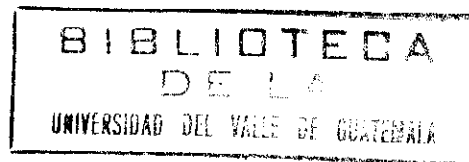


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE CONTROL PARA UNA
LÍNEA AUTOMÁTICA DE ELECTRODEPOSICIÓN DE
CROMO DECORATIVO



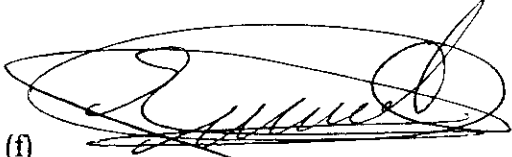
ANA PATRICIA STERKEL GLINZ

TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

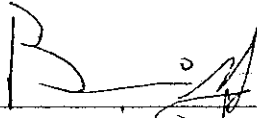
GUATEMALA

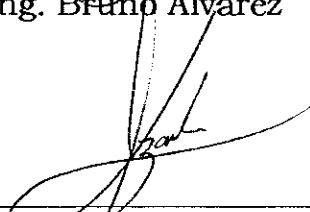
1988

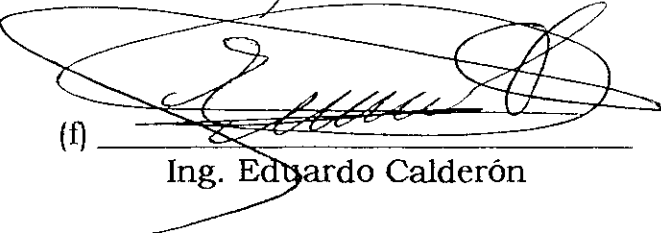
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Eduardo Calderón
Asesor

Tribunal:

(f) 
Ing. Bruno Alvarez

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano

(f) 
Ing. Eduardo Calderón

Fecha de aprobación: 1 de octubre de 1998

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	ANTECEDENTES.....	2
A.	FUNDAMENTOS DE LA ELECTRODEPOSICIÓN	2
1.	<i>Electroquímica</i>	2
2.	<i>Densidad de Corriente</i>	3
3.	<i>Eficiencia de Corriente</i>	4
4.	<i>Distribución de la Corriente</i>	4
5.	<i>Equipo de Electrodeposición</i>	5
B.	FUNDAMENTOS DEL CROMADO	7
1.	<i>Soluciones utilizadas en la electrodeposición de cromo</i>	8
2.	<i>Anodos</i>	11
C.	FUNDAMENTOS DEL NIQUELADO.....	12
1.	<i>Soluciones utilizadas en la electrodeposición de níquel</i>	12
2.	<i>Anodos</i>	15
D.	CALIDAD Y CONTROL DE CALIDAD	16
1.	<i>Especificaciones de los Recubrimientos Metálicos</i>	16
2.	<i>Propiedades de los Recubrimientos de Níquel Brillante</i>	17
III.	OBJETIVOS.....	19
A.	OBJETIVO GENERAL.....	19
B.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
IV.	JUSTIFICACIÓN.....	20
V.	PROBLEMA A RESOLVER.....	21
VI.	METODOLOGÍA	22
VII.	RESULTADOS.....	23
VIII.	DISCUSIÓN.....	24
IX.	CONCLUSIONES.....	29
X.	RECOMENDACIONES.....	30
XI.	BIBLIOGRAFÍA.....	31
XII.	ANEXOS	33
A.	CÁLCULO DEL AREA MÁXIMA	33
B.	CÁLCULO DE LA CAPACIDAD ADECUADA	33

Resumen

Se elaboró un manual de control de una línea automática de cromado decorativo, en el cual se detallan pruebas analíticas y mediciones, un sistema de control y mantenimiento, y una introducción a la administración y análisis estadístico de datos de control. El diseño del sistema de control se basó en la información recabada durante una revisión extensa de la línea automática en la cual se identificaron problemas y restricciones en el proceso. Se determinó un nivel de calidad correspondiente a la capacidad del proceso y una capacidad máxima con la cual se obtiene tal nivel de calidad. Además, se encontró la necesidad de cambiar el sistema de control de temperatura actual por uno automático. Finalmente, se reflexionó sobre la utilidad y función del manual de control.

I. INTRODUCCIÓN

A través de los últimos años, el control de procesos ha cobrado mucha importancia dentro de las disciplinas de la ingeniería química. Esto se debe a que el control de procesos está íntimamente relacionado con la calidad y el control de calidad de cualquier producto de cualquier industria. La calidad, a su vez, está muy de moda. El fenómeno de la globalización de los mercados que las industrias enfrentan hoy en día, exige que éstas saquen productos de mayor calidad, lo cual implica la necesaria implementación de rigurosos sistemas de control a los procesos. Por esta razón, se han desarrollado varios métodos y filosofías con las cuales grandes empresas puedan asegurar el control y la calidad de sus productos.

En Guatemala, pocas industrias han logrado implementar programas de control tan ambiciosos, probablemente porque no es posible aplicarlos en su totalidad a la realidad guatemalteca, y probablemente también porque resultan más caros de lo que el mercado local puede pagar. Los programas de calidad total generalmente requieren de un control automatizado para poder llegar a niveles de calidad altos. Sin embargo, en Guatemala todavía prevalece el control manual.

Este trabajo se refiere al desarrollo de un sistema de control para el proceso de cromado decorativo. La calidad de un recubrimiento de cromo depende únicamente de la efectividad del sistema de control del proceso de cromado. Esta es la importancia de tener un control efectivo en este tipo de procesos.

Además de los métodos convencionales de control que se usan normalmente en un proceso de electrodeposición, existen muchas herramientas de otras disciplinas que pueden ser utilizadas para este fin. Así, en el desarrollo del sistema de control se deberán tomar en cuenta todos los métodos disponibles. Un sistema de control que funcione eficientemente debe diseñarse con base en los requerimientos específicos del proceso. Por esta razón, el sistema de control de un proceso de electrodeposición manual es muy diferente a un sistema de control de un proceso que ocurre en una máquina cromadora. Aunque estas distintas configuraciones comparten ciertas mismas exigencias de control, el sistema a diseñar para cada una será diferente. El sistema de control debe ajustarse de acuerdo a las propiedades únicas que presenta el proceso, por ejemplo la capacidad.

El proceso a evaluar es el de cromado de un tipo de pieza, más específicamente, el aro de una bicicleta, en una máquina automática de gran capacidad. Se ha escogido este tipo de proceso debido a que su elevada capacidad hace muy necesaria la aplicación de un sistema de control riguroso.

II. ANTECEDENTES

A. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRODEPOSICIÓN

La electrodeposición es el proceso de recubrir un metal u otra superficie conductora con una capa metálica utilizando una corriente eléctrica. El objeto a recubrirse pasa por un proceso de limpieza y luego se sumerge en una solución que contiene al metal que servirá de recubrimiento. El metal existe en solución en forma de iones positivos. El objeto a metalizar se conecta a un cátodo o polo negativo de una fuente de electricidad. El ánodo o polo positivo se conecta a otro conductor que también se encuentra sumergido en la solución. La corriente eléctrica actúa sobre los iones en solución, que son atraídos al cátodo (el objeto) y se depositan en forma de una delgada capa metálica sobre el mismo. Si el metal en solución y el metal que actúa como ánodo son el mismo, la electricidad podrá disolver iones del ánodo para reponer los iones metálicos que ha perdido la solución.

El grosor de la capa metálica depositada sobre el objeto depende de la fuerza de la corriente eléctrica, de la concentración de los iones metálicos en solución y del tiempo en que el objeto se encuentra sumergido dentro de la solución.

1. ELECTROQUÍMICA

En 1833, Michael Faraday estableció las leyes de la electrólisis:

- la magnitud del cambio químico producido por una corriente eléctrica es proporcional a la cantidad de electricidad utilizada
- las cantidades de diferentes sustancias liberadas por una cantidad dada de electricidad son proporcionales a sus pesos equivalentes electroquímicos

El peso equivalente electroquímico de un elemento, es igual a su peso atómico dividido por el cambio de valencia implícito en la reacción. Por ejemplo, en el niquelado electroliza una solución que contiene iones de níquel y se deposita níquel metálico sobre el cátodo. Ocurre la siguiente reacción:



El cambio de valencia es de 2. El peso equivalente electroquímico del níquel es, por lo tanto, igual a la mitad de su peso atómico: 58.70 dividido entre 2, o 29.35. Para una cantidad dada de electricidad, la cantidad de níquel que se deposita sobre el cátodo será proporcional a 29.35 g.

La cantidad de electricidad necesaria para depositar 1 gramo equivalente de un elemento cualquiera se conoce como un faraday, F, y es igual a 96 483 coulombs. Generalmente se utiliza la magnitud aproximada de 96 500 C. Nótese que el faraday también puede definirse como la cantidad de carga equivalente a un mol de electrones. La ley de Faraday establece la relación que existe entre la cantidad en peso de recubrimiento metálico w_F , la corriente eléctrica I, y el tiempo de depósito t:

$$w_F = \frac{I \cdot \text{peq} \cdot t}{F} = \frac{I \cdot \text{peq} \cdot t}{96500 \cdot C} \quad (2)$$

peq es el peso equivalente del metal depositado.

Si se conoce el voltaje V aplicado a la electrólisis, puede calcularse la energía consumida en la reacción, mediante la definición de un joule, J:

$$J \equiv V \cdot A \cdot s \quad (3)$$

donde A es el amperaje y s el tiempo en segundos (12).

2. DENSIDAD DE CORRIENTE

Es posible calcular la cantidad en peso de metal que se deposita sobre el cátodo mediante la ley de Faraday. Sin embargo, en los procesos de electrodeposición no es tan importante la cantidad de metal que se deposita como el grosor y la distribución del grosor de la capa metálica sobre el objeto a recubrir. El grosor promedio depende tanto de la cantidad de metal depositado como del área disponible para el depósito. La distribución depende de qué tan homogéneamente se deposita el metal sobre el cátodo. La densidad de corriente se define como la intensidad de la corriente I por unidad de área A:

$$\text{densidad de corriente} = \frac{I}{A} \quad (4)$$

La densidad de corriente se expresa generalmente en amperios por metro cuadrado, A/m², amperios por decímetro cuadrado, A/dm² o amperios por pie cuadrado, A/ft². En la mayoría de los casos, es muy difícil

determinar el área exacta del objeto a recubrir. Por lo tanto, se usa un área aproximada o aparente, calculada con base en la geometría del objeto.

La densidad de corriente es una variable de mucha importancia en los procesos de electrodeposición, ya que influye sobre las propiedades del depósito, la distribución del grosor y la eficiencia de la corriente. La densidad de corriente existente en el ánodo también se estudia (12).

3. EFICIENCIA DE CORRIENTE

En casi todos los procesos de electrodeposición, ocurren reacciones secundarias en el cátodo o en el ánodo que no son importantes para el proceso, pero consumen energía. Un ejemplo es la formación de hidrógeno gaseoso en el cátodo durante el niquelado. La evolución de hidrógeno representa un gasto de energía y una disminución en la eficiencia del proceso. Por esta razón, se define la eficiencia de corriente como el porcentaje de corriente que se utiliza para la reacción electroquímica que interesa en un proceso de electrodeposición, o

$$\eta = \frac{w}{w_F} \cdot 100 \quad (5)$$

donde η es la eficiencia de corriente, w es la cantidad en peso del metal depositado y w_F es la cantidad en peso del metal que se depositaría según la ley de Faraday considerando que no hay reacciones secundarias.

La eficiencia del cátodo es la eficiencia de corriente de la reacción que ocurre en el cátodo. La eficiencia del ánodo es la eficiencia de corriente de la reacción que ocurre en el ánodo (12).

4. DISTRIBUCIÓN DE LA CORRIENTE

La densidad de corriente es una magnitud promedio, debido a que la corriente no es uniforme sobre la superficie del cátodo, excepto en casos especiales. La corriente siempre es más alta en los extremos y en las orillas de un objeto, y tiende a fluir más en las partes del objeto que están más cercanas al electrodo contrario. Esto significa que el grosor del depósito, que depende de la densidad de corriente, no es uniforme sobre la superficie.

Algunas soluciones tienen la propiedad de hacer que la distribución del metal sobre el cátodo sea más homogénea. Se dice que estas soluciones

tienen un buen poder de penetración¹ (12).

5. EQUIPO DE ELECTRODEPOSICIÓN

a) TANQUES

La función primordial de un tanque de electrodeposición es la de contener la solución de electrodeposición sin que se fugue o contamine la misma en un cierto período de tiempo. La selección del material del tanque dependerá de la naturaleza de la solución a utilizar y de la temperatura de operación. El tamaño, forma y construcción del tanque depende del tipo de uso que se le dará. Por ejemplo, en una línea automática de electrodeposición, los tanques tienden a ser más pequeños, debido a que se diseñan para contener objetos cuya forma no varía. En líneas manuales, los tanques se diseñan con un volumen que permita cierta flexibilidad para aceptar piezas de muy variados tamaños. El material del tanque debe ser químicamente resistente a la solución de electrodeposición, a menos que se cubra con un forro, en cuyo caso el forro debe cumplir con éste requerimiento. Lo importante es que el líquido contenido no se contamine. Los materiales más populares para los tanques de electrodeposición son: plásticos, fibra de vidrio, cerámica, concreto y acero.

Un forro es necesario para evitar la contaminación de la solución por el material del tanque. Además, protege el tanque mismo de corrosión y actúa como aislante, reforzando así la productividad de la corriente eléctrica (5).

b) EQUIPO DE CALENTAMIENTO

En la mayoría de procesos de electrodeposición es necesario calentar el baño. Los tipos de intercambiador de calor utilizados para este fin se clasifican en los que se sumergen dentro de la solución y los que son externos. Entre los sumergibles es común el uso de serpentines y resistencias eléctricas. Menos utilizados son los intercambiadores tipo plancha y los quemadores de gas sumergibles. Los intercambiadores de

¹ El poder de penetración ("throwing power" en inglés) es una propiedad del electrolito que asegura la uniformidad en el espesor del depósito sobre toda la superficie de la pieza a tratar, incluyendo los huecos. Este término no debe confundirse con el poder de recubrimiento ("covering power" en inglés) que, es "la capacidad del electrolito para depositar un metal, en condiciones de trabajo dadas, sobre toda la superficie de un cátodo que inicialmente no está recubierto" (13).

calor externos pueden ser de concha y tubo, de tubos concéntricos, etc. Para obtener una descripción más detallada de los intercambiadores utilizados en los procesos de electrodeposición, véase la referencia (19). Según Pinkerton (1984), cuando el área de transferencia de calor requerida por el proceso es de aproximadamente 20 a 50 pies cuadrados, es preferible el uso de un intercambiador sumergido. La capacidad de este tipo de intercambiador se ve limitada por cuestiones de espacio y también por el hecho de que un intercambiador externo puede tener una eficiencia mucho mayor de intercambio de calor.

El medio de calentamiento generalmente se escoge de acuerdo a consideraciones y costos locales. Los medios más comunes son: vapor, agua caliente, electricidad y gas. Los materiales de construcción dependen del tipo de solución a calentar (19).

c) *INSTALACIONES DE OPERACIÓN MANUAL*

Los procesos manuales de electrodeposición son los más flexibles. Debido a que los tiempos de depósito están bajo el control del operador en una instalación manual, ésta se utiliza mucho para niveles de producción bajos o moderados, y para aplicaciones en las cuales las condiciones varían mucho, como en los casos en los que se requieren distintos tratamientos previos a la electrodeposición, distintos grosores del recubrimiento o distintos tipos de recubrimiento; o como en los casos en que las piezas son de distintos tamaños y formas (9).

d) *INSTALACIONES DE OPERACIÓN AUTOMÁTICA*

En los procesos de electrodeposición, las máquinas automáticas se usan para transportar las piezas mecánicamente a través del ciclo de tratamiento. La automatización del proceso presenta varias ventajas frente a la operación manual. Por esta razón, las máquinas se usan muy a menudo para niveles de producción altos y bajos, cuando los ahorros en la mano de obra justifican la fuerte inversión necesaria (14).

(1) TIPOS DE MÁQUINAS

Moll (1984) hace la siguiente clasificación de las diferentes máquinas cromadoras:

- *Máquinas de línea recta.* Generalmente se usan como máquinas de trabajo pesado, aunque también pueden usarse para trabajos livianos.
- *Máquinas de retorno.* Se usan para todo tipo de aplicaciones, tanto de cargas grandes y pesadas como de cargas pequeñas y livianas. Pueden

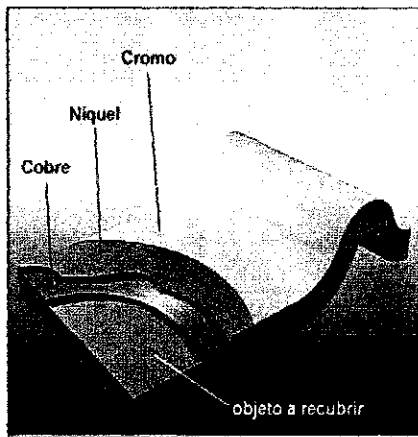
diferenciarse con las de trabajo pesado, mediano o liviano. En este tipo de máquinas, los tratamientos pre- y post-deposición se realizan dentro de la misma máquina de una forma automatizada.

- **Máquinas semi-automáticas.** Las máquinas semi-automáticas consisten de un mecanismo montado sobre una línea de tanques (14).

B. FUNDAMENTOS DEL CROMADO

La función primordial de un recubrimiento de cromo es brindar protección y características decorativas a un metal u otro material más barato. El cromo es un metal apropiado para aplicaciones decorativas, ya que es muy resistente a la corrosión, a los rayones y al uso prolongado. Por lo tanto, su superficie permanece con alto poder de reflexión y mucho brillo por grandes períodos de tiempo.

La electrodeposición de cromo se lleva a cabo casi exclusivamente sobre objetos previamente recubiertos de níquel. Se usa particularmente níquel debido a que este metal protege contra la corrosión del objeto, y la capa de cromo, a su vez, evita la oxidación de la capa de níquel. Además, los recubrimientos de cromo tienen una apariencia más blanca cuando se depositan sobre una capa de níquel. Una práctica común en el cromado es el recubrimiento previo de la pieza con una o varias capas de cobre y/o níquel.



El proceso se escoge de acuerdo a la aplicación y el nivel de calidad requerido. Los recubrimientos de cromo decorativo no exceden por lo general las 20 millonésimas de pulgada. Las capas muy gruesas tienden a ser más opacas y tienen rajaduras visibles (6).

Figura No.1. Cromado con recubrimiento previo de cobre y níquel.

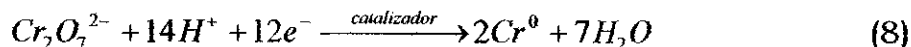
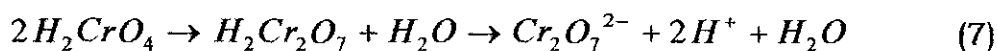
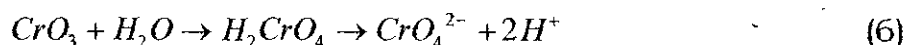
1. SOLUCIONES UTILIZADAS EN LA ELECTRODEPOSICIÓN DE CROMO

a) ACIDO CRÓMICO

Generalmente, los baños comerciales de cromado consisten en soluciones acuosas de trióxido de cromo (anhídrido crómico), CrO_3 , que se conocen comúnmente como soluciones de ácido crómico. Para que ocurra el depósito de cromo sobre el cátodo, debe añadirse un catalizador a la solución de ácido crómico. Por lo tanto, las soluciones comerciales para el cromado generalmente contienen ácido crómico y otro químico que sirve como catalizador. No se usan aditivos orgánicos debido a que el medio de la solución es altamente oxidante y destruye la mayoría de los compuestos orgánicos, especialmente durante la electrólisis. Por esta razón, la única forma de cambiar las propiedades del recubrimiento de cromo es por medio de la variación en el tipo y concentración del catalizador utilizado, mediante el uso de más de un catalizador y mediante la variación en las condiciones de operación (corriente eléctrica y temperatura). Es muy difícil hacer variar el pH de la solución, ya que ésta es fuertemente ácida.

Existen diferentes especies de iones de cromo dentro de la solución. Además de estar en forma de aniones $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, el cromo también se reduce a diferentes estados de valencia, y forma fácilmente compuestos complejos en su estado trivalente. Se han desarrollado muchas teorías que explican el mecanismo del depósito de cromo sobre el cátodo, pero ninguna es, de acuerdo con Dennis y Such (1993), completamente satisfactoria hasta el momento.

