



UNIVERSIDAD DEL MAR

Campus Puerto Ángel

INGENIERÍA AMBIENTAL

**Implementación de la Teoría de
Control de Procesos como una
Herramienta de la Producción
Más Limpia**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AMBIENTAL

Presenta:

David Tello Delgado

Director:

M en C. Alejandro Regalado Méndez

Puerto Ángel, Pochutla, Oaxaca, 2014



Puerto Ángel, Mayo de 2014

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Después de realizar una revisión detallada de la tesis “**Implementación de la Teoría de Control de Procesos como una Herramienta de la Producción Más Limpia**” presentada por el pasante de Ing. Ambiental **DAVID TELLO DELGADO**, se considera que cumple con los requisitos necesarios y de calidad para ser defendida en el examen profesional.

COMISIÓN REVISORA

M. en C. Alejandro Regalado Méndez
Universidad del Mar
Director

Dr. Ever Peralta Reyes
Universidad del Mar

Dr. Carlos Estrada Vásquez
Universidad del Mar

M. en C. Mario Edgar Cordero Sánchez
Universidad Popular Autónoma del
Estado de Puebla

M. en C. Cervando Sánchez Muñoz
Universidad del Mar

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor,
la electricidad y la energía atómica: la voluntad”
Albert Einstein

ÍNDICE

Resumen	I
Introducción	IV
Capítulo 1	1
1. Estado del Arte	2
2. Justificación	9
3. Objetivo General	10
Capítulo 2	11
2. Caso de Estudio	12
2.1 Descripción del caso	13
2.2 Implementación de la Teoría de Control al Caso de Estudio	15
Capítulo 3	18
3. Discusión de Resultados	19
3.1 Modelado de las ecuaciones cinéticas del reactor	19
3.2 Implementación de la Ley de Control	21
Capítulo 4	29
4. Conclusiones	30
Capítulo 5	32
5. Bibliografía	33
Apéndice	41
Marco teórico	42
1.1 Industria de la Galvanoplastia	42
1.1.1 Orígenes	42
1.1.2 Actualidad y Panorama General de la Industria de la Galvanoplastia en México	42
1.1.3 Proceso de Producción de una Pequeña Empresa	44
1.1.4 Contaminación Producida	48
1.1.5 Tratamientos empleados para Aguas Residuales	49
1.2 Cromo	50

1.2.1 Antecedentes _____	50
1.2.2 Uso de Cromo en la Industria _____	51
1.2.2.1 En la Industria de la Galvanoplastia _____	52
1.2.3 Cromo y la Salud _____	52
1.2.3.1 Toxicidad _____	54
1.3 Producción Más Limpia _____	56
1.3.1 Historia _____	56
1.3.2 Fundamento Teórico _____	57
1.3.3 Beneficios _____	60
1.3.4 Metodología _____	62
1.3.5 Oportunidades de Implementación de la Producción Más Limpia en el Sector de la Galvanoplastia _____	63
1.3.6 Producción Más Limpia en la Industria de la Galvanoplastia en México _____	68
1.3.6.1 Experiencia de Producción Más Limpia _____	68
1.3.6.2 Resultados del proyecto de demostración _____	69
1.4 Control de Procesos _____	72
1.4.1 Historia de la Teoría de Control _____	72
1.4.2 Fundamento Teórico _____	74
1.4.3 Tipos de Control _____	76
1.4.3.1 Técnicas de control _____	78
1.4.3.2 Estructuras de Control _____	80
1.4.4 Herramientas de control _____	83
1.4.4.1 Estabilidad del Sistema _____	83
1.4.4.2 Ganancia _____	84
1.4.4.3 Tiempo del Proceso _____	85
1.4.4.4 Diagrama de Fases _____	86

