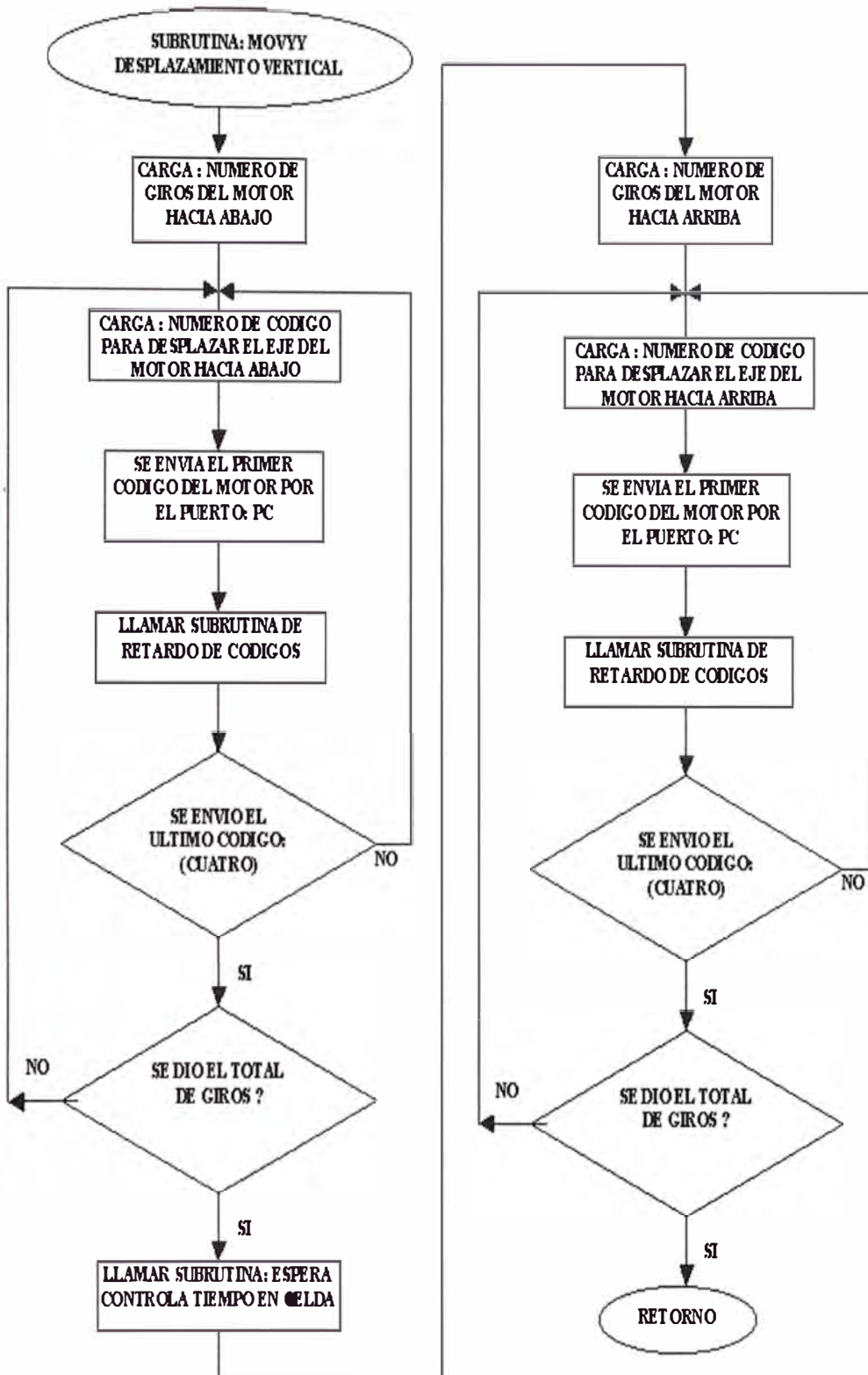


Figura 6.3: Subrutina de desplazamiento vertical subida y bajada de la pieza

## 6.1.2 Hardware del Sistema de Control Secuencial

El buffer usado está conformado por 4 CI's Optoaclopadores de codigo 4N35, cuyas características se presentan en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Características eléctricas del C.I. 4N35

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)						
INDIVIDUAL COMPONENT CHARACTERISTICS						
Parameter	Test Conditions	Symbol	Min	Typ*	Max	Unit
<b>EMITTER</b>						
Input Forward Voltage	( $I_F = 10\text{ mA}$ )	$V_F$		1.18	1.50	V
Reverse Leakage Current	( $V_R = 6.0\text{ V}$ )	$I_R$		0.001	10	$\mu\text{A}$
<b>DETECTOR</b>						
Collector-Emitter Breakdown Voltage	( $I_C = 1.0\text{ mA}$ , $I_F = 0$ )	$BV_{CE0}$	30	100		V
Collector-Base Breakdown Voltage	( $I_C = 100\ \mu\text{A}$ , $I_F = 0$ )	$BV_{CB0}$	70	120		V
Emitter-Collector Breakdown Voltage	( $I_E = 100\ \mu\text{A}$ , $I_F = 0$ )	$BV_{EC0}$	7	10		V
Collector-Emitter Dark Current	( $V_{CE} = 10\text{ V}$ , $I_F = 0$ )	$I_{CE0}$		1	50	nA
Collector-Base Dark Current	( $V_{CB} = 10\text{ V}$ )	$I_{CB0}$			20	nA
Capacitance	( $V_{CE} = 0\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$ )	$C_{CE}$		8		pF

Dicho chip se muestra en la figura 6.4

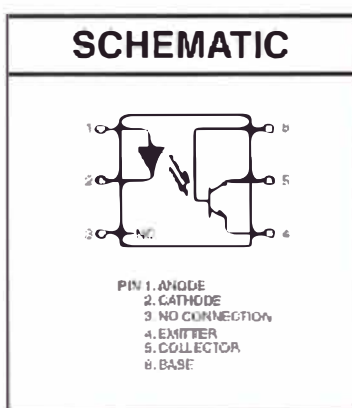


Figura 6.4: Diagrama de pines del CI. 4N35

Los driver utilizados son transistores darlington NPN de código NTE 2301 cuyas salidas se conectan a los terminales del motor paso a paso. Los motores paso a paso utilizados son del tipo monofasico de 6 hilos. El diagrama esquemático del buffer, los drivers y los motores paso a paso se muestran en la figura 6.5.