Según Snyder (1990), las reacciones que ocurren en el cátodo se asemejan a las siguientes:



La reacción (8) tiene una eficiencia de 20% o menos. Ocurren otras reacciones secundarias. En el cátodo se forma gas hidrógeno, reacción que consume el 80% o más de la energía disponible:



En los ánodos de plomo se produce de nuevo el anhídrido crómico:



el proceso de cromado tiene una eficiencia muy baja en el cátodo, y ésta aumenta al incrementarse la densidad de corriente. Por lo tanto, la baja eficiencia permite que se pueda cromar una pieza a un tiempo corto utilizando una densidad de corriente alta.

En el cromado decorativo se usan generalmente densidades de corriente de 11 a 17 A/dm² (6).

(c) *VOLTAJE*

La conductividad de la solución alcanza su máximo valor a concentraciones de 400 a 500 g/l. El intervalo de voltaje que se usa generalmente es de 4 a 10 voltios. El voltaje depende de la densidad de corriente que se quiere alcanzar, de la distancia entre los electrodos y del área total que se quiere recubrir (6).

b) *BAÑOS DE CROMO TRIVALENTE*

Debido a que las soluciones de ácido crómico presentan serios problemas de salud y contaminación ambiental, se han desarrollado baños de cromo trivalente menos peligrosos. Existen muchas patentes, pero no muchos de los procesos desarrollados han podido ponerse en práctica exitosamente a un nivel comercial.

Uno de los baños de cromo trivalente más populares es el que se basa en una solución de sulfato de cromo. Sus ingredientes típicos se muestran en la Tabla No.1.

TABLA NO.1
COMPOSICIÓN Y CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN BAÑO DE CROMO TRIVALENTE
DE SULFATOS (6)

Sulfato de cromo, Cr ₂ (SO ₄) ₃	20 g/l
Sulfato de potasio, K ₂ SO ₄	150 g/l
Sulfato de sodio, Na ₂ SO ₄	100 g/l
Acido bórico, H ₃ BO ₃	60 g/l
Acido málico, C ₄ H ₅ O ₅	10 g/l
Tiourea, (NH ₂) ₂ CS	0.1 g/l
Ph	3.5 - 3.7
Temperatura	45 - 55 °C
Densidad de corriente	4 - 10 A/dm ²

El baño se amortigua con ácido bórico y se usan sulfatos o cloruros de metales alcalinos para aumentar su conductividad. Se prefiere el uso de sulfatos sobre cloruros para evitar la formación de cloro gaseoso en el ánodo. Otros ingredientes del baño son: un aditivo cuya función es bajar el potencial de los ánodos de carbono (para evitar la oxidación de Cr(III) a Cr(VI) en el ánodo) y un surfactante.

La velocidad de depósito de cromo en este proceso es comparable a la del proceso convencional de ácido crómico. Sin embargo, la velocidad no aumenta al aumentar la densidad de corriente sobre el cátodo, como ocurre en el baño convencional, y por lo tanto se obtiene una capa metálica de grosor uniforme en todo el objeto. También se elimina el problema de "quemaduras" en áreas de altas densidades de corriente. Otra ventaja del baño trivalente es que no es susceptible a las interrupciones de la corriente.

La apariencia del recubrimiento de cromo es un poco diferente cuando se utiliza un baño de cromo trivalente. Esto puede ser una desventaja. Sin embargo, la mayor desventaja del proceso de electrodeposición de cromo trivalente es que éste es muy susceptible a la contaminación de metales, la cual trae consigo variaciones en la coloración del recubrimiento. Por lo tanto, los baños de cromo trivalente necesitan de un control y un mantenimiento más estrictos que los baños de ácido crómico (6).

2. ANODOS

Para el cromado se utilizan ánodos inertes, ya que el uso de ánodos solubles de cromo resultaría muy caro. Además, la eficiencia de un ánodo de cromo sería de aproximadamente 100%, lo cual haría que la solución se saturara de cromo muy rápidamente. Se usan ánodos de plomo que contienen 6-8% de antimonio o 4-6% de estaño. Los ánodos que contienen antimonio se corroen mucho en presencia de catalizadores fluorinados, y por eso se usan más los ánodos que contienen estaño, los cuales también son más resistentes a la corrosión en los baños que contienen únicamente sulfato como catalizador.

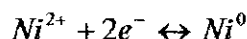
Durante el uso, los ánodos se cubren de una capa café de peróxido de plomo (PbO_2), la cual es beneficiosa, ya que sirve para oxidar la fracción de cromo trivalente formado en el cátodo a cromo hexavalente. Por lo tanto, un exceso de cromo trivalente en el baño puede removerse utilizando un pedazo de chatarra de pequeña área como cátodo y dejando que los ánodos recubiertos de óxido de plomo oxiden todo el cromo trivalente presente.

Cuando los ánodos de plomo se dejan en reposo por mucho tiempo dentro de la solución, se cubren de una capa amarilla de cromato de

plomo. Esta capa es indeseable, ya que es aislante y obstruye el paso de la corriente a través del ánodo (6).

C. FUNDAMENTOS DEL NIQUELADO

Cuando se disuelven sales de níquel en agua, el níquel se presenta en solución en forma de iones bivalentes Ni^{2+} . En presencia de una corriente eléctrica, los iones reciben dos electrones y se convierten en níquel metálico (Ni^0) en el cátodo. La misma reacción en reversa ocurre en el ánodo de níquel:



Debido a que los iones de níquel que se consumen sobre el cátodo son repuestos por los que se forman en el ánodo, el proceso de niquelado puede ponerse en marcha por mucho tiempo sin interrupción.

1. SOLUCIONES UTILIZADAS EN LA ELECTRODEPOSICIÓN DE NÍQUEL

a) BAÑO DE WATTS

En el año de 1916, el profesor O.P. Watts de la Universidad de Wisconsin publicó la fórmula de una solución a utilizarse para la electrodeposición de níquel. Esta fórmula ha servido de base para todos los baños de níquel que se usan hoy en día comercialmente. El término "baño de Watts" se usa para describir una serie de soluciones cuyas composiciones varían dentro de un intervalo, como se muestra en la siguiente tabla.

TABLA NO. 2
COMPOSICIÓN DEL BAÑO DE WATTS

Reactivo	Intervalo de Concentración (g/l)
sulfato de níquel, $NiSO_4 \cdot 6H_2O$	150 - 400
cloruro de níquel, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$	20 - 80
o cloruro de sodio, NaCl	10 - 40
ácido bórico, H_3BO_3	15 - 50

El sulfato de níquel es el principal proveedor de iones de níquel en la solución. Se utiliza este reactivo debido a que se disuelve muy fácilmente, es relativamente barato y comercialmente disponible. Además, provee iones de níquel no complejos. Esto es importante, ya que mientras más iones de níquel libres hay en el baño, mayor será la densidad de corriente límite con la cual se obtienen deposiciones de níquel razonables. En general, el aumento de la concentración de níquel permite el uso de densidades de corriente mayores en el cátodo y consecuentemente, velocidades mayores de niquelado. Por esta razón, la concentración de sulfato de níquel debe ser alta.

La función del cloruro de níquel es la de proveer iones cloruro. Este ion puede introducirse también en la forma de cloruro de sodio, el cual es más barato y es satisfactorio en la mayoría de aplicaciones. Sin embargo, se ha reportado que los iones sodio son perjudiciales para el proceso en presencia de algunos aditivos orgánicos. La presencia del ion cloruro en el baño mejora la corrosión de los ánodos y aumenta la conductividad de la solución. Este aumento se debe a un incremento en el coeficiente de difusión de los iones de níquel en presencia de iones Cl⁻. El tener una alta conductividad es importante, ya que ésta reduce el voltaje necesario para llegar a cierta densidad de corriente.

El ácido bórico se usa para amortiguar el pH del baño. La cantidad de ácido bórico que se usa en un baño de Watts fija el pH en un valor de aproximadamente 4.0. Este nivel de acidez es óptimo para la electrodeposición. Por esta razón, se prefiere el ácido bórico sobre el acetato o el formato como agente amortiguador. La finalidad de mantener el pH ligeramente ácido es la de evitar la formación de hidróxido de níquel y su codepósito sobre el cátodo (6).

b) BAÑO DE SULFAMATO DE NÍQUEL

En el baño de sulfamato, se usan sales de sulfamato de níquel [Ni(NH₂SO₃)₂] en vez de sulfato de níquel. Aunque este reactivo es más caro que el sulfato de níquel, con él se tienen dos características especiales en el proceso: altas velocidades de depósito y baja tensión en el recubrimiento metálico. La presencia de iones cloruro en la solución es necesaria para la corrosión de los ánodos. Sin embargo, un exceso de iones Cl⁻ da como resultado una mayor tensión en la capa de níquel. El pH, al igual que en el baño de Watts, es ligeramente ácido y se mantiene alrededor de 3.0 y 5.0. Generalmente se usa ácido bórico en la misma forma en que se usa en el baño de Watts para mantener el pH dentro del intervalo mencionado (6).

c) BAÑO DE FLUOBORATO DE NÍQUEL

Los componentes de esta solución son: fluoborato de níquel como fuente de iones Ni^{2+} , iones cloruro y ácido bórico. El pH se mantiene a aproximadamente 3.0. La capa depositada tiene una buena ductilidad y baja tensión interna. La solución posee buena conductividad y tolera una alta contaminación de otros metales, pero es mucho más cara que una solución Watts (6).

d) NÍQUEL BRILLANTE

Es posible obtener depósitos brillantes de níquel sin recurrir al pulido. Esto se hace mediante la adición de ciertos compuestos orgánicos al baño de níquel. La función de estos aditivos es la de "rellenar" con níquel los rayones y las imperfecciones selectivamente, y además exagerar el brillo del mismo níquel. Generalmente, se usan combinaciones de varios agentes orgánicos para obtener el efecto deseado.

Los aditivos se clasifican de acuerdo a su función: abrillantadores de primera clase, abrillantadores de segunda clase, agentes niveladores, reductores de esfuerzos de tensión, despolarizadores y surfactantes (6).

(1) ABRILLANTADORES

Los abrillantadores primarios, cuando actúan solos, no producen depósitos totalmente brillantes, excepto sobre substratos lustrosos que han sido pulidos previamente. La concentración de abrillantadores primarios no es crítica y puede usarse una concentración alta sin problemas. Esto se debe a que la presencia de los abrillantadores de primera clase no tiene grandes efectos sobre las propiedades físicas del depósito. Los abrillantadores de primera clase se distinguen por que contienen un grupo $=\text{C}-\text{SO}_2$ en su molécula.

Los abrillantadores de segunda clase sirven para que el níquel depositado tenga mucho brillo. No pueden usarse solos, debido a que causan fragilidad y aumentan el esfuerzo a la tensión interna dentro del depósito. Por esta razón, la concentración límite superior de los abrillantadores de segunda clase es muy importante. En algunos casos, se utiliza un aditivo adicional para disminuir los efectos desventajosos de estos abrillantadores. A estos aditivos se les llama "despolarizadores". Los abrillantadores de segunda clase se caracterizan por contener un

grupo insaturado en su molécula (6).

(2) AGENTES NIVELADORES

Como agentes niveladores de la superficie se usa la cumarina, los compuestos acetilénicos y ciertas sulfobetainas, entre otros. La cumarina es el mejor agente nivelador, ya que con ella se obtienen depósitos muy uniformes. Sin embargo, los productos de la reducción de este material orgánico en el cátodo son causa de problemas en la electrodeposición. Por esta razón, se utilizan más los compuestos acetilénicos, cuyos productos de descomposición sobre el cátodo son inofensivos al proceso (6)

(3) AGENTES REDUCTORES DE ESFUERZOS DE TENSIÓN

Estos se utilizan para contrarrestar los efectos que tienen los abrillantadores de segunda clase sobre las propiedades mecánicas del depósito de níquel. El compuesto más popular que se usa para este fin es la sacarina (6).

(4) SURFACTANTES

Los surfactantes se usan para evitar las picaduras causadas por burbujas de hidrógeno gaseoso que se forma sobre el objeto. Mediante la disminución de la tensión superficial del baño, se consigue que las burbujas formadas se deslicen más fácilmente sobre la superficie del objeto y no se queden estáticas sobre el cátodo e impidan la deposición sobre el mismo.

El surfactante debe ser compatible con los demás aditivos, de manera que no se tenga un brillo disminuido o una homogeneidad reducida sobre la superficie (6).

2. ANODOS

En el proceso de electrodeposición de níquel se utilizan ánodos de níquel de por lo menos 99% de pureza. Estos ánodos se corroen en presencia de la corriente eléctrica y liberan iones de níquel a la solución. Los iones cloruro presentes en la solución facilitan este proceso. La pureza de los ánodos es de suma importancia. Anodos de baja pureza pueden dar problemas de contaminación de la solución y problemas de calidad inferior en el depósito de níquel. Los ánodos deben disolverse

lentamente. La presencia de gránulos finos de níquel dentro de la solución es perjudicial al recubrimiento, ya que éstas se incorporan a la capa de níquel y no se obtiene un recubrimiento homogéneo sobre el cátodo (6).

D. CALIDAD Y CONTROL DE CALIDAD

La calidad de un recubrimiento metálico formado por electrodeposición se define con base en la aplicación que se hará de él. Es decir, para establecer un criterio de calidad del recubrimiento, primero debe especificarse la función que desempeñará el mismo. Conociéndose la función del recubrimiento, se pueden enumerar las características deseadas de la capa metálica. Estas características pueden cuantificarse y constituyen una medida de la calidad del depósito metálico en función de la aplicación que tiene el recubrimiento.

En el caso del cromado decorativo, las características que definen la calidad del depósito son: ductilidad, adherencia, tensión, dureza, brillo, poder de reflexión y aspereza de la superficie (6). Estas características se controlan regulando y manteniendo la composición del baño y las condiciones de operación dentro de intervalos específicos. Es decir, el control de calidad en las operaciones de electrodeposición consiste en regular y mantener la composición de las soluciones y las condiciones de operación constantes. Sólo así se logra obtener recubrimientos de calidad reproducibles (4).

1. ESPECIFICACIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS METÁLICOS

Aunque en Guatemala no existen regulaciones en cuanto a las especificaciones de recubrimientos metálicos, algunas de éstas deben cumplirse para llegar a un nivel de calidad adecuado y tener un producto competitivo. La mayoría de especificaciones para recubrimientos electrodepositados incluyen requerimientos que pertenecen a la mano de obra, la preparación previa de la superficie, apariencia, adherencia, grosor, resistencia a la corrosión y los tratamientos post-deposición. También incluyen los métodos de prueba para determinar si la calidad del producto está de acuerdo con las especificaciones de calidad (4).

a) CONDICIÓN DEL SUBSTRATO

Debido a que la condición del sustrato, o material sobre el cual se

deposita la capa metálica, tiene influencia sobre las características del recubrimiento y sobre el desempeño de la pieza, es importante que la condición del sustrato esté sometida también a una caracterización y a un control. Por esta razón, las especificaciones generalmente exigen que el sustrato esté libre de defectos que pueden ser desventajosos a la apariencia o acción protectora del recubrimiento.

b) APARIENCIA

Los requisitos para la apariencia se definen generalmente en términos de acabado brillante, opaco, mate o satin. No existen métodos prácticos para definir y medir cuantitativamente las condiciones de la apariencia. Las especificaciones de la apariencia también prohíben la presencia de defectos visibles como picaduras, nódulos, ampollas, rajaduras y quemaduras (1).

c) ADHERENCIA

La adherencia de la capa metálica al sustrato es de mucha importancia. Excepto para los depósitos metálicos sobre plásticos, no existen métodos para determinarla cuantitativamente, y por lo tanto se define mediante tests cualitativos. Estas pruebas generalmente consisten en doblar o cortar una muestra y luego buscar evidencias de desprendimiento en la interfase recubrimiento-sustrato. Las especificaciones ISO 2819 y ASTM B571 presentan varios de estos métodos (1).

d) GROSOR

El grosor del recubrimiento es esencial, ya que la acción protectora del depósito depende del mismo. Debido a su importancia y a que es fácil de definir y medir, prácticamente cualquier especificación contiene un grosor local mínimo o un grosor promedio mínimo (1).

2. PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS DE NÍQUEL BRILLANTE

a) BRILLO

El depósito deberá ser totalmente brillante en un amplio intervalo de densidad de corriente, independientemente del grosor (6). El brillo es una

propiedad subjetiva y no puede ser determinada cuantitativamente. La mejor forma de investigar el intervalo brillante de una solución es utilizando una celda Hull en la cual el ánodo y el cátodo no están alineados paralelamente. En este tipo de prueba, se puede observar fácilmente la apariencia del depósito para diferentes densidades de corriente (4).

b) ASPEREZA Y PICADURAS

La aspereza del depósito de níquel generalmente se debe a la presencia de partículas sólidas dentro del baño. Las partículas pueden llegar al electrolito debido a una limpieza deficiente de la pieza a niquelar, una filtración inadecuada o una bolsa de ánodo rota.

Las picaduras se deben principalmente a la formación de burbujas de hidrógeno sobre la superficie del cátodo. Mientras que la burbuja permanece adherida a la superficie, el níquel se acumula a su alrededor, produciéndose así un hueco en el recubrimiento. Las picaduras también pueden formarse debido a gotas de grasa sobre la superficie del cátodo. Para evitar los problemas de picaduras, además de usarse un surfactante, se agita el electrolito con aire y en muchos casos también se instala un mecanismo de movimiento de la barra del cátodo. El uso de agitación con burbujas de aire en combinación con un surfactante puede llevar a problemas de espuma excesiva. Para evitar este tipo de problemas, se usa un surfactante que no produzca mucha espuma, y se ajusta su concentración de manera que la tensión superficial sea unas 30 a 35 dinas por centímetro. En los casos en los que no se usa agitación con burbujas de aire, la tensión superficial puede ser tan baja como 20 dinas/cm (6).

c) RECEPTIVIDAD AL CROMO

La presencia de algunos abrillantadores resulta en la adsorción de compuestos orgánicos sobre el recubrimiento de níquel, la cual puede disminuir la receptividad al cromo o causar defectos en él. La receptividad al cromo del níquel disminuye rápidamente, por lo que el intervalo de tiempo entre el niquelado y el cromado es importante para obtener recubrimientos de cromo aceptables. Para "activar" el níquel, la pieza se remoja rápidamente en un ácido o base diluida, y luego se cromata (6).

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un manual para controlar y mantener los tanques de níquel y cromo en una línea de electrodeposición de cromo decorativo.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar los parámetros de control de los tanques de cromo y níquel en una línea de cromado automática.
2. Evaluar los requerimientos de control de las soluciones de cromo y níquel en una línea de cromado automática.
3. Realizar una evaluación y una selección de opciones de control para el proceso.
4. Elaborar un sistema de recaudación y manejo de datos para facilitar el control.

IV. JUSTIFICACIÓN

La electrodeposición de cromo es el método generalmente utilizado para impartir las características físicas y químicas del cromo a la superficie de un material barato y fácil de moldear. Las propiedades del cromo como un acabado metálico son muy deseables, debido a que este metal posee excelentes características protectoras y decorativas.

En Guatemala, la electrodeposición de cromo decorativo se ha llevado a cabo desde hace mucho tiempo. Actualmente, existen aproximadamente diez establecimientos que proveen este servicio en la Ciudad de Guatemala. En ellos, se croman todo tipo de objetos para diferentes aplicaciones, desde parachoques y escapes de vehículos, hasta componentes de aparatos para levantar pesas, rodillos para máquinas litográficas y diferentes objetos utilizados en los hospitales. El cromado decorativo también se lleva a cabo en Guatemala como parte de un proceso mayor en la fabricación de varios artículos metálicos, por ejemplo en la fabricación de muebles de oficina y en la fabricación de bicicletas.

A pesar de la variedad de aplicaciones que tiene este proceso y de la proliferación de fábricas que manejan la electrodeposición de cromo en Guatemala, no existe nada escrito al respecto, y la industria sigue siendo un arte desarrollado empíricamente. Los avances tecnológicos y las investigaciones en el campo de los acabados metálicos que se han llevado a cabo en todo el mundo, han introducido en el proceso de cromado nuevas alternativas de manufactura que todavía han de conocerse, aplicarse y desarrollarse en la industria guatemalteca. Para mientras, las compañías que realizan la electrodeposición de cromo requieren asesoría especializada extranjera cuando se enfrentan con problemas en la línea o cuando requieren de alguna modificación o innovación en su proceso. Los problemas más frecuentes en una línea de electrodeposición de cromo se deben a desbalances en las soluciones o en sus condiciones de operación, que son causas de un control inefectivo o inexistente de los baños de electrodeposición.

El control y el mantenimiento de las soluciones son una parte medular en la operación de una línea de electrodeposición, ya que las propiedades de los recubrimientos metálicos dependen principalmente de la concentración de los componentes en solución y de las condiciones de operación, de tal manera que un manual de control de los tanques de níquel y cromo vendría a aliviar el vacío de información existente sobre dicha operación.