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Esquema del RCTA (Aguilar, et al., 2005).</i>	II
<i>Figura 2. Diagrama de Bloques de la Ley de Control (Regalado, 2003).</i>	17
<i>Figura 3. Simulación numérica de la dinámica del reactor a lazo abierto empleando distintas concentraciones iniciales de Cr(VI).</i>	20
<i>Figura 4. Mapa de bifurcación del Cr(VI).</i>	21
<i>Figura 5. Desempeño del controlador no lineal utilizando distintos valores de α y β.</i>	23
<i>Figura 6. Desempeño del modelo a lazo abierto y cerrado.</i>	24
<i>Figura 7. Desempeño del término de reacción al implementar la Ley de Control.</i>	24
<i>Figura 8. Desempeño del modelo no lineal.</i>	25
<i>Figura 9. Desempeño de la Ley de Control utilizando distintas concentraciones de entrada.</i>	26
<i>Figura 10. Respuesta del controlador ante perturbaciones.</i>	27
<i>Figura 11. Respuesta del controlador ante cambios de setpoint.</i>	27
<i>Figura 12. Organigrama para una micro y pequeña industria (CONCAMIN, 2008; Secretaría de Economía, 2008).</i>	46
<i>Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de producción a escala de pequeña empresa (Secretaría de Economía, 2008).</i>	48
<i>Figura 14. Proceso de galvanoplastia (cobre-níquel-cromo) (Centro Mexicano para la Producción Más Limpia, 1997).</i>	64
<i>Figura 15. Inversión, gastos y ahorro de seis empresas (Centro Mexicano para la Producción Más Limpia, 1997).</i>	70
<i>Figura 16. Inversiones requeridas (Centro Mexicano para la Producción Más Limpia, 1997).</i>	70
<i>Figura 17. Tiempo de recuperación de la inversión (Centro Mexicano para la Producción Más Limpia, 1997).</i>	71
<i>Figura 18. Tiempo de recuperación de la inversión (Centro Mexicano para la Producción Más Limpia, 1997).</i>	71
<i>Figura 19. Esquema de una Acción de Control (Regalado, 2003).</i>	76
<i>Figura 20. Control por retroalimentación (Regalado, 2003).</i>	77
<i>Figura 21. Puntos de Equilibrio y Estabilidad de un RCTA (Regalado, 2003).</i>	83
<i>Figura 22. Ganancia en Estado Estacionario (Regalado, 2003).</i>	84
<i>Figura 23. Respuesta de un proceso de primer orden a un cambio en escalón de la función de forzamiento-constante de tiempo (Regalado, 2003).</i>	85

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Descripción de Variables del Proceso.</i>	14
<i>Tabla 2. Descripción de Variables Empleadas en la Estrategia de Control.</i>	17
<i>Tabla 3. Valores Óptimos de las Variables de Control.</i>	23
<i>Tabla 4. Información estadística de la industria de la galvanoplastia (INEGI, 2008).</i>	43
<i>Tabla 5. Inversiones para una micro empresa (CONCAMIN, 2008; Secretaría de Economía, 2008).</i>	44
<i>Tabla 6. Inversiones para una pequeña empresa (CONCAMIN, 2008; Secretaría de Economía, 2008).</i>	45
<i>Tabla 7. Características del personal de una micro y pequeña industria (Secretaría de Economía, 2008).</i>	46
<i>Tabla 8. Rangos de producción por tamaño de empresa (Secretaría de Economía, 2008).</i>	47
<i>Tabla 9. Relación insumo-producto (CANACINTRA, 2008).</i>	47
<i>Tabla 10. Periodicidad de sustitución de los baños en la galvanoplastia (CANACINTRA, 2008).</i>	47
<i>Tabla 11. Toxicidad del Cr(VI) (¹MERIAN, 1984; ²KOCH, 1989; ³DVGW, 1988).</i>	55
<i>Tabla 12. Acciones de Producción Más Limpia (Centro Mexicano para la Producción Más Limpia, 1997).</i>	65

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue demostrar que a través de la implementación de esquemas de control no lineal aplicados en un reactor electroquímico continuo de tanque agitado que reduce cromo hexavalente residual proveniente de la industria de la galvanoplastia, puede considerarse a la Teoría de Control de Procesos como una herramienta de la “*Producción más limpia*”, ya que ésta en su fundamentación teórica contempla la modificación de los procesos a través de la implementación y desarrollo de tecnologías, métodos o teorías que permiten producir de una forma más limpia, eficiente y por ende redituable desde el punto de vista financiero.

Se seleccionó como giro industrial la industria de la galvanoplastia, ya que en nuestro país es un sector en crecimiento donde la mayor parte de establecimientos que la implementan son micro y pequeñas industrias, carentes en su conjunto de procesos de tecnificación y consideradas como altamente contaminantes (Martínez, *et al.*, 2000); y que, entre sus residuos es común encontrar sales de metales pesados, como el cromo hexavalente (Rodríguez, *et al.*, 2003), el cual es considerado por las normatividades ambientales tanto mexicanas como internacionales como altamente tóxico ya que representa un problema de salud serio por considerársele potencialmente carcinogénico para los seres vivos (Standeven, *et al.*, 1989, James, *et al.*, 1997).

El trabajo de tesis desarrolló esquemas de control proporcional con ajustes de ganancia proporcional de acuerdo a la función signo de error para la regulación de Cr(VI) en un reactor electroquímico continuo de tanque agitado (**RCTA**). Dicho, algoritmo de control fue implementado en un **RCTA** electroquímico que reduce cromo hexavalente (Cr(VI)) residual proveniente de la industria de la galvanoplastia a cromo tetravalente (Cr(IV)). La cinética de degradación empleada para dicha degradación fue desarrollada por Rodríguez (Rodríguez, *et al.*, 2003). El **RCTA** diseñado tiene capacidad para soportar un volumen de hasta 16.0 L, contiene un electrodo central que está compuesto por una serie de 14 anillos sujetos a un eje dispuesto en una secuencia de un cátodo y un ánodo, cada uno con un diámetro de 11.5 cm, con un área superficial de 75.0 cm² y una