



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRÓNICA AUTOMATI-
ZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO EN AUTOMATIZA-
CIÓN Y CONTROL**

**TEMA: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
DE CONTROL PARA ANODIZADO TIPO 2"**

**AUTOR: AQUINO AVILÉS, KATHERINE VIVIANA
VINUEZA ORQUERA, GALO DAVID**

DIRECTOR:

ING. PROAÑO ROSERO, VICTOR GONZALO

SANGOLQUÍ

2017

CERTIFICADO DEL DIRECTOR

Certifico que el trabajo de titulación, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA ANODIZADO TIPO 2” realizado por los señores Vinueza Orquera Galo David y Aquino Avilés Katherine Viviana, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software antiplagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar los señores Aquino Avilés Katherine Viviana y Vinueza Orquera Galo David para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 30 de Octubre del 2017

Ing. Víctor Gonzalo Proaño Rosero
DIRECTOR

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

Yo, Aquino Avilés Katherine Viviana, con cédula de identidad N° 1715690572 ,declaro que este trabajo de titulación “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA ANODIZADO TIPO 2” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 30 de Octubre del 2017

Katherine Viviana Aquino Avilés

C.I 1715690572

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

Yo, Vinueza Orquera Galo David, con cédula de identidad N° 1714975206 ,declaro que este trabajo de titulación “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA ANODIZADO TIPO 2” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 30 de Octubre del 2017

.....
Galo David Vinueza Orquera

C.I. 1714975206



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

AUTORIZACIÓN

Yo, Aquino Avilés Katherine Viviana, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA ANODIZADO TIPO 2” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad

Sangolquí, 30 de Octubre del 2017

Aquino Avilés Katherine Viviana
C.I: 1715690572



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

AUTORIZACIÓN

Yo, Vinueza Orquera Galo David, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA ANODIZADO TIPO 2” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad

Sangolquí, 30 de Octubre del 2017

Vinueza Orquera Galo David
C.I:1714975206

DEDICATORIA

El presente proyecto de Titulación está dedicado a:

A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar

A mis padres quienes a lo largo de toda mi vida han apoyado y motivado mi formación académica, creyeron en mí en todo momento y no dudaron de mis habilidades.

A mi hermano por llenarme de motivación, cuando los días eran largos.

A todas las personas que han formado parte de mi vida a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida.

DEDICATORIA

El presente proyecto de Titulación está dedicado a:

Dios por darme la fuerza y ganas de culminar una etapa más de mi vida para tener un mejor futuro para mí y para mi familia.

A mis queridos padres por confiar en mis capacidades e brindarme la oportunidad de ser un profesional, por el apoyo moral, económico, espiritual y la paciencia con que esperaron ver a su hijo subir un peldaño más.

A mis Hermanas Cristina y Silvia que han sido un ejemplo en mi vida me han impulsado siempre a no rendirme a luchar por ser siempre mejores.

A mis hijas Raquel y Ariana porque debo ser un ejemplo para ellas de superación, constancia, y dedicación para alcanzar lo que uno desea en la vida, a mi querida Esposa Mirian que me ha brindado su apoyo incondicional.

A todos aquellos amigos y personas que de forma desinteresada aportaron y colaboraron para cumplir con este objetivo.

AGRADECIMIENTO

Los resultados de este proyecto, están dedicados a todas aquellas personas que, de alguna forma, son parte de su culminación.

Por esto agradezco a nuestro director de proyecto, Ing. VICTOR GONZALO PROAÑO ROSERO, sin el cual no hubiésemos podido salir adelante.

A mis profesores durante toda mi carrera profesional, porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación, gracias a su paciencia y enseñanza.

Finalmente un eterno agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la cual me abrió sus puertas, preparándome para un futuro competitivo y formándome como profesional.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento va dirigido a:

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en especial a la carrera de Ingeniería en Electrónica Especialidad Control y Automatización por habernos dado la oportunidad de ser alumnos de tan noble intuición y de habernos formado como profesionales de haber adquirido los conocimientos necesarios de nuestros grandes maestros.

Un agradecimiento especial a nuestro guía el Ing. VICTOR GONZALO PROAÑO ROSERO por habernos apoyado en el proceso y elaboración de nuestro proyecto de grado.

Y finalmente damos las gracias a todos nuestros profesores de la carrera de Ingeniería Electrónica Control y Automatización que con su paciencia y enseñanzas nos brindaron sus conocimientos para seguir luchando para mejorar y contribuir con nuestro país.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| CERTIFICADO DEL DIRECTOR | ii |
| AUTORIA DE RESPONSABILIDAD | iii |
| DEDICATORIA | vii |
| AGRADECIMIENTO | ix |
| ÍNDICE | xi |
| ÍNDICE DE TABLAS | xiii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xiv |
| RESUMEN..... | xvi |
| ABSTRACT..... | xvii |
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| MARCO TEÓRICO..... | 1 |
| 1.1 Antecedentes de la investigación | 1 |
| 1.2 Sistema de anodizado de aluminio | 2 |
| 1.2.1 Tipos de anodizado | 4 |
| 1.3. Factores que influyen en las aplicaciones electrolíticas. | 5 |
| 1.3.1 Oxidación Corrosión del Aluminio, Alúmina | 8 |
| 1.4 Principio del anodizado tipo 2..... | 10 |
| 1.4.1 Proceso de anodizado tipo 2 | 12 |
| 1.5. La regla 720..... | 14 |
| 1.6 Prueba de rotura de agua | 15 |
| CAPÍTULO II | 16 |
| DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN..... | 16 |
| 2.1 Diagrama de proceso e instrumentación | 16 |
| 2.1.1. Diagrama de bloques del sistema de control | 19 |
| 2.1.2. Selección de la fuente | 21 |
| 2.1.3. Controlador | 22 |
| 2.1.4 Sensor de corriente | 24 |
| 2.1.5 Sensor de temperatura..... | 26 |
| 2.2 Diseño e Implementación del controlador de corriente..... | 26 |
| 2.2.1 Explicación del funcionamiento del controlador | 27 |
| 2.2.2 Modificación de la fuente de alimentación..... | 27 |
| 2.2.3 Acondicionamiento de la señal de corriente | 30 |
| 2.2.4 Planta | 34 |
| 2.2.5 Identificación de la planta..... | 35 |
| 2.2.6 Modelamiento de la planta..... | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.7 Diseño del controlador..... | 41 |
| 2.2.8 Costos de construcción y mantenimiento de equipo..... | 44 |
| 2.2.9 Software | 45 |
| 2.2.10 Descripción de la estructura..... | 54 |
| CAPÍTULO III..... | 56 |
| PRUEBAS Y RESULTADOS | 56 |
| CAPÍTULO IV..... | 70 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 70 |
| 4.1 Conclusiones | 70 |
| 4.2. Recomendaciones | 71 |
| BIBLIOGRAFÍA | 72 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla N°1. Simbología del diagrama de Proceso e Instrumentación P&ID | 17 |
| Tabla N°2. Cálculos de corriente | 21 |
| Tabla N°3. Especificaciones Tarjeta Arduino..... | 23 |
| Tabla N°4. Conexiones Conversor D/A..... | 24 |
| Tabla N°5. Conexiones Sensor de corriente | 25 |
| Tabla N°6. Tabla de Relación Bits vs Voltajes..... | 35 |
| Tabla N°7. Materiales y Costo | 44 |
| Tabla N°8. Proceso de Limpieza previo al Anodizado..... | 56 |
| Tabla N°9. Calculo de corrientes y tiempos para diferentes piezas..... | 62 |
| Tabla N°10. Errores obtenidos en la Piezas anodizadas | 67 |
| Tabla N°11. Solución de problemas de anodizado | 68 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura N ^o 1. Electrolisis..... | 4 |
| Figura N ^o 2. Concentración de ácido sulfúrico vs conductibilidad | 6 |
| Figura N ^o 3. Variación de la conductividad para distintos electrolitos | 7 |
| Figura N ^o 4. Proceso de Anodizado del aluminio..... | 11 |
| Figura N ^o 5. Pasos del anodizado del aluminio | 12 |
| Figura N ^o 6. Diagrama P&ID del anodizado del aluminio | 16 |
| Figura N ^o 7. Diagrama P&ID etapa de anodizado..... | 18 |
| Figura N ^o 8. Diagrama P&ID etapa de teñido y sellado..... | 18 |
| Figura N ^o 9. Diagrama del Sistema de Control de Corriente..... | 20 |
| Figura N ^o 10. Diagrama de bloques del Sistema de Control de Corriente | 20 |
| Figura N ^o 11. Fuente de Alimentación Yucco..... | 22 |
| Figura N ^o 12. Tarjeta Arduino uno | 23 |
| Figura N ^o 13. Conversor Digital-Análogo MCP4725 | 23 |
| Figura N ^o 14. Sensor de corriente de efecto hall | 24 |
| Figura N ^o 15. Dimensiones sensor de corriente..... | 25 |
| Figura N ^o 16. Sensor de temperatura | 26 |
| Figura N ^o 17. Esquema de conexiones del sistema | 26 |
| Figura N ^o 18. Diagrama del Controlador de Corriente..... | 27 |
| Figura N ^o 19. Fuente de alimentación | 28 |
| Figura N ^o 20. Funcionamiento de la fuente de alimentación con carga | 28 |
| Figura N ^o 21. Medición de voltaje en el potenciómetro de voltaje | 29 |
| Figura N ^o 22. Diagrama de conexión para pruebas del sensor de corriente | 30 |
| Figura N ^o 23. Señal del sensor de corriente Vs Tiempo..... | 31 |
| Figura N ^o 24. Señal del sensor de corriente sin filtrar vs señal filtrada..... | 32 |
| Figura N ^o 25. Señal del sensor de corriente sin filtrar vs señal filtrada..... | 34 |
| Figura N ^o 26. Diagrama de la planta..... | 34 |
| Figura N ^o 27. Representación gráfica de la planta..... | 34 |
| Figura N ^o 28. Diagrama de salida de la planta | 35 |
| Figura N ^o 29. Identificación de la planta Corriente vs Tiempo..... | 37 |
| Figura N ^o 30. Códigos en Matlab | 37 |
| Figura N ^o 31. Importación de datos en la herramienta Ident de Matlab..... | 38 |
| Figura N ^o 32. Simulación de la estimación de la planta Matlab..... | 38 |
| Figura N ^o 33. Modelado Planta Matlab | 39 |
| Figura N ^o 34. Planta en Matlab..... | 40 |
| Figura N ^o 35. Respuesta Step de la planta en Matlab..... | 40 |
| Figura N ^o 36. Ingreso de datos a la herramienta Sisotool de Matlab..... | 41 |
| Figura N ^o 37. Cálculo del controlador Matlab..... | 42 |
| Figura N ^o 38. Diagrama de bloques de controlador y planta..... | 43 |
| Figura N ^o 39. Planta sin controlador (azul) vs Planta con controlador (verde)..... | 44 |
| Figura N ^o 40. Instalación Arduino 1 | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura N ^o 41. Instalación Arduino 2..... | 46 |
| Figura N ^o 42. Instalación Arduino 3..... | 47 |
| Figura N ^o 43. Instalación Arduino 4..... | 47 |
| Figura N ^o 44. Ventana de programación Arduino | 48 |
| Figura N ^o 45. Instalación de software MegunoLink 1..... | 49 |
| Figura N ^o 46. Instalación de software MegunoLink 2..... | 49 |
| Figura N ^o 47. Pantalla de inicio MegunoLink | 50 |
| Figura N ^o 48. Instalación de Librerías MegunoLink 1 | 50 |
| Figura N ^o 49. Interfaz Gráfica Show Visualizers | 51 |
| Figura N ^o 50. Interfaz gráfica Sistema de Control para Anodizado tipo 2..... | 51 |
| Figura N ^o 51. Interfaz gráfica Sistema de Control..... | 52 |
| Figura N ^o 52. Plano de la estructura | 55 |
| Figura N ^o 53. Estructura finalizada..... | 55 |
| Figura N ^o 54. Prueba de continuidad de la pieza..... | 56 |
| Figura N ^o 55. Pieza a través de los baños de limpieza, decapado y desoxidante | 57 |
| Figura N ^o 56. Pieza en la cuba de anodizado..... | 58 |
| Figura N ^o 57. Grafica de control de corriente vs tiempo | 61 |
| Figura N ^o 58. Prueba de continuidad en pieza anodizada..... | 61 |
| Figura N ^o 59. Grafica de control de corriente vs tiempo pieza 1..... | 63 |
| Figura N ^o 60. (a)Pieza terminada (b) Prueba de continuidad en la pieza 1 | 63 |
| Figura N ^o 61. Grafica de control de corriente vs tiempo pieza 2..... | 64 |
| Figura N ^o 62. (a)Pieza terminada (b) Prueba de continuidad en la pieza 2 | 64 |
| Figura N ^o 63. Grafica de control de corriente vs tiempo pieza 3..... | 65 |
| Figura N ^o 64. (a)Pieza terminada (b) Prueba de continuidad en la pieza 3 | 65 |
| Figura N ^o 65. Grafica de control de corriente vs tiempo pieza 4..... | 66 |
| Figura N ^o 66. (a)Pieza terminada (b) Prueba de continuidad en la pieza 4 | 66 |
| Figura N ^o 67. Falla en el anodizado..... | 67 |

RESUMEN

Este trabajo de titulación tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema de control para anodizado tipo 2, con el cual se pueden realizar pruebas con diferentes tipos de piezas de aluminio y mejorar la calidad de presentación y durabilidad de estas piezas. El diseño de la planta como tal nos ayudará a obtener una película de óxido mucho más gruesa artificialmente y a mejorar las características de protección de la capa superficial de las piezas de aluminio. Esto se obtiene mediante un proceso químico y electrolítico. La anodización es un proceso industrial utilizado para lograr la protección del material de aluminio de los agentes atmosféricos, utilizando una forma controlada de parámetros importantes como el flujo, la temperatura, el espesor de la capa de película anódica, en el aluminio y diferentes aleaciones. La capa formada nos ayudará a obtener una superficie de mejor calidad, adecuada para diferentes aplicaciones. En el anodizado arquitectónico utilizado para interiores y exteriores, puede evitar la corrosión y el desgaste causado por los agentes existentes en el medio ambiente, es de bajo costo y mejora la vida útil por completo. Este equipo de procesamiento para anodizado, está dirigido a una empresa que se dedica a mejorar la calidad de presentación de su producto.