V. PROBLEMA A RESOLVER

Debido a que la industria metalúrgica guatemalteca se ha ido desarrollando en forma empírica, no cuenta con un manual de control que brinde la información necesaria para mantener en condiciones óptimas los baños de níquel y cromo, parte medular de una línea de electrodeposición de cromo decorativo. Esta información es útil para:

- mantener las soluciones de níquel y de cromo a concentraciones óptimas
- controlar eficientemente las condiciones de operación requeridas para el buen funcionamiento del proceso
- manejar los datos recaudados en forma eficiente
- adquirir el criterio necesario para identificar problemas y solucionarlos
- adquirir los conocimientos necesarios para reducir los costos de producción
- calcular costos apegados a la realidad

VI. METODOLOGÍA

- I. Revisión de una línea de electrodeposición de cromo automática de gran capacidad.
 - A. Definición de los objetivos de operación del proceso.
 - B. Definición de los objetivos del sistema de control.
 - C. Identificación de las restricciones en el proceso.
 - D. Identificación de causas y efectos en el proceso relacionados a la ausencia de control y/o mantenimiento.

- II. Selección de opciones de control.
 - A. Investigación de los métodos y equipo existentes para el control de los baños de níquel y cromo.
 - B. Selección de un método de control de acuerdo con los requerimientos de control, las instalaciones y factores económicos.

- III. Elaboración del manual de control, que incluye:
 - A. Introducción
 - B. Pruebas y mediciones
 - C. Programa de control
 - D. Programa de mantenimiento (preventivo y correctivo)
 - E. Administración de datos

VII. RESULTADOS

A continuación se presenta el manual elaborado.

**MANUAL DE CONTROL PARA UNA LÍNEA AUTOMÁTICA DE
ELECTRODEPOSICIÓN DE CROMO DECORATIVO**

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PRUEBAS Y MEDICIONES	2
2.1 MUESTREO	2
2.2 PRUEBAS QUÍMICAS	2
2.2.1 ANÁLISIS VOLUMÉTRICO DEL JABÓN ALCALINO	2
2.2.2 ANÁLISIS VOLUMÉTRICO DEL JABÓN ANÓDICO/CATÓDICO	2
2.2.3 ANÁLISIS VOLUMÉTRICO DE LA SOLUCIÓN ACIDA	2
2.2.4 ANÁLISIS VOLUMÉTRICO DEL ELECTROLITO DE NÍQUEL	3
2.2.5 ANÁLISIS VOLUMÉTRICO DEL ELECTROLITO DE CROMO	6
2.3 PRUEBAS DE CELDA HULL	7
2.3.1 PRUEBA DE CELDA PARA NÍQUEL	9
2.3.2 PRUEBA DE CELDA PARA CROMO	9
2.4 ADICIONES DE QUÍMICOS AL TANQUE DE NÍQUEL	10
2.4.1 ÁCIDO SULFÚRICO	10
2.4.2 CLORURO DE NÍQUEL	10
2.4.3 SULFATO DE NÍQUEL	11
2.4.4 ÁCIDO BÓRICO	12
2.4.5 AGUA	12
2.4.6 CARBONATO DE NÍQUEL	13
2.5 ADICIONES DE QUÍMICOS AL TANQUE DE CROMO	13
2.5.1 ACIDO CRÓMICO O TRIÓXIDO DE CROMO	13
2.5.2 ACIDO SULFÚRICO	13
2.5.3 CARBONATO DE BARIO	14
2.5.4 CATALIZADOR	15
2.5.5 AGUA	16
2.6 PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN	16
2.6.1 DENSIDAD DEL ELECTROLITO DE CROMO	16
2.6.2 MEDICIÓN DE pH CON PAPEL COLORIMÉTRICO	16
2.6.3 MEDICIÓN DE pH CON UN ELECTRODO	16
2.6.4 MEDICIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL	17
2.7 PROCEDIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	18
2.7.1 CAMBIO DE CARTUCHOS DEL FILTRO	18
2.7.2 TRATAMIENTO CON CARBÓN ACTIVADO	18
2.7.3 ELECTRÓLISIS CON PIEZAS CHATARRA	19
3. PROGRAMA DE CONTROL	20
3.1 ESPECIFICACIONES DEL PROCESO	20
3.1.1 MÁQUINA CROMADORA	20
3.1.2 GANCHOS	22
3.1.3 FORMULACIONES QUÍMICAS	22
3.2 OBJETIVOS DE OPERACIÓN DEL PROCESO	22
3.3 OBJETIVOS DEL SISTEMA DE CONTROL	23
3.3.1 OBJETIVO GENERAL	23
3.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3.4 RESTRICCIONES DEL PROCESO	24
3.5 PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA AUSENCIA DE CONTROL	25
3.6 MÉTODOS DE CONTROL	26
3.6.1 CORRIENTE APLICADA A LOS ELECTROLITOS	26

3.6.2	TEMPERATURA	27
3.6.3	CONCENTRACIÓN DE JABONES Y SOLUCIÓN ACIDA	28
3.6.4	PH DEL ELECTROLITO DE NIQUEL	28
3.6.5	COMPOSICIÓN DEL ELECTROLITO DE NIQUEL	28
3.6.6	COMPOSICIÓN DEL ELECTROLITO DE CROMO	29
3.6.7	RELACIÓN ACIDO CRÓMICO - SULFATO EN EL ELECTROLITO DE CROMO	29
3.6.8	CONCENTRACIÓN DE ABRILLANTADORES Y ADITIVOS EN EL ELECTROLITO DE NIQUEL	30
3.6.9	APARIENCIA DEL RECUBRIMIENTO	31
3.7	CUADRO SINÓPTICO DEL PROGRAMA DE CONTROL	36
 4. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO		38
4.1	CICLO DE LIMPIEZA	38
4.2	NIQUELADO	39
4.3	CROMADO	40
4.4	AGUA DE REMOJO	40
4.5	TANQUES Y EQUIPO AUXILIAR	40
4.6	GANCHOS	41
4.7	CUADRO SINÓPTICO DEL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO	41
 5. ADMINISTRACIÓN DE DATOS		42
5.1	RECAUDACIÓN DE DATOS	42
5.1.1	HOJAS DE CONTROL	42
5.1.2	HISTORIA DE SOLUCIONES	43
5.1.3	CONTEO DE DEFECTOS EN LAS PIEZAS	43
5.2	ANÁLISIS DE DATOS MEDIANTE CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS	44
5.2.1	GRÁFICAS DE CONTROL	44
5.2.2	GRÁFICA DE CONTROL DE INTERVALO MOVIBLE	45
5.2.3	GRÁFICA DE CONTROL DE MEDICIONES INDIVIDUALES	47
5.2.4	GRÁFICA DE CONTROL DE LA MEDIA MOVIBLE	48
5.2.5	ANÁLISIS DE GRÁFICAS DE CONTROL	49
 6. APÉNDICE		54
6.1	DENSIDAD Y CONTENIDO EQUIVALENTE DE ACIDO CRÓMICO	54
6.2	HOJAS DE CONTROL	55

1. Introducción

Este manual de control pretende ser una guía objetiva para el mejoramiento del control de la línea automática de cromo decorativo. En él se encuentra un plan de control y un plan de mantenimiento que son propuestas planteadas con base en los problemas más frecuentes enfrentados en la línea. Los problemas se combaten por medio de la regulación de todas las variables controlables que posee el proceso.

El manual tiene dos maneras de ser útil: una es la lectura de todo el manual por parte del inspector, el cual podrá formarse una idea de la complejidad que posee un buen sistema de control y así podrá diseñar un sistema de control basado en los lineamientos de éste. La segunda función es la de servir como referencia para ser consultada cuando sea necesario.

El manual comienza con una sección en la cual están recopiladas todas las pruebas, mediciones y procedimientos que se usan en el sistema de control. La aplicación adecuada de estos procedimientos se detalla en las secciones que siguen.

El sistema de control se presenta en la Sección 3, en la cual se encuentra una breve descripción de las características y especificaciones del proceso. Luego sigue un análisis de los objetivos del proceso y del sistema de control en sí, lo que facilita la comprensión del control propuesto. La Sección 4 trata sobre el sistema de mantenimiento que debe acompañar al control para que éste funcione a plenitud. Se han incluido cuadros sinópticos al final de estas secciones para tenerse una idea general y rápida de los sistemas de control y mantenimiento propuestos.

El manual termina con una presentación resumida de lo que es una buena administración de datos y una propuesta breve del uso de control estadístico de procesos para monitorear el desempeño del sistema de control. Esta sección pretende dar únicamente una idea de la utilidad que tiene una buena administración y análisis de datos; para obtener más información al respecto se recomienda consultar libros sobre control de calidad y control estadístico de procesos. Sin embargo, el inspector interesado podrá poner en práctica los métodos resumidos en la Sección 5 y obtener resultados positivos sin consultar ninguna otra fuente.

Las hojas de control presentadas en el Apéndice deben considerarse como una propuesta. Es probable que la empresa necesite añadir información adicional en las hojas de control.

2. Pruebas y Mediciones

2.1 Muestreo

Para todas las pruebas, se debe asegurar una mezcla uniforme en el tanque antes de tomarse la muestra. Esto puede lograrse por medio de agitación. En el caso de los jabones y el electrolito de cromo, debe permitirse que se sedimenten los componentes sólidos antes del muestreo. Basta tomar aproximadamente 300 ml de muestra. Se recomienda utilizar un tubo largo para extraer la muestra. Esto asegura que la muestra se toma desde el fondo del tanque. El punto del cual se extrae la muestra debe escogerse aleatoriamente (16).

2.2 Pruebas Químicas

2.2.1 Análisis Volumétrico del Jabón Alcalino

- A. Introduzca 10 ml de muestra en un erlenmeyer.
- B. Agregue 50 ml de agua destilada.
- C. Añada 5 gotas de indicador fenolftaleína.
- D. Titule con ácido clorhídrico 0.5 N hasta que desaparezca el color rojo.
- E. Multiplique los ml consumidos por 0.74 para obtener las onzas por galón de jabón anódico (16).

2.2.2 Análisis Volumétrico del Jabón Anódico/Catódico

- A. Introduzca 10 ml de muestra en un erlenmeyer.
- B. Agregue 50 ml de agua destilada.
- C. Añada 5 gotas de indicador fenolftaleína.
- D. Titule con ácido clorhídrico 0.5 N hasta que desaparezca el color rojo.
- E. Multiplique los ml consumidos por 0.36 para obtener las onzas por galón de jabón anódico o catódico (16).

2.2.3 Análisis Volumétrico de la Solución Ácida

- A. Introduzca 10 ml de muestra en un erlenmeyer.
- B. Agregue 50 ml de agua destilada.

- C. Añada 5-10 gotas de indicador naranja de metilo o verde de bromocresol.
- D. Titule con hidróxido de sodio (NaOH) 0.5 N hasta que aparezca un color anaranjado (naranja de metilo) o verde (verde de bromocresol) (16).

2.2.4 Análisis Volumétrico del Electrolito de Níquel

2.2.4.1 PREPARACIÓN DE SOLUCIONES

2.2.4.1.1 SOLUCIÓN BUFFER DE AMONIO

Una solución buffer es una solución “amortiguadora” del pH. Es decir, la solución se agrega cuando se quiere mantener el pH constante. La magnitud del pH dependerá de la naturaleza y de la concentración de la solución buffer. La solución buffer de amonio que se utiliza en esta prueba mantiene el pH en 10.

- A. Pese exactamente 21.6 gramos de cloruro de amonio (NH_4Cl) cristalino y disuelva con un poco de agua destilada en un beaker.
- B. Transfiera el contenido del beaker a un balón volumétrico de 250 ml.
- C. Agregue 140 ml de hidróxido de amonio (NH_4OH) concentrado.
- D. Añada agua destilada exactamente hasta la marca. Agite.
- E. Guarde la solución en un recipiente adecuado.

2.2.4.1.2 CROMATO DE SODIO AL 20%

- A. Pese exactamente 20 gramos de cristales de cromato de sodio (Na_2CrO_4) en un beaker de 150 ml (acuérdesse de tarar el beaker).
- B. Añada un poco de agua destilada y disuelva los cristales.
- C. Agregue agua hasta la marca de 100 ml. Disuelva.
- D. Guarde la solución en un frasco o gotero de 100 ml.

2.2.4.1.3 INDICADOR MUREXIDE

- A. Pese exactamente 1 gramo de murexide.
- B. Pese exactamente 100 g de cloruro de sodio.
- C. Mezcle y guarde en un recipiente adecuado.

2.2.4.2 INDICADOR BTB/BCP

BTB es una abreviación de "bromothymol blue" o azul de bromotimol. BCP es una abreviación de "bromocresol purple" o púrpura de bromocresol. La solución es entonces, como lo dice su nombre, una mezcla de dos indicadores.

- A. Pese exactamente 0.2 gramos de azul de bromotimol.
- B. Pese exactamente 1 gramo de púrpura de bromocresol.
- C. Mezcle e introduzca en un beaker de 150 ml.
- D. Disuelva en un poco de alcohol.
- E. Ajuste el nivel de la solución con alcohol hasta la marca de 100 ml.
- F. Guarde la solución en un gotero o frasco adecuado.

2.2.4.3 DETERMINACIÓN DE NÍQUEL METÁLICO

- A. Introduzca con una pipeta 1 ml de muestra en un erlenmeyer.
- B. Añada con una probeta aproximadamente 50 ml de agua destilada.
- C. Añada con una probeta aproximadamente 10 ml de solución buffer de amonio o solución concentrada de amonio.
- D. Añada aprox. media cucharita de murexide (1g), o lo suficiente para obtener un color salmón.
- E. Titule con EDTA 0.1 M. El color debe cambiar a un morado profundo.
- F. Los ml utilizados de EDTA, multiplicados por 0.78 dan la cantidad de níquel metálico presente en onzas por galón (16).

2.2.4.4 DETERMINACIÓN DE CLORURO DE NÍQUEL

- A. Introduzca con una pipeta 2 ml de muestra en un erlenmeyer.
- B. Añada con una probeta aprox. 50 ml de agua destilada.
- C. Añada con una pipeta aprox. 1 ml de solución de cromato de sodio de 20 g/l.
- D. Titule con nitrato de plata (AgNO_3) 0.1 N hasta obtener un color café permanente.
- E. Los mililitros utilizados de nitrato de plata, multiplicados por 0.79, dan la cantidad de cloruro de níquel presente en onzas por galón (16).

2.2.4.5 DETERMINACIÓN DE SULFATO DE NÍQUEL

Utilice la siguiente fórmula para calcular la concentración, en onzas por galón, de sulfato de níquel en el tanque:

$$[NiSO_4] = ([Ni^0] - [NiCl_2] \times 0.247) \times 4.48$$

donde $[NiSO_4]$ es la concentración de sulfato de níquel, $[Ni^0]$ es la concentración de níquel metálico y $[NiCl_2]$ es la concentración de cloruro de níquel, todas en onzas por galón (16).

EJEMPLO: Suponga que las titulaciones indican que hay una concentración de 8.5 oz/gal de cloruro de níquel y 10.5 oz/gal de níquel metálico en el tanque. Utilizando la fórmula se tiene que:

$$[NiSO_4] = (10.5 - 8.5 \times 0.247) \times 4.48 = 37.6 \frac{oz}{gal}$$

2.2.4.6 DETERMINACIÓN DE ÁCIDO BÓRICO

- A. Introduzca con una pipeta 2 ml de muestra en un erlenmeyer.
 - B. Añada 5 gotas de indicador BTB/BCP o indicador púrpura de bromocresol.
 - C. Añada suficiente polvo de manitol para formar una pasta dentro del erlenmeyer (aprox. 5 g de manitol).
 - D. Titule con hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N hasta obtener un color morado.
- Multiplique los ml consumidos de hidróxido de sodio (NaOH) por 0.41 para obtener la concentración de ácido bórico en onzas por galón (16).

2.2.4.7 DETERMINACIÓN DE AGENTE REDUCTOR DE TENSIÓN

- A. Introduzca 10 ml de muestra de electrolito de níquel en un erlenmeyer.
- B. Agregue 50 ml de agua destilada.
- C. Añada 5 ml de ácido clorhídrico concentrado.
- D. Agregue 20 ml de solución 0.1 N de bromuro de potasio.
- E. Agregue 10 ml de solución al 10% de yoduro de potasio.

- F. Titule con tiosulfato de sodio 0.1 N hasta obtener un color casi transparente.
- G. Añada 10 gotas de almidón soluble.
- H. Titule hasta obtener un color transparente.
- I. Utilice la siguiente fórmula para obtener el porcentaje de agente reductor de tensión en el electrolito (7):

$$20 - \text{ml tiosulfato} \times 0.26 = \% \text{ agente reductor de tensión}$$

2.2.5 Análisis Volumétrico del Electrolito de Cromo

2.2.5.1 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES

2.2.5.1.1 SOLUCIÓN DE YODURO DE POTASIO AL 10%

- A. Pese exactamente 10 gramos de cristales de yoduro de potasio (KI) en un beaker de 150 ml (acuérdesse de tarar el beaker).
- B. Añada un poco de agua destilada y disuelva los cristales.
- C. Agregue agua hasta la marca de 100 ml. Disuelva.
- D. Guarde la solución en un frasco o gotero de 100 ml.

2.2.5.1.2 INDICADOR DE ALMIDÓN

El indicador de almidón se degrada fácilmente a glucosa. Por favor revise que éste tenga un color blanco. Si está gris, es recomendable preparar una solución fresca.

- A. Pese exactamente 4 gramos de almidón soluble en un beaker de 150 ml (acuérdesse de tarar el beaker).
- B. Agregue agua hasta la marca de 100 ml.
- C. Guarde la solución en un frasco o gotero de 100 ml.

2.2.5.2 DETERMINACIÓN DE ÁCIDO CRÓMICO

- A. Introduzca con una pipeta 10 ml de muestra en un balón volumétrico de 250 ml (o, en caso de no tener un balón de 250 ml, 20 ml de muestra en un balón de 500 ml). Diluya con agua destilada hasta la marca y agite. Asegúrese de no pasarse de la marca.
- B. Transfiera con una pipeta 5 ml de muestra diluida a un erlenmeyer.
- C. Añada 100 ml de agua destilada en una probeta.
- D. Añada aprox. 1 g de cristales de bifluoruro de amonio. Agite para disolver.

- E. Añada 10 ml de ácido clorhídrico concentrado.
- F. Añada 10 ml de solución de yoduro de potasio al 10%.
- G. Titule con tiosulfato de sodio 0.1 N hasta que el color café se convierta en un color amarillo pálido (heno).
- H. Añada 5 ml de indicador de almidón (starch). La solución debe ponerse negra.
- I. Continúe la titulación hasta que el color negro desaparezca.
- J. Multiplique los ml utilizados de tiosulfato de sodio por 2.23 para obtener las oz/gal de ácido crómico (3).

2.2.5.3 DETERMINACIÓN DE SULFATO

- A. Introduzca con una probeta 5 ml de solución "A" o ácido clorhídrico concentrado en cada tubo estándar de centrifuga.
- B. Añada con una pipeta 10 ml de muestra a cada tubo.
- C. Añada aprox. 5 ml de solución "B" o cloruro de bario al 20% a ambos tubos.
- D. Añada 5 ml de agua destilada a ambos tubos.
- E. Tape y agite los tubos. Luego déjelos por 5 minutos.
- F. Centrifugue los tubos por un minuto a aprox. 60 revoluciones por minuto.
- G. Saque los tubos y golpee suavemente el conducto inferior hasta que el precipitado tenga una superficie plana. Anote el nivel del precipitado.
- H. Centrifugue por aprox. 15 segundos.
- I. Lea el nivel del precipitado. Si el nivel ha caído, centrifugue de nuevo hasta que el nivel del precipitado se mantenga constante.
- J. **IMPORTANTE:** Multiplique el nivel del precipitado por 2 para obtener el contenido de sulfato en la solución, en onzas por galón. Tome el promedio de ambos tubos como el resultado final (16).

2.3 Pruebas de celda Hull

La celda Hull es una unidad miniatura para la electrodeposición, diseñada para producir un depósito catódico sobre el cual se puede "leer" el desempeño de la electrodeposición obtenido en todas las densidades de corriente dentro del intervalo de operación. Las propiedades del recubrimiento que se obtienen en una celda Hull son dependientes de la condición del tanque de electrodeposición en cuanto a sus componentes principales, aditivos e impurezas presentes.

La celda Hull permite al operador experimentado determinar los siguientes factores concernientes a los baños de electrodeposición:

1. Los límites del intervalo de densidad de corriente dentro de los cuales se obtiene un depósito brillante.
2. Las concentraciones aproximadas de los constituyentes principales.
3. La concentración de los aditivos.
4. La presencia de impurezas orgánicas.

La celda Hull también es un instrumento indispensable para las investigaciones experimentales.