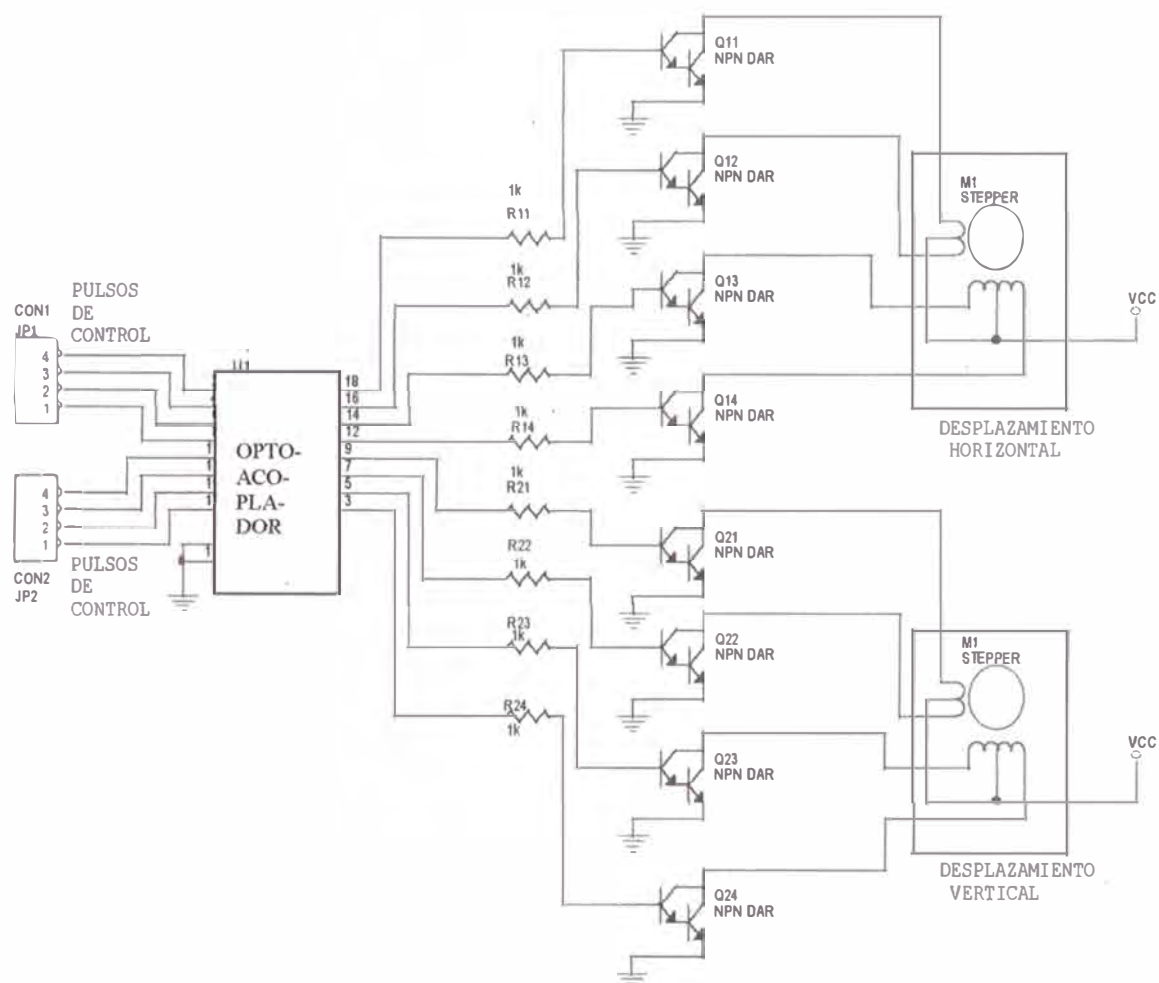


Figura 6.5: Interfaz para los dos motores paso a paso

Sobre los tipos de motores paso a paso y su funcionamiento se trató en el capítulo III.

## 6.2 Estructura del Sistema de Control Realimentado.

### 6.2.1. Diagrama de bloques de implementación del Sistema de Control Optimo Proporcional Integral de Temperatura.

En la figura 6.6 se muestra la implementación del sistema de control de temperatura usando para ello los siguientes puertos de la tarjeta LAB-PC +:

- Puerto digital PA de 8 bits configurado como entrada, que permite recibir la información de temperatura en código digital.

- viar la señal de control necesaria para conseguir la tensión en los terminales de la celda electrolítica de acuerdo a un banco de ganancias correspondientes a la densidad de corriente( $\text{Amp}/\text{dm}^2$ ).
- La salida analógica DAC1 que permite activar un relé de estado sólido que logre cerrar o abrir la válvula con cierto grado de apertura y con ello originar un caudal a través del serpentín, que va a enfriar el electrolito de la celda.
- El sensor de temperatura permite la obtención de un nivel de tensión correspondiente a un nivel de temperatura sensada en la celda electrolítica y que luego debe ser amplificada para posteriormente efectuarse la conversión analógica digital, de tal manera que esta información digital pueda ingresar al puerto PA de la tarjeta en referencia información que será tomada por el controlador óptico y luego de compararla con la temperatura deseada produce un error que a su vez generará una señal de control óptico digital. Esta señal de control digital ingresa al DAC1 con una longitud de palabra de 12 bits, obteniéndose en su salida una señal analógica, que es la que activa la válvula para el agua circulante y por consiguiente controlar la temperatura en la celda electrolítica al nivel de referencia.

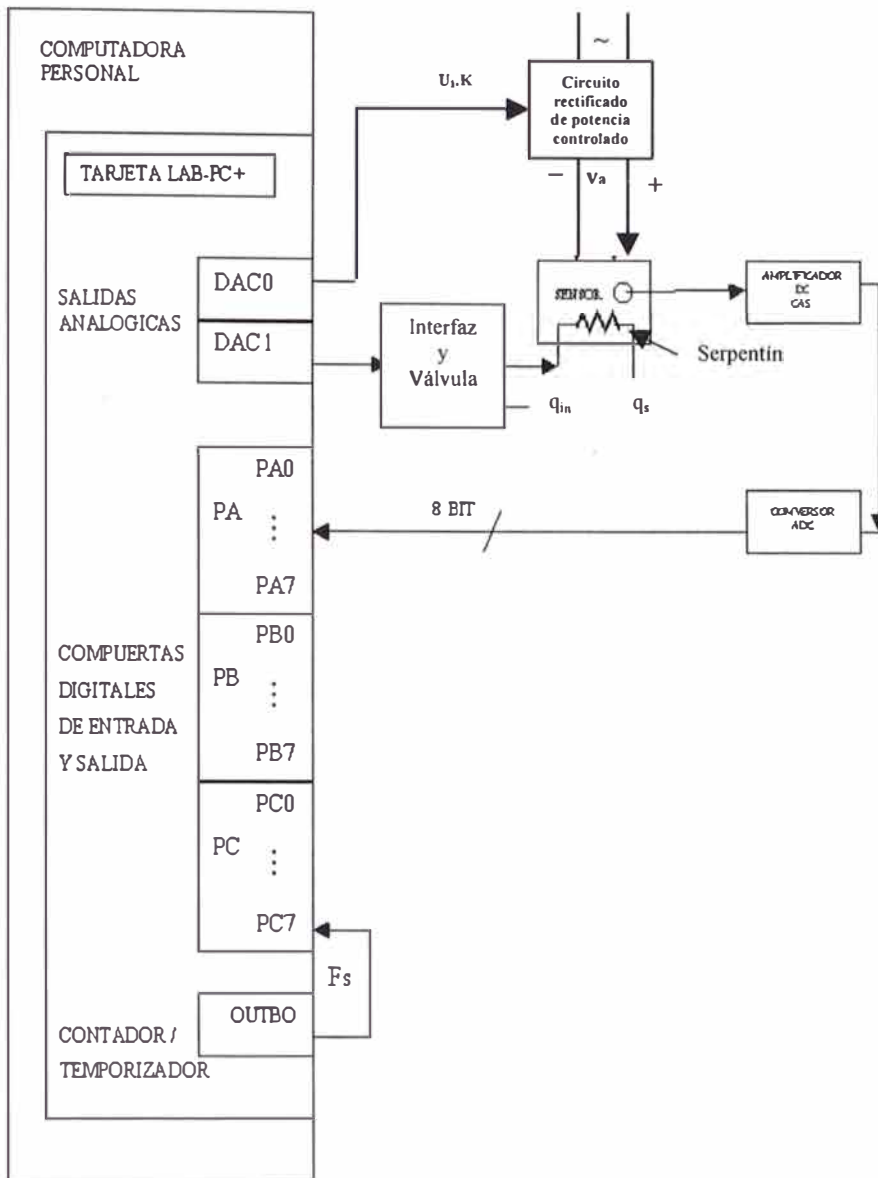


Figura 6.6: Diagrama de implementación del sistema de control de temperatura.