PALABRAS CLAVE

- **ANODIZADO**
- **PROTECCIÓN DE ALUMINIO**
- **CONTROL DE CORRIENTE**
- **SISTEMA DE CONTROL PI**

ABSTRACT

This degree work is aimed at the design and implementation of a control system for anodized type 2, with which you can due testing with different kinds of aluminum parts and improve the quality of presentation and durability of these parts. The design of the plant as such will help us to get a much more thickness oxide film artificially and improve the protection features of the surface layer of aluminum parts. This is obtained by a chemical process and electrolytic. Anodizing is an industrial process used to achieve the protection of aluminum material from atmospheric agents, using a controlled form of important parameters such as flow, temperature, the thickness of the layer of Anodic film, on the aluminum and different alloys. The formed layer will help us get a better quality surface, suitable for different applications. In the architectural anodized used for indoor and outdoor, can prevent corrosion and wear caused by the existing agents in eco-friendly, low-cost maintenance and useful life improves completely. This processing equipment for anodizing is aimed at a company that is dedicated to improving the quality of presentation of your product.

KEY WORDS

- **ANODIZED**
- **ALUMINUM PROTECTION**
- **CURRENT'S CONTROL**
- **PI CONTROL SYSTEM**

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes de la investigación

SupraCNC es una marca de la empresa Suprarain Cía. Ltda. Se dedica a la fabricación de maquinaria con control numérico por computador, dentro de la ciudad de Quito y con comercialización dentro de todo el territorio ecuatoriano.

El 21 de Septiembre del 2007 se constituye la empresa bajo el nombre de Suprarain Cía. Ltda. Con el objeto de realizar las siguientes actividades:

- Fabricación, promoción y venta de todo tipo de artículos relacionados a la seguridad personal.
- Fabricación, promoción y venta de armas.
- Producir, realizar, promocionar y comercializar cualquier tipo de trabajo de metal-mecánica.

Todas estas actividades se realizaron conforme a las leyes vigentes hasta el año 2010 cuando se presentaron cambios tanto en la normativa como en las leyes pertinentes a la actividad que se estaba realizando, por lo que se comenzó con el planteamiento de un cambio de actividad. En el año 2011 se realiza finalmente el cambio a los estatutos sociales para comenzar con el trabajo en las siguientes actividades, eliminando por completo la fabricación, promoción y venta de armas.

Fabricar maquinaria CNC de alta calidad, con precisión, excelente presencia, servicio técnico y mantenimiento, cumpliendo con los parámetros requeridos y alcanzando la satisfacción de nuestros clientes. Fabricar las mejores máquinas CNC del mercado bajo un estándar de mejoramiento continuo, ofreciendo soluciones adecuadas a las necesidades de nuestros clientes. La empresa fabrica al momento mesas de corte láser, plasma y router principalmente, ofreciendo un valor agregado por medio del servicio técnico, el mantenimiento y el desarrollo de soluciones adicionales para complemento de la maquinaria.

Durante el año 2011 se diseñó y fabricó la primera máquina Láser CNC, obteniendo buenos resultados y consiguiendo con esto el primer prototipo para demostraciones que se realizarían a los clientes. En ese mismo año se realizó la fabricación de la primera máquina Plasma CNC. Conforme se fue mejorando el diseño y rendimiento de las máquinas se pudo ver un incremento en el interés del mercado. Durante el año 2012 se realizaron varios diseños de nuevos modelos de máquinas, obteniendo excelentes resultados y equiparando la calidad de los equipos con los de la competencia directa e inclusive superándolos en algunos aspectos.

Al presente año se fabricaron varias máquinas y algunos de sus clientes son Induglob (Indurama), Mecaniza, Sigma Idea que poseen máquinas plasma, Mahe Publicidad, Publijob, Vm Creatives que poseen máquinas láser y Bartus que posee una máquina router y plasma. Con los avances en la electrónica y la aparición de nuevos dispositivos con características particulares actuales se hace posible implementar mecanismos y tecnologías que facilitan el tratamiento superficial de piezas de aluminio permitiendo mejorar la calidad y durabilidad del producto.

Una de las tecnologías existentes en el mercado es el anodizado, proceso electroquímico que crea una capa considerablemente más gruesa de óxido que la que se forma naturalmente. Esto brinda protección contra el desgaste mecánico y la corrosión además de convertir la superficie en aislante eléctrico. El proceso implica colocar el aluminio en un baño electrolítico con una corriente continua en la que éste actúa como ánodo. Cuando se aplica la corriente se forma una capa de óxido que pasa a formar parte integral del material. El espesor de la capa está determinado por una combinación de la temperatura y la composición del baño, la corriente aplicada y el tiempo de anodizado.

1.2 Sistema de anodizado de aluminio

El aluminio se utiliza rara vez al 100% puro, casi siempre se usa aleado con otros materiales, siendo un material que se oxida rápidamente con el aire cubriéndose de óxido de aluminio, por tanto al contacto con otros materiales puede darse intensos fenómenos de corrosión. (Pancorbo, 2010). El perfil de aluminio es un instrumento arquitectónico extruido y laminado para todo tipo de elemento arquitectónico.

Para obtener una capa superficial con una buena oxidación de aluminio donde no aparezca residuos de abrasión, corrosión o erosión del material se recurre un proceso industrial de tratamiento superficial de aluminio conocido como anodizado. El anodizado de aluminio es un proceso electroquímico, de oxidación forzada, por medio de este proceso el aluminio forma una capa protectora de óxido de aluminio sobre la superficie del aluminio base.

El proceso consiste en someter al aluminio a una inmersión de ácido sulfúrico, al pasar corriente se libera el oxígeno que se dirige al ánodo que al reaccionar con el aluminio genera una capa de óxido cuyo espesor varía con el tiempo de paso de la corriente. (Piña, 2013)

Para comprender el proceso de anodizado debemos tener claro que es la electroquímica que estudia las reacciones químicas que dan origen a la producción de una corriente eléctrica o que son producidas al paso de la corriente eléctrica. La electroquímica estudia también la conductividad eléctrica de las diferentes sustancias, particularmente las disoluciones de electrolitos débiles y fuertes. (Helpelr, 1968). Un proceso relacionado con la electroquímica es la electrolisis cuyo principio es: “aplicando una corriente continua a una disolución, mediante electrodos, se consigue la deposición de un metal determinado en el electrodo negativo”. (Arbellot, 1965)

Entonces la electrolisis es el cambio de energía eléctrica a energía química, los iones se transfieren entre dos electrodos, si se aplica una corriente eléctrica, los iones positivos migran al cátodo mientras que los iones negativos migran al ánodo, los iones positivos se denominan cationes y los componen los metales, mientras que los iones negativos se los llaman aniones estos llevan los electrones para dar la oportunidad de cederlos.

En el electrodo, los cationes serán reducidos y los aniones serán oxidados, el electrolito contiene los iones que conducen la corriente.

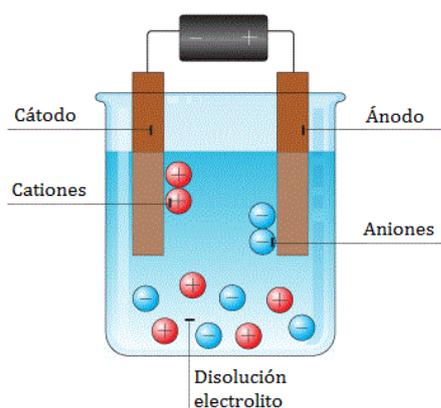


Figura N° 1. Electrolisis

Fuente: (Castellán, 1998)

1.2.1 Tipos de anodizado

Existen tres tipos de anodizado para aluminio y aleaciones de aluminio que se encuentran especificados en la norma MIL-A-8625F. El anodizado tipo 1 de ácido crómico y el anodizado tipo 2 y 3 de ácido sulfúrico.

En el anodizado tipo 1, el revestimiento es de 0,51[um] a 1,8[um] de espesor, para la formación de película se añade cromo en el proceso electrolítico y la tensión se intensifica a través del proceso.

En el anodizado tipo 2, el revestimiento es de 1,8[um] a 25,4[um] de espesor formado por ácido sulfúrico en 15% y el 85% en agua, por 12[ASF] (amperios por pie cuadrado), 18-24[V], 20[°C] a 22[°C] para 60[min]. Se utiliza en piezas industriales sometidas a una gran exigencia técnica, decorativa y/o que requieren una elevada precisión del espesor de capa en sectores automotriz, empresarial.

En el anodizado tipo 3, el revestimiento es de 12,7[um] a 114,3[um] de espesor formado por 40[ASF] (amperios por pie cuadrado), 75[V], -3[°C] a 0[°C]. Se utiliza en piezas que requieran mayor dureza y resistencia a la abrasión, la capa de óxido crece un 50% en profundidad y el 50% restante queda superpuesto a la superficie. Por ello, se utiliza como técnica de redimensionado y recuperación de piezas en sectores empresariales y de alta tecnología, incluyendo militares y de defensa, aeroespacial y construcción.

El que resulta de interés para la construcción de una planta de anodizado es el tipo 2 ya que el rango de temperatura en el que se realiza el mismo es fácilmente manejable y no requiere ningún sistema de refrigeración y se necesita espesores de la capa precisos.

Para el manejo de residuos de la solución de ácido sulfúrico se neutraliza la misma con bicarbonato de sodio o lechada de cal (hidróxido de calcio). En caso de existir fugas o derrames de ácido, se deberá lavar inmediatamente con agua abundante el área contaminada; y posteriormente neutralizar la acidez remanente con los químicos antes mencionados.

1.3. Factores que influyen en las aplicaciones electrolíticas.

Entre los factores que más influyen en las aplicaciones electrolíticas son:

- ✓ Densidad de Corriente
- ✓ Concentración
- ✓ Composición del Electrolito
- ✓ Temperatura
- ✓ Agitación.

La densidad de corriente expresada en amperios por dm^2 regula el espesor de la capa electrolítica siempre que sea posible utilizar corrientes bastante elevadas, el aumento de la corriente afina el tamaño del metal depositado, se debe tener cuidado también de que si elevamos demasiado la corriente se corre el riesgo de tener superficies quemadas es decir superficies sin consistencia.

La concentración de las sales en la solución (electrolito), que permiten elevar la densidad de la corriente especialmente si este aumento se combina con la elevación de temperatura y la agitación de la misma.

La velocidad de oxidación es proporcional al grado de disociación electrolítica que se mide por la conductibilidad del electrolito en la siguiente grafica se observa la variación de esta característica en función de la concentración se ve que esta presenta un máximo para un 30% de H₂SO₄ aproximadamente.

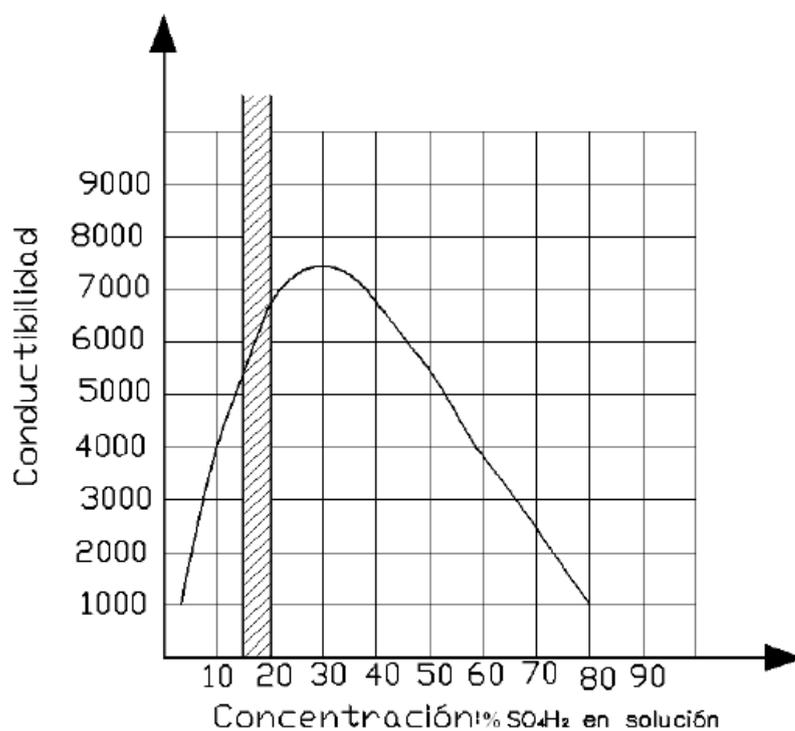


Figura N° 2. Concentración de ácido sulfúrico vs conductividad
Fuente: (Universidad de Valencia, 1995)

Si el 30% de H₂SO₄ es un máximo para la velocidad de oxidación entonces esto quiere decir que la velocidad de disolución es más fuerte. Para la práctica se admite un aproximado del 20% o (180g/l) de H₂SO₄. La reducción de la concentración a (150g/l) tiende a disminuir la velocidad de disolución la cual resulta ser muy pequeña.

Existe un aumento inicial de la conductividad a medida que aumenta la concentración hasta un valor máximo, lo que se explica por existir un mayor número de iones dispuestos para la conducción.

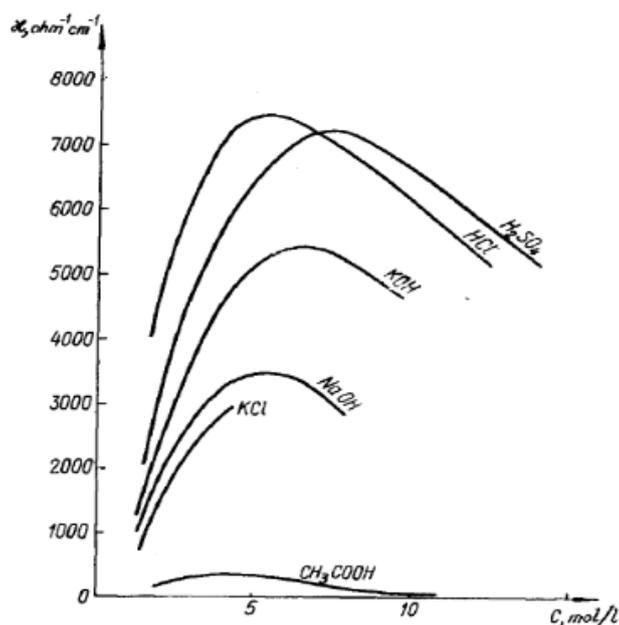


Figura N° 3. Variación de la conductividad para distintos electrolitos

Fuente: (Universidad de Valencia, 1995)

A partir de un determinado valor de concentración, la conductividad comienza a disminuir, debido a que las interacciones asociativas entre los iones dificultan la conducción de la corriente.

La temperatura afecta directamente a la conductividad del electrolito y la solubilidad de las sales esto se refiere que entre mayor sea la concentración de iones a mayor temperatura la corriente será más fuerte mientras que si la temperatura disminuye la corriente será menor.

Por tanto la temperatura en los baños no puede ser menor de 15°C ya que la dureza del film anódico se hace más duro, para fines prácticos se recomienda un valor nominal de 20°C .

La temperatura debe ser controlada dentro del proceso de anodizado ya que se puede producir un fenómeno de pulverulencia (fenómeno en el cual el re ataque de la capa de óxido llega a no dejar poros sobre la superficie de aluminio).

La agitación de la solución contribuye al flujo de electrones de la zona anódica, también impide en mayor o menor medida la adherencia de burbujas gaseosas sobre el cátodo, mismas que producen picaduras en su superficie.