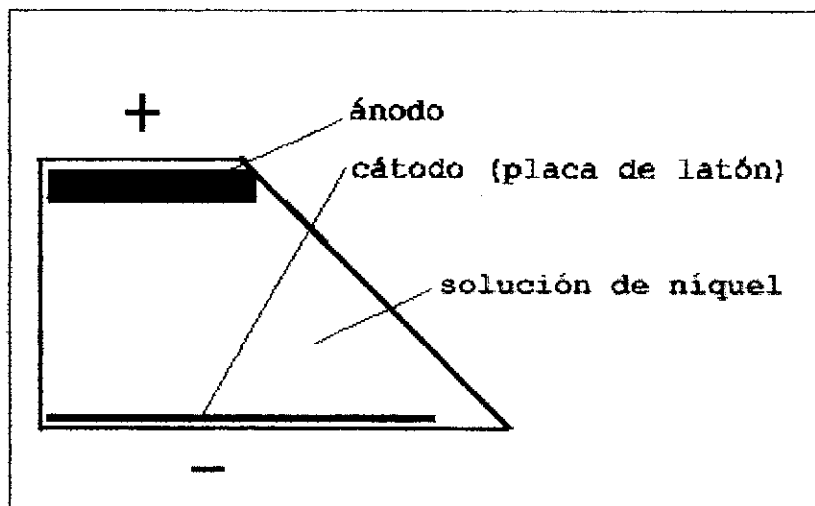
2.3.1 Prueba de Celda para Níquel

- A. Llene la celda exactamente hasta la línea.
- B. Caliente la solución hasta la temperatura de operación. Utilice un termómetro para asegurarse que se tiene la temperatura correcta.
- C. Sumerja la placa pulida de acero en ácido clorhídrico o muriático al 50% para botarle la capa de protección de zinc.
- D. Remoje en agua. El agua debe correr fluidamente sobre la placa al sacar ésta del líquido. En caso de formarse "islas secas" sobre la superficie de la placa, ésta deberá limpiarse con detergente.
- E. Seque la placa.
- F. Niquele a la temperatura de operación, ajustando el rectificador a 1 amperio, por 10 minutos (20).

2.3.2 Prueba de Celda para Cromo

Ya que se quiere simular el proceso de cromado en la celda, se procede primero a niquelar la placa y luego a cromarla. Por lo tanto, se deberán tomar muestras de ambos tanques y se usarán dos celdas: una para niquelar a densidad de corriente constante y otra para cromar a densidad de corriente variable.

FIGURA No.2.1
ELECTRODEPOSICIÓN DE NÍQUEL A DENSIDAD DE CORRIENTE CONSTANTE
UTILIZANDO UNA CELDA HULL



- A. Utilice una celda Hull con una configuración como la que se muestra en la Figura No. 2.1. Esto permitirá que el níquel se deposite

homogéneamente sobre la placa a una densidad de corriente más o menos constante. Una segunda celda para el cromo se utiliza de la manera convencional.

- B. Llene la celda de níquel con una muestra de níquel y la celda de cromo con la solución de cromo, exactamente hasta la línea.
- C. Caliente la solución de níquel hasta su respectiva temperatura de operación. Caliente el baño de ácido crómico a 45°C (115°F), independientemente de la temperatura de operación. Utilice un termómetro para asegurarse que se tiene la temperatura correcta.
- D. Utilice una placa pulida de latón¹.
- E. Asegúrese de que la placa no esté sucia y que la superficie esté libre de grasa.
- F. Niquelate a la temperatura de operación, ajustando el rectificador a 2.5 amperios, por 2 minutos.
- G. Remoje la placa en agua y asegúrese de que está libre de la solución de níquel.
- H. Cromate la placa a 5 amperios por 5 minutos (20).

2.4 Adiciones de Químicos al Tanque de Níquel

2.4.1 Ácido Sulfúrico

El ácido deberá manejarse con sumo cuidado. Utilice siempre protección en los ojos y manos. Debe diluirse antes de echarse al tanque. Nunca debe echarse el agua al ácido al diluirlo, siempre se añade el ácido al agua para evitar accidentes. Se recomienda el siguiente procedimiento para hacer las adiciones (3):

- A. Disuelva 1 litro de ácido sulfúrico en 5 litros de agua.
- B. Agregue al tanque.
- C. Espere media hora y mida el pH
- D. Repita hasta alcanzar el pH deseado.

2.4.2 Cloruro de Níquel

Si la cantidad que se va a añadir es muy grande, la adición deberá planearse a lo largo de varios días en pequeñas porciones. Disuelva en agua antes de echar al tanque. Las libras a añadir se calculan así:

¹ La placa no necesariamente tiene que ser de latón. Sin embargo, el color amarillento del latón facilita la percepción visual del cromado, ya que resalta la apariencia amarillenta del níquel y aumenta el contraste con el color blanco azulado del cromo.

$$lb_{NiCl_2} = \frac{\Delta[NiCl_2] \times V_{tanque}}{16}$$

donde lb_{NiCl_2} es la cantidad de cloruro de níquel a añadir al tanque en libras, $\Delta[NiCl_2]$ es la diferencia entre la concentración de cloruro de níquel en el tanque y la concentración de cloruro de níquel que se desea, en oz/gal, y V_{tanque} es el volumen o capacidad del tanque en galones.

EJEMPLO: Supóngase que ha encontrado que la concentración de cloruro de níquel es de 6.0 oz/gal. Esta concentración se encuentra por debajo del intervalo de 10 - 12 oz/gal y por lo tanto Ud. decide subir la concentración de cloruro de níquel a 11 oz/gal. Su tanque es de 700 gal. Entonces:

$$\Delta[NiCl_2] = 11 - 6 = 5 \text{ oz/gal}$$

$$lb_{NiCl_2} = \frac{5 \times 700}{16} = 219 \cdot lb \cong 220 \cdot lb$$

2.4.3 Sulfato de Níquel

Si la cantidad a añadir es muy grande, la adición deberá planearse a lo largo de varios días en pequeñas porciones.

Disuelva en agua antes de echar al tanque. Las libras a añadir se calculan así:

$$lb_{NiSO_4} = \frac{\Delta[NiSO_4] \times V_{tanque}}{16}$$

donde lb_{NiSO_4} es la cantidad de sulfato de níquel a añadir al tanque en libras, $\Delta[NiSO_4]$ es la diferencia entre la concentración de sulfato de níquel en el tanque y la concentración de sulfato de níquel que se desea, en oz/gal, y V_{tanque} es el volumen o capacidad del tanque en galones.

EJEMPLO: Supóngase que ha encontrado que la concentración de sulfato de níquel es de 35 oz/gal. Esta concentración se encuentra por debajo del intervalo de 40 - 50 oz/gal y por lo tanto Ud. decide subir la concentración de sulfato de níquel a 45 oz/gal. Su tanque es de 700 gal. Entonces:

$$\Delta[NiSO_4] = 45 - 35 = 10 \text{ oz/gal}$$

$$lb_{NiCl_2} = \frac{10 \times 700}{16} = 437.5 \cdot lb \cong 440 \cdot lb$$

2.4.4 Ácido Bórico

Deberá disolverse primero en un recipiente aparte antes de ser introducido al tanque. Si la cantidad a añadir es muy grande, es preferible introducir una bolsa (de las que se usan para los ánodos de níquel) conteniendo el ácido en su forma sólida al tanque, ya que la disolución del ácido bórico es lenta. La cantidad a añadir se calcula de la siguiente forma:

$$lb_{borico} = \frac{\Delta[borico] \times V_{tanque}}{16}$$

donde lb_{borico} es la cantidad de ácido bórico a añadir al tanque en libras, $\Delta[borico]$ es la diferencia entre la concentración de ácido bórico en el tanque y la concentración de ácido bórico que se desea, en oz/gal, y V_{tanque} es el volumen o capacidad del tanque en galones.

EJEMPLO: Supóngase que ha encontrado que la concentración de ácido bórico es de 5.0 oz/gal. Esta concentración se encuentra por debajo del intervalo de 6.0 - 6.5 oz/gal y por lo tanto Ud. decide subir la concentración de cloruro de níquel a 6 oz/gal. Su tanque es de 700 gal. Entonces:

$$\Delta[NiCl_2] = 6 - 5 = 1 \text{ oz/gal}$$

$$lb_{NiCl_2} = \frac{1 \times 700}{16} = 43.75 \cdot lb \cong 45 \cdot lb$$

2.4.5 Agua

Muy a menudo será necesario ajustar el nivel del tanque. Para ello, utilizar el agua de arrastre de las piezas niqueladas, ya que ésta contendrá cierta concentración de níquel, el cual puede ser así

recuperado. Unas horas después de ajustar el nivel del tanque, deberá revisarse el pH, ya que la adición puede provocar cambios en el mismo.

2.4.6 Carbonato de Níquel

El carbonato de níquel se utiliza a veces para elevar el pH del baño de níquel. El procedimiento es delicado:

- A. Introduzca 10 - 15 galones de solución del tanque en un recipiente.
 - B. Agregue carbonato de níquel. Agite continuamente.
 - C. Mida el pH de la solución. Debe estar aproximadamente entre 5.5 - 6.0.
 - D. Filtre la solución de regreso al tanque y deje que se mezcle.
 - E. Chequee el pH del tanque.
 - F. Repita el procedimiento hasta que se alcance el pH deseado. **NUNCA AGREGUE CARBONATO DE NIQUEL DIRECTAMENTE AL TANQUE!**
- (3).

2.5 Adiciones de Químicos al Tanque de Cromo

2.5.1 Acido Crómico o Trióxido de Cromo

Se hará una adición de ácido crómico cuando el resultado del análisis indique una concentración menor a la concentración límite inferior del intervalo, es decir, menor a 24 oz/gal. Para calcular cuánto trióxido de cromo se debe agregar, utilice la siguiente formula:

$$lb_{cromo} = \frac{\Delta[cromo] \times V_{tanque}}{16}$$

donde $\Delta[cromo]$ es la diferencia de concentración de ácido crómico que se requiere, V_{tanque} es el volumen del tanque en galones y 16 es el número de onzas en una libra.

2.5.2 Acido Sulfúrico

Se deberá adicionar ácido sulfúrico cuando la relación ácido crómico/sulfato esté muy alta. El ácido sulfúrico eleva la concentración de sulfato en la solución, y por lo tanto hace que disminuya la relación. Asegúrese de utilizar ácido sulfúrico concentrado para este propósito. El cálculo de los galones de ácido sulfúrico a echar es el siguiente:

$$ml_{sulfurico} = \frac{\Delta[sulfato] \times V_{tanque}}{16} \times \frac{454}{1.83}$$

donde $\Delta[sulfato]$ es la diferencia de concentración de ácido sulfúrico que se requiere, en onzas por galón, V_{tanque} es el volumen del tanque en galones, 16 es el número de onzas en una libra, 454 es el número de gramos por libra y 1.83 es la densidad del ácido sulfúrico en gramos por mililitro.

EJEMPLO: Supóngase que Ud. encontró que la relación de ácido crómico con respecto a sulfato es de 280, pero que la concentración de ácido crómico está bien (34 oz/gal). El análisis indica además, que la concentración de sulfato es de 0.10 oz/gal. Por lo tanto, Ud. querrá que la relación baje a un valor dentro del intervalo permisible, por ejemplo, a 275, lo que implica subir la concentración de sulfato:

$$\frac{[acido \cdot cromico]}{[sulfato]} = 275$$

$$\frac{[acido \cdot cromico]}{275} = [sulfato] = \frac{34}{275} = 0.12$$

$$\Delta[sulfato] = 0.12 - 0.10 = 0.02 \text{ oz/gal}$$

$$ml_{sulfurico} = \frac{0.02 \times 660}{16} \times \frac{454}{1.83} = 204.6 \cong 205 \cdot ml$$

El ácido deberá manejarse con sumo cuidado; use siempre protección en los ojos y manos. Debe diluirse antes de echarse al tanque. Nunca debe echarse el agua al ácido al diluirlo, siempre se añade el ácido al agua para evitar accidentes.

2.5.3 Carbonato de Bario

Se añade carbonato de bario al tanque para bajar la concentración de sulfato dentro del mismo y así aumentar la relación ácido crómico/sulfato. El carbonato de bario reacciona con el sulfato, formando un precipitado blanco, sulfato de bario, que se deposita en el

fondo del tanque. Por lo tanto, no deberá hacerse la adición mientras que se está cromando, ya que el precipitado se depositará sobre la pieza y obstruirá la deposición de cromo. Debido a que este sólido es pesado, no tendrá efectos adversos sobre la calidad del cromado mientras el sedimento no ocupe demasiado volumen en el tanque. Por lo tanto, el lodo puede dejarse en el fondo del tanque hasta que se le de mantenimiento al mismo. La forma de calcular la adición de carbonato de bario es la siguiente:

$$\text{lbs de carbonato de bario} = \Delta[\text{sulfato}] \times 700/16 \times 2.4$$

$$lb_{BaCO_3} = \frac{\Delta[\text{sulfato}] \times V_{\text{tanque}}}{16} \times 2.4$$

donde lb_{BaCO_3} son las libras a echar de carbonato de bario, $\Delta[\text{sulfato}]$ es el cambio de concentración requerido de sulfato, V_{tanque} es el volumen del tanque en galones, 16 las onzas por libra y 2.4 la relación entre el peso del carbonato de bario con respecto al sulfato.

EJEMPLO: Supóngase que Ud. encontró que la relación de ácido crómico con respecto a sulfato es de 100, pero que la concentración de ácido crómico está bien (29 oz/gal). El análisis indica además, que la concentración de sulfato es de 0.29 oz/gal. Por lo tanto, Ud. querrá que la relación baje a un valor dentro del intervalo permisible, por ejemplo, a 170, lo que implica bajar la concentración de sulfato:

$$\frac{[\text{acido} \cdot \text{cromico}]}{[\text{sulfato}]} = 170$$

$$\frac{[\text{acido} \cdot \text{cromico}]}{170} = [\text{sulfato}] = \frac{29}{170} = 0.17$$

$$\Delta[\text{sulfato}] = 0.29 - 0.17 = 0.12 \text{ oz/gal}$$

$$lb_{BaCO_3} = \frac{0.29 \times 660}{16} \times 2.4 = 28.71 \cong 29 \cdot lb$$

2.5.4 Catalizador

Se agregan 500 ml de catalizador hasta que s00e nota una mejor recepción de cromo. No agregue más de 2 litros (2000 ml). Si el problema persiste, revise el níquel (3).

2.5.5 Agua

Muy a menudo será necesario ajustar el nivel del tanque. Para ello, utilice el agua de arrastre de las piezas cromadas, ya que ésta contendrá cierta concentración de cromo, el cual puede ser así recuperado.

2.6 Procedimientos de Medición

2.6.1 Densidad del Electrolito de Cromo

La densidad de la solución de ácido crómico se puede determinar con un hidrómetro. La densidad del electrolito de cromo puede correlacionarse con la concentración de ácido crómico por medio de la Tabla No. 6.1 del Apéndice.

1. Tome una muestra de electrolito de cromo en una probeta de 1000 ml.
2. Sumerja el hidrómetro dentro de la solución.
3. Lea la gravedad específica o la densidad Baumé del electrolito sobre la escala del hidrómetro, indicada por el nivel de electrolito.

2.6.2 Medición de pH con Papel Colorimétrico

El papel colorimétrico es una tira de papel en cuya superficie se encuentra impregnado un indicador ácido-base, es decir, una sustancia que cambia de color al cambiar el pH. Una escala apropiada de colores con sus valores de pH correspondientes se encuentra impresa sobre la tira o sobre una tarjeta aparte. El papel colorimétrico tiene un error de ± 0.3 respecto de una medición de pH con un electrodo.

1. Sumerja una tira de papel colorimétrico en la solución.
2. Compare el color de la tira con los colores en la escala.
3. Lea el valor del pH de la escala de colores.

2.6.3 Medición de pH con un Electrodo

La determinación electrométrica del pH depende del hecho de que ciertos electrodos inmersos en una solución ácida adquieren un potencial eléctrico que es función de la actividad o concentración de los iones hidrógeno presentes. Un electrodo de medición de pH consiste en realidad de un par de electrodos. Uno es el electrodo de referencia y su el

segundo es el electrodo indicador y su potencial varía con la acidez de la solución. El electrodo de medición se mantiene sumergido en agua destilada hasta que se realiza la medición. Antes de la medición, debe sumergirse el electrodo en una solución amortiguada de pH conocido para calibrar el medidor (2).

1. Saque el electrodo del agua destilada y sumerja en la solución amortiguada.
2. Ajuste el medidor de voltaje.
3. Sumerja de nuevo en agua destilada.
4. Sumerja el electrodo en la solución de pH desconocido.
5. Lea el pH del medidor.

2.6.4 Medición de la Tensión Superficial

Para esta medición se utiliza un estalagmómetro, que es esencialmente un tubo capilar de vidrio de pequeño orificio (0.5 mm o menos) unido a un bulbo de vidrio.

- A. Asegúrese de que el estalagmómetro está completamente limpio.
- B. Llene el estalagmómetro con agua destilada.
- C. Deje correr el agua destilada entre las dos marcas sobre el tubo y cuente el número de gotas que caen de su extremo.
- D. Llene el estalagmómetro con la muestra de electrolito.
- E. Deje correr el electrolito entre las dos marcas sobre el tubo y cuente el número de gotas que caen de su extremo.
- F. Calcule la tensión superficial del electrolito, en dinas por centímetro, con la siguiente fórmula:

$$\sigma_E = \frac{N_A}{N_E} \times \sigma_A$$

donde σ_E , σ_A son las tensiones superficiales y N_E , N_A el número de gotas del electrolito y el agua, respectivamente. A temperatura ambiente, $\sigma_A = 73$ dinas por centímetro (16).

2.7 Procedimientos de Mantenimiento

2.7.1 Cambio de Cartuchos del Filtro

- A. Abra el filtro.
- B. Saque los cartuchos viejos y limpie todo el interior del filtro.
- C. Coloque los cartuchos como es indicado (consulte el manual de operación del filtro).
- D. Cierre el filtro.
- E. Introduzca 1 lb de tierra de diatomeas en un recipiente.
- F. Agregue 5 galones de agua. Mezcle.
- G. Introduzca la manguera de succión y de descarga de la bomba dentro del recipiente.
- H. Recircule hasta que salga agua libre de tierra de diatomeas de la manguera de descarga. El papel dentro del filtro posee ahora una capa de tierra de diatomeas que ayudarán a la separación de partículas finas del baño de níquel (3).

2.7.2 Tratamiento con Carbón Activado

El tratamiento con carbón activado se usa para limpiar un baño de níquel contaminado con compuestos orgánicos. Este proceso no puede llevarse a cabo en el tanque de níquel. Antes de tratar la solución, se recubre el medio de filtración con tierra de diatomeas.

- A. Siga el procedimiento descrito en la sección 2.6.1.
- B. Caliente el baño a por lo menos 60°C (140°F).
- C. Transfiera el baño a un tanque auxiliar.
- D. Agregue 61 lb de carbón activado por cada 100 galones de solución.
- E. Agite la solución por 4 horas.
- F. Deje que el carbón se sedimente durante una noche.
- G. Filtre la solución de regreso al tanque.
- H. Asegúrese de que la manguera de succión se encuentre cerca de la superficie de la solución. De lo contrario, el filtro se tapaná con las partículas finas de carbón activado.
- I. El fondo de la solución tratada, que estará saturada de partículas de carbón activado, debe tirarse. Aproximadamente 4 a 6% del baño se pierde en cada tratamiento con carbón activado (3).

2.7.3 Electrólisis con Piezas Chatarra

Este procedimiento se aplica generalmente cuando se tiene una cantidad muy alta de abrillantadores en el tanque, o cuando éste presenta contaminación de compuestos orgánicos (jabones, grasas, aceites, etc.) El procedimiento consiste en colocar piezas "chatarra", preferiblemente piezas corrugadas, dentro del tanque y niquelarlas a bajo amperaje durante toda la noche. De esta forma, el exceso de abrillantadores y/o orgánicos se destruye sobre las partes de alta densidad de corriente de las piezas.

Después del tratamiento, debe efectuarse una nueva prueba de celda Hull, con el fin de revisar si el problema ha desaparecido y si es necesario ajustar la concentración de abrillantadores. Si la prueba de la celda indica que han sido destruidos los abrillantadores, se deben hacer las siguientes adiciones a la celda:

1.0 % aditivo reductor de tensión
1.5 % abrillantador primario
0.3 % surfactante

(porcentajes en volumen)

Si después de una segunda prueba de celda todavía hacen falta abrillantadores, haga la siguientes adiciones a la celda:

2.5 % abrillantador primario
0.05% abrillantador secundario
0.5% aditivo reductor de tensión
0.1% surfactante

(porcentajes en volumen)

Luego de haberse corregido el problema en la celda se procede a hacer las adiciones adecuadas al tanque, en la misma proporción en que se hicieron en la celda (3).