## 6.2.2 Hardware del Sistema de Control de Temperatura.

A continuación se presentan los esquemas de los componentes de hardware del sistema de control de temperatura, tales como el esquema del relé de estado sólido (ver figura 6.7), el amplificador de tensión (figura 6.9) y el convertidor digital/analógico (DAC) (figura 6.10).

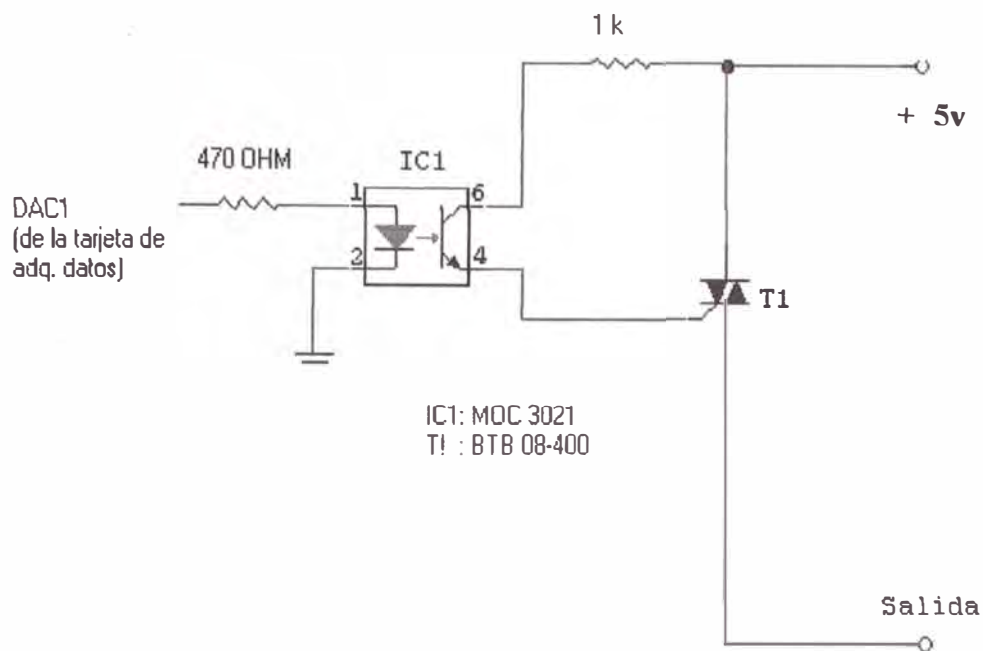


Figura 6.7a: Diagrama esquemático del relé de estado sólido.

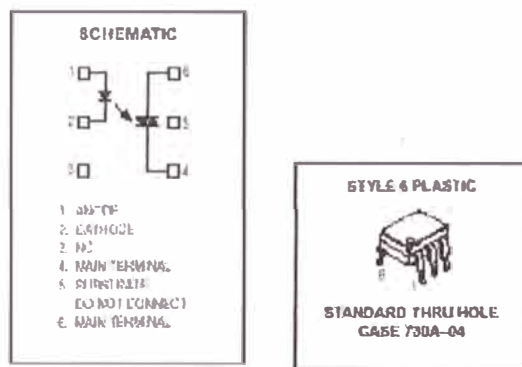


Figura 6.7b: Diagrama esquemático y de pines del C.I. MOC 3021.

El circuito amplificador de voltaje está conformado fundamentalmente por dos C.I. LM741, que recibe la señal proveniente de un sensor de temperatura de código LM335A. La señal de salida del circuito amplificador se aplica al convertidor D/A (ver figura 6.8).

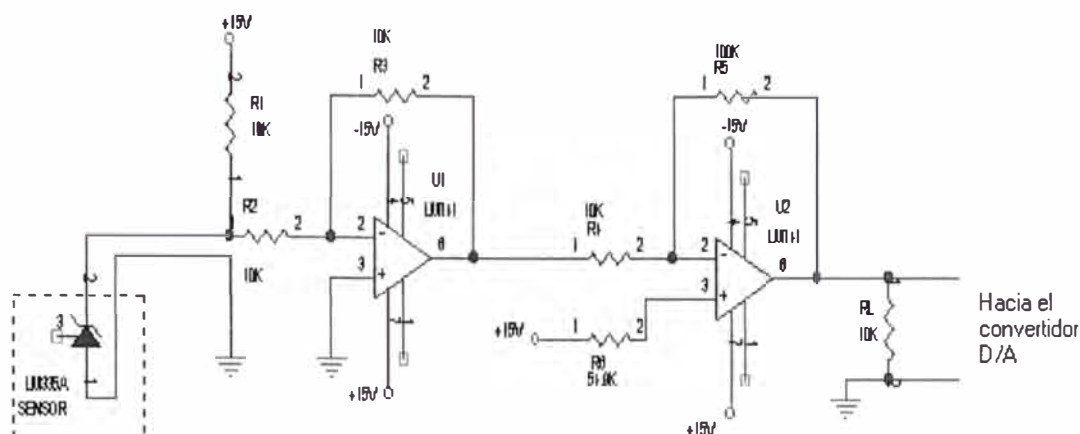


Figura 6.8: Amplificador de tensión, incluyendo el sensor.

El sensor de temperatura LM335 presenta las siguientes características:

- Sensibilidad en el punto  $V_s = 10\text{mV}/^\circ\text{kelvin}$ .
- Margen operativo de temperaturas: de  $0^\circ\text{C}$  a  $70^\circ\text{C}$ .
- Es lineal dentro del margen de temperaturas especificado.

El convertidor analógico digital usado es el ADC 0804 que convierte la señal analógica proveniente del amplificador de tensión (ver figura 6.8) a un código digital de 8 bits, los cuales ingresan al puerto PA de la tarjeta de adquisición de datos LAB-PC+, tal como se muestra en la figura 6.9.

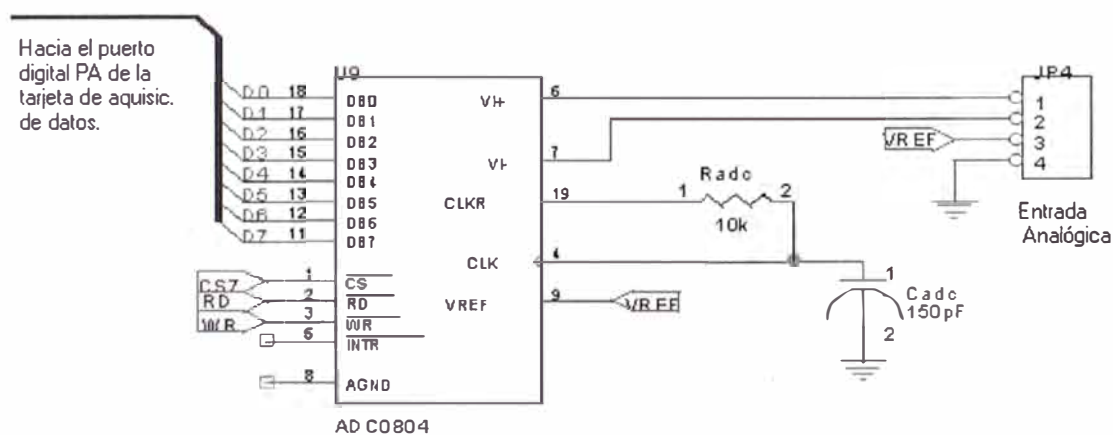


Figura 6.9: Circuito convertidor A/D.