Hay que tener cuidado con la introducción de impurezas por causa de la agitación las cuales hacen que el recubrimiento resulte rugoso o como picado se debe realizar un filtrado del ácido sulfúrico para prevenir la introducción de las impurezas.

1.3.1 Oxidación Corrosión del Aluminio, Alúmina

El aluminio por ser un metal resistente, económico, abundante, más liviano que el hierro y extremadamente moldeable se dice que no se oxida pero en realidad como la mayoría de los metales comunes es inestable en la presencia de oxígeno.

Este se oxida pero no se percibe a simple vista ya que al oxidarse se produce óxido de aluminio y este se deposita en la parte exterior del aluminio en una capa microscópica, transparente que da una apariencia de que no se oxidara.

Esta capa microscópica es químicamente igual a los minerales que conocemos como corindón, rubí o zafiro, los cuales son extremadamente resistentes, solo superados por el diamante.

La oxidación del aluminio es rápida, sucede apenas el aluminio entra en contacto con el oxígeno en el aire, completando una capa de óxido transparente en segundos, podemos usar la expresión “el aluminio siempre está cubierto de óxido”.

Para el proceso de protección del aluminio lo que se hace es oxidar más al aluminio creando una capa más gruesa de óxido, protegiéndolo aún más, este aluminio toma el nombre de anodizado.

Lo que le afecta directamente al aluminio es el mercurio, en estado líquido y a temperatura ambiente, este penetra rápidamente, y evita que se siga formando óxido de aluminio.

La corrosión en el aluminio es muy resistente comparado con el acero por su durabilidad y resistencia a la corrosión este tiene una menor resistencia a la corrosión de contacto con otro metal.

Respecto a la corrosión frente al ambiente, para que se produzca solo se requiere que el aluminio este en contacto con el oxígeno. La velocidad a la que el aluminio se corroe, en un principio, es más rápida que en el caso del acero, debido a la mayor afinidad del oxígeno con el aluminio, pero una vez formada la capa de óxido en la superficie, ésta actúa como un escudo, ya que es muy dura y compacta, evitando de esta forma la progresión de la oxidación en el aluminio. No ocurriría lo mismo en el acero, ya que ésta seguiría avanzando hasta provocar el deterioro de la pieza.

Se denomina alúmina al óxido de aluminio que se forma en la pieza compuesta de este material, siendo una característica muy importante del aluminio, ya que se produce de modo espontáneo en la superficie de la pieza.

Esta capa de alúmina tiene la propiedad de que posee una temperatura de fusión muy elevada, de unos 2050°C, en comparación con los 660°C del aluminio.

La corrosión de contacto, se produce entre metales distintos puestos en contacto, y también entre pequeñas zonas de un mismo metal, en las que hay diferencias de potencial eléctrico. El medio que rodee a las piezas puede ser una atmósfera con gran contenido en vapor de agua, o con humedad superficial, ambiente que sirve como electrolito y permite la formación de pequeñas células electrolíticas en la superficie del metal.

Cada una de estas células consta de una zona positiva o ánodo que libera electrones y otra negativa o cátodo. Los electrones, que son partículas con carga negativa, fluyen del ánodo al cátodo. La pérdida de electrones por parte del ánodo convierte a algunos átomos del mismo en iones con carga positiva o cationes, los cuales pasan al electrolito y en él reaccionan con otros iones de carga negativa o aniones. Esta reacción entre el ánodo y el electrolito provoca la desintegración o corrosión del metal anódico, mientras que en el metal catódico no se produce corrosión.

La dirección del flujo de electrones entre dos metales en contacto a través de un electrolito, depende de su posición relativa en la serie galvánica dicha serie mide la tendencia de dichos materiales para sufrir corrosión. Cuando dos metales están sumergidos en un electrolito, a la vez que están conectados eléctricamente, el menos noble experimentará una corrosión galvánica.

Cuando se ponen en contacto mutuo dos de estos metales, los electrones fluyen desde el metal situado en la parte superior hacia el que está más bajo en la serie, esto significa que los metales que están por encima se convierten en anódicos y los situados más abajo en catódicos.

El metal que hace de ánodo se corroe de forma que protege al metal catódico. La descomposición es mayor cuanto más distanciados estén los metales en la serie de los metales. La corrosión por contacto del aluminio lleva a un deterioro rápido de las piezas, especialmente de aquellas que poseen poco espesor en la zona de contacto.

Las piezas de aleación de aluminio no deben estar en contacto con otras piezas metálicas, porque el aluminio es anódico con respecto a la mayor parte de los restantes metales corrientes y si sucede una acción electrolítica, es el aluminio el que sufre el ataque en mayor medida. Para prevenir esta corrosión de contacto del aluminio, este debe estar aislado todo lo posible de otros metales mediante pinturas epoxi, o imprimaciones de cinc. A su vez, para prevenir problemas de corrosión por contacto en las carrocerías de aluminio.

Igualmente, los adhesivos, tanto de lunas como estructurales, deben mostrar una resistencia de paso específica y no deben ser conductores de la electricidad ya que de lo contrario se corre el riesgo de provocar corrosión de contacto por su capacidad conductora.

El aluminio se comporta, respecto a la corrosión, de una forma óptima frente al ambiente, sin embargo, frente al contacto con otros metales, sufre la corrosión de un modo más agudo que el acero, por este motivo, a la hora de su reparación, será necesario utilizar adhesivos que no sean conductores de la electricidad, así como elementos de unión que dispongan de un recubrimiento de cinc en el caso de que sean de acero.

1.4 Principio del anodizado tipo 2

Se llena una cuba con agua agregada ácido sulfúrico, en este electrolito se instala un cátodo de polo negativo construido de plomo, y un ánodo de la pieza de aluminio conectado al polo positivo, se observa pequeñas burbujas desprendiéndose del cátodo (oxígeno) mientras que del ánodo no se observa ningún cambio.

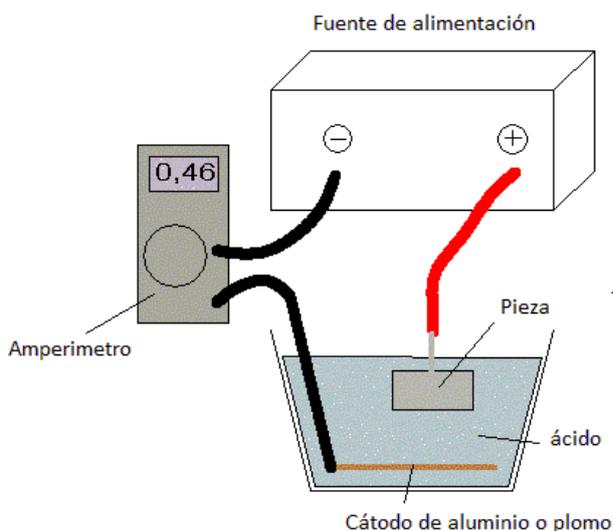


Figura N° 4. Proceso de Anodizado del aluminio

Al finalizar se puede observar que el ánodo (pieza de aluminio) ha sido recubierta a este proceso se lo llama Oxidación Anódica.

Por tanto el anodizado consiste en formar artificialmente una capa de óxido en la superficie de la pieza, en un medio electrolítico que es la mezcla de agua destilada con ácido sulfúrico atravesando por este un corriente eléctrica controlada cuya acción separa el oxígeno de los cátodos sobre la pieza, el metal se va transformando progresivamente desde la superficie hacia el interior, este procedimiento electroquímico permite aprovechar una propiedad que el aluminio ya tiene, su excelente resistencia a agentes químicos, dureza, baja conductividad eléctrica y estructura molecular porosa, estas características hacen que la terminación sea excelente para la protección del mismo.

1.4.1 Proceso de anodizado tipo 2

Para realizar el proceso de anodizado se debe someter la pieza a unos tratamientos previos, es importante mencionar que después de cada paso se requiere enjuagar la pieza por inmersión y realizar la prueba de rotura de agua. Los pasos se encuentran resumidos en la siguiente figura:

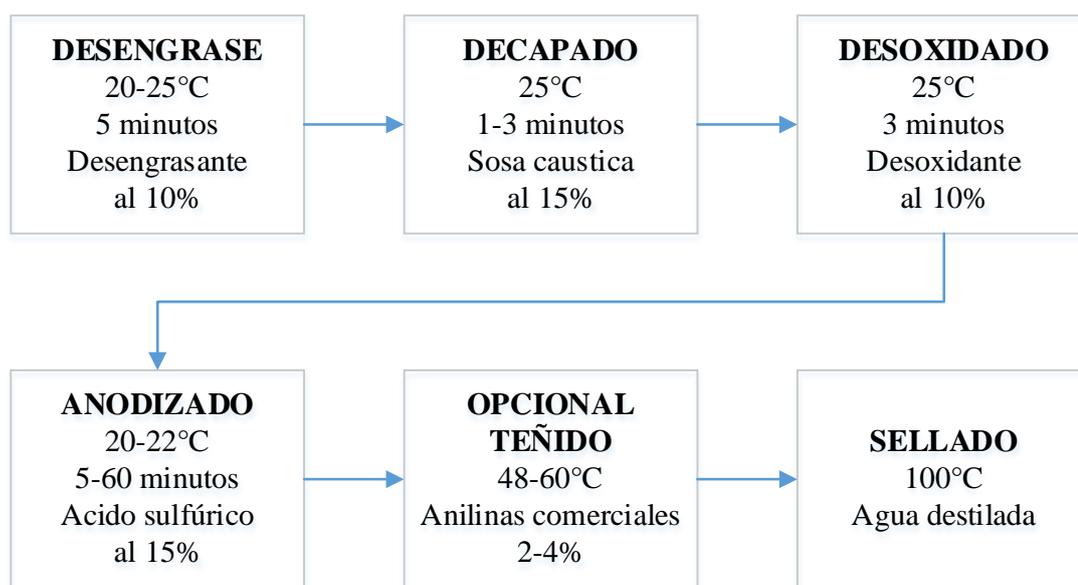


Figura N° 5. Pasos del anodizado del aluminio

Desengrase

Una vez con la pieza la cual va hacer tratada se utiliza un par de guantes de látex posteriormente se sumerge en desengrasante a una temperatura de 20 °C a 25 °C por un tiempo aproximado de 4-5 minutos.

Hay que tener presente que una vez desengrasada no se puede manipular la pieza con las manos hasta el final del proceso.

Decapado

El segundo paso es sumergir es una disolución de sosa caustica (hidróxido sódico) al 5%, teniendo encuentra que 50 - 100 gramos de sosa en un litro de agua.

La temperatura debe estar 25 °C el tiempo de inmersión es de 1 a 3 minutos dependiendo del tamaño y forma de pieza.

Desoxidante

Posteriormente sumergimos la pieza en desoxidante a una temperatura de 25° C por tiempo de 3 minutos.

Anodizado

Para el anodizado tipo 2 se emplea la solución al 15 % en ácido sulfúrico, y la temperatura de trabajo se fija a $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

La densidad normal de corriente es de entre 12[ASF] y 15[ASF] amperios por pie cuadrado y para un grosor de capa de 25 micrones se precisa un tiempo de anodizado calculado por la corriente.

El grosor de capa que se precisa está entre los 16 y 30 micrones, y para obtener un acabado uniforme y eliminar las señales de la extrusión.

Teñido

Para poder dar color a la pieza anodizada se debe dar un baño agua destilada previamente teñida con anilinas disueltas en un porcentaje de 2-4 %

El tiempo de inmersión en la cuba es variable depende de la ecuación

A mayor tiempo de inmersión dependerá de la estabilidad de calor del agua.

La temperatura está entre los 48 a 60 °C

Para este proceso se puede utilizar anilinas comerciales.

Sellado

Consiste en sumergir la pieza en agua destilada a una temperatura de 100°C alrededor de 20 minutos con esto obtenemos el cierre de los poros de la capa anódica mediante un proceso de calor con el cual se evita la modificación de la capa superficial de cualquier agente externo.

Una vez terminado el proceso se debe tomar precauciones de contaminación en el movimiento de la pieza en cada proceso ya que una vez sellado quedaran expuestas si hubo contagio de impurezas en el medio de trabajo donde se realiza el anodizado y este es irreversible a su culminación.

1.5. La regla 720

Esta regla establece que se necesita 720 Amperios minutos por pie cuadrado para producir 1mil de espesor de la capa de anodizado (1mil = 0.001 [in] = 25.4 [um]).

$$720 = \frac{[ASF] * [min]}{[mil]}$$

También se puede decir que se necesitan 12[ASF] para producir 1[mil] en 60[min]

$$ASF = \frac{720 * 1[mil]}{60[min]}$$

$$ASF = 12$$

Para el anodizado Tipo II en el que los espesores van de 1.8 [um] a 25.4 [um] y con una densidad de corriente 12ASF.

$$1.8[um] = 0.00007[in] = 0.07[mil]$$

$$\frac{720 * 0.07[mil]}{12[ASF]} = 4.2[min]$$

$$25.4[um] = 0.001[in] = 1[mil]$$

$$\frac{720 * 1[mil]}{12[ASF]} = 60[min]$$

Se estima que se va a demorar 4,2[min] y 1[h] en producir 1.8 [um] y 25.4 [um] respectivamente, de acuerdo a la experiencia de varios anodizadores, esta regla tiene un 10% de aproximación.

1.6 Prueba de rotura de agua

Esta prueba es probablemente uno de los procedimientos más importantes en cualquier operación de galvanoplastia o anodización. Es necesario llevar a cabo esta prueba después de hacer todo el trabajo de preparación, incluyendo desengrasado, decapado, desoxidante.

Para realizar la prueba de rotura de agua se debe seguir los siguientes pasos:

1. Tome una pieza limpia y seca y colóquela en posición vertical.
2. Use una botella de spray que contenga agua destilada.
3. Rocíe la parte dos a tres veces desde al menos 15cm de distancia.
4. Si la pieza está limpia y libre de residuos aceitosos, el rocío de agua debe desprenderse.
5. Si queda algún residuo aceitoso, el agua tiende a hacerse gotas.
6. Repita el proceso de limpieza hasta que la pieza pase la prueba.

Alternativamente, aplique varias gotas de agua destilada a las superficies limpiadas. Si la superficie está inadecuadamente limpiada, la forma esférica de la gota queda retenida en gran medida y la superficie debe limpiarse una vez más. Si el agua corre sobre la superficie tratada, entonces la humectación ha sido satisfactoria y la pieza está lista para el recubrimiento (ver figura N°5).



a. Las impurezas hacen que se formen gotas en la pieza



b. Pieza limpia sin impurezas

Figura N° 5. Prueba de la rotura de agua

CAPÍTULO II

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Para el diseño e implementación del sistema de anodizado tipo 2 se realizará un diagrama de los bloques que lo componen y la instrumentación necesaria para cada uno de ellos.