3. Programa de Control

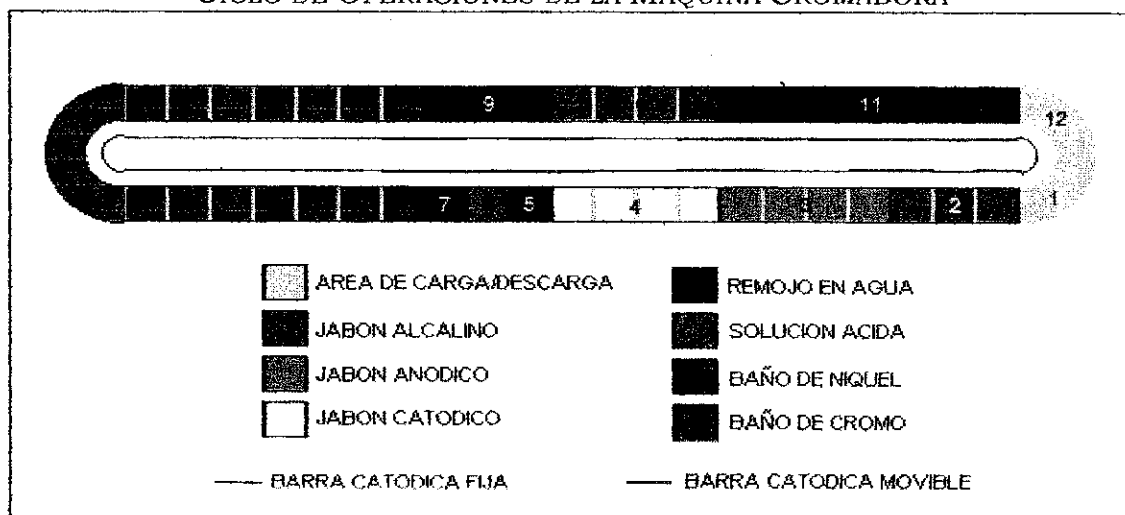
3.1 Especificaciones del Proceso

3.1.1 Máquina Cromadora

El proceso se lleva a cabo en una máquina cromadora automática, tipo retorno en U, de trabajo liviano. La máquina puede cargar 45 ganchos a la vez y tiene un movimiento de 65 ganchos por hora. En ella, se llevan a cabo 9 operaciones automatizadas y 2 manuales. Estas son:

1. Instalación de la pieza en el gancho (manual).
2. Limpieza con jabón alcalino.
3. Limpieza con jabón alcalino conductor, bajo corriente anódica.
4. Limpieza con jabón alcalino conductor, bajo corriente catódica.
5. Remojo en agua.
6. Remojo en solución ácida.
7. Remojo en agua.
8. Niquelado.
9. Remojo en agua.
10. Cromado.
11. Remojo en agua.
12. Remoción de la pieza (manual).

FIGURA NO. 3.1
CICLO DE OPERACIONES DE LA MÁQUINA CROMADORA



La máquina posee un tanque para cada operación excepto las operaciones de remojo en agua después del níquelado y el cromado, que

cuentan con tres y siete tanques de agua, respectivamente. En la siguiente tabla se muestran las capacidades de cada tanque.

TABLA NO. 3.1
VOLÚMENES DE LOS TANQUES Y TIEMPOS DE INMERSIÓN DE LA MÁQUINA CROMADORA

Operación	Volumen del Tanque (gal)	Tiempo de Inmersión (min:s)
jabón alcalino	495	3:15
jabón anódico	660	4:20
jabón catódico	660	4:20
lavado	165	1:05
solución ácida	165	1:05
lavado	165	1:05
niquelado	2300	15:10
lavado 1	165	1:05
lavado 2	165	1:05
lavado 3	165	1:05
cromado	660	4:20
lavado 4	165	1:05
lavado 5	165	1:05
lavado 6	165	1:05
lavado 7	165	1:05

La corriente se distribuye desde los rectificadores a la máquina por medio de conductores de cobre en forma de planchas. El voltaje aplicado a cada operación de electrólisis puede ajustarse desde un panel de control.

Voltaje “de Golpe” en la Operación de Cromado

La máquina cuenta con un voltaje especial o “de golpe” para la operación de cromado. El voltaje se aplica únicamente en el momento en que la pieza se sumerge dentro del electrolito de cromo, y es un voltaje apreciablemente mayor que el voltaje aplicado a la pieza cuando ésta permanece dentro de la solución de ácido crómico. El voltaje “de golpe” se utiliza para depositar sobre las regiones de alta densidad de corriente un grosor de cromo aceptable, sin que estas regiones sufran “quemaduras”. Las quemaduras aparecen en las partes de la pieza en las cuales hay alta densidad de corriente, es decir en los extremos

puntiagudos y en los filos de la pieza, y se manifiestan como manchas negras, grises y blancas.

Los tanques que requieren calentamiento poseen serpentines por los cuales pasa vapor alimentado por una caldera.

3.1.2 Ganchos

Los ganchos utilizados en la máquina son de cobre y sostienen un máximo de tres piezas a la vez.

3.1.3 Formulaciones Químicas

3.1.3.1 ELECTROLITO DE NÍQUEL

El electrolito de níquel consiste en un baño de Watts acompañado de un abrillantador primario, un abrillantador secundario, un reductor de tensión que actúa también como agente nivelador y un surfactante. La composición de todos los aditivos es desconocida y propiedad de la compañía MacDermid International.

3.1.3.2 ELECTROLITO DE CROMO

El electrolito de cromo es una fórmula propiedad de la compañía MacDermid International y consiste en ácido crómico, sulfato y un catalizador fluorinado, que también tiene la función de activar la superficie de níquel y hacerla más receptiva al cromo.

3.2 Objetivos de Operación del Proceso

1. Procesar aproximadamente 130 piezas en una hora, lo que representa una capacidad de aproximadamente 1100 pies cuadrados de área por hora.
2. Trabajar ocho horas al día y cinco días a la semana.

3.3 Objetivos del Sistema de Control

3.3.1 Objetivo General

Asegurar que el producto sea de una calidad comparable a la establecida en el estándar ASTM B 456-79, condición de servicio SC2, clasificación No. Fe/Ni20b Cr r, considerando las horas de trabajo y el número de piezas procesadas por hora.

3.3.2 Objetivos Específicos

1. Mantener las corrientes aplicadas a los tanques de acuerdo a la siguiente tabla:

TABLA NO. 3.2
INTERVALOS DE CORRIENTE PARA EL PROCESO

Paso	Intervalo de Corriente (A)
limpieza anódica	500-1000
limpieza catódica	500-1000
electrolito de níquel	1000-1500
electrolito de cromo	500-1000

2. Mantener las temperaturas de los tanques de acuerdo a la siguiente tabla:

TABLA NO. 3.3
INTERVALOS DE TEMPERATURA PARA EL PROCESO

Paso	Intervalo de Temperatura (°C)
jabón alcalino	70 - 90
jabón anódico	70 - 90
jabón catódico	70 - 90
electrolito de níquel	50 - 70
electrolito de cromo	40 - 50

3. Mantener el pH dentro del intervalo de 3.8 a 4.5.

4. Mantener la composición del electrolito de níquel de acuerdo con la siguiente tabla:

TABLA NO. 3.4
COMPOSICIÓN DEL ELECTROLITO DE NÍQUEL

Componente	Intervalo de Concentración (oz/gal)
cloruro de níquel	10 - 12
sulfato de níquel	40 - 50
ácido bórico	5.5 - 6.5

5. Mantener la composición del electrolito de cromo de acuerdo a la siguiente tabla:

TABLA NO. 3.5
COMPOSICIÓN DEL ELECTROLITO DE CROMO

Componente	Intervalo de Concentración (oz/gal)
ácido crómico	24 - 32
Sulfato	0.08 - 0.12

6. Mantener la razón de ácido crómico respecto del sulfato entre 250:1 y 300:1.
7. Mantener las concentraciones de abrillantadores y aditivos en el electrolito de níquel tal que se obtenga un brillo y una ductilidad satisfactorios en el recubrimiento de níquel.

3.4 Restricciones del Proceso

Debido a que el proceso posee un alto grado de automatización, se tienen ciertas restricciones sobre varias de las variables a controlar. Una de estas variables es el tiempo de inmersión, el cual está fijado por la velocidad de traslación de los ganchos de la máquina.

El volumen de los tanques constituye otra restricción al proceso, ya que éste sólo permite la inmersión de piezas que quepan dentro de los tanques, lo cual se traduce como una restricción al área a tratar por gancho. El área se ve limitada por otros factores, como la intensidad de la corriente que pasa por el

electrolito, regida a su vez por la conductividad de la solución y el voltaje aplicado, y el grosor requerido.

Tomando en cuenta los objetivos trazados para el sistema de control y con base en la observación de la conductividad de los electrolitos de níquel y de cromo y de los tiempos de inmersión, se pueden establecer las siguientes áreas máximas que puede transportar cada gancho:

$$A_{\max, Ni} = 16.7 \text{ pie}^2$$

$$A_{\max, Cr} = 32.7 \text{ pie}^2$$

Por lo tanto, para obtener piezas cromadas cuyos grosores de níquel y cromo están en concordancia con los objetivos de calidad del producto, se deberá procesar un área menor a 16.7 pie² por gancho, lo que equivale a dos piezas por gancho.

3.5 Problemas Relacionados con la Ausencia de Control

Se han identificado los siguientes problemas y sus probables causas:

- *Quemaduras en las piezas.* Las quemaduras se ocasionan generalmente debido a una relación inadecuada entre el ácido crómico y el catalizador en el electrolito de cromo, o por aplicación de una corriente o voltaje muy grande a la solución.
- *Regiones exentas de cromo.* La aparición de regiones libres de cromo sobre la pieza se debe a una relación inadecuada de los componentes del electrolito de cromo y a una receptividad baja del substrato de níquel respecto del cromo.
- *Apariencia opaca de níquel.* La apariencia opaca de níquel indica la falta parcial o total de abrillantadores en el electrolito de níquel.
- *Picaduras sobre el recubrimiento.* Las picaduras se originan debido a condiciones desfavorables del electrolito de níquel, especialmente debido a un pH muy bajo.
- *Aspereza del recubrimiento.* La aspereza es causada por la presencia de partículas insolubles dentro del baño de níquel. La solución de este problema reside en el mantenimiento continuo del filtro y de la selección adecuada de los ánodos de níquel.
- *Poca adherencia del recubrimiento.* La mala adherencia se debe a un recubrimiento de níquel pasivo y a la contaminación de los tanques con sustancias orgánicas.

3.6 Métodos de Control

3.6.1 Corriente Aplicada a los Electrolitos

La corriente eléctrica que pasa a través de los electrolitos (jabón anódico, jabón catódico, solución de níquel y solución de ácido crómico) depende de tres factores: la conductividad del electrolito, el área de la pieza y el voltaje aplicado. El primero depende de la composición del electrolito, el segundo es más o menos constante. Es el tercer factor, el voltaje, el que se usa para mantener la intensidad de la corriente eléctrica dentro de los límites propuestos. El voltaje óptimo para cada tanque ha salido de la observación frecuente del voltaje y de la corriente. El voltaje óptimo se muestra en la siguiente tabla.

TABLA NO. 3.6
VOLTAJES OPTIMOS PARA CADA TANQUE

Electrolito	Tensión (V)	Corriente (A)
jabón anódico	6.0	500-1000
jabón catódico	6.0	500-1000
Níquel	6.0	1000-1500
Cromo	5.0	500-1000

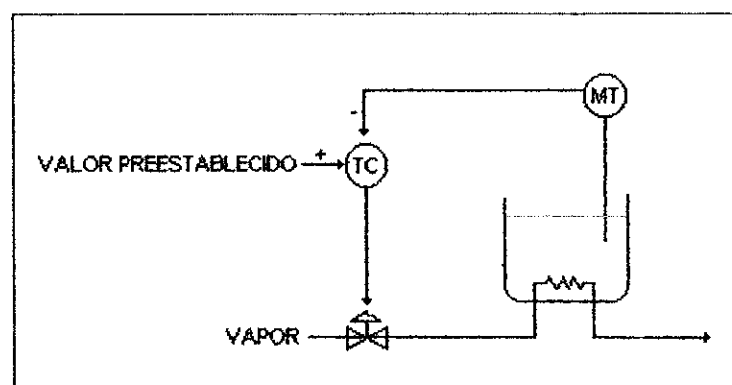
El ajuste de la tensión eléctrica aplicada a los electrolitos se realiza en el panel de control de la máquina automática. El voltaje varía únicamente cuando cambia la conductividad del electrolito, por lo cual no necesita un control demasiado frecuente. Así, el control del voltaje consiste en que el operador o el inspector revise su valor y haga un ajuste con el dial si es necesario. El inspector podrá notar un cambio en el amperímetro aún cuando el voltaje permanece constante. Si el amperaje llega a ser menor que el amperaje mínimo, la conductividad de la solución es baja y tendrá que corregirse. El operador puede, en este caso, subir la tensión arriba del óptimo con tal de reestablecer la intensidad de la corriente. Sin embargo, después de corregirse el problema de conductividad, el voltaje debe regresarse a su estado original para evitar una sobrecorriente que puede causar quemaduras en las piezas.

3.6.2 Temperatura

La temperatura es un factor muy importante para el niquelado y el cromado, ya que la conductividad del electrolito aumenta con ella. Si se mantienen los tanques de electrodeposición a las temperaturas recomendadas, se eliminan problemas frecuentes de quemaduras y falta de brillo.

Ya que la temperatura es un factor crítico para la calidad del recubrimiento, es preferible controlarla automáticamente en los tanques de niquelado y cromado. Ya que ambos procesos pueden operar dentro de un intervalo de temperaturas el control automático de la temperatura no tiene que ser muy estricto. Por lo tanto, basta con un controlador que encienda y apague el flujo de vapor a través del serpentín, es decir un controlador "on/off" (TC), el cual reciba información del instrumento de medición de la temperatura (MT) y la compare con un valor preestablecido de temperatura que puede ser de 60°C para el tanque de níquel y de 45°C para el tanque de cromo, como se muestra en la figura. El controlador emite una señal de acuerdo con el signo de la resta entre el valor preestablecido de temperatura y la medición: cuando el resultado de la resta es positivo, la válvula de control deberá permanecer abierta, mientras que al tener la resta un signo negativo, la temperatura del tanque habrá superado la preestablecida y la válvula de control deberá cerrarse e interrumpir el flujo de vapor hacia el serpentín.

FIGURA NO. 3.2
CONTROL DE TEMPERATURA PARA LOS TANQUES DE CROMADO Y NIQUELADO



Si no se tiene un sistema de control automático, la regulación de la temperatura deberá ser por parte del operador, por medio de un termómetro y la acción correspondiente de cerrar o abrir la válvula de entrada de vapor. De la misma forma puede controlarse la temperatura

de los tanques de limpieza. El operador deberá conocer la capacitancia de la temperatura correspondiente a cada tanque con la experiencia.

3.6.3 Concentración de Jabones y Solución Ácida

La concentración de las soluciones de limpieza y remoción de óxidos deberán ser controladas mediante los análisis volumétricos descritos en la Sección 2.1. El mantenimiento de las concentraciones alrededor de un valor establecido no es tan importante como en los electrolitos de níquel y cromo. Sin embargo, la efectividad del ciclo de limpieza dependerá de qué tan alta es la concentración.

TABLA NO.3.7
CONCENTRACIÓN RECOMENDADA PARA JABONES Y SOLUCIÓN ÁCIDA

Sustancia	Concentración (oz/gal)
jabón alcalino	16
jabón anódico	16
jabón catódico	16
Solución ácida	32

3.6.4 pH del Electrolito de Níquel

El control del pH es crítico en el proceso de niquelado. El pH del tanque de níquel siempre está en aumento, ya que la producción de ácido sulfúrico sobre el cátodo no es suficiente como para mantener la acidez de la solución. El pH se regula agregando ácido sulfúrico para elevar la acidez o añadiendo carbonato de níquel para bajarla. Sin embargo, el uso de carbonato de níquel rara vez es necesario, ya que el comportamiento natural del pH del baño de níquel es una tendencia al alza. El control consiste entonces en una medición del pH y luego la acción correspondiente para subir o bajar el pH. Los procedimientos para añadir los reactivos al tanque de níquel se encuentran en la sección 2. La medición del pH se hará mediante un electrodo o mediante papel de pH colorimétrico.

3.6.5 Composición del Electrolito de Níquel

El control del electrolito de níquel se divide en el control de sus cuatro componentes principales: níquel metálico, cloruro de níquel, sulfato de

níquel y ácido bórico. Los procedimientos para determinar la concentración de cada uno de éstos se describen en la Sección 2.1.4.

El control de la concentración consiste en realizar las pruebas para cada componente del electrolito y luego ajustarlas como sea necesario, mediante la adición de las sales de níquel correspondientes o de ácido bórico. Si se tiene un exceso de algún componente, la acción correspondiente es esperar hasta la siguiente medición.

3.6.6 Composición del Electrolito de Cromo

El control de la composición del electrolito de cromo se efectúa de la misma forma que el del electrolito de níquel, con la única diferencia de que los componentes a controlar son únicamente dos: ácido crómico y sulfato. Después de hacer las pruebas respectivas, la composición se ajusta agregando trióxido de cromo para aumentar la concentración de ácido crómico, ácido sulfúrico para aumentar la cantidad de sulfato, o carbonato de bario para disminuir la cantidad de sulfato, como sea el caso. Si se tiene un exceso de ácido crómico, el inspector deberá esperar hasta que la concentración disminuya por sí sola. Un exceso de ácido crómico no tiene efectos desventajosos sobre la calidad del recubrimiento.

3.6.7 Relación Acido Crómico - Sulfato en el Electrolito de Cromo

Es de suma importancia en el proceso de cromado que se mantenga la relación de la concentración de ácido crómico con la concentración de sulfato más o menos constante dentro de un intervalo.

$$\frac{[\text{acido crómico}]}{[\text{sulfato}]} = \text{constante}$$

Por lo tanto, las concentraciones de ácido crómico y de sulfato deben ajustarse de tal forma que satisfagan esta relación. El fabricante de las sales de cromo recomienda que esta constante se mantenga entre 250 y 300. Si la relación está muy baja (alto contenido de sulfato), la cobertura es baja. El cromo no se depositará en las esquinas. Si la relación está muy alta (bajo contenido de sulfato), entonces las orillas, puntas y otras áreas de alta densidad de corriente se quemarán y en un caso extremo no habrá deposición alguna de cromo.

El control de la relación entre ácido crómico y sulfato en el electrolito de cromo se logra manteniendo las concentraciones de ácido crómico y sulfato dentro de los intervalos de concentración especificados. Sin

embargo, es de mayor importancia mantener la relación que las concentraciones de los componentes dentro del intervalo especificado, por lo que el inspector deberá tener como prioridad el control de la relación ácido crómico/sulfato sobre el control de los componentes individuales.

3.6.8 Concentración de Abrillantadores y Aditivos en el Electrolito de Níquel

3.6.8.1 ABRILLANTADORES

Debido a que la concentración de abrillantadores es difícil de determinar, su control se restringe únicamente al control visual de las piezas y de la placa resultante de una prueba de celda Hull. Así, si la placa de la prueba de celda sale opaca y carente de brillo, el inspector sabrá que la concentración de abrillantadores es escasa y deberá agregar abrillantadores al tanque de níquel. El procedimiento detallado se encuentra en la Sección 2.2.

3.6.8.2 AGENTE REDUCTOR DE TENSIÓN

A diferencia de los abrillantadores, el agente reductor de tensión puede determinarse mediante un análisis volumétrico, listado en la Sección 2.1.4. El agente reductor de tensión también actúa como agente nivelador, por lo que es muy importante que se encuentre en cantidad suficiente en el electrolito de níquel. El fabricante recomienda que se mantenga a un mínimo de 2% de concentración. Un exceso de agente reductor de tensión no es perjudicial.

3.6.8.3 SURFACTANTE

Debido a que la acción del surfactante sobre el electrolito de níquel es la de reducir la tensión superficial del mismo, el control de la cantidad de surfactante se lleva a cabo mediante la medición de esta propiedad. En la Sección 2.5.4 se describe el procedimiento correspondiente. La tensión superficial deberá mantenerse alrededor de 40 a 42 dinas por centímetro.

3.6.9 Apariencia del Recubrimiento

La mejor forma de controlar la apariencia del recubrimiento es por medio de la prueba de celda Hull. La placa niquelada y/o cromada en la celda Hull se examina minuciosamente, de preferencia con una lupa en buena luz, y se evalúa la apariencia de acuerdo a parámetros establecidos por la experiencia.

La utilidad de la prueba de celda no se restringe a la evaluación de la apariencia. Otras observaciones durante la prueba pueden hacerse para buscar indicios del estado de los electrolitos en general. Las siguientes tablas muestran la solución de problemas frecuentes en el proceso mediante la prueba de celda Hull.