### 6.3 Propuesta del diagrama de Automatización de los Procesos de Recubrimiento Metálico-Cincado.

El diagrama de bloques de los sistemas de control secuencial y realimentado se puede observar en la figura 6.10, en la cual se visualiza los puertos de la tarjeta LAB-PC+ a usarse, lo que significa que en una posible implementación se tendría que considerar la edición de un programa que incorpore los dos sistemas de control indicados. Por ejemplo dicho programa puede estar en código C.

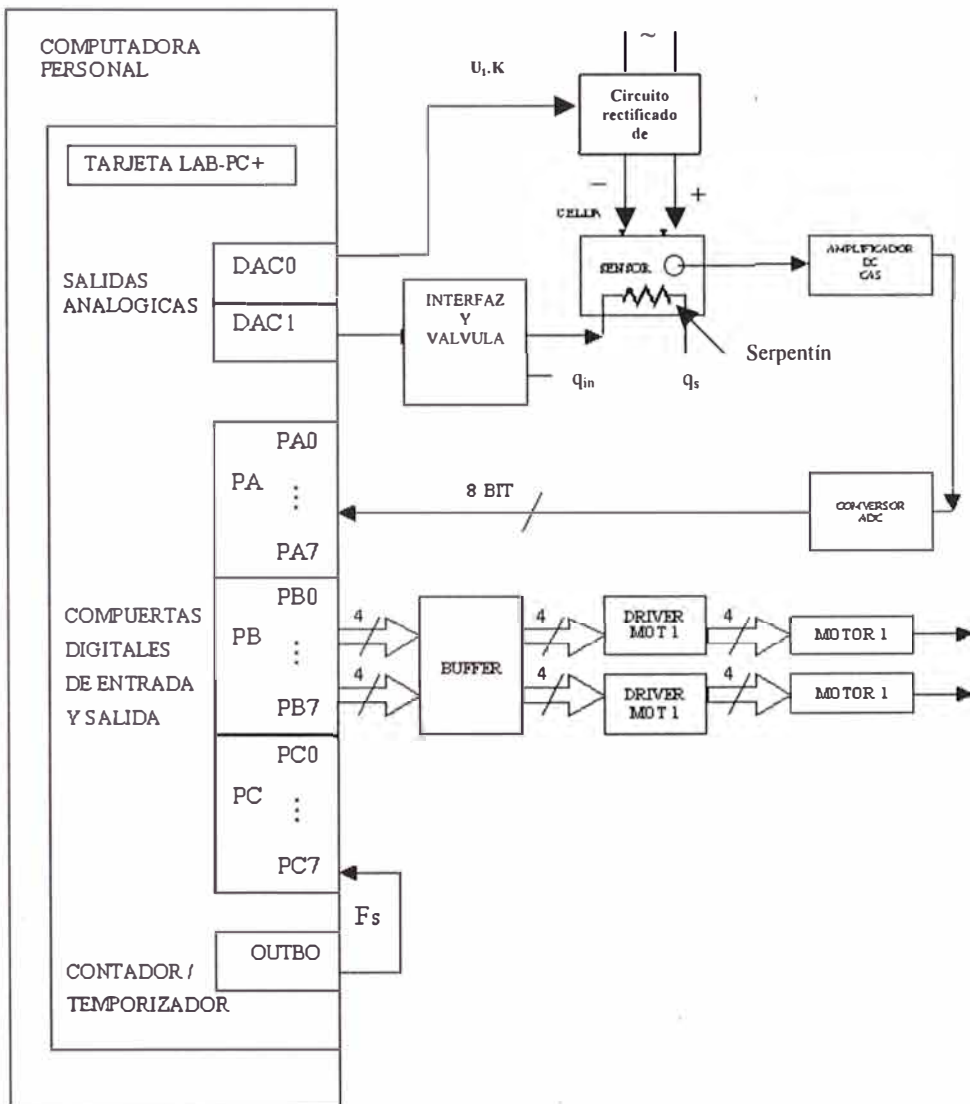


Figura 6. 10: Diagrama de implementación del sistema de Automatización-Cincado



A continuación, en la figura 6.11 se presenta el diagrama de flujo correspondiente al sistema de control de temperatura.

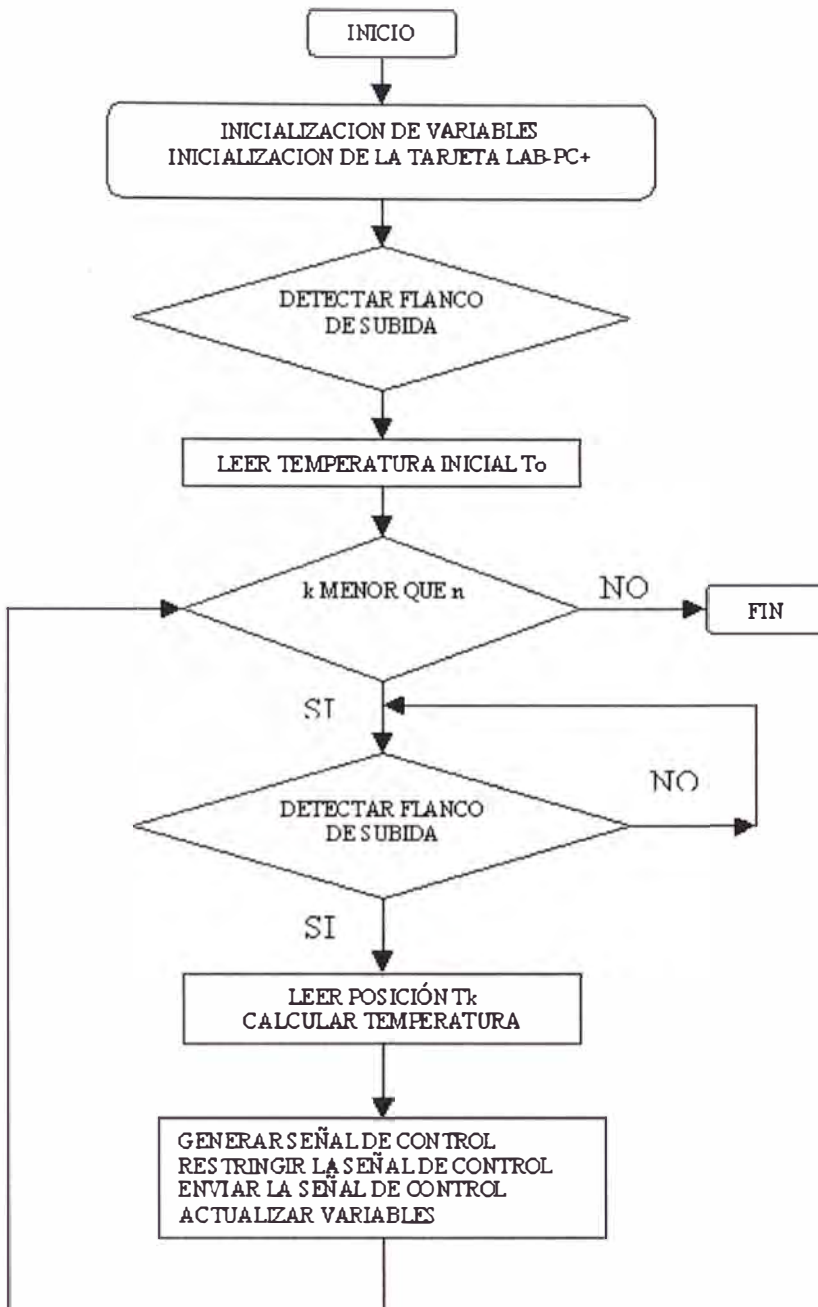


Figura 6.11: Diagrama de flujo del sistema de control de temperatura.