2.1 Diagrama de proceso e instrumentación

En la siguiente figura se detalla el diagrama de proceso e instrumentación del anodizado. La etapa E-1 corresponde al desengrase, E-2 decapado, E-3 desoxidado, E-4 anodizado, E-5 teñido, E-6 sellado y la etapa E-7 corresponde al sistema de refrigeración.

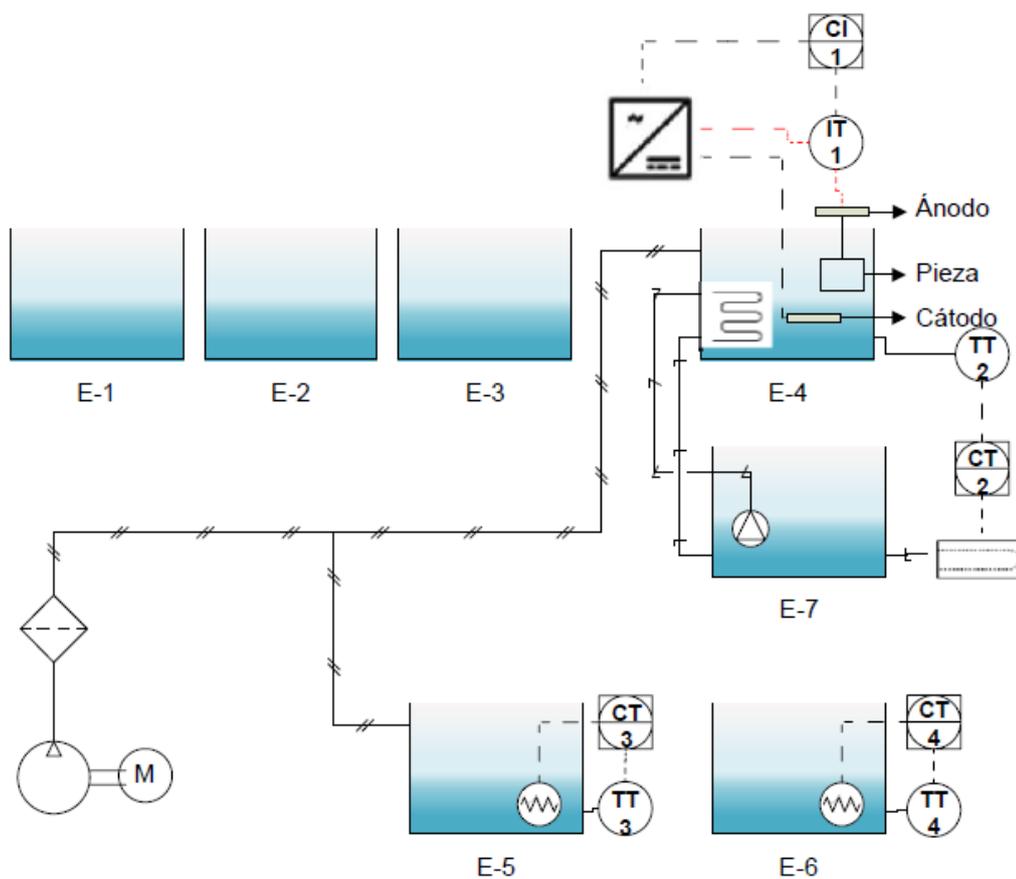
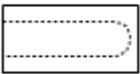
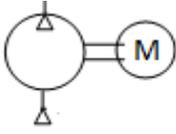
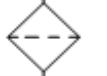


Figura N° 6. Diagrama P&ID del anodizado del aluminio

A continuación se muestra la simbología utilizada en el diagrama anterior

Tabla N° 1.

Simbología diagrama P&ID

| Simbología | |
|---|--|
| Símbolo | Definición |
|  | Bomba |
|  | Calentador eléctrico |
|  | Chiller/Sistema de enfriamiento |
|  | Compresor |
|  | Controlador accesible al operador |
|  | Filtro de aire |
|  | Fuente de alimentación |
|  | Instrumento montado en campo |
|  | Serpentín de titanio para enfriamiento |
|  | Conexión eléctrica |
|  | Conexión hidráulica |
|  | Conexión neumática |
| TT | Transmisor de temperatura |
| IT | Transmisor de corriente |
| CI | Controlador de corriente |
| CT | Controlador de temperatura |

En la siguiente figura se observa el diagrama de anodizado a detalle:

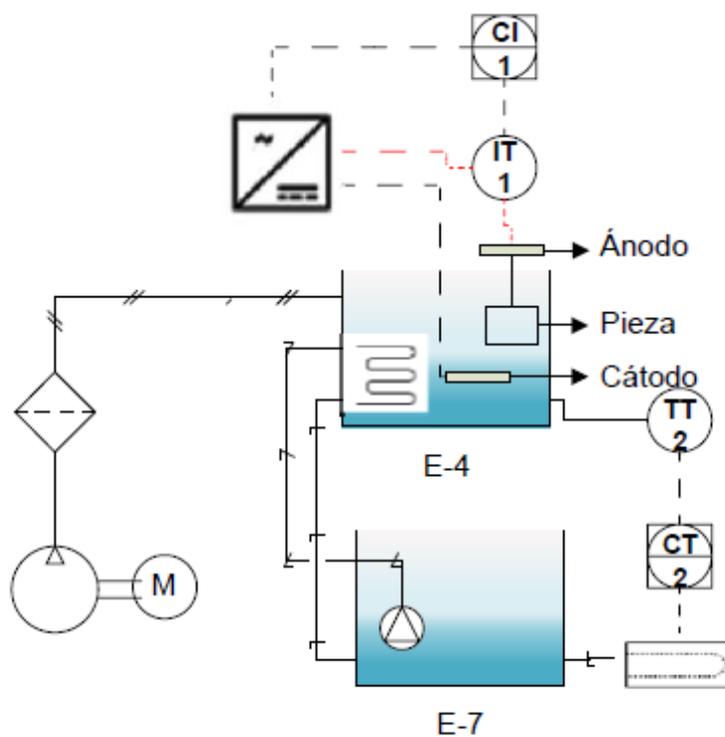


Figura N° 7. Diagrama P&ID etapa de anodizado

En la siguiente figura se observa el diagrama de teñido y sellado a detalle

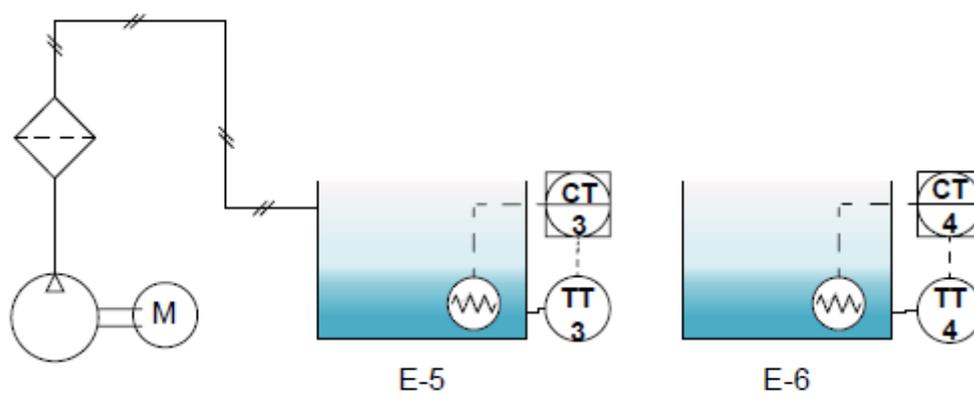


Figura N° 8. Diagrama P&ID etapa de teñido y sellado

2.1.1. Diagrama de bloques del sistema de control

El diseño e implementación del control de corriente se realiza en la etapa de anodizado. Se debe mantener una corriente constante para que la capa de óxido anódico que se forma sea uniforme. El óxido anódico ofrece buena resistencia. A medida que aumenta su espesor, se vuelve más resistente al paso de corriente eléctrica. El anodizado se puede realizar de dos formas: por control de tensión y por control de corriente.

Al aplicar un nivel de tensión constante al baño de anodizado, sólo será capaz de superar un cierto nivel de resistencia. Esto significa que la densidad de corriente decaerá mientras el proceso de anodización continúa, produciendo un óxido anódico que será menos resistente a la abrasión. Por el contrario, un óxido anódico, formado en una corriente constante, será consistente a lo largo del tiempo, independientemente de las condiciones variables.

Otra ventaja de utilizar corriente constante es el ahorro de tiempo. Debido a que la corriente decae cuando se utiliza voltaje constante, se necesita más tiempo para formar el espesor de óxido necesario. Con corriente constante, de acuerdo a la regla de 720, se puede predecir con exactitud el tiempo necesario para formar una capa de espesor de óxido dado. Esto significa que las partes que están siendo anodizadas pasarán menos tiempo en el baño de ácido sulfúrico y tendrán menos disolución de óxido de la superficie exterior debido a la proximidad del óxido con el ácido.

La corriente en exceso produce que se anodice más rápido la pieza, pero puede quemar el alambre colgante. El anodizado a alta corriente puede erosionar la película, haciendo que aparezcan marcas. Esto es debido a que provoca temperaturas mucho más altas en el tanque.

Si se emplea una combinación de alta temperatura y baja densidad de corriente, la capa de óxido resultante tendrá una baja resistencia a la abrasión y lo más probable es que tenga alta resistencia al sellado. También es importante realizar la realimentación en el proceso de anodizado, ya que existe un punto cuando la corriente decae, a esto se le conoce como un pico de resistencia anódica.

Cuando se alcanza un pico de resistencia anódica, la película deja de crecer y al seguirse aplicando una corriente diferente a la especificada, provoca erosión en la película. Es necesario tener un amperímetro en el sistema para evitar que llegue al pico de resistencia anódica y tomar las medidas respectivas. Si se aplica una corriente irregular en la pieza se producen bordes oscuros. Por las razones expuestas anteriormente se realizó de control de corriente con realimentación.

El lazo de control de corriente está conformado por la fuente de alimentación, el sensor de corriente, el controlador y la planta.

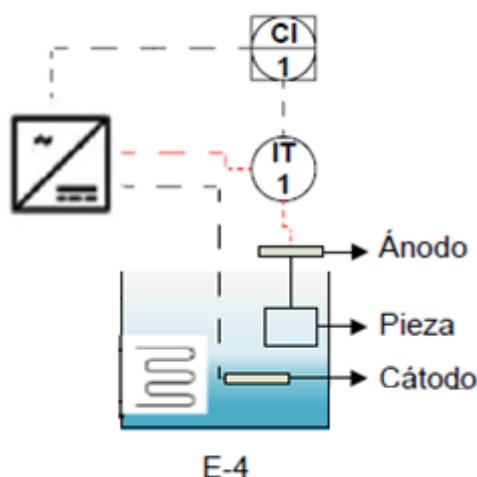


Figura N° 9. Diagrama del Sistema de Control de Corriente

El sistema de control está dado por el siguiente diagrama: la señal de mando es el setpoint o la corriente con la que se desea anodizar la pieza, la señal manipulada es el voltaje (se varía el voltaje para mantener la corriente constante), la señal controlada es la corriente y la realimentación se realiza por el sensor de efecto hall.

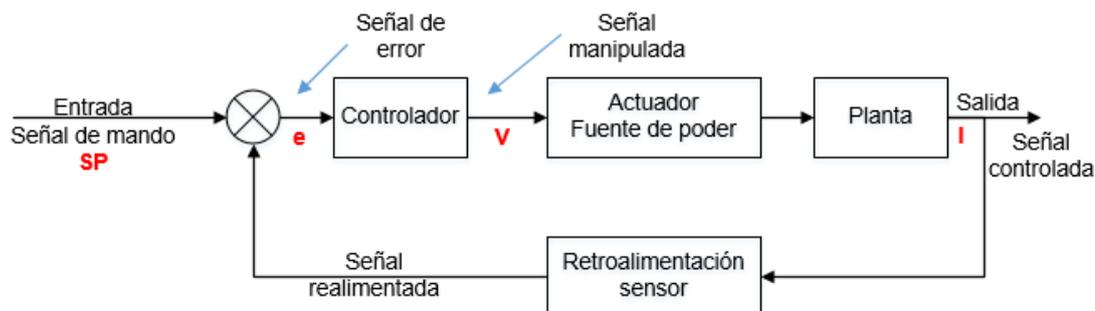


Figura N° 10. Diagrama de bloques del Sistema de Control de Corriente

2.1.2. Selección de la fuente

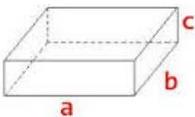
Para elegir los componentes eléctricos es necesario calcular el amperaje requerido. De acuerdo a las especificaciones de la empresa la pieza más grande existente es de 400*500*25[mm], sin embargo fue difícil hallar una cuba comercial para esas piezas.

Por lo tanto se optó por reducir la cuba a unas que se encontraron comercialmente. Las medidas de la cuba son 400x350x250[mm], en estas cubas solo se puede sumergir una pieza máximo de 450x150x25[mm].

Para hallar el cálculo de la corriente, se realizan los siguientes cálculos

Tabla N° 2.

Cálculos de corriente

| Datos | Pieza=400*500*25[mm] | Pieza=450*150*25[mm] |
|---|--|--|
| | Espesor=25.4[um]=1[mil] I=12[ASF] 1m ² = 10.7639ft ² | Espesor=25.4[um]=1[mil] I=12[ASF] 1m ² = 10.7639ft ² |
| Área | a= 0.40[m] b=0.50[m] c=0.025 [m] | a= 0.45[m] b=0.15[m] c=0.025 [m] |
| Largo: a Ancho: b Alto: c | $A = 2(ab + ac + bc)$ $A = 2(0.4 * 0.5 + 0.4$ * 0.025 + 0.5 * 0.025) $A = 0.445[m^2] = 4.79[ft^2]$ | $A = 2(ab + ac + bc)$ $A = 2(0.45 * 0.15 + 0.45$ * 0.025 + 0.15 * 0.025) $A = 0.165[m^2]$ = 1.77[ft ²] |
|  | | |
| Corriente | $I = A[ft^2] * \#piezas * [ASF]$ $I = 4.79[ft^2] * 1$ * 12 $\left[\frac{A}{ft^2}\right]$ $I = 57.47[A]$ | $I = A[ft^2] * \#piezas$ * [ASF] $I = 1.77[ft^2] * 1$ * 12 $\left[\frac{A}{ft^2}\right]$ $I = 21.31[A]$ |

Con la pieza más grande que tienen en la actualidad en la empresa se llegaría a ocupar máximo 60[A], sin embargo se prefirió que el diseño se realice con 80[A], para tener un margen mayor de corriente, para futuras ampliaciones.

Considerando que la corriente máxima que se manejará será 80[A], con este valor de corriente se procede a elegir los materiales adecuados.

La fuente de alimentación utilizada es de la marca Yucco YK-AD15100, sus características son las siguientes:

- Entrada: AC220V±15% 50/60hz
- Voltaje: (0-15)VDC ajustable
- Corriente: (0-100)A ajustable
- Potencia: 1500W
- Ventiladores de control de temperatura
- Sobre temperatura automática
- Sobretensión de salida
- Sobre corriente
- Protección contra cortocircuitos.