TABLA NO. 3.8
OBSERVACIONES FRECUENTES EN LA PRUEBA DE CELDA HULL PARA NIQUEL

Problema	Probable Causa	Solución
Apariencia amarillenta	pH muy alto	revise y ajuste el pH
Deposición de níquel irregular	a) pH muy alto o concentración de ácido bórico muy baja b) concentración de abrillantador secundario muy alta o contaminación de orgánicos	a) revise el pH y la concentración de ácido bórico b) véase el procedimiento de electrólisis con piezas chatarra (Sección 2.6.3)
Deposición de níquel quebradiza (la placa hace ruido al doblarse y es poco dúctil)	c) pH muy bajo d) concentración de agente aliviador de tensión muy baja, concentración de abrillantador secundario muy alta o contaminación de orgánicos	c) revise el pH y la concentración de reductor de tensión d) véase el procedimiento de electrólisis con piezas chatarra (Sección 2.6.3)
Efervescencia sobre la placa	pH muy bajo	revise y ajuste el pH

Apariencia lechosa	a) pH muy bajo b) concentración de surfactante muy alta c) contaminación con orgánicos	revise el pH; si éste está bien, véase el procedimiento de electrólisis con piezas chatarra (Sección 2.6.3)
Deposición de níquel quemada (generalmente a altas densidades de corriente)	d) concentración de níquel muy baja e) contaminación de hierro	d) revise la concentración de níquel e) véase el tratamiento con carbón activado (Sección 2.6.2)
Precipitación de un sólido blanco sobre la placa	pH muy alto o concentración de ácido bórico muy baja	revise y ajuste el pH y/o la concentración de ácido bórico
Picaduras	a) concentración de ácido bórico muy baja b) concentración de surfactante muy baja	a) revise la concentración de ácido bórico b) añada 0.25% en volumen de surfactante a la celda y repita la prueba
Efervescencia en el ánodo	baja concentración de cloruro de níquel	revise y ajuste la concentración de cloruro de níquel
mucho voltaje para obtener 1 Amperio	baja concentración de cloruro de níquel	revise y ajuste la concentración de cloruro de níquel
Deposición de níquel opaca	baja concentración de abrillantadores primario y/o secundario	añada 1% de abrillantador primario y 0.025% de abrillantador secundario en volumen a la celda; repita la prueba
Deposición semi-brillante	baja concentración de aditivo reductor de tensión	añada 2% en volumen de aditivo reductor de tensión a la celda; repita la prueba

Deposición veteadas	contaminación de orgánicos	véase el procedimiento de electrólisis con piezas chatarra (Sección 2.6.3)
Manchas	<ul style="list-style-type: none"> a) pH muy alto b) concentración de ácido bórico muy baja c) concentración de abrillantadores muy alta d) contaminación de orgánicos 	revise el pH y la concentración de ácido bórico; si ambos están normales, véase el procedimiento de electrólisis con piezas chatarra (Sección 2.6.3)
color oscuro a bajas densidades de corriente	presencia de impurezas	véase el procedimiento de electrólisis con piezas chatarra (Sección 2.6.3)

TABLA NO. 3.9
OBSERVACIONES FRECUENTES EN LA PRUEBA DE CELDA HULL PARA CROMO

Problema	Probable Causa	Solución
cobertura menor a 65 mm ²	a) la relación ácido crómico/sulfato está muy baja b) el níquel está pasivo	a) revise y ajuste las concentraciones de ácido crómico y sulfato b) reduzca el pH del níquel, la concentración de abrillantadores y agregue 1 litro de catalizador al tanque de cromo; si el problema persiste, trate el baño de níquel con carbón activado (vea Sección 2.6.2)
manchas cafés o multicolores en la frontera cromo-níquel	presencia de cromo trivalente	véase el procedimiento de electrólisis con piezas chatarra (Sección 2.6.3)
quemaduras en el área de alta densidad de corriente	La relación ácido crómico/sulfato está muy alta	revise y ajuste las concentraciones de ácido crómico y sulfato
aparición lechosa	la relación ácido crómico/sulfato está muy baja	revise y ajuste las concentraciones de ácido crómico y sulfato

² La deposición de cromo sobre la placa (que se percibe con un color azulado en comparación con el aspecto amarillento del níquel) llega hasta aproximadamente ½ a ¼ de pulgada desde el borde derecho. Una cobertura excepcional puede llegar a ser de hasta 72 mm desde el borde izquierdo de la placa.

<p>apariencia blanca opaca, manchas blancas irregulares</p>	<p>a) la relación ácido crómico/sulfato está sumamente alta b) níquel en estado pasivo c) interrupción de la corriente</p>	<p>a) revise y ajuste las concentraciones de ácido crómico y sulfato b) reduzca el pH del níquel, la concentración de abrillantadores y agregue 1 litro de catalizador al tanque de cromo; si el problema persiste, trate el baño de níquel con carbón activado (vea Sección 2.6.2)</p>
---	--	--

3.7 Cuadro Sinóptico del Programa de Control

TABLA NO. 3.10
CUADRO SINÓPTICO DEL PROGRAMA DE CONTROL

Variable	Valor Pre-establecido	Instrumento de Medición	Método de Control	Frecuencia
Voltaje de limpieza anódica	6 V	Voltámetro	panel de control	3 x día
Corriente de limpieza catódica	6 V	Voltámetro	panel de control	3 x día
Corriente de niquelado	6 V	Voltámetro	panel de control	3 x día
Corriente de cromado	5 V	Voltámetro	panel de control	3 x día
Temperatura de limpieza alcalina	80°C	Termocopla o termómetro	válvula de alimentación de vapor	1 x día (automático) 3 x día (manual)
Temperatura de limpieza anódica	80°C	Termocopla o termómetro	válvula de alimentación de vapor	1 x día (automático) 3 x día (manual)
Temperatura de limpieza catódica	80°C	Termocopla o termómetro	válvula de alimentación de vapor	1 x día (automático) 3 x día (manual)
Temperatura de niquelado	60°C	Termocopla o termómetro	válvula de alimentación de vapor	1 x día (automático) 3 x día (manual)
Temperatura de cromado	45°C	Termocopla o termómetro	válvula de alimentación de vapor	1 x día (automático) 3 x día (manual)
pH del electrolito de níquel	4.0	Electrodo o papel colorimétrico	adición de ácido sulfúrico	3 x día
Concentración de jabón alcalino	16 oz/gal	Titulación con ácido clorhídrico 0.5 N	adición de jabón alcalino	1 x 2 semanas
Concentración de jabón anódico	16 oz/gal	Titulación con ácido clorhídrico 0.5 N	adición de jabón anódico	1 x semana

Concentración de jabón catódico	16 oz/gal	Titulación con ácido clorhídrico 0.5 N	adición de jabón catódico	1 x semana
Concentración de solución ácida	32 oz/gal	Titulación con hidróxido de sodio 0.5 N	adición de sal ácida	1 x 2 semanas
Concentración de níquel metálico	12 oz/gal	Titulación con EDTA	adición de cloruro de níquel, sulfato de níquel y/o níquel anódico	3 x semana
Concentración de cloruro de níquel	12 oz/gal	Titulación con nitrato de plata	adición de cloruro de níquel	3 x semana
Concentración de sulfato de níquel	40 oz/gal		adición de sulfato de níquel	3 x semana
Concentración de ácido bórico	6 oz/gal	Titulación con hidróxido de sodio	adición de ácido bórico	3 x semana
Concentración de ácido crómico	28 oz/gal	Titulación con tiosulfato de sodio	adición de trióxido de cromo	1 x día
Concentración de sulfato	0.1 oz/gal	Centrifugación en tubos Kocour	adición de ácido sulfúrico o carbonato de bario	1 x día
Relación ácido crómico-sulfato	270:1		adición de ácido sulfúrico o carbonato de bario y/o ácido sulfúrico	1 x día
Concentración de abrillantadores		Prueba de celda Hull	adición de abrillantadores	1 x día
Concentración de agente reductor de tensión	2 % (v/v)	Titulación con tiosulfato de sodio	adición de agente reductor de tensión	1 x día
Concentración de surfactante	41 dinas/cm	Estalagmómetro	adición de surfactante	1 x día
aparición		Prueba de celda Hull	todos los anteriores	1 x día

4. Programa de Mantenimiento

4.1 Ciclo de Limpieza

El mantenimiento de los tanques de jabón alcalino, jabón anódico, jabón catódico y solución ácida es muy importante para que el ciclo de limpieza pueda desempeñarse eficientemente durante todo el tiempo en el que opera la máquina cromadora. A diferencia de los electrolitos de níquel y de cromo, las soluciones del ciclo de limpieza deben reemplazarse periódicamente, ya que en ellas se acumulan grasas, aceites, óxidos, residuos metálicos y residuos de los compuestos de pulido. Por lo tanto llega un punto en el cual debe tirarse todo el contenido del tanque y prepararse una solución nueva.

Además de la regeneración periódica de las soluciones de limpieza, se deben seguir las siguientes prácticas de mantenimiento en el ciclo de limpieza:

1. La sedimentación y remoción periódica de lodos y partículas metálicas en los tanques.
2. La remoción periódica de aceites por medio del desnatado periódico o continuo.
3. El control de la concentración del jabón o ácido como se especificó en la Sección 3.6.3.
4. La limpieza periódica de las barras conductoras de electricidad, los electrodos, los serpentines y los tubos de ventilación.

La vida útil de los jabones y la sal ácida dependen de la formulación de cada jabón, la naturaleza y cantidad de suciedad que traen las piezas, la cantidad de solución limpiadora que se arrastra al siguiente paso, y las prácticas de mantenimiento del ciclo de limpieza. Por lo tanto, es imposible predecir la vida útil de las soluciones. El período útil se establece por medio de la experiencia. Se recomienda comenzar con un período de 3 meses para el jabón alcalino, dos semanas para los jabones electrolíticos y 1 mes para la solución ácida.

Se puede utilizar una prueba basada en la experiencia para determinar la capacidad limpiadora de una solución. La prueba consiste en examinar una pieza que sale del ciclo de limpieza. En la última etapa de remojo, la pieza debe emerger del agua completamente cubierta de agua, sin tener regiones "secas" o carentes de agua. La prueba se basa en la habilidad que tiene una pieza limpia de retener una capa continua de agua sobre su superficie metálica.

4.2 Niquelado

4.2.1.1 FILTRO

La filtración continua de la solución de níquel asegura que la deposición de níquel no sea áspera. La aspereza del níquel se da cuando existen partículas sólidas dentro del electrolito, las cuales se depositan con el níquel. Las partículas pueden provenir del aire, como polvo, o del arrastre desde otro tanque, como contaminantes, o pueden provenir de los ánodos de níquel, como pedazos de níquel no disueltos. Se tiene como regla general que la razón de filtración debe ser como mínimo un volumen del tanque por hora.

Es recomendable utilizar tierra de diatomeas en el filtro. La tierra de diatomeas es un material sólido que se usa para formar un residuo poroso incompresible y permeable sobre el "papel" o medio de filtración, con el fin de extender su vida útil. También se utiliza el carbón activado conjuntamente con la tierra de diatomeas para purificar el electrolito.

Debido a que en el presente caso se tiene mucha contaminación de partículas sólidas en el aire, se deberán cambiar los cartuchos del filtro cada dos semanas, siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 2.6.1.

4.2.1.2 ANODOS DE NÍQUEL

Un ánodo de níquel consiste en una canasta de titanio rellena de esferas, cuadros o discos de níquel al 99%. La canasta va cubierta con una bolsa que puede ser de franela, dynel o polipropileno. Las bolsas deben tratarse antes de meterse al baño. La inspección de las canastas deberá realizarse cada semana. El ánodo se saca lentamente de la solución y luego de la bolsa. Su superficie debe estar limpia y libre de manchas cafés. En caso de estar sucio o manchado el níquel, limpiar la superficie. Las bolsas que contienen el ánodo deberán inspeccionarse y lavarse una vez al mes, ya que el lodo que se acumula en sus paredes obstruye el paso libre de los iones de níquel desde el ánodo al cátodo.

Las bolsas pueden limpiarse para su rehabilitación sumergiéndolas en ácido clorhídrico al 10 %. Cuando se instalan bolsas nuevas, éstas deben sumergirse previamente en una solución de ácido sulfúrico al 5% por 4 a 6 horas y luego lavarse en agua.

4.3 Cromado

La inspección de los ánodos deberá realizarse aproximadamente cada mes. Una revisión breve de los ánodos consiste en cromar una pieza de acero a 6 voltios e inspeccionar los ánodos. Un ánodo en buen estado y con un buen contacto tendrá una copiosa efervescencia a su alrededor. Además, habrá que revisar la superficie de los ánodos. El ánodo se saca lentamente de la solución. La superficie debe estar limpia y libre de manchas amarillas. Las manchas amarillas son cromato de plomo depositadas sobre el ánodo. El cromato de plomo no conduce la corriente y es por lo tanto un aislante sobre el ánodo que interrumpe el paso de la corriente hacia la solución. En caso de estar sucio o manchado un ánodo, limpie bien su superficie con un cepillo de alambre.

4.4 Agua de Remojo

El rebosamiento del agua en el tanque de remojo deberá ser suficiente como para asegurar un grado de contaminación bajo en la solución de remojo y así evitar problemas de contaminación en el paso siguiente debidos al arrastre de contaminantes en el agua.

Se recomienda tener un límite de concentración máxima en el agua de remojo. Si la concentración del agua de remojo supera la concentración límite establecida, deberá reemplazarse el agua. La concentración límite deberá fijarse por experiencia, es decir, mediante la medición periódica de la concentración de contaminante en el agua de remojo por los mismos métodos de análisis de jabones y electrolitos. Si al inicio no se tiene un criterio para determinar la vida útil del agua de remojo, puede utilizarse una concentración del 1 % de la concentración del tanque anterior como concentración máxima en el agua.

4.5 Tanques y Equipo Auxiliar

La vida de los electrolitos dependerá de las prácticas adecuadas de mantenimiento de los tanques y el equipo auxiliar. Estas prácticas incluyen:

1. La sedimentación y remoción periódica de lodos y partículas metálicas en los tanques.
2. El control de la concentración de los electrolitos como se especificó en la Sección 3.6.

3. La limpieza periódica de las barras conductoras de electricidad, los electrodos, los serpentines y los tubos de ventilación.

4.6 Ganchos

Los ganchos deben revisarse continuamente. Deben cambiarse los contactos desgastados, debe quitarse el metal depositado sobre los ganchos y repararse la capa de recubrimiento aislante.

4.7 Cuadro Sinóptico del Programa de Mantenimiento

TABLA NO. 4.1
CUADRO SINÓPTICO DEL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

Práctica de Mantenimiento	Frecuencia
cambio de jabón alcalino	1 x 3 meses
cambio de jabón anódico	1 x 2 semanas
cambio de jabón catódico	1 x 2 semanas
cambio de solución ácida	1 x mes
desnatado de tanques de limpieza	1 x día
Inspección y limpieza de equipos auxiliares	1 x 2 semanas
cambio del medio de filtración	1 x 2 semanas
Inspección de ánodos de níquel	1 x semana
Inspección de bolsas de ánodos de níquel	1 x mes
Inspección de ánodos de plomo	1 x mes
Inspección y mantenimiento de ganchos	1 x semana

5. Administración de Datos

Un programa de control y mantenimiento que sea efectivo necesariamente deberá incluir una documentación detallada de todos los resultados de pruebas y mediciones, de todas las observaciones, en fin, de toda la información proveniente del proceso bajo control. Para ello, es necesario realizar una eficiente administración de datos.

5.1 Recaudación de Datos

5.1.1 Hojas de Control

Existen dos tipos de datos que pueden ser recolectados en un proceso: datos que son variables y datos que son atributos. Los primeros se obtienen de mediciones y tienen la propiedad de que pueden asumir cualquier valor. Los segundos son el resultado de un proceso de conteo, y por lo tanto pueden asumir sólo valores discretos. Para ambos tipos de información, las hojas de colección de datos u hojas de control son diferentes, así como el subsecuente análisis estadístico.

Las hojas de control facilitan la colección de los datos y el control del proceso, ya que ellas tienen información relevante al proceso que puede ser consultada en el momento en que se lleva a cabo una medición. Esta información, al compararse con la medición recién hecha, puede llevar al inspector a una decisión de control instantánea. La segunda función inherente a una hoja de control es la de constituir una historia del comportamiento de las variables a través del tiempo. Esta historia puede servir de referencia para la búsqueda y análisis de las causas de los problemas en la línea, como se verá en la Sección 5.2.

5.1.1.1 VARIABLES

Todos los resultados de pruebas y mediciones deberán ser anotados en hojas de control. Una hoja de control debe indicar la fecha y hora de la prueba o medición, la variable medida y su valor, y también la forma en que se convierte la medición en otro parámetro. En el Apéndice se encuentran todas las hojas de control necesarias para la recaudación de datos variables del sistema de control.

5.1.1.2 ATRIBUTOS

Las hojas de control de atributos son diferentes a las de colección de variables, debido a que deben contener más información respecto a los defectos y problemas comúnmente encontrados en el proceso, además de la información mencionada para cualquier hoja de control.

La única prueba del sistema de control que provee atributos es la prueba de celda. El objetivo de la hoja de control en este caso es la de recaudar los atributos de la apariencia de la placa niquelada y/o cromada en la celda.

5.1.2 Historia de Soluciones

Los resultados de pruebas y mediciones no son los únicos datos a recaudar. Se deberá tener una historia completa de todas las soluciones en la máquina. La historia debe incluir la fecha y la anotación detallada de la operación llevada a cabo en la solución. Para ello, es útil llevar una bitácora para cada solución por separado, en la cual se anote la cantidad añadida, la fecha en la cual se cambió de solución, fecha de mantenimiento, etc., como se muestra en la Tabla 6.6. del Apéndice.

5.1.3 Conteo de Defectos en las Piezas

Con el fin de tener un control de calidad en el proceso, es menester tener un conteo del número de piezas que salen defectuosas por día o por lote. Para ello, se requiere una hoja de control parecida a la hoja de colección de atributos para la prueba de celda, en la cual se anoten los detalles en cuanto a la localización, naturaleza y frecuencia de los defectos en la superficie de la pieza.

5.2 Análisis de Datos Mediante Control Estadístico de Procesos

Los datos recaudados pueden ser analizados para resolver problemas de control o mejorar el control del proceso. Una herramienta poderosa para analizar los datos provenientes de un proceso es la estadística. Por medio de métodos de control estadístico de procesos (CEP³) es posible determinar si el ciclo de limpieza, el proceso de niquelado o el proceso de cromado están bajo control. La implementación del CEP al control de las concentraciones de los electrolitos consiste en la elaboración de dos tipos de gráficas de control a partir de los datos variables coleccionados.

5.2.1 Gráficas de Control

Una gráfica de control es una representación gráfica de una medida de una característica variable (peso, longitud, temperatura, etc.) a través del tiempo. La medición de la característica se traza sobre la abscisa y el número de muestra se traza sobre la ordenada, como se muestra en la Figura 5.1. Las gráficas de control del CEP se basan en el hecho de que en un proceso que está bajo control, las mediciones se comportan de acuerdo a una distribución normal o gaussiana, y cualquier desviación de este comportamiento es una indicación de un problema en el proceso. Como se observa en la Figura 5.2, todas las gráficas de control poseen una línea central que indica la media, un límite de control superior (LCS) y un límite de control inferior (LCI), los cuales indican una desviación de tres veces la desviación estándar ($\pm 3\sigma$) desde la media.

El objetivo básico de una gráfica de control es el de reducir la variación en la característica que se ha medido, proveyendo la información necesaria sobre las causas de la variación tal que éstas puedan ser reducidas o eliminadas. Existen muchos tipos de gráficas de control. Para el control del proceso de cromado decorativo, son útiles dos gráficas de control diferentes: la gráfica de intervalo movable y la gráfica de mediciones individuales. Asimismo, se usa la gráfica de media movable en casos en los que se descubre que las mediciones no presentan una distribución normal.

³ SPC, statistical process control, en inglés.