Considerando que es necesario presentar información básica sobre la estructura de la tarjeta LAB-PC+, se considera oportuno mostrar algunas de ellas. En

la figura 6.12 se presenta el diagrama de bloques de la tarjeta LAB-PC+, en la figura 6.13 se muestra el diagrama de bloques del circuito de salida analógico, en la figura 6.14 se muestra el diagrama de bloques del circuito digital de entrada/salida (I/O). Asimismo, en la tabla 6.2 se presenta los niveles de alimentación usadas en la tarjeta indicada.

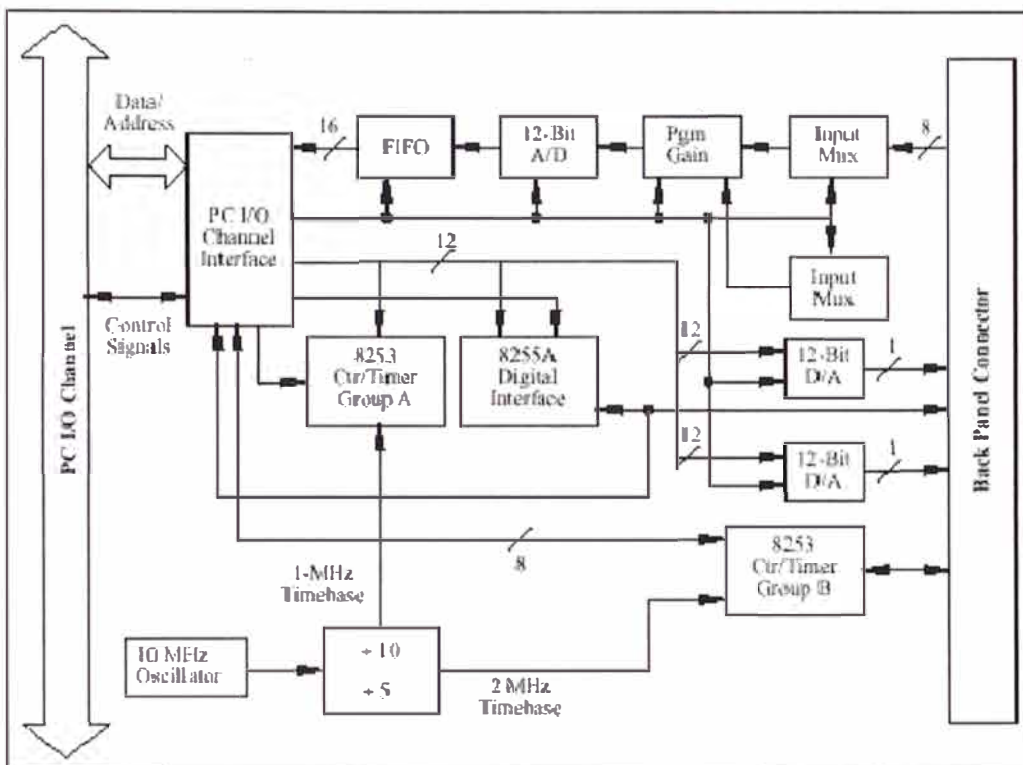


Figura 6.12: Diagrama de bloque de la tarjeta LAB-PC +

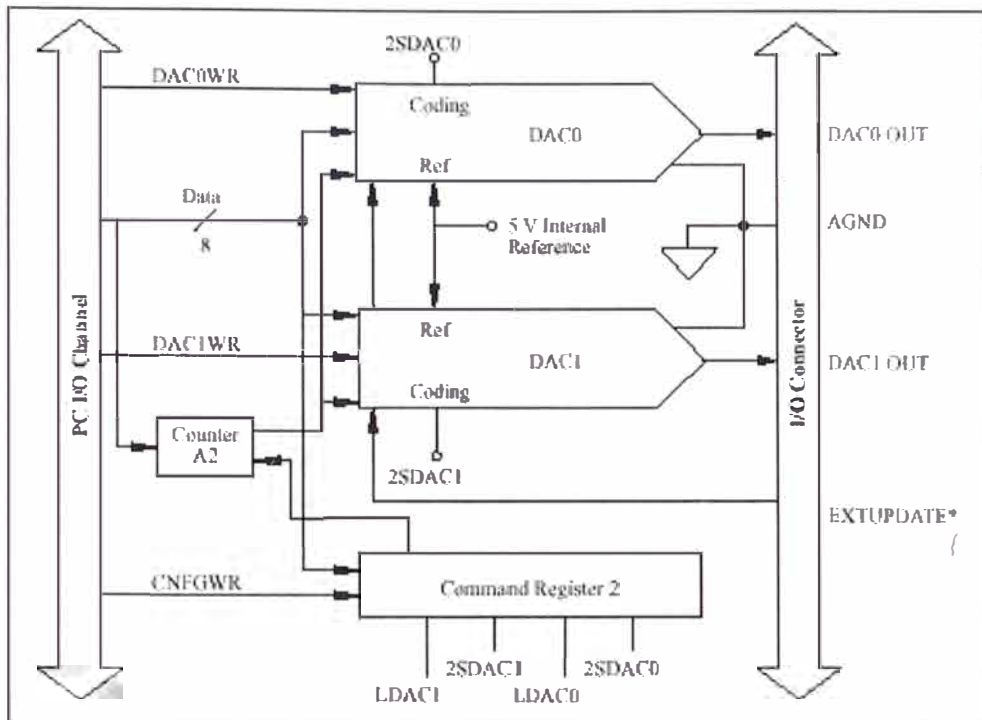


Figura 6.13: Diagrama de bloques del circuito de salida analógico.

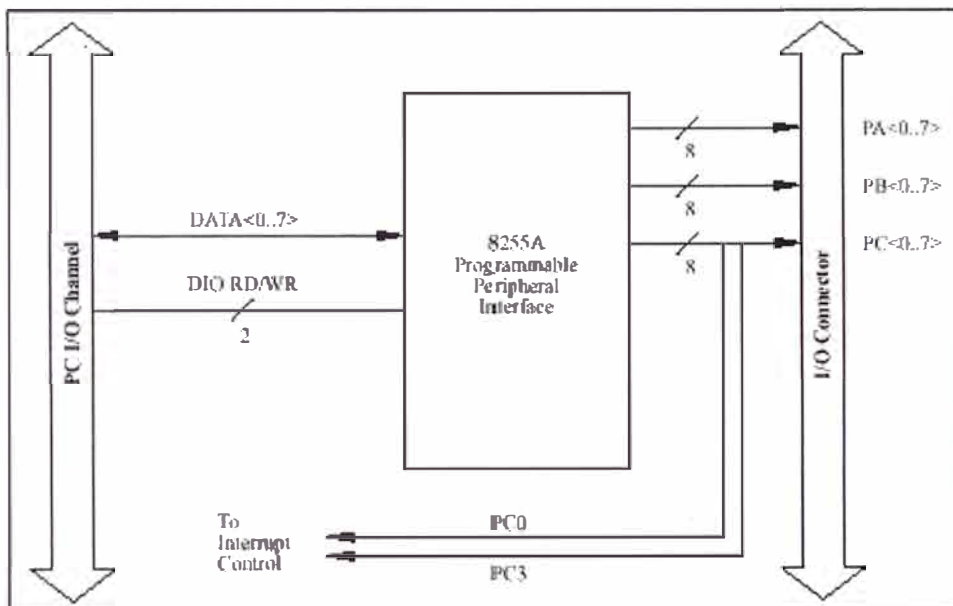


Figura 6.14: Diagrama de bloques del circuito digital de entrada / salida.

Tabla 6.2: Configuración de las entradas y salidas analógicas de la tarjeta en referencia.

Parameter	Configuration	Jumper Settings
Output CH0 Polarity	Bipolar: $\pm 5$ V (factory setting) Unipolar: 0 to 10 V	W1: A-B W1: B-C
Output CH1 Polarity	Bipolar: $\pm 5$ V (factory setting) Unipolar: 0 to 10 V	W2: A-B W2: B-C
Input Range	Bipolar: $\pm 5$ V (factory setting) Unipolar: 0 to 10 V	W3: A-B W3: B-C
Input Mode	Referenced single-ended (RSE) (factory setting) Nonreferenced single-ended (NRSE) Differential (DIFF)	W4: A-B W4: B-C W4: B-C

En la figura 6.15 se presenta la planta de automatización de cincado y su organigrama propuesto.

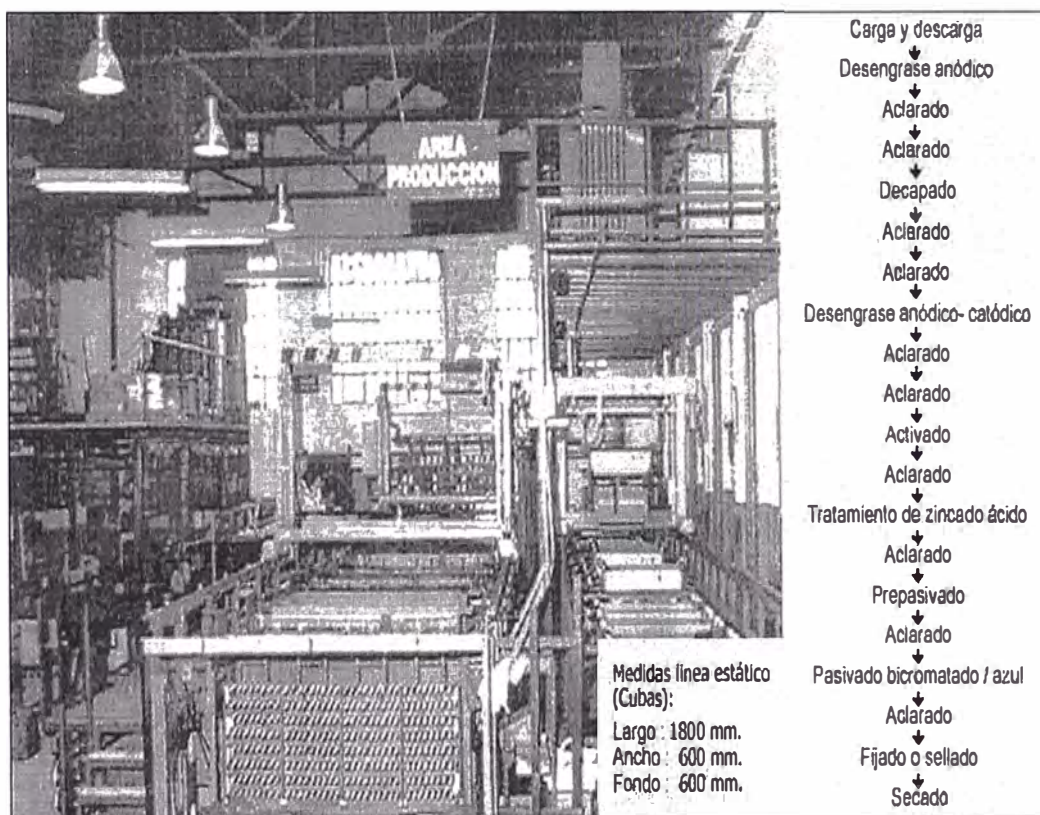


Figura 6.15: Vista y organigrama de la planta automática de cincado por bastidor.

En la figura 6.16 se muestra la planta de automatización de recubrimiento metálico de cincado por bastidores propuesto, que representaría de gran utilidad en nuestro medio, en la protección de las piezas a la corrosión y otras utilidades de uso.

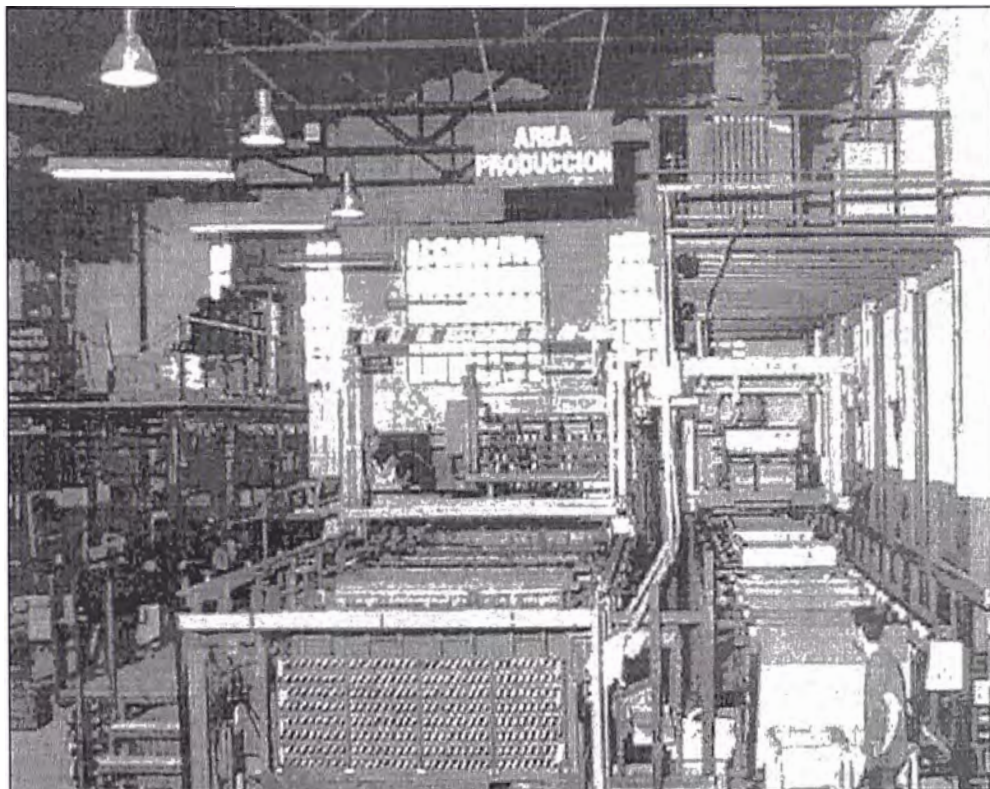


Figura 6.16: Planta de automatización de recubrimiento metálico de cincado por bastidores, y sus procesos.

## **CAPITULO VII**

# **EVALUACIÓN ECONOMICA DE LA PROPUESTA DE IMPLEMENTACION DE AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE RECUBRIMIENTO**

### **7.1 Bases para la Evaluación Económica**

Se deben tomar en cuentas las siguientes características para la implementación de una planta automatizada de recubrimiento metálico por cincado.

Capacidad de la planta:1300 TM/A

Periodo de evaluación:10 años (2002-2012)

Tasa impositiva(renta): 30%

Tasa de descuento:15%

Moneda utilizada: U.S.S. Dólares Constantes de 2003

Materias primas:

- Electrolito de cinc
- Agua de lavado de red
- Sosa para tratamiento
- Desengrasantes químicos(baño)
- Desapado(baño)

### **7.2 Estimación de Costos**

En este capítulo se tratará de estimar los costos de producción de la planta de cincado automatizado considerando las restricciones que implica que el escalamiento

ha sido realizado al nivel de la planta piloto bajo el supuesto que la tecnología probada y consolidada por muchas pruebas experimentales al nivel de laboratorio funcionara.

### **7.2.1 Costos de Materia Prima y Equipos necesarios para la instalación de una Planta Automatizada de Cincado**

a)	Materias Primas		
	Desengrase anódico	(600lt)	
	Cincado electrolítico	(200lt)	
	Pasivador amarillo	(300lt)	
	Pasivador azul	(300lt)	
			<b>Costo Estimado: \$ 2 500.00</b>
b)	Tanques		
	02 tanques	(300lt)	
	06 tanques con fibra de vidrio	(300lt)	
	01 tanque	(600lt)	
	01 tanque con sistema de enfriamiento	(2000lt)	
			<b>Costo Estimado: \$ 3 500.00</b>
c)	Sistema para pulido en disco		\$ 1 500.00
d)	Micrómetro y densímetro		\$ 650.00
e)	Centrífuga de 25 Kgr de capacidad		\$ 1 200.00
f)	Tambor de 6kg para recubrimiento a granel		\$ 560.00
	Usado para recubrimiento de objetos pequeños.		
g)	Ánodos(10) y Guías de corriente		\$ 2 300.00

h)	Rectificador de corriente 1000 Amp, 0-6V Sistema refrigerado en aceite dieléctrico	\$ 6 550.00
g)	Válvula y serpentín	\$ 180.00
	<b>SUB TOTAL</b>	<b>\$ 18 940.00</b>
	<b>IGV</b>	<b>\$ 3 409.20</b>
	<b>TOTAL PARCIAL</b>	<b>\$ 22 349.20</b>

### 7.2.2 Costos de los componentes electrónicos

a)	4 C.I. optoacopladores 4N35      4 x \$1.09 =	\$ 04.36
b)	1 C.I. optoacoplador MOC 3021	\$ 09.00
c)	8 transistores darlington NTE 2301   8 x \$5.69 =	\$ 45.52
d)	2 C.I. amplificador operacional LM 1741-OPAM	\$ 04.00
e)	1 C.I. sensor de temperatura LM 335A	\$ 05.00
f)	1 triac BTB 08-400	\$ 09.00
g)	1 resistencia de 470 $\Omega$	\$ 00.50
h)	9 resistencias de 1 k $\Omega$	\$ 04.50
i)	8 resistencias de 10 K $\Omega$	\$ 04.00
j)	1 resistencia de 50 K $\Omega$	\$ 00.50
k)	1 resistencia de 100 K $\Omega$	\$ 00.50
l)	1 condensador 150 pF	\$ 00.50
m)	1 rele de estado sólido	\$ 22.00
n)	2 motores bipolares de paso a paso	\$ 40.00
o)	1 convertidor ADC 0804	\$ 02.77



**SUB TOTAL** \$ 152.15

**IGV** \$ 27.39

**TOTAL PARCIAL** \$ 179.54

### **7.2.3 Tarjeta de Adquisición de datos**

1 tarjeta de adquisición de datos LAB-PC+  
de National Instruments \$ 1 000.00

### **7.2.4 Tarjetas en Circuito Impreso**

1 tarjeta buffer y drivers del sistema secuencial \$ 20.00

1 tarjeta para el relé de estado sólido \$ 10.00

1 tarjeta para el amplificador y ADC \$ 20.00

Computadora Pentium III \$ 700.00

**7.2.5 Diseño e Implementación** \$ 1 500.00

**7.2.6 Otros** \$ 1 000.00

**SUB TOTAL** \$ 4 250.00

**IGV** \$ 765.00

**TOTAL PARCIAL** \$ 5 015.00

Sumando los costos parciales, sale un total de:

**COSTO TOTAL** \$ 27 515.35

## OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Una vez concluida cada etapa del presente trabajo de acuerdo a los objetivos planteados en el desarrollo inicial de este estudio, se puede concluir lo siguiente:

- Se logra un sistema de control secuencial y control realimentado de temperatura de alto rendimiento a bajo costo, que puede ser empleado por la pequeña y mediana industria de procesos de recubrimiento metálico, para mejorar la calidad y productividad de los productos de cincado.
- Para la implementación en tiempo real, en el programa del control óptimo proporcional integral de temperatura, se debe considerar limitaciones en cuanto a la señal de control, debido a que, en los resultados de la simulación (ver figuras 5.4, 5.6 y 5.8) se puede apreciar que la señal de control alcanza un máximo de aproximadamente 0.47 bar. Puede observarse también, que no se presentan sobrepicos, lo que lo hace deseable frente a técnicas clásicas como el PI y el PID. Asimismo, el tiempo de asentamiento, en cualquiera de los casos, es de aproximadamente 100 segundos, tiempo menor al necesario, exigido para el proceso de recubrimiento de las piezas.
- Disponer de un sistema de control para su implementación en tiempo real.
- Con este sistema se logra el control de los posibles riesgos de contaminación de los trabajadores expuestos a los contaminantes de los vapores que emanan durante el proceso.

- Reducción del costo de hardware debido a que el controlador del sistema secuencial y realimentado está implementado en software en una PC pentium de alta velocidad
- Queda planteado para futuros trabajos la implementación de este sistema pero con control de efluentes de las aguas residuales, mediante un sistema de recuperación de materiales y así lograr bajar los índices de contaminación del agua residual.

Para futuros trabajos de diseño y su posible implementación, se recomienda investigar sobre la aplicación de estrategias de control Fuzzy, para comparar su resultado, y en caso de tener mejor rendimiento, poder optar por esta nueva técnica.

## **ANEXO A**

### **Programa de Simulación del Proceso en Lazo Abierto**

## Anexo A: Programa de Simulación del Proceso en Lazo Abierto (Usando el MATLAB)

```

% Celda.m %Programa de simulación en lazo abierto
clear all
% PARAMETROS DEL PROCESO
% V=3, 5, 6 voltios; A=100 dm^2;
% PARA LA SIMULACION ACTIVAR SOLO UNO DE LOS SIGUIENTES CASOS:
% SELECCIONANDO:

% CASO A)
A=100; e=6.50; t=480; V=3;

% CASO B)
A=100; e=6.09; t=300; V=5;

% CASO C)
A=100; e=9.75; t=480; V=6;

% n=2; nu=0.7; ro=7.15; roh=1; F=96500; M=65.4; cph=1; Tent=17;
KK=(3.0426374*V*A*e)/t;
% ECUACION DE ESTADO DEL PROCESO EN TIEMPO CONTINUO
% dTeta(t)/dt = Ac*Teta(t) + Bc*vc(t) + E*Teta_o

% MATRICES DE ESTADO EN TIEMPO CONTINUO
Ac = (-0.0021*2*1+0.0021*2*1)*(25-17)/KK+(0.0836*2*1)*(25-17)/KK-(0.8357*2)*(25-17)/KK;
Bc = -0.0021*2*1*(25-17)/KK+0.0836*(25-17)/KK;
Cc = 1; Dc = 0;

% CHEQUEAR CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD
rAB = rank(ctrb(Ac,Bc)); % rAB = 1 => COMPLETAMENTE CONTROLABLE
rAC = rank(observ(Ac,Cc)); % rAC = 1 => COMPLETAMENTE OBSERVABLE
% rank(M)=rank(N)=n=1 => COMPLETAMENTE CONTROLABLE Y OBSERVABLE

% CONVERSION A TIEMPO DISCRETO
T = 0.1;
[G,H,C,D] = c2dm(Ac,Bc,Cc,Dc,T,'zoh');

% SIMULACION
[yc,xc,t]=step(Ac,Bc,Cc,Dc);
[yd,xd]=dstep(G,H,C,D);
tt=linspace(0,size(yd,1)*T,size(yd,1));
subplot(211)
plot(t,yc); grid
title('Respuesta del proceso a un escalón unitario')
xlabel('tiempo en segundos')
ylabel('yc (salida continua)')
subplot(212)
plot(tt,yd); grid
xlabel('tiempo en segundos')
ylabel('yd (salida discreta)')

```

## **ANEXO B**

**Programa de Control Optimo Proporcional Integral  
de Temperatura y de Control Proporcional de  
Tensión en los Electrodo de la Cuba Electrolítica**

## Anexo B: Programa de Control Óptimo Integral de temperatura y Control Proporcional de Tensión entre Electrodo. (Usando el MATLAB)

```

% contop.m Programa de Control Optimo Proporcional Integral de
% temperatura y Control Proporcional de Tensión Anódica
% PARAMETROS DEL PROCESO
% V=3, 5, 6 voltios; A=100 dm^2;
% PARA LA SIMULACION ACTIVAR SOLO UNO DE LOS SIGUIENTES CASOS:
% SELECCIONANDO:

% CASO A)
A=100; e=6.50; t=480; V=3;

% CASO B)
% A=100; e=6.09; t=300; V=5;

% CASO C)
% A=100; e=9.75; t=480; V=6;

% n=2; nu=0.7; ro=7.15; roh=1; F=96500; M=65.4; cph=1; Tent=17;
KK=(3.0426374*V*A*e)/t;
% ECUACION DE ESTADO DEL PROCESO EN TIEMPO CONTINUO
% dTeta(t)/dt = A*Teta(t) + B*vc(t) + E*Teta_o

% MATRICES DE ESTADO EN TIEMPO CONTINUO
Ac = (-0.0021*2*1+0.0021*2*1)*(25-17)/KK+(0.0836*2*1)*(25-17)/KK-(0.8357*2)*(25-17)/KK;
Bc = -0.0021*2*1*(25-17)/KK+0.0836*(25-17)/KK;
Cc = 1; Dc = 0;

% CHEQUEAR CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD
rAB = rank(ctrb(Ac,Bc)); % rAB = 1 => COMPLETAMENTE CONTROLABLE
rAC = rank(observ(Ac,Cc)); % rAC = 1 => COMPLETAMENTE OBSERVABLE
% rank(M)=rank(N)=n=1 => COMPLETAMENTE CONTROLABLE Y OBSERVABLE

% CONVERSION A TIEMPO DISCRETO
T = 0.1;
[G,H,C,D] = c2dm(Ac,Bc,Cc,Dc,T,'zoh');
Gtilde = [G zeros(1,1)
-C*G eye(1,1)]; % DEBE SER DE ORDEN n+1=2
Htilde = [H
-C*H];

% PONDERACION
Q = [1000 0; 0 300]; % PONDERA EL VECTOR DE ESTADO x(k)

```

```

R = 10000; % PONDERA LA SEÑAL DE CONTROL u(k)

% CALCULO DE LA GANANCIA DEL CONTROLADOR OPTIMO
[Ktil,Ptil,E] = dlqr(Gtilde,Htilde,Q,R); % Ktil: GANANCIA OPTIMA
K = Ktil(1); KI = -Ktil(2);

% CONDICIONES INICIALES Y REFERENCIA
x = [0]; yi=0; v=0;
N = 20000;
r=25; % referencia de temperatura: 25 grados centígrados

% RESPUESTA A UNA REFERENCIA DE 25 GRADOS CENTIGRADOS
% Y CONTROL PROPORCIONAL DE LA TENSION ANODICA
for k=1:N
    v = v + r - yi;
    u(k) = -K*x + KI*v;
    x = G*x + H*u(k);
    y(k) = x; yi = y(k);

ua(k)=1.4; % Voltaje de control aplicado a la entrada del amplificador
% Va=A*ua(k); % Voltaje entre electrodos comprendido entre 3 a 6 voltios
% A1, A2, A3 : Banco de ganancias del amplificador

% CASO A)
% Si I=599.96 Amp para un espesor de: 6.50 micras
A1=2.1428; Va(k)=A1*ua(k); Va=Va(k); % ua(k) es la tensión de control proveniente del
controlador

% CASO B)
% Si I=1499.90 Amp para un espesor de: 6.09 micras
A2=3.5714; Va(k)=A2*ua(k); Va=Va(k);

% CASO C)
% Si I=1799.89 Amp para un espesor de: 9.75 micras
A3=4.2857; Va(k)=A3*ua(k); Va=Va(k);
end

% GRAFICOS
t = linspace(0,T*N,N);
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(t,y); grid on;
ylabel('T (°C)')
title('Control Óptimo Proporcional Integral de Temperatura')
subplot(2,1,2)
plot(t,u); ylabel('u (mbar)'); grid on;
xlabel('Tiempo (seg)')
%print -deps -f

figure(2)
plot(t,Va); grid on;
title('Control Proporcional de Tensión anódica')
ylabel('Va (Voltios)')
xlabel('Tiempo (seg)')

```



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Ogata, Katushito. Ingeniería de Control Moderna. Segunda Edición, Prentice Hall Hispanoamericana, 1993.
- [2] Ogata, Katushito. Designing Linear Control Systems with MATLAB. Prentice Hall Englewood Cliffs New Jersey, 1994.
- [3] Rojas-Moreno, Arturo. Control Avanzado{Diseño y Aplicaciones en Tiempo Real . Publicación Independiente, 2001.
- [4] Ogata, Katushito. Sistemas de Control en Tiempo Discreto. Segunda Edición, Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.
- [5] Umez-Eronini, Eronini. Dinámica de Sistemas y Control . International Thomson Editores, 2001.
- [6] Ogata, Katushito. Problemas de Ingeniería de Control utilizando Matlab. Prentice Hall Iberia, 1999.
- [7] N. Rao Sripada, D. Grant Fisher. "Improved Least Squares Identification," Int. J. Control, Vol. 46, no. 6 , 1889{1913 (Dic 1987).
- [8] Del Brío, Bonifacio Martín. Redes Neuronales y Sistemas Difusos. Segunda Edición, Alfaomega, Ra-Ma, 2002.

- [9] MathWorks, Inc. MATLAB Reference Guide. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1996.
- [10] Paredes Freddy. Tratamientos Electrolítico de Superficies. Mundoop S.A., Perú, 1999.
- [11] Ávila José, Galvanotecnia Técnicas y Procedimientos, Paris, TECHNIQUE & VULGARRISTATION (Gerona), 1980.
- [12] IHOBE, S.A., Libro Blanco para la Minimización de Residuos y Emisiones-Recubrimiento Electrolíticos, Vasco, EUSKC JAURLARIT, Gobierno Vasco, 2000.
- [13] Varea Mauricio, Tesis: Control de una válvula isoporcentual con microcontrolador8051, Universidad de San Juan.