Figura N° 11. Fuente de Alimentación Yucco
Fuente: (Yucco Network Equipment Co., 2012)

Se elige esta fuente de poder por el valor máximo de corriente que puede suministrar y por las características de protección contra cortocircuitos, sobretensión y sobre temperatura haciéndola una fuente robusta para trabajo industrial.

2.1.3. Controlador

El controlador se implementa en una tarjeta Arduino uno. Debido a que es una solución práctica y económica



Figura N° 12. Tarjeta Arduino uno
Fuente: (Arduino Co., 2014)

Tabla N° 3.

Especificaciones Tarjeta Arduino

| | |
|-----------------------------------|---------------------|
| Microcontrolador | ATmega328P |
| Voltaje de operación | 5V |
| Voltaje de entrada | 7-12V |
| Voltaje de entrada(límite) | 6-20V |
| Pines Digitales E/S | 14 (6 salidas PWM) |
| Pines PWM Digital E/S | 6 |
| Pines entradas digitales | 6 |
| Corriente DC por pin E/S | 20 mA |
| Flash Memory | 32 KB (ATmega328P) |
| SRAM | 2 KB (ATmega328P) |
| EEPROM | 1 KB (ATmega328P) |
| Velocidad de reloj | 16 MHz |

Fuente: (Arduino, 2014)

Para realizar el control se necesita una salida análoga, por lo tanto se adiciona un módulo conversor digital-análogo MCP4725 de 12 bits



Figura N° 13. Conversor Digital-Análogo MCP4725
Fuente: (Microchip, 2010)

Conexiones

Tabla N° 4.

Conexiones Conversor D/A

| MCP4725 | Arduino uno |
|---------|-------------|
| VDD | 5V |
| GND | GND |
| SDA | A4 |
| SCL | A5 |
| A0 | - |

Fuente: (Microchip, 2010)

VOUT es el voltaje de salida de la DAC. Para obtener un voltaje análogo se escribe un valor entre 0 y 4095 bits que representan un voltaje de 0-5[V]

2.1.4 Sensor de corriente

El sensor con el que se trabaja es un sensor de efecto hall, tiene las siguientes características:

Alimentación: ± 12 V

Rango: 0-100A

Salida: 0-5V

Resolución: 0.05V/A



Figura N° 14. Sensor de corriente de efecto hall

Fuente: (Shenzhen XinRuida Electric Power Equipments Co., Ltda, 2010)

Dimensiones y cableado

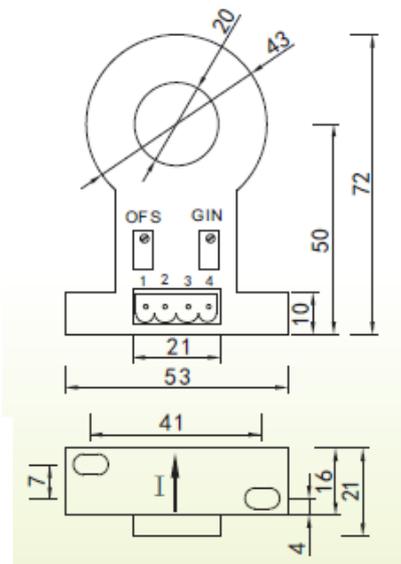


Figura N° 15. Dimensiones sensor de corriente

Fuente: (Shenzhen XinRuida Electric Power Equipments Co., Ltda, 2010)

Tabla N° 5.

Conexiones Sensor de corriente

| Pin | Conexión |
|-----|--|
| 1 | (+) terminal positivo de alimentación +12V |
| 2 | (-) terminal negativo de alimentación -12V |
| 3 | (M) medición del terminal de salida Out |
| 4 | (G) tierra GND |

Fuente: (Shenzhen XinRuida Electric Power Equipments Co., Ltda, 2010)

Se elige este sensor por ser robusto, por su rango máximo de 100[A] y por la salida que se encuentra de 0-5V. (Véase el Anexo A, para ver el datasheet del sensor)

2.1.5 Sensor de temperatura

Para medir la temperatura se utilizan termocuplas tipo K ya que cubren un amplio rango de temperaturas (-40 a 1200 °C) y poseen linealidad en el rango de trabajo requerido para el proceso de anodizado (20 a 100°C).



Figura N° 16. Sensor de temperatura
Fuente: (Arian Control & Instrumentación, 2009)

(Véase el Anexo B, para obtener información sobre la implementación del control de temperatura)

2.2 Diseño e Implementación del controlador de corriente

El esquema de conexiones del sistema a implementar se muestra en la figura

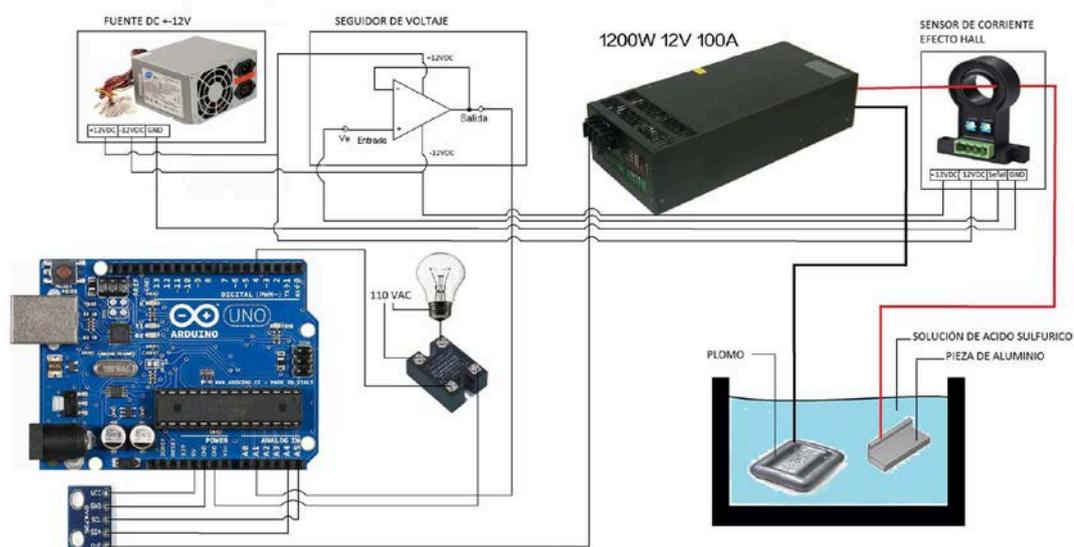


Figura N° 17. Esquema de conexiones del sistema

2.2.1 Explicación del funcionamiento del controlador

Al enviar un valor de setpoint, el controlador Arduino envía una señal de voltaje analógico entre 0-5V a la fuente de alimentación. La fuente de alimentación envía este valor hacia la planta en un rango de 0-15V, el sensor de corriente se encarga de medir la corriente actual en la pieza y el controlador utiliza esta medida para ajustar el valor del voltaje en la fuente de alimentación, que varía la corriente de anodizado.

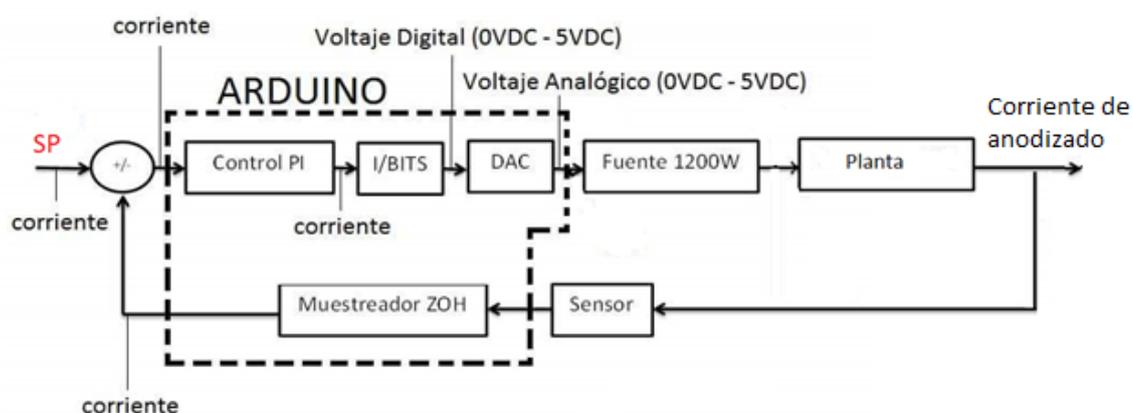


Figura N° 18. Diagrama del Controlador de Corriente

Antes de diseñar e implementar el controlador se realizó las modificaciones necesarias en la fuente de alimentación para poder obtener la señal manipulada que es el voltaje y se realizó el acondicionamiento del sensor de corriente.

2.2.2 Modificación de la fuente de alimentación

La fuente de alimentación seleccionada fue modificada para recibir la señal del controlador y que esta señal reemplace el efecto de potenciómetro de ajuste de voltaje a la salida.

En la fuente de alimentación se sustituye el potenciómetro del voltaje, mientras que la perilla del amperaje se deja al máximo. De esta manera se consigue variar el voltaje, para obtener la corriente deseada.



Figura N° 19. Fuente de alimentación

Para realizar las pruebas se necesitó una carga que consumiera corriente DC, al no contar con resistencias de potencia, se utilizó un motor universal para simular la carga.

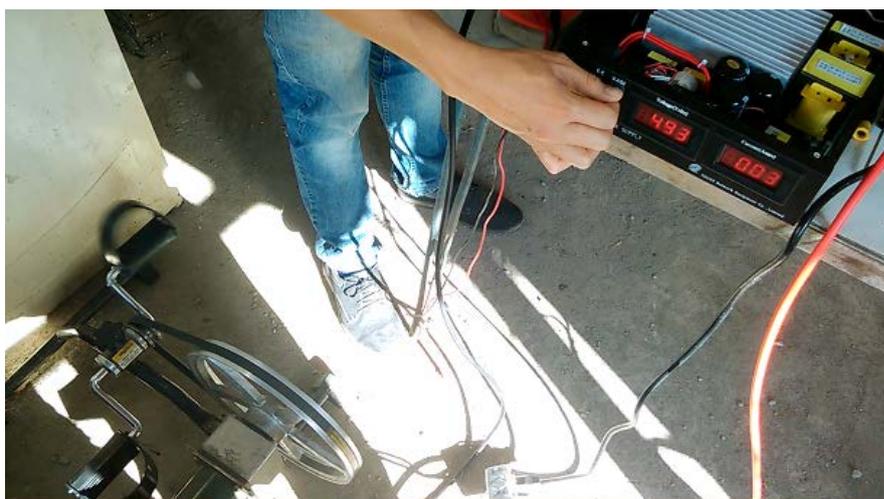


Figura N° 20. Funcionamiento de la fuente de alimentación con carga

Se determinó que la tensión entregada por la fuente de alimentación es tres veces la tensión en el terminal móvil del potenciómetro.

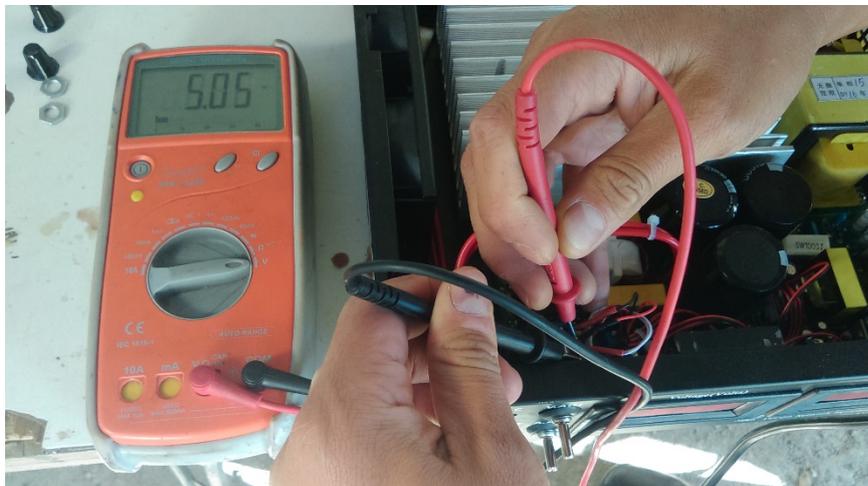


Figura N° 21. Medición de voltaje en el potenciómetro de voltaje

La tensión del terminal móvil del potenciómetro fue reemplazada por la salida del convertor digital/análogo del microcontrolador.

A continuación se presenta el programa que genera una tensión variable en forma de rampa de 0-15[V] a la salida de la fuente.

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>
Adafruit_MCP4725 dac;
uint32_t value=4095;
int value=0;
void setup() {
  dac.begin(0x60);
}
void loop() {
  dac.setVoltage(value,false);
  value++;
  delay(10);
  if(value>4096)
  value=0;
}
```

2.2.3 Acondicionamiento de la señal de corriente

Se realizó las pruebas del sensor de corriente de acuerdo el siguiente diagrama.

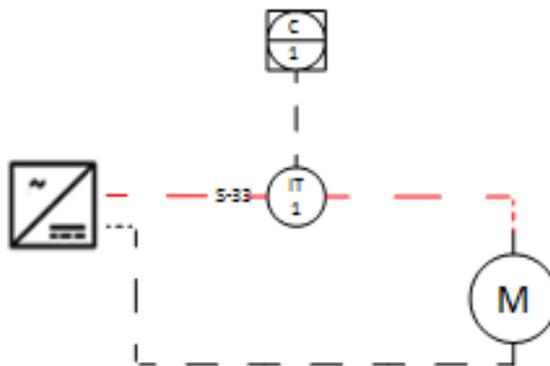


Figura N° 22. Diagrama de conexión para pruebas del sensor de corriente

Se escribió un código para apreciar la señal del sensor en la computadora. El siguiente programa lee el valor del sensor y lo grafica en MegunoLink

```
#include "MegunoLink.h"
TimePlot Plot1;
int sensorPin = A0;
void setup() {
  pinMode(sensorPin,INPUT);
  Serial.begin(9600);
  TimePlot Plot1("Control");
}
void loop() {
  aux=analogRead(sensorPin); //lectura del sensor
  x= (aux*5)/(1024*0.05); //paso a corriente al sensor
  Plot1.SendData("Control", y); //Impresión filtro fir 2do orden
}
```

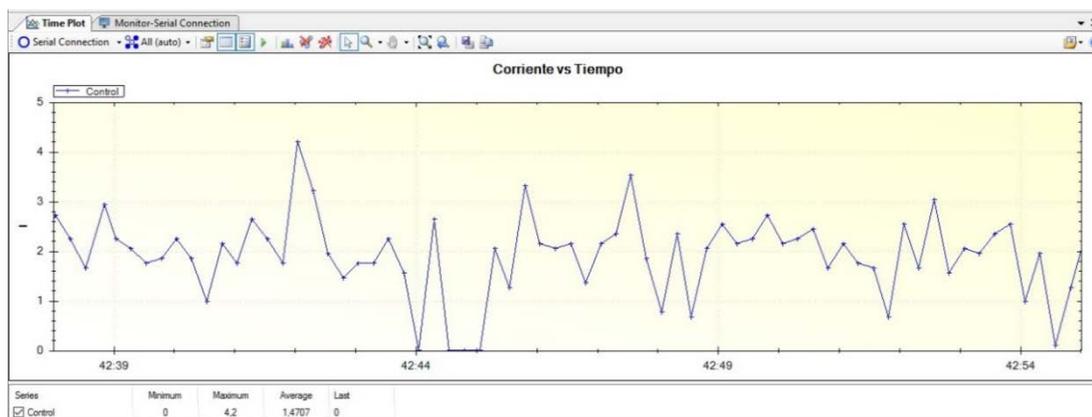


Figura N° 23. Señal del sensor de corriente Vs Tiempo

Se determina que se necesita realizar un filtro para la señal del sensor ya que se observó mucho ruido.

Para la implementación del filtro se utilizó filtros activos y pasivos, siendo que no se obtuvo mejoría se optó por implementar un filtro digital en la tarjeta Arduino para mejorar la señal.

- Filtro IIR de 1er orden

$$y[n] = 0,5 \cdot x[n] + 0,5 \cdot y[n - 1]$$

Código de Arduino

```
#include "MegunoLink.h"
TimePlot Plot1,Plot2;
int sensorPin = A0;
double aux,x;
double y1=0,y;
void setup() {
  pinMode(sensorPin,INPUT);
  Serial.begin(9600);
  TimePlot Plot1("Control");
  TimePlot Plot2("Corriente");
}
```

```

void loop() {
  aux=analogRead(sensorPin); //lectura del sensor
  x= (aux*5)/(1024*0.05); //paso a corriente al sensor
  //filtro IIR 1er orden
  y=0.5*x+0.5*y1; y1=y;
  Plot1.SendData("Control", y); //Impresión filtro fir 2do orden
  Plot2.SendData("Corriente", x); //señal del sensor sin filtrar
}

```

La señal de tipo de línea continua (verde) corresponde al filtro IIR de primer orden, mientras que la señal con tipo de línea punteada (azul) corresponde a la señal del sensor sin filtrar.

Se observa que existe una mejoría en la señal del sensor, sin embargo el ruido en la señal del sensor provoca cambios bruscos en la lectura

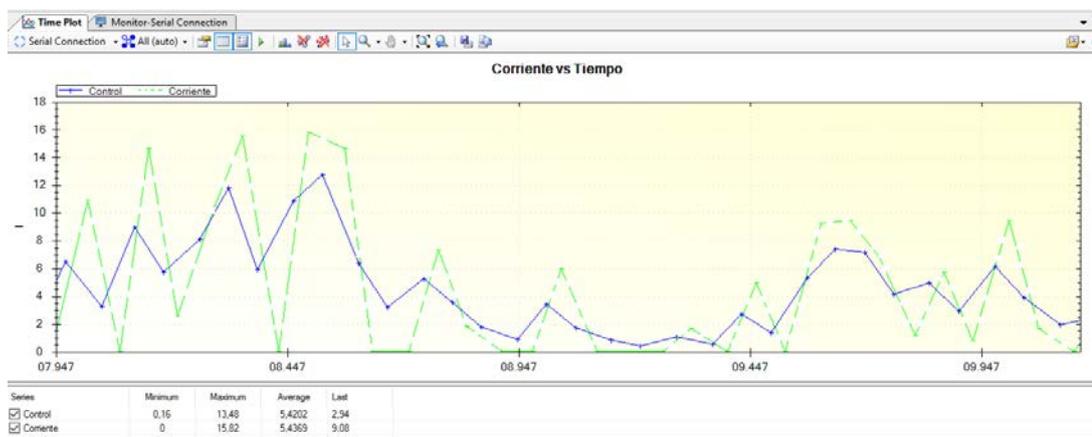


Figura N° 24. Señal del sensor de corriente sin filtrar vs señal filtrada

Se aumentó el orden del filtro y se observa mejorías.

- **Filtro IIR 6to orden**

$$y[n] = 0,17 (x[n] + y[n - 1] + y[n - 2] + y[n - 3] + y[n - 4] + y[n - 5])$$

Código Arduino

```

#include "MegunoLink.h"
TimePlot Plot1,Plot2;
int sensorPin = A0;
double aux,x;
double y,y1=0,y2=0,y3=0,y4=0,y5=0;

void setup() {
  pinMode(sensorPin,INPUT);
  Serial.begin(9600);
  TimePlot Plot1("Control");
  TimePlot Plot2("Corriente");
}
void loop() {
  aux=analogRead(sensorPin); //lectura del sensor
  x= (aux*5)/(1024*0.05); //paso a corriente al sensor
  //filtro iir
  y=0.17*(x+y1+y2+y3+y4+y5);
  y5=y4; y4=y3; y3=y2; y2=y1; y1=y;
  Plot1.SendData("Control", y); //filtro iir 6to orden
  Plot2.SendData("Corriente", x); //sensor
}

```

La señal con tipo de línea gruesa (azul) es la señal del sensor filtrada, mientras que la señal con tipo de línea delgada (verde) es la señal del sensor.

Con esta señal ya se pudo trabajar y por lo tanto realizar la identificación de la planta.

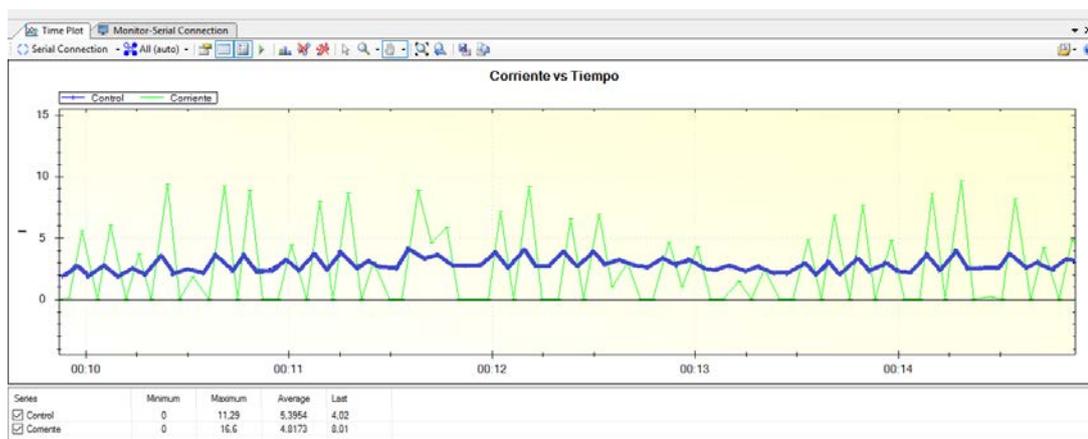


Figura N° 25. Señal del sensor de corriente sin filtrar vs señal filtrada

2.2.4 Planta

La planta se conforma de la siguiente manera: el cátodo que es una pieza de plomo de $0.20 \times 0.20 \times 0.02$ [m], una barra cuadrada de aluminio de 0.022 [m] para suspender las piezas, la cuba de plástico de $0.40 \times 0.35 \times 0.25$ [m] y las piezas de aluminio a sumergir.

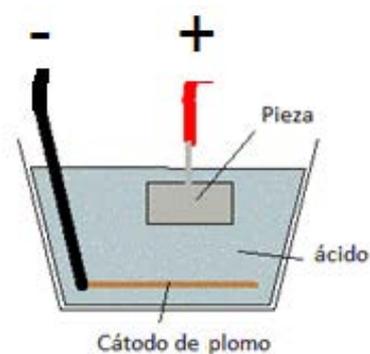


Figura N° 26. Diagrama de la planta



Figura N° 27. Representación gráfica de la planta

2.2.5 Identificación de la planta

Para la identificación de la planta se ocupa una pieza de 31x4.4x1.2 [cm]. Se envía una señal Step de voltaje a la planta. En la DAC el valor de 3500 bits que corresponde a 12.82V.

Tabla N° 6.

Relación Bits vs Voltajes

| BITS | Voltaje en el potenciómetro | Voltaje en la fuente de alimentación |
|------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 4095 | 5 | 15 |
| 3500 | x | x |

$$X = \frac{3500 * 15}{4095} = 12.82$$

Se enviará $V=12.82V$ durante 3min, el periodo de muestreo es $T=250[ms]$



Figura N° 28. Diagrama de salida de la planta

La función de transferencia estará dada por:

$$G(s) = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{I(s)}{V(s)}$$

Código de Arduino

```

#include "MegunoLink.h"
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>

Adafruit_MCP4725 dac;
uint32_t counter=3500;
TimePlot Plot1;
int sensorPin = A1;
double aux,x;
double y,y1=0,y2=0,y3=0,y4=0,y5=0,y6=0,y7=0,y8=0,y9=0;

void setup() {
  pinMode(sensorPin,INPUT);
  Serial.begin(9600);
  TimePlot Plot1("Corriente");
  dac.begin(0x60);
  dac.setVoltage(0,false);
}

void loop() {
  aux=(analogRead(sensorPin)); //lectura del sensor
  x = (aux*5)/(1024*0.05); //paso a corriente al sensor
  dac.setVoltage(counter,false);

  //filtro iir
  y=0.1*(x+y1+y2+y3+y4+y5+y6+y7+y8+y9);
  // actualizacion de variables
  y9=y8; y8=y7; y7=y6; y6=y5; y5=y4;
  y4=y3; y3=y2; y2=y1; y1=y;
  //impresion valores
  Plot1.SendData("Corriente", y); //filtro fir 4to orden
  delay(250); //periodo de muestreo ms
}

```

La gráfica obtenida de la planta es la siguiente:

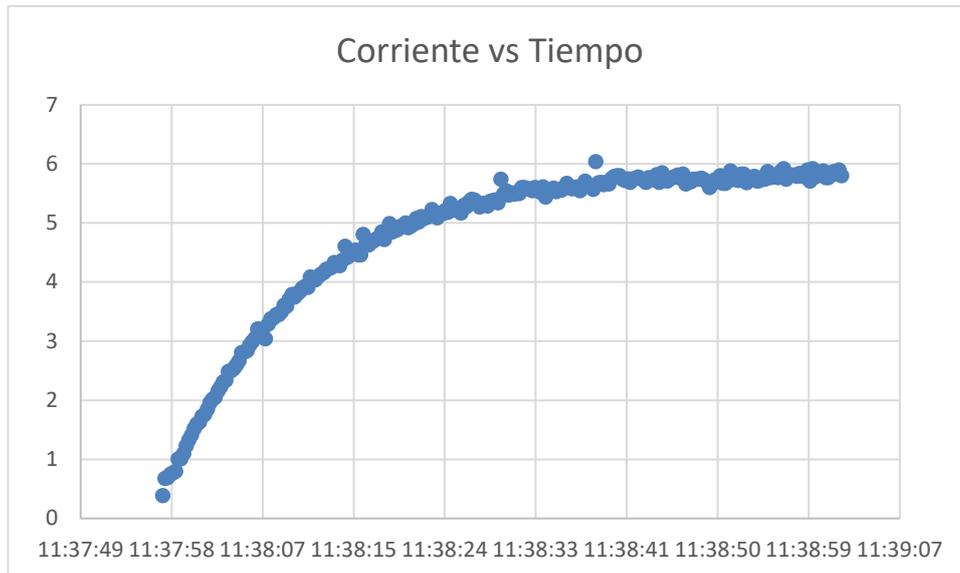


Figura N° 29. Identificación de la planta Corriente vs Tiempo

De la gráfica anterior se puede definir que la planta es un sistema de primer orden con retraso.

$$G(s) = \frac{K}{1 + T_p s} e^{-T_d s}$$

2.2.6 Modelamiento de la planta

Para obtener la planta los datos se guardaron en un archivo Excel, y se importan al programa Matlab

```
A=xlsread('ident.xlsx'); //lectura del archivo de excel
Y=A(:,2); //seleccion de la segunda columna
X=12.82.*ones(276,1); //inicializacion de vector de entrada
```

```
A=xlsread('ident.xlsx');
Y=A(:,2);
X=12.82.*ones(258,1);
ident
```

Figura N° 30. Códigos en Matlab

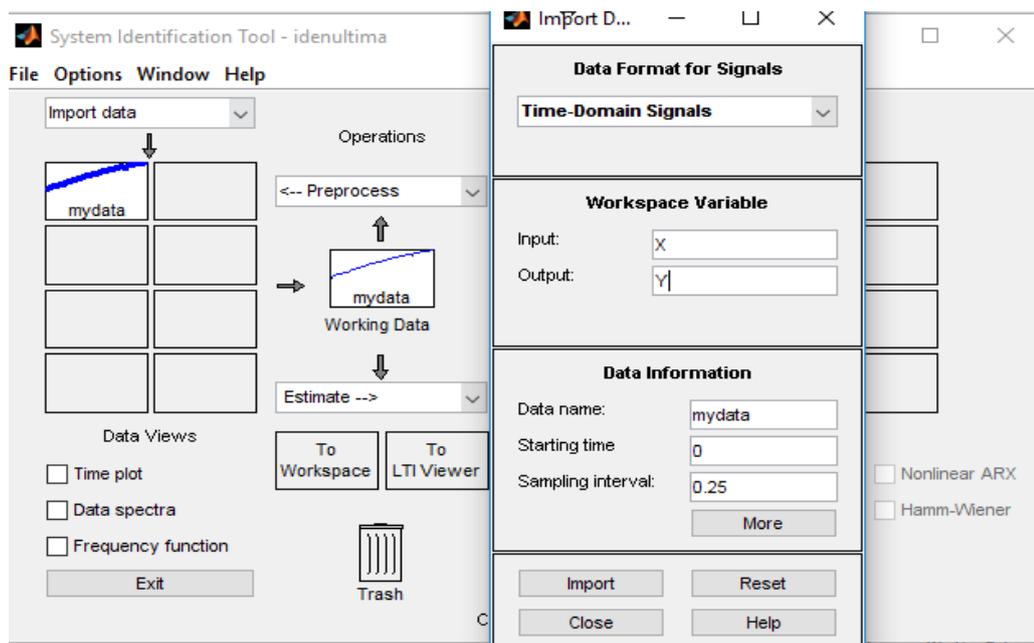


Figura N° 31. Importación de datos en la herramienta Ident de Matlab
Fuente: (MathWorks, 1998)

Para estimar el modelo de la planta, se da clic en Estimate en la opción Process Models, la respuesta del modelo tiene una aproximación del 95.22%

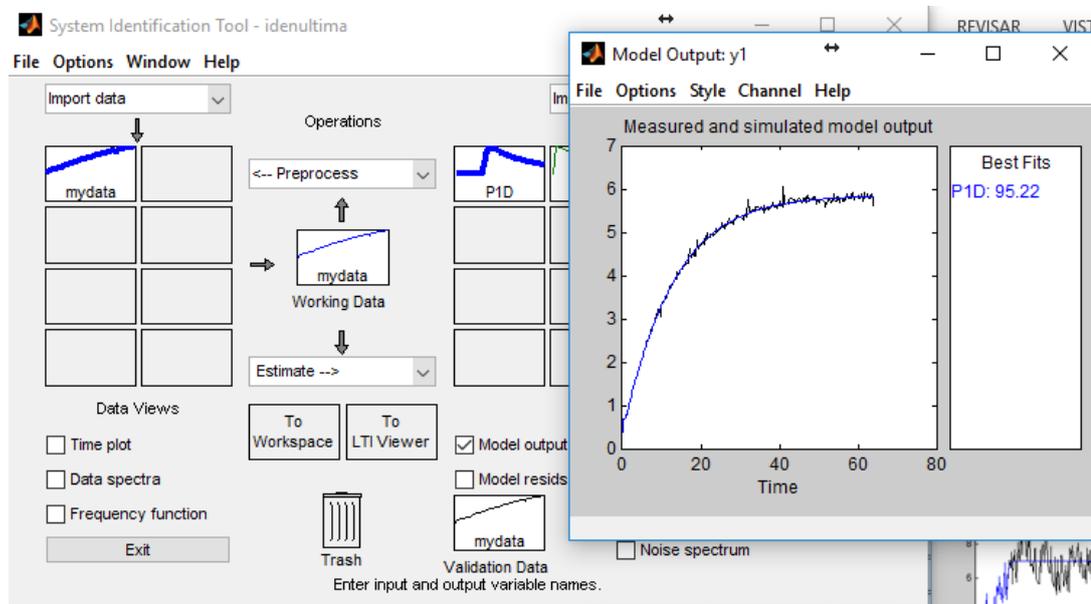


Figura N° 32. Simulación de la estimación de la planta Matlab

La planta queda de la forma

Process model with transfer function

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + T_{p1}s} * \exp(-T_d*s)$$

with $K_p = 0.22838$
 $T_{p1} = 12.256$
 $T_d = 7.3137$

Estimated using PEM using SearchMethod = Auto from data set z
 Loss function 0.00492685 and FPE 0.00504143

Figura N° 33. Modelado Planta Matlab

Se crea un archivo.m en Matlab para trabajar con la planta.

Para aproximar el retardo se utiliza la función Pade de Matlab.

```

K=0.22838;
Tp=12.256;
Td=7.31;
T=0.1;
s=tf('s');
%-----
%Tiempo continuo
%-----
H = tf([K],[Tp 1]);
[num den]=pade(Td,3); %retardo
R=tf(num,den);
% modelo de la planta
G=H*R;
step(G)

```

```

>> H

Transfer function:
  0.2284
-----
12.26 s + 1

>> R

Transfer function:
-s^3 + 1.642 s^2 - 1.123 s + 0.3072
-----
s^3 + 1.642 s^2 + 1.123 s + 0.3072

>> G

Transfer function:
  -0.2284 s^3 + 0.3749 s^2 - 0.2564 s + 0.07016
-----
12.26 s^4 + 21.12 s^3 + 15.4 s^2 + 4.888 s + 0.3072

```

Figura N° 34. Planta en Matlab

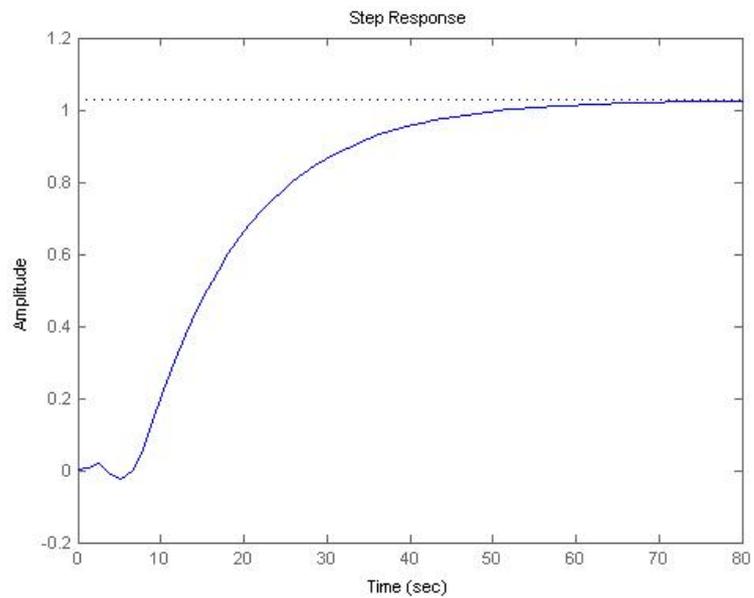


Figura N° 35. Respuesta Step de la planta en Matlab

2.2.7 Diseño del controlador

Para obtener el controlador se utiliza la herramienta sisotool. En sisotool se carga la planta previamente encontrada.

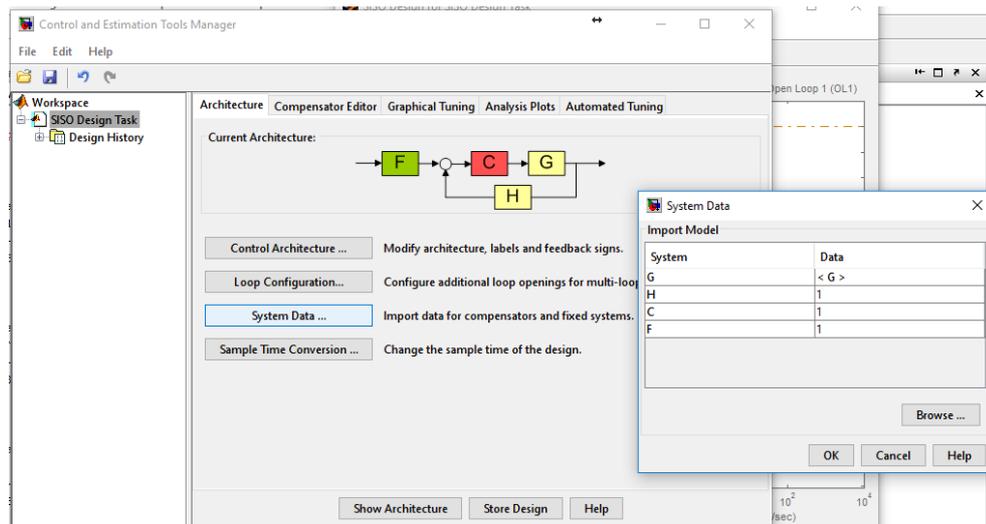


Figura N° 36. Ingreso de datos a la herramienta Sisotool de Matlab

En la pestaña de Automated Tuning, se elige PID Tuning método de Ziegler Nichols Lazo Cerrado y clic en Update Compensator.

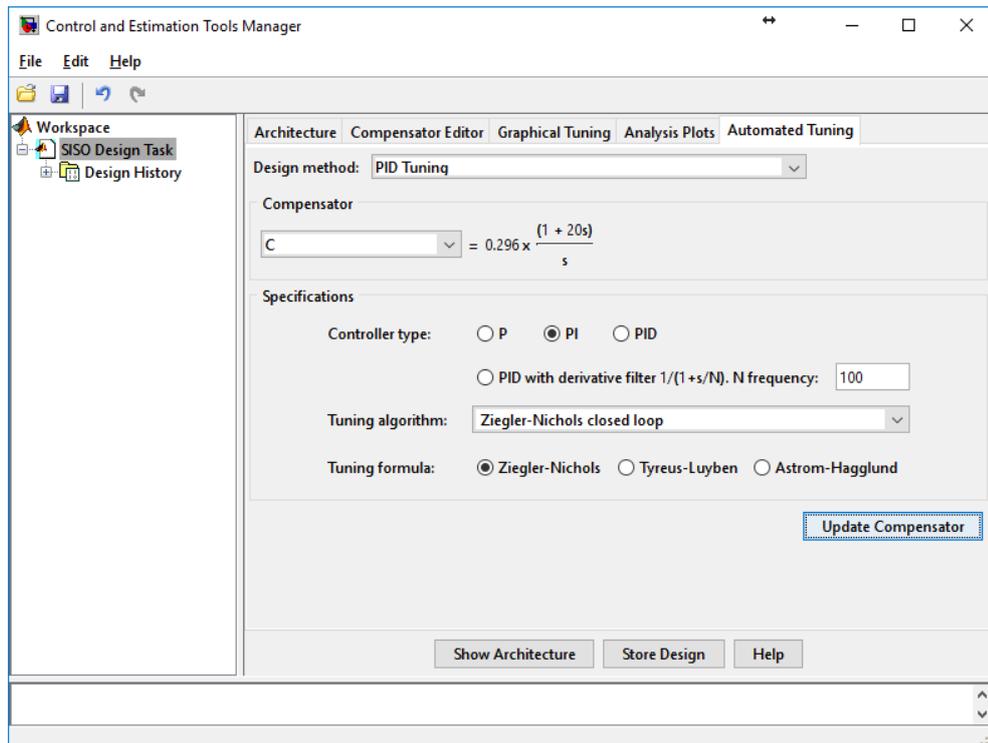


Figura N° 37. Cálculo del controlador Matlab

El controlador con sisotool queda de la forma

$$C = 0.296 * \frac{1 + 20s}{s}$$

Este controlador se lo tiene que llevar a la forma

$$C = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$C = \frac{0.296}{s} + 20 * 0.296$$

$$C = 5.92 \left(\frac{1}{20s} + 1 \right)$$

$K_p=5.92$

$T_i=20$

$T_d=0$

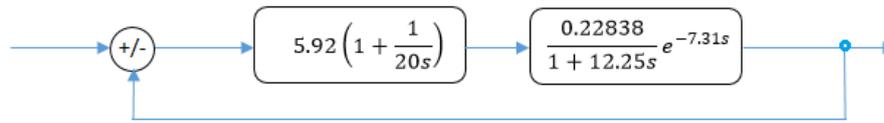


Figura N° 38. Diagrama de bloques de controlador y planta

Ahora se comprueba la respuesta de este controlador en la planta

```

K=0.22838;
Tp=12.256;
Td=7.31;
T=0.1;
s=tf('s');
%-----
% Tiempo continuo
%-----
H = tf([K],[Tp 1]);
[num den]=pade(Td,3); %retardo
R=tf(num,den);
% modelo de la planta
G=H*R;
step(G)
hold on
% controlador
Kc= 5.92;
Ti=20;
Td=0;
Cpi=Kc*(1+(1/(Ti*s))+Td*s);
gpi=feedback(G*Cpi,1);
step(gpi)

```

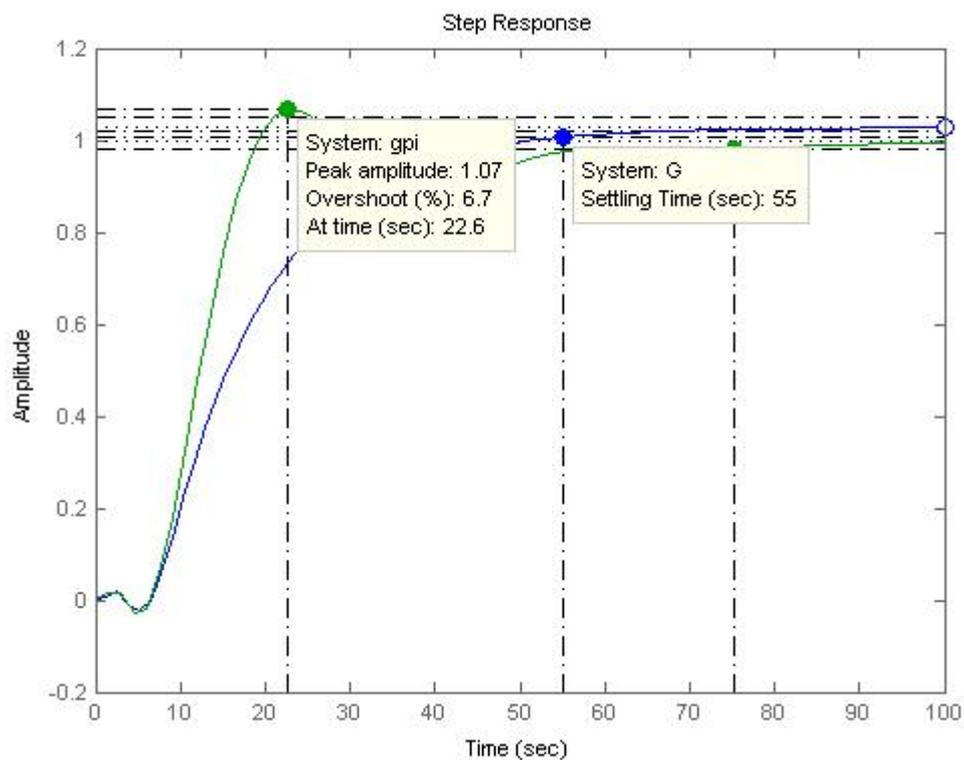


Figura N° 39. Planta sin controlador (azul) vs Planta con controlador (verde)

Se puede observar que se mejoró el máximo pico, el tiempo de retardo y el tiempo de establecimiento.

2.2.8 Costos de construcción y mantenimiento de equipo

Los materiales utilizados en el proyecto se detallan en la siguiente tabla:

Tabla N° 7.

Materiales y Costo

| Material | Cantidad | Precio | Valor total |
|----------------------|----------|--------|-------------|
| Ácido sulfúrico | 2l | 4 | 8 |
| Alambre de aluminio | 10m | 2 | 2 |
| Agua destilada | 16 | 2,2 | 35,2 |
| Cable 10AWG | 1 | 10 | 10 |
| Calentadores de agua | 5 | 2 | 10 |

CONTINUA 

| | | | |
|-------------------------------------|---|------|-----------------|
| Capacitores de marcha1 | 1 | 1,8 | 1,8 |
| Capacitores de marcha2 | 1 | 2,7 | 2,7 |
| Cubas | 7 | 12,6 | 88,2 |
| Desengrasante | 1 | 5,6 | 5,6 |
| Desoxidante | 1 | 3 | 3 |
| Fuente de alimentación 1500W | 1 | 800 | 800 |
| Enchufes, tomas de corriente | 1 | 5 | 5 |
| Relé de estado solido | 1 | 60 | 60 |
| Sosa caustica | 1 | 5 | 5 |
| Tinte para telas | 3 | 1,2 | 3,6 |
| Varios | 1 | 20 | 20 |
| Total | | | \$1060,1 |

Los materiales que son consumibles son el alambre de aluminio y los químicos que se deberán reemplazar de acuerdo al uso.

2.2.9 Software

Arduino

El software Arduino (IDE) es un software de código abierto. Facilita escribir código y cargarlo en la tarjeta. Utiliza el sistema operativo Windows, Mac OS X y Linux. El lenguaje de programación está escrito en Java y otro software de código abierto.

Instalación de software

En la página de Arduino <https://www.arduino.cc/en/Main/Software> se puede escoger el archivo de instalación para la versión de sistema operativo.

Al hacer doble clic sobre el archivo de instalación aparece la siguiente pantalla. Clic en *I Agree*

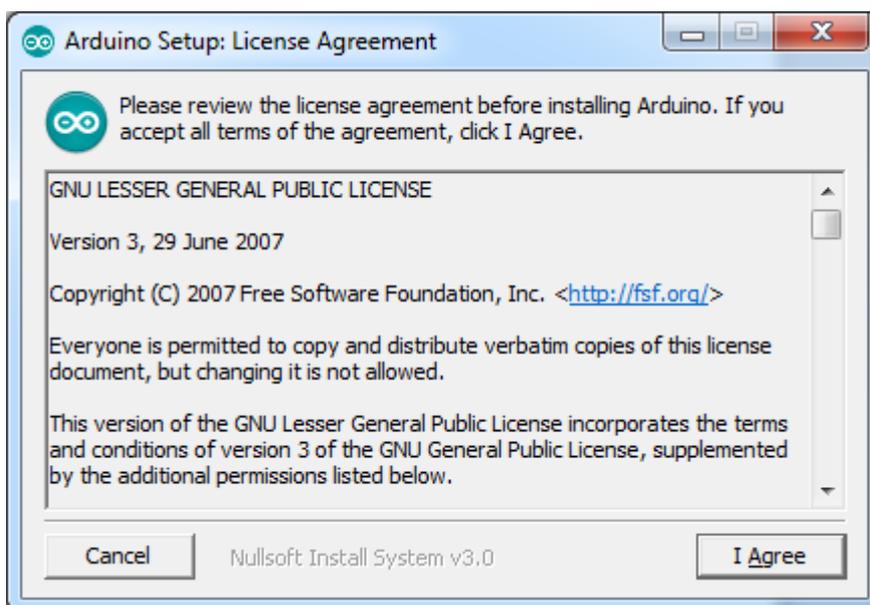


Figura N° 40. Instalación Arduino 1

Fuente: (Arduino Co., 2010)

Se debe hacer clic en *Next*

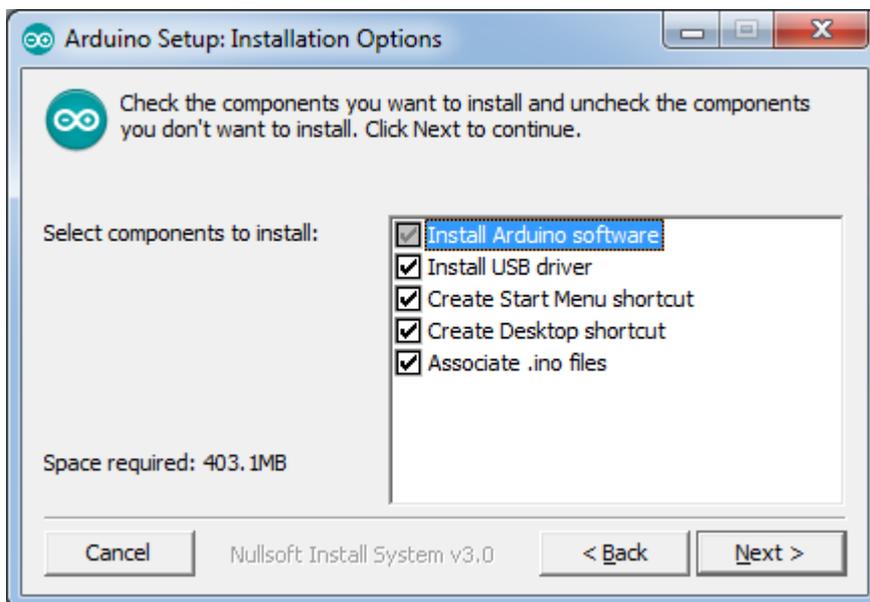


Figura N° 41. Instalación Arduino 2

Fuente: (Arduino Co., 2010)

Se puede elegir la carpeta de instalación y clic en *Install*

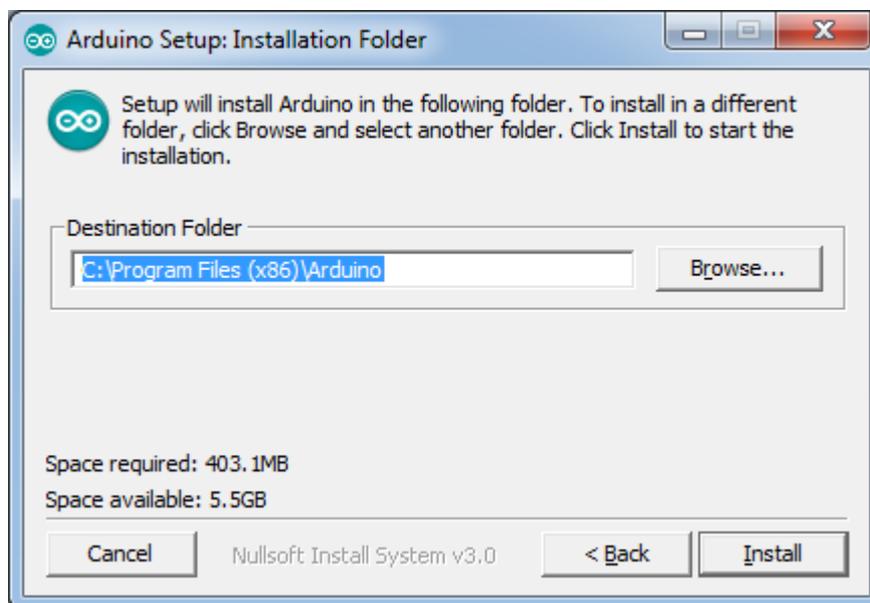


Figura N° 42. Instalación Arduino 3
Fuente: (Arduino Co., 2010)

Al finalizar la instalación se da clic en *Close*

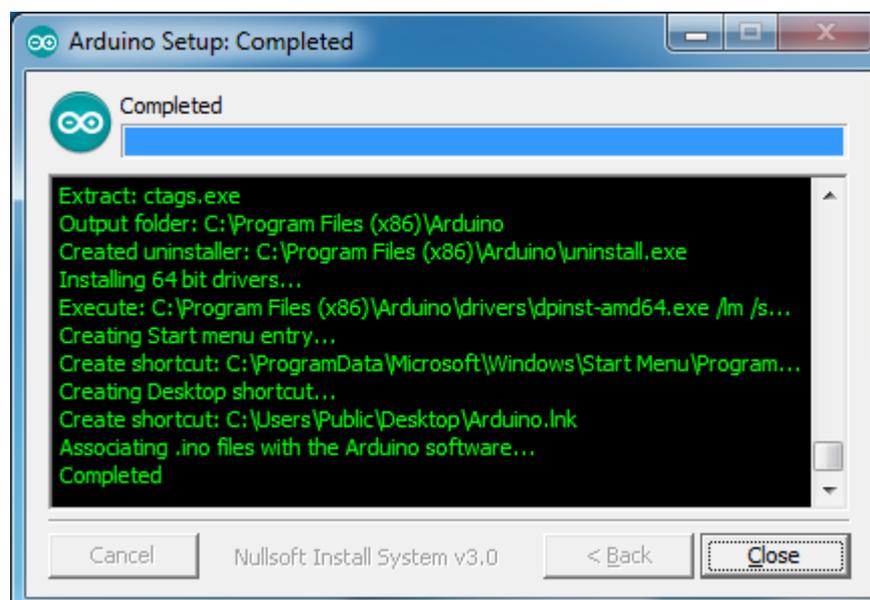


Figura N° 43. Instalación Arduino 4
Fuente: (Arduino Co., 2010)

Al abrir el programa se muestra la ventana de programación

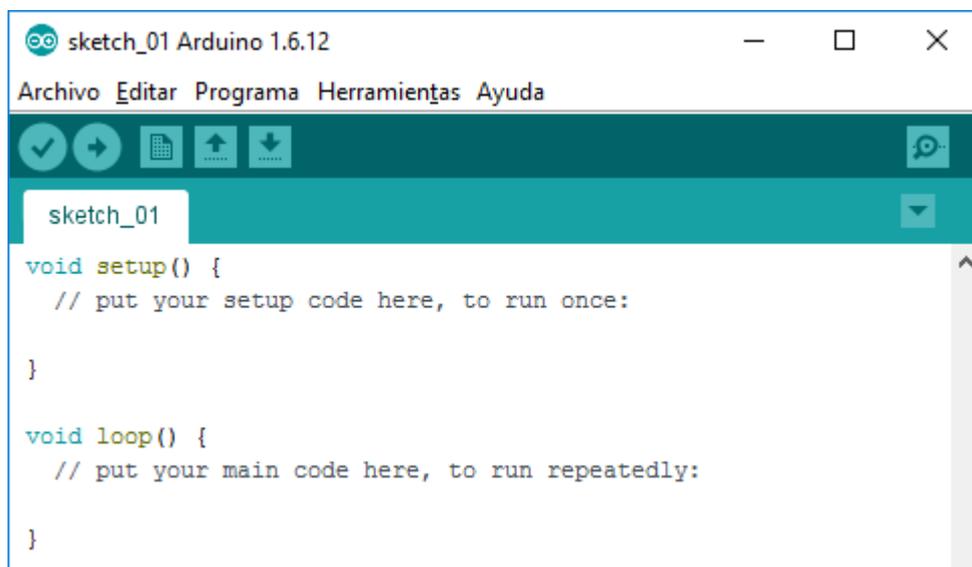


Figura N° 44. Ventana de programación Arduino
Fuente: (Arduino Co., 2010)

MegunoLink

El envío y recepción de datos se realiza a través del programa MegunoLink. MegunoLink es una interfaz de usuario y desarrollo para Arduino y otros microcontroladores.

Se conecta a través de comunicación serial, inalámbrica o Ethernet. Se puede ver datos o trazar medidas en gráficos, mapas o mostrarlo en tablas para que sea más fácil de entender.

Con MegunoLink, se puede crear una interfaz de usuario desde controles como botones y cuadros de texto que se ejecutan en la PC y enviar mensajes al programa Arduino. Se puede procesar los mensajes en el Arduino para cambiar las configuraciones, encender una luz o activar un servo, cualquier cosa que un Arduino pueda hacer.

Instalación de software MegunoLink

El link de descarga del programa está en la página <http://www.megunolink.com/>

Doble clic en el archivo de instalar, aparece la siguiente pantalla. Clic en instalar



Figura N° 45. Instalación de software MegunoLink 1
Fuente: (MegunoLink, 2010)

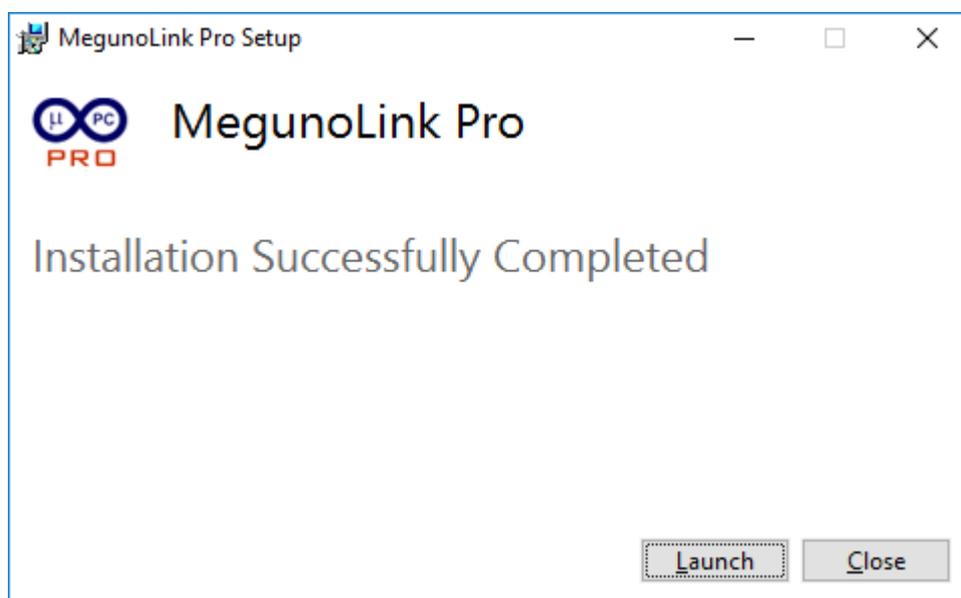


Figura N° 46. Instalación de software MegunoLink 2
Fuente: (MegunoLink, 2010)

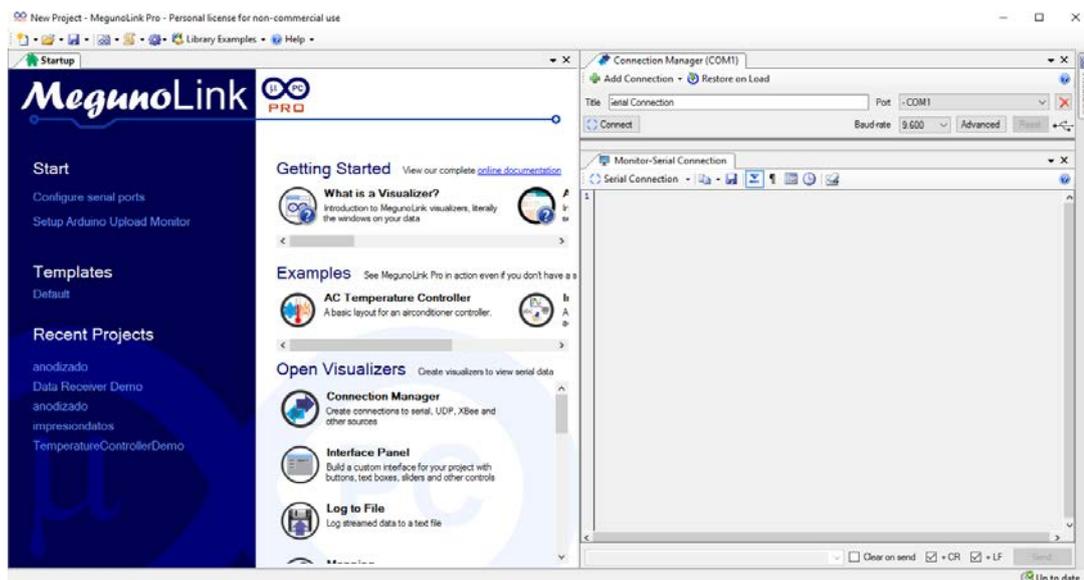


Figura N° 47. Pantalla de inicio MegunoLink
Fuente: (MegunoLink, 2010)

Terminada la instalación del programa se instala las librerías para comunicación con Arduino. Clic en *LibraryExamples->Setup Arduino Integration*