5.2.2 Gráfica de Control de Intervalo Movable

Una gráfica de control de intervalo movable para la concentración de los electrolitos se construye de la siguiente forma:

1. Se forman dos grupos de mediciones de concentración, como se muestra en la Tabla 5.1. El primer grupo o columna consta de todas las mediciones tal como son. El segundo grupo consta de las mediciones comenzando por la segunda medición –la primera se ha obviado. Si n es el número de mediciones, se tienen así $n-1$ parejas de mediciones.
2. Se calcula el tamaño del intervalo R de cada pareja de mediciones (esto es: el valor más alto menos el valor más pequeño).
3. Se calcula la media aritmética de los tamaños de intervalo, que denominaremos R -Barra.
4. Se calcula el límite de control superior del tamaño de intervalo (LCS_R) mediante la siguiente fórmula:

$$LCS_R = 3.267 \cdot \bar{R}$$

5. El límite de control inferior del tamaño de intervalo siempre es igual a cero.

$$LCS_R = 0$$

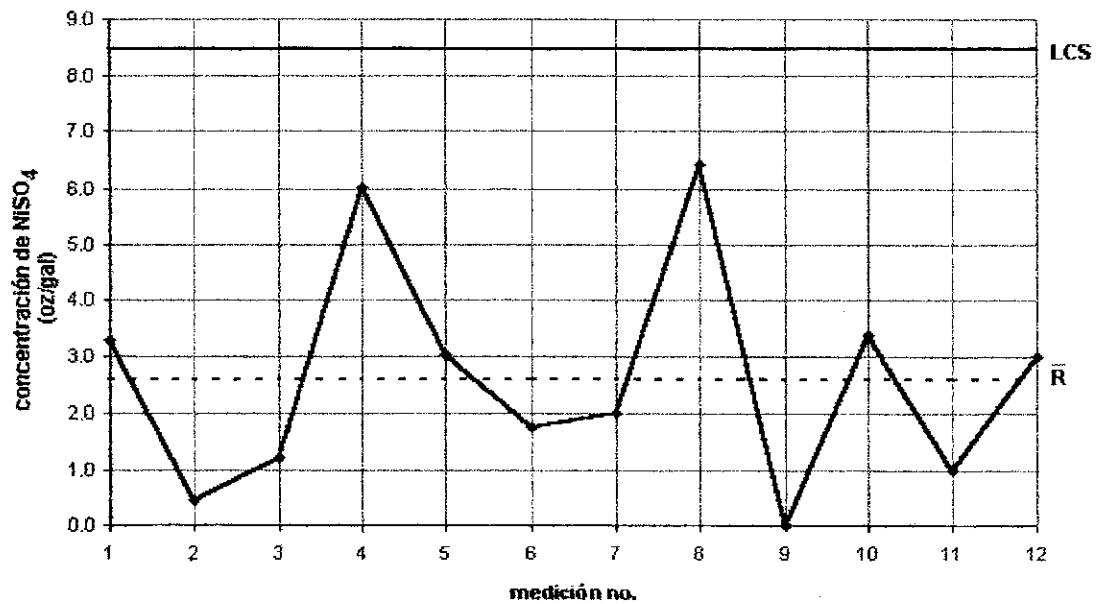
6. Trace la gráfica con los datos calculados. Si uno o más valores de R -Barra traspasan uno de los límites, deberá recalcularse el límite LCS_R , ya que en este caso existen anomalías en el grupo de mediciones. Estas anomalías son indicación de la ausencia de control. Por lo tanto, para establecer los límites de la gráfica de control, los valores de R -Barra que traspasen los límites calculados tentativamente al inicio, deben ignorarse en los cálculos de los límites de control revisados.

TABLA 5.1
DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA GRÁFICA DE CONTROL DE INTERVALO MOVIBLE

Medición No.	X1 (oz/gal)	X2 (oz/gal)	R (oz/gal)	R-Barra (oz/gal)	LCS R (oz/gal)	LCI R (oz/gal)
1	36.6	41.9	3.3	2.6	8.5	0
2	41.9	41.5	0.4	2.6	8.5	0
3	41.5	42.7	1.2	2.6	8.5	0
4	42.7	36.7	6.0	2.6	8.5	0
5	36.7	39.7	3.1	2.6	8.5	0
6	39.7	38.0	1.7	2.6	8.5	0
7	38.0	36.0	2.0	2.6	8.5	0
8	36.0	42.4	6.4	2.6	8.5	0
9	42.4	42.4	0.0	2.6	8.5	0
10	42.4	39.0	3.4	2.6	8.5	0
11	39.0	40.0	1.0	2.6	8.5	0
12	40.0	37.0	3.0	2.6	8.5	0
13	37.0					

La gráfica de intervalo movable se ilustra en la Figura No.5.1.

FIGURA NO. 5.1
GRÁFICA DE CONTROL DE INTERVALO MOVIBLE



5.2.3 Gráfica de Control de Mediciones Individuales

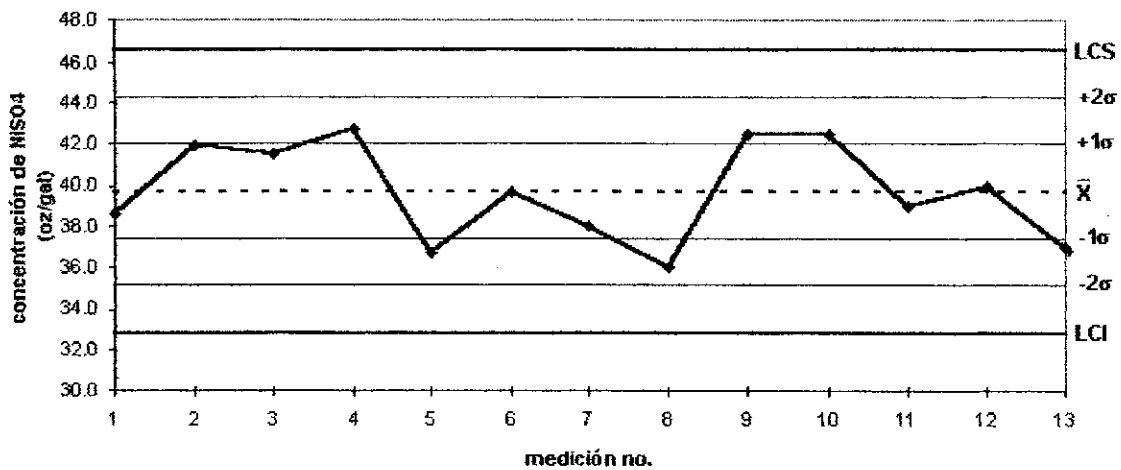
La gráfica de control de mediciones individuales son simplemente las mediciones de concentración trazadas respecto del tiempo. Como se verá, ésta gráfica es muy útil para la detección de la variación a largo plazo. Los límites de control son función del R-Barra calculado para la gráfica de control del intervalo movable:

$$LCS_x = \bar{X} + 3\left(\frac{\bar{R}}{1.128}\right)$$

$$LCI_x = \bar{X} - 3\left(\frac{\bar{R}}{1.128}\right)$$

donde X-Barra es la media de las mediciones individuales. Para utilizar estas fórmulas, primero debe estarse seguro de que el R-Barra calculado corresponde al proceso bajo control (es decir, no existen puntos de R fuera de los límites en la gráfica de intervalo movable). La gráfica de control de mediciones individuales se muestra en la Figura No. 5.2.

FIGURA 5.2
GRÁFICA DE CONTROL DE MEDICIONES INDIVIDUALES



5.2.4 Gráfica de Control de la Media Movable

Una gráfica de control de media movable se construye de la misma forma que una de intervalo movable, es decir, creando parejas de mediciones adyacentes.

1. Se forman dos grupos de mediciones. El primer grupo o columna consta de todas las mediciones tal como son. El segundo grupo consta de las mediciones comenzando por la segunda medición -la primera se ha obviado. Si n es el número de mediciones, se tienen así $n-1$ parejas de mediciones.
2. Se calcula la media aritmética cada pareja de mediciones (X-Barra).
3. Se computa la media aritmética de todas las X-Barra (X-Doblebarra).
4. Se calcula el límite de control superior de la media (LCS _{\bar{x}}) mediante la siguiente fórmula:

$$LCS_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} + 1.88 \cdot \bar{R}$$

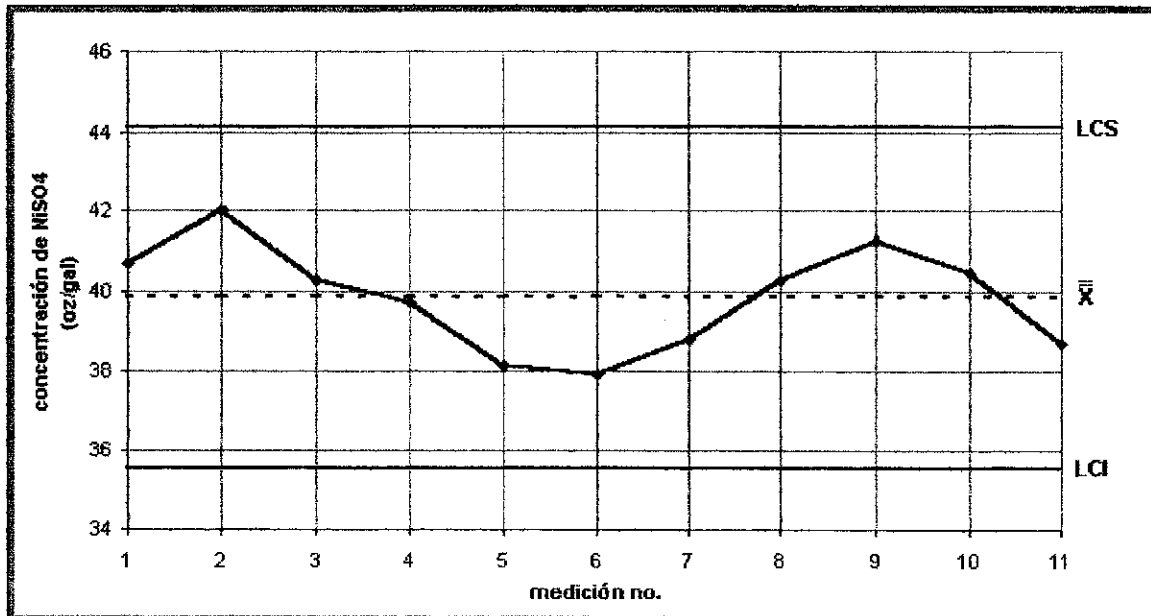
5. Se calcula el límite de control inferior de la media (LCI _{\bar{x}}) mediante la siguiente fórmula:

$$LCI_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} - 1.88 \cdot \bar{R}$$

6. Trace la gráfica con los datos calculados. Si uno o más valores de X-Barra traspasan uno de los límites, deberá recalcularse los límites LCS _{\bar{x}} y LCI _{\bar{x}} , ya que en este caso existen anomalías en el grupo de mediciones. Estas anomalías son indicación de la ausencia de control. Por lo tanto, para establecer los límites de la gráfica de control, los valores de X-Barra que traspasen los límites calculados tentativamente al inicio, deben ignorarse en los cálculos de los límites de control revisados.

Un ejemplo de este tipo de gráfica se muestra en la Figura 5.3.

FIGURA 5.3
GRÁFICA DE CONTROL DE LA MEDIA MOVIBLE



5.2.5 Análisis de Gráficas de Control

La información presentada en una gráfica de control puede utilizarse para dos fines: corregir el proceso para llevarlo a un estado de control y mejorar el proceso mediante un cambio en el diseño del mismo. Generalmente se efectúa sólo el primero al inicio y luego de haberse llegado a un control total del proceso, se inician cambios en el diseño para optimizarlo aun más.

5.2.5.1 CORRECCIÓN DEL PROCESO

La corrección del proceso consiste en descubrir las causas de las desviaciones, lo que resulta en una estabilización y una reducción en la variación del proceso. Una ventaja de la gráfica de control es la de presentar en forma visual el mejoramiento perpetuo del proceso, cosa que le da un efecto psicológico positivo al inspector u operador a cargo. La gráfica de control del intervalo móvil, es una representación de la variación que existe en la concentración entre cada medición consecutiva. Este tipo de variación es a corto plazo, y se origina debido a tres fenómenos:

- **Errores de medición.** La variación debido a errores de medición, puede disminuirse gradualmente mediante la práctica y experiencia de la persona que hace la medición. Sin embargo, cada método de medición tiene cierto error intrínseco, el cual deberá ser mucho menor a la variación permitida en la medida. Como se trata de una valoración volumétrica, la variación esperada sólo debido a la medición es de $\pm 5\%$.
- **Variación debido al muestreo.** Esta variación es la que se presenta cuando se toman mediciones en diferentes puntos del tanque. La muestra para la medición de la concentración debe tomarse al azar. Por lo tanto, las mediciones consecutivas pueden variar si existe estratificación de la concentración en el tanque. Esto es especialmente cierto para los jabones y el electrolito de cromo, ya que éstos no son agitados y tienen acumulación de componentes en otra fase como grasa en el caso de los jabones y sulfato de bario en el caso del electrolito de cromo.
- **Variación debida al desgaste y mantenimiento de la concentración.** A diferencia de las anteriores, esta variación puede y debe ser reducida al mínimo. La variación se produce por el consumo natural de los químicos, que causa una tendencia hacia arriba en la gráfica de control del intervalo movable, y el mantenimiento de la concentración, por parte del inspector, el cual se muestra en la gráfica como una tendencia a bajar. Así, muchas veces se obtiene una gráfica en zigzag. Para reducir este tipo de variación lo más efectivo es hacer adiciones de químicos pequeñas y frecuentes a los tanques. Este tipo de variación también incluye la resultante del ajuste del nivel del tanque con agua de remojo y las pérdidas debido al arrastre de la solución.

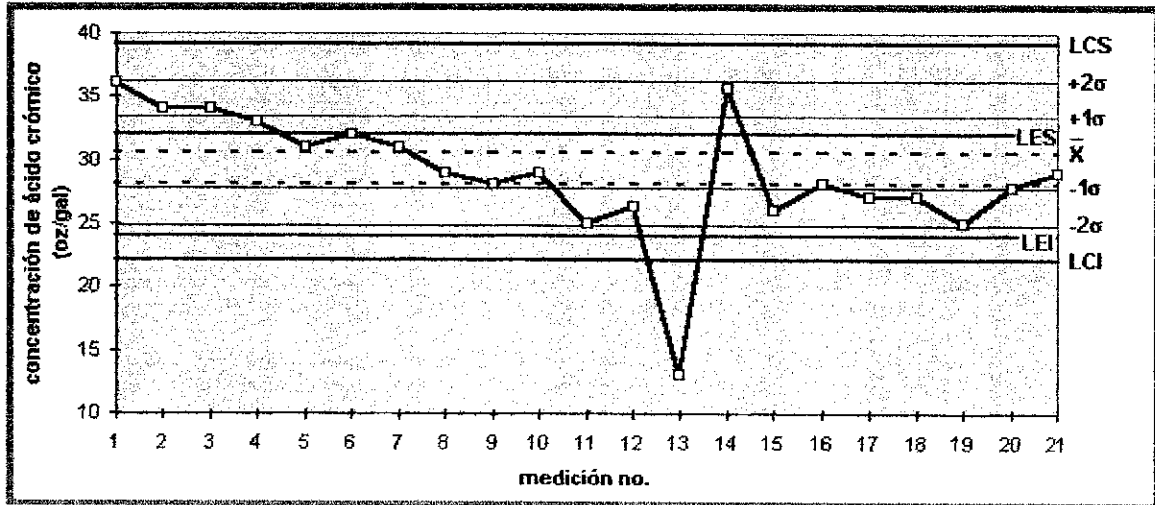
Mientras que los puntos del intervalo movable se mantengan abajo del límite superior, el proceso se considera bajo control respecto de la variación de corto plazo. Los problemas de corto plazo pueden ser errores en las adiciones de químicos (se añadió demasiado o muy poco), errores de medición, la dilución excesiva de los electrolitos y el arrastre excesivo de solución, entre otros.

Los problemas a largo plazo que existan en el proceso aparecerán indicados en la gráfica de control de mediciones individuales como desviaciones o patrones de comportamiento especiales. Así, el análisis de una gráfica de control consiste en la búsqueda de estas desviaciones y patrones de comportamiento. Luego de identificarlos, se procede a asignarle a cada desviación una causa. La subsecuente eliminación de esta causa corrige el problema en el proceso.

Una desviación en una gráfica de control se define como un evento o patrón de comportamiento que tiene una probabilidad de que ocurra sólo por azar menor al 1%. Los patrones son:

1. Cualquier valor que caiga afuera de los límites de control. La probabilidad de que una medición caiga, sólo por azar, fuera de los límites es de 0.27% para cada límite y de 0.135% contando ámbos. Por tanto, esta desviación es sin duda una anomalía y probablemente tendrá una causa asignable, probablemente un error de medición o un cambio en la materia prima.
2. Siete valores en línea que tengan el mismo comportamiento, ésto es, siete seguidos arriba de la media, siete seguidos abajo de la media, siete seguidos alternados arriba y abajo de la media, siete en línea hacia arriba, siete en línea hacia abajo. La probabilidad de que ésto ocurra sólo por azar es de 0.78%.
3. 10 de 11 valores en línea que tengan el mismo comportamiento.
4. 12 de 14 valores en línea que muestren el mismo comportamiento.
5. Patrones de comportamiento en el área de \pm una desviación estándar de la media ($\pm 1\sigma$). Estos son: 5 sucesivos de mismo comportamiento, 6 de 7 con el mismo comportamiento. Debido a que los límites de control están puestos a ± 3 desviaciones estándar de la media, la gráfica puede dividirse en 6 partes iguales, cada una correspondiente a la distancia de una desviación estándar.
6. Patrones de comportamiento entre +1 y +2 desviaciones estándar o entre -1 y -2 desviaciones estándar. Estos son: tres sucesivos de mismo comportamiento, 4 de 5 de mismo comportamiento.
7. Dos sucesivos de mismo comportamiento en el área de +2 a +3 desviaciones estándar o -2 y -3 desviaciones estándar de la media.

FIGURA No.5.3
 GRÁFICA DE CONTROL DE MEDICIONES INDIVIDUALES DE LA CONCENTRACIÓN DE
 ACIDO CRÓMICO EN EL ELECTROLITO DE CROMO



Por ejemplo, considérese el comportamiento de la concentración de ácido crómico que se representa en la Figura 5.3. Nótese que existe una medición que está fuera de los límites de control (marcados en azul), los cuales constituye una indicación clara de la ausencia de control. Además, los primeros 9 puntos poseen el mismo comportamiento: una tendencia hacia abajo, lo cual es un claro patrón anómalo de comportamiento (siete en línea).

También se observan tres medidas en la región de -1 y -2 desviaciones estándar. Estos tres patrones de comportamiento tienen una causa asignable diferente cada uno. Se encontró que la medición que traspasó el límite inferior fue una omisión de la adición de ácido crómico que debía hacerse en esa ocasión, es decir, un claro error de control. La tendencia hacia abajo que se observa se creó debido a que al iniciarse el monitoreo del tanque, la concentración estaba muy elevada y se dejó caer por un tiempo hasta llegar a un valor más cercano al óptimo. Finalmente, las tres mediciones entre -1 y -2 desviaciones son una indicación de un cambio en el control del proceso –se comenzó a tomar mediciones de concentración dos veces a la semana en vez de una.

La inspección de patrones de comportamiento es exclusivamente para la gráfica de mediciones individuales y no se aplica a la gráfica de control de la media móvil, porque los datos trazados en ésta última no son independientes entre sí. Mientras que la gráfica de individuales es muy práctica para descubrir problemas por medio de desviaciones anómalas,

la gráfica de media móvil es más adecuada para encontrar desplazamientos en el comportamiento.

5.2.5.2 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO

La optimización del proceso se realiza cambiando los parámetros del proceso (temperatura, concentración, etc.), es decir, rediseñando el proceso. Los resultados de este cambio son la disminución de la variación en la gráfica de control y el desplazamiento de los límites de control hacia la media. El análisis de las gráficas de control se realiza de la misma forma que en la corrección del proceso, con la diferencia de que ya no se tienen causas asignables para las desviaciones, sino que éstas se eliminan únicamente con un cambio en el diseño del proceso.

Una práctica muy útil es la comparación de los límites de control estadístico con los límites de control especificados. En la Figura No. 5.3 se observa el límite de especificación superior (LES), el límite de especificación inferior (LEI) y el valor óptimo preestablecido (en líneas punteadas) trazados en rojo. Al compararse la capacidad del proceso con los límites de especificación, se debe observar lo siguiente:

- Si los límites de control están ambos adentro de los límites de especificación, es muy probable que el sistema se encuentre bajo control.
- Si los límites de control están afuera de los límites de especificación, el control del proceso todavía no es capaz de cumplir la especificación y el proceso se considera fuera de control.
- Se busca que la media y el óptimo se traslapen. Si éste no es el caso, el control necesita de un ajuste: deberá aumentarse o disminuirse la concentración a largo plazo. Si los límites de especificación están fuera de los límites de control, el problema no es tan importante.

6. Apéndice

6.1 Densidad y Contenido Equivalente de Acido Crómico

TABLA NO. 6.1
DENSIDAD Y CONTENIDO EQUIVALENTE DE ACIDO CRÓMICO

GRAVEDAD ESPECÍFICA A 15 °C	DENSIDAD BAUMÉ A 60 °F	CONCENTRACIÓN DE ACIDO CRÓMICO OZ/GAL
1.01	1.44	2.0
1.02	2.94	3.9
1.03	4.22	5.8
1.04	5.58	7.6
1.05	6.90	9.5
1.06	8.20	11.4
1.07	9.50	13.4
1.08	10.07	15.3
1.09	12.00	17.3
1.10	13.00	19.1
1.11	14.40	21.0
1.12	15.50	22.9
1.13	16.70	24.8
1.14	17.80	26.8
1.15	18.90	28.8
1.16	20.00	30.6
1.17	21.10	32.6
1.18	22.10	34.4
1.19	23.20	36.4
1.20	24.20	38.6
1.21	25.20	40.3
1.22	26.20	42.3
1.23	27.10	44.2
1.24	28.10	46.2
1.25	29.00	48.2
1.26	29.99	50.2
1.27	30.80	52.2
1.28	31.70	54.5
1.29	32.60	56.5
1.30	33.50	58.7
1.31	34.30	60.7
1.32	35.20	62.7
1.33	36.00	64.8
1.34	36.80	67.0

6.2 Hojas de Control

TABLA NO. 6.2
HOJA DE CONTROL HC-1

HOJA DE CONTROL		HC-1	
VOLTAJES Y TEMPERATURAS			
Fecha:			
Tanque	Hora	Temperatura (°C)	Voltaje (V)
jabón alcalino	8:00		---
jabón anódico			
jabón catódico			
níquel	pH:		
cromo			
jabón alcalino	12:00		---
jabón anódico			
jabón catódico			
níquel	pH:		
cromo			
jabón alcalino	15:00		---
jabón anódico			
jabón catódico			
níquel	pH:		
cromo			
Inspector:			

TABLA No. 6.3
HOJA DE CONTROL HC-2

HOJA DE CONTROL		HC-2	
ELECTROLITO DE NIQUEL			
Fecha:			
análisis volumétrico de níquel metálico			
inicio (ml)	Final (ml)	total (ml)	
níquel metálico =	ml	x 0.78 =	oz/gal
		óptimo:	12 oz/gal
análisis volumétrico de cloruro de níquel			
inicio (ml)	Final (ml)	total (ml)	
cloruro de níquel =	ml	x 0.79 =	oz/gal
intervalo:	10 - 12 oz/gal	óptimo:	12 oz/gal
cálculo de sulfato de níquel			
sulfato de níquel =	(oz/gal - oz/gal x 0.247)	x 4.48 =	oz/gal
intervalo:	40 - 50 oz/gal	óptimo:	45 oz/gal
análisis volumétrico de ácido bórico			
inicio (ml)	Final (ml)	total (ml)	
ácido bórico =	ml	x 0.41 =	oz/gal
intervalo:	5.5 - 6.5 oz/gal	óptimo:	6.0 oz/gal
Inspector:			

TABLA 6.4
HOJA DE CONTROL HC-3

HOJA DE CONTROL		HC-3	
ELECTROLITO DE CROMO			
Fecha:			
análisis volumétrico de ácido crómico			
inicio (ml)	Final (ml)	total (ml)	
ácido crómico =	ml	x 2.23 =	oz/gal
intervalo:	26 - 32 oz/gal	óptimo:	28 oz/gal
Análisis de sulfato			
sulfato =	oz/gal	x 2 =	oz/gal
intervalo:	0.08 - 0.12 oz/gal	óptimo:	0.10 oz/gal
cálculo de relación ácido crómico/sulfato			
relación =	oz/gal /	oz/gal =	
intervalo:	250 - 300	óptimo:	270 oz/gal
Inspector:			

TABLA No. 6.5
HOJA DE CONTROL HC-4

HOJA DE CONTROL		HC-4	
ADITIVOS DEL ELECTROLITO DE NIQUEL			
Fecha:			
análisis volumétrico de agente reductor de tensión			
inicio (ml)	Final (ml)	total (ml)	
agente reductor =	20 - ml	x 0.26 =	% (v/v)
		óptimo:	2 % (v/v)
Tensión superficial			
no. gotas agua:		no. gotas níquel:	
tensión s. =	/	x 73 dina/cm =	dina/cm
		óptimo:	41 dina/cm
Inspector:			

VIII. DISCUSIÓN

Los objetivos del sistema de control fueron planteados con base en las observaciones hechas en la línea automática: los objetivos de operación, y sobre todo las restricciones y los problemas existentes en el proceso, los cuales fueron determinantes del nivel de calidad al que puede aspirarse en el proceso. Este nivel de calidad se definió como "comparable" y no igual a la calidad establecida por un estándar de la ASTM, debido a que el estándar en mención posee ciertos requisitos que son imposibles de cumplir en el presente proceso debido a que requieren de pruebas con instrumentación no existente en el país, como son las pruebas para medir el grosor del depósito. Por lo tanto, el término "comparable" utilizado en el objetivo general del sistema de control se refiere a que la calidad del producto obtenido posee ciertas características que también tiene el estándar, pero no cumple con todos los requisitos del mismo. Esta limitación se debe a la imposibilidad, tanto práctica como económica, de realizar todas las pruebas que exige el estándar norteamericano. El producto no necesita estar diseñado para competir en el mercado norteamericano, sino que en el centroamericano, lo cual significa que la calidad puede ser más baja y el precio puede ser más accesible.

Se escogió la condición de servicio número dos (moderada) en la clasificación del estándar de la ASTM, a pesar de que la condición de servicio adecuada para el producto, según la ASTM, es la número tres (severa). Esto se hizo debido a la limitación de tiempo y espacio inherente a la máquina cromadora; es imposible fabricar un recubrimiento que cumpla con los requisitos de grosor necesarios para soportar una condición de servicio severa como se establece en el estándar, con un tiempo de inmersión tan corto y una capacidad de tanque tan pequeña.

Los objetivos específicos en conjunto llevan al objetivo general. Estos objetivos fueron fijados con base en la experiencia, información extraída de la literatura y con base en recomendaciones del fabricante de las sales. El caso de las corrientes aplicadas a los electrolitos es un ejemplo de un objetivo obtenido casi sólo por experiencia, ya que es imposible medir la distribución de la corriente dentro de cualquier baño sin una instrumentación adecuada, y por lo tanto, es imposible establecer un límite a la corriente de una forma que no sea a prueba y error. Así, los intervalos de corriente se fijaron de tal forma que dentro de ellos no se den problemas de quemaduras (límite superior) o poca cobertura (límite inferior), y se tenga una densidad de corriente promedio razonable.

Los intervalos de temperatura, en cambio, se fijaron de acuerdo a las recomendaciones del fabricante para los baños de níquel y cromo. Para

los jabones, el intervalo de temperatura recomendado por el fabricante es sumamente amplio; se escogió la parte superior del intervalo, es decir, un intervalo de temperaturas altas, ya que a mayor temperatura, más eficiente es la limpieza y es más rápida la emulsificación. Esto es muy necesario en el ciclo de limpieza, ya que la mayoría de piezas llegan al paso de cromado luego de pasar por el pulido y traen residuos del mismo. El ciclo de limpieza debe ser lo más eficiente que se pueda.

Las concentraciones de los electrolitos son las recomendadas por el fabricante en todos los casos excepto para el sulfato en el electrolito de cromo. Se tomó un intervalo de control diferente al especificado por el fabricante porque se observó que al estar la concentración de sulfato en la parte superior del intervalo recomendado, se tenía un valor muy bajo e inaceptable (fuera de límites) para la relación ácido crómico/sulfato. Así, el intervalo indicado en el manual es un intervalo de concentración corregido por la experiencia y más adecuado para el proceso estudiado en particular.

La capacidad permisible por gancho se reduce a dos piezas por gancho debido a las limitaciones de la máquina cromadora. Este cálculo (véase el Apéndice) se basa en la medición del área aproximada de la pieza y es un dato aproximado, ya que el área también es una aproximación y el equivalente electroquímico utilizado está basado en una eficiencia del 100 %. El dato sirve básicamente para saber que al colocar tres piezas en cada gancho, el grosor del recubrimiento obtenido será menor al grosor establecido en los objetivos del sistema de control.

El control de las corrientes aplicadas, por medio de la regulación del voltaje es la más simple de todas las opciones. Un control automático sería redundante debido a que la corriente varía muy poco a lo largo del día. Además, el control requerirá que deba aumentarse el voltaje en ciertos casos, cosa que sería complicada hacer con un regulador automático. El alto costo de un controlador de este tipo no se ve justificado. En el caso de la temperatura, el costo de un control automático de temperatura se justifica por la eliminación de una variedad de problemas que se han visto emerger por descuidos en el control manual de la temperatura. Por esta razón, aunque en la actualidad el proceso carece de una regulación automática de la temperatura, en el manual se incluye una descripción aproximada de tal método de control, además de la descripción del control manual. Para este último, la frecuencia de control debe aumentar para mantener las desviaciones en la temperatura al mínimo.

Lo mismo puede decirse del control del pH: el uso de papel colorimétrico no es inadecuado, pero puede llegar a ser impreciso. El pH es crítico para el buen funcionamiento del baño de níquel, y en ocasiones varía rápidamente, por lo que es más seguro el uso de un electrodo. En el manual aparece la descripción de los procedimientos de medición para

ambos. Debido a su importancia y variabilidad, la frecuencia de control es de 3 veces al día.

La razón por la cual se adjuntó el control de los tanques del ciclo de limpieza al sistema de control es porque en el presente proceso, el ciclo de limpieza es muy importante ya que las piezas no llegan del todo limpias al proceso, y la falta de control en este paso puede llevar a un sin fin de problemas que no se perciben sino hasta en los tanques de niquelado o cromado. Además, en la máquina cromadora se incluye el ciclo de limpieza, por lo que se considera una parte integral de la línea automática. El mantenimiento de la concentración de los jabones contribuye a la obtención de piezas sin defectos y cuyos recubrimientos de níquel y cromo están más fuertemente adheridos. Por lo tanto, el control de los jabones es otro medio necesario para cumplir los objetivos del sistema de control. Se ha escogido una concentración más alta recomendada por el fabricante de los detergentes para asegurar una mayor eficiencia en el ciclo de limpieza. Las frecuencias de control han sido fijadas con base en la observación del tiempo de degradación de cada jabón.

El análisis volumétrico como método de control para las concentraciones de los tanques es el más adecuado para el proceso, primero porque no se necesita de instrumentación cara y complicada, segundo, porque los procedimientos son fáciles y rápidos; cualquiera puede aprenderlos y adquirir experiencia; y tercero, el error máximo posible en que puede incurrir un laboratorista experimentado es suficientemente pequeño (aproximadamente 5 %) como para ser un factor despreciable en la variabilidad a corto plazo de las mediciones. Otra razón de peso es el hecho de que el análisis volumétrico ha sido la única forma práctica de averiguar la composición de los electrolitos hasta recientemente.

Debido a que la mayoría de los iones de níquel que pasan a ser parte del recubrimiento provienen de la corrosión de los ánodos de níquel, el contenido de níquel en el electrolito permanece constante por mucho tiempo y los ajustes con las sales de sulfato y cloruro de níquel se deben únicamente a las pérdidas ocasionadas por el arrastre. Es por esto que la frecuencia de control se limita a 3 veces por semana. En el baño de cromo, en cambio, el ácido crómico añadido es el que se deposita sobre la pieza, y el mantenimiento de su concentración resulta ser más crítico. El control es diario.

La prueba de celda es un muy buen medio para evaluar la apariencia del recubrimiento, lo cual es suficiente para regular la cantidad de abrillantadores añadidos, ya que ésta tiende a ser constante después de que se ha establecido una cantidad rutinaria a añadir que da buenos resultados de apariencia. La alternativa a la prueba de celda es el uso de un espectrofotómetro UV para cuantificar las concentraciones de abrillantador primario y abrillantador secundario.

El programa de mantenimiento se ha diseñado tanto con base en recomendaciones del fabricante, como es el cambio del medio de filtración y la inspección de los ánodos, y también con base en las observaciones realizadas en la línea, como es la vida útil de los jabones, la cantidad de suciedad acumulada en los tanques y el estado de los ganchos. Las frecuencias de control asignadas a cada operación de control y de mantenimiento de aplicarse, pretenden mantener los desvarios al mínimo.

La utilidad de incluir una sección dedicada a la administración de datos reside en que ésto permite que el programa de control pueda mejorarse con el tiempo, en vez de quedar como un programa rígido. Esta es la otra razón por la cual se recaudan y archivan los datos. Los cambios en el programa de control se deberán dar poco después de comenzado el análisis periódico de los datos. Cabe mencionar que mediante el análisis de datos con los métodos descritos brevemente en el manual, se descubrió la imposibilidad de obtener una proporción de sulfato adecuada con el intervalo especificado por el fabricante.

Aunque el control estadístico de procesos se ideó para analizar propiedades del producto ya terminado, también se ha encontrado muy útil para encontrar problemas dentro del proceso al medir y analizar las condiciones de operación del mismo. Las gráficas de control son excelentes recursos para analizar el estado del proceso y evaluar el desempeño del control. Sin embargo, se debe mostrar cierto interés en el CEP para poder implementarlo. Como se menciona en la introducción del manual, los métodos de control estadístico de procesos presentados en el mismo son una síntesis que se acopla muy bien a las concentraciones de los electrolitos a través del tiempo. Hay muchas otras cosas del CEP que pueden aplicarse al proceso, y que el inspector interesado podrá investigar por su cuenta (véase las referencias (8) y (11)). La razón por la cual se limita a las concentraciones de los baños de níquel y cromo es, en primer lugar porque sólo se intenta dar un ejemplo; segundo, porque las concentraciones de los electrolitos son las variables más importantes de todo el sistema de control. Otros datos, como el pH, la temperatura, la tensión superficial, la cobertura deben tratarse de la misma forma. En resumen, el control estadístico de procesos se considera una herramienta tan poderosa para un sistema de control que se vio necesario incluir un breve esbozo del mismo en el manual.

Se ha colocado la sección de pruebas y mediciones antes a propósito, ya que el manual tiene una doble función: instruir sobre el sistema de control propuesto y servir como referencia de todos los procedimientos que se practican en el control del proceso. Se considera más práctico que el material de referencia se encuentre adelante y no atrás. Se ha intentado que las instrucciones en toda esta sección sean lo más claras y ordenadas, para que cualquier persona pueda seguirlas con facilidad.

Muchos términos que pueden ser desconocidos para cualquier persona ajena a la química se encuentran explicados brevemente. En el resto de las secciones, se ha supuesto que el lector ya tiene ciertos conocimientos fundamentales del proceso y su terminología.

IX. CONCLUSIONES

1. Las limitaciones del sistema de control son el factor determinante en el nivel de calidad posible para el producto.
2. La capacidad del proceso se ve limitada a 2 piezas por gancho, lo que equivale a una capacidad máxima de 130 piezas por hora, con lo cual se obtiene el nivel de calidad especificado.
3. La instalación de un sistema de control automático de temperatura facilitaría considerablemente el control y por ende mejoraría el proceso.
4. El uso de un electrodo para medir el pH es más adecuado que el papel colorimétrico en este caso.
5. La sección de administración de datos del manual es solamente una sección introductoria a la recaudación de datos y al control estadístico de procesos.
6. El manual tiene una doble función: instruir sobre el sistema de control y mantenimiento, y servir como referencia de todos los procedimientos de control y mantenimiento asociados al proceso.

X. RECOMENDACIONES

1. En el caso de que sea necesario aumentar la producción, se aconseja organizar turnos en vez de forzar la capacidad de la máquina cromadora.
2. Se recomienda invertir en un sistema de control automático.
3. Se recomienda invertir en un electrodo de medición de pH.
4. La persona interesada en la implementación de control estadístico de procesos deberá consultar fuentes especializadas.
5. El inspector de calidad deberá desarrollar sus conocimientos con la experiencia.

XI. BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM Designation B 456-95: Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Copper Plus Nickel Plus Chromium and Nickel Plus Chromium. 1995. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
2. Banhidi, M. 1990. pH. En: Murphy, M. (ed.) Metal Finishing Guidebook and Directory Issue. 13a. edición. pp. 584-587. Metals and Plastics Publications, Inc., New Jersey.
3. Banhidi, M. Consulta personal.
4. Clegg, E.T., y F. Ogburn. 1984. Plating Standards and Specifications. En: Durney, L.J. (ed.) Electroplating Engineering Handbook. 4ta. edición. pp. 263-284. Chapman & Hall, Londres.
5. Davis, J.V., y A.K. Graham. 1984. Tanks- Design, Construction, Installation and Maintenance. En: Durney, L.J. (ed.) Electroplating Engineering Handbook. 4ta. edición. pp. 516-524. Chapman & Hall, Londres.
6. Dennis, J.K., y T.E. Such. 1993. Nickel and Chromium Plating. Woodhead Publishing Limited, 3a. edición, Cambridge.
7. Dixon, R. Consulta personal.
8. Doty, L. 1996. Statistical Process Control. 2a. edición. Industrial Press, Inc., N.Y.
9. Durney, L.J. 1984. Manually Operated Installations. En: Durney, L.J. (ed.) Electroplating Engineering Handbook. 4ta. edición. pp. 567-572. Chapman & Hall, Londres.
10. Graham, A.K., y H.L. Pinkerton. Anode and Cathode Rod and Bus Systems. En: Durney, L.J. (ed.) Electroplating Engineering Handbook. 4ta. edición. pp. 631-637. Chapman & Hall, Londres.
11. Leitnaker, M. et al. 1996. The Power of Statistical Thinking. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts.

12. Lowenheim, F.A. 1995. Electroplating. Technical Reference Publications Ltd., Bristol.
13. Meas, Y. Consulta personal.
14. Moll, M.J. 1984. Semi- and Fully Automatic Plating Machines. En: Durney, L.J. (ed.) Electroplating Engineering Handbook. 4ta. edición. pp. 606-616. Chapman & Hall, Londres.
15. M&T Technical Data Sheet No. P-Ni-323. 1972. M&T Chemicals Inc., New Jersey.
16. M&T Technical Data Sheet No. P-SM-12: Simple Methods for Analyzing Plating Solutions. 1972. M&T Chemicals Inc., New Jersey.
17. Perry, R. et al. 1984. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 6ta edición. McGraw-Hill, N.Y.
18. Peterson, D.S. 1997. Practical Guide to Industrial Metal Cleaning. Hanser Gardner Publications, Cincinnati.
19. Pinkerton, H.L. 1984. Heating and Cooling Equipment. En: Durney, L.J. (ed.) Electroplating Engineering Handbook. 4ta. edición. pp. 537-558. Chapman & Hall, Londres.
20. Rohco Technical Bulletin: Directions for Hull Cell Plating Tests. R.O. Hull & Company, Inc., Cleveland.
21. Skoog, D. y Donald West. 1989. Química Analítica. 4ta. edición. McGraw-Hill, México.
22. Snyder, D.L. 1990. Decorative Chromium Plating. En: Murphy, M. (ed.) Metal Finishing Guidebook and Directory Issue. 13a. edición. pp. 183-191. Metals and Plastics Publications, Inc., New Jersey.

XII. ANEXOS

A. CÁLCULO DEL ÁREA MÁXIMA

Según la especificación, se requiere un grosor de 20 μm de níquel sobre la pieza. El equivalente electroquímico para el níquel es el siguiente:

$$eq_{Ni} = 19.0 \frac{A \cdot h}{\text{pie}^2 \cdot 0.001 \text{ pulg}}$$

Es decir, se requieren 19.0 amperios hora por pie cuadrado de área efectiva a recubrir para obtener un grosor de 0.001 pulgadas. Entonces:

$$eq_{Ni} = 19.0 \frac{A \cdot h}{\text{pie}^2 \cdot 0.001 \text{ pulg}} \times \left(\frac{\text{pulg}}{25400 \mu\text{m}} \right) = 0.748 \frac{A \cdot h}{\text{pie}^2 \cdot \mu\text{m}}$$

$$area_{\text{max}} = \frac{1}{0.748} \cdot \frac{\text{pie}^2 \cdot \mu\text{m}}{A \cdot h} \times \frac{1000 A \cdot 0.25 h}{20 \mu\text{m}} = 16.7 \text{ pie}^2$$

donde se han utilizado las condiciones extremas del proceso de 1000 A de corriente mínima y 0.25 horas de tiempo de inmersión en el tanque de níquel.

El equivalente electroquímico para el cromo es de 51.8 A-h/ $\text{pie}^2 \cdot 0.001$ pulg, y de la misma forma se encuentra que para obtener un grosor de 0.25 μm , el área máxima que puede acarrear un gancho es de 32.7 pie^2 . Por lo tanto, el factor limitante es el grosor requerido de níquel.

B. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD ADECUADA

El área efectiva de cada pieza es de 8.4 pie^2 . De acuerdo al cálculo anterior, el número máximo de piezas que deberá acarrear un gancho es:

$$\frac{\text{no. piezas}}{\text{gancho}} = \frac{16.7 \text{ pie}^2}{\text{gancho} \cdot 8.4 \text{ pie}^2} = 1.99 \cong 2$$

Si la máquina acarrea 65 ganchos por hora, la capacidad es de 130 piezas por hora o 1092 pie^2 de área efectiva por hora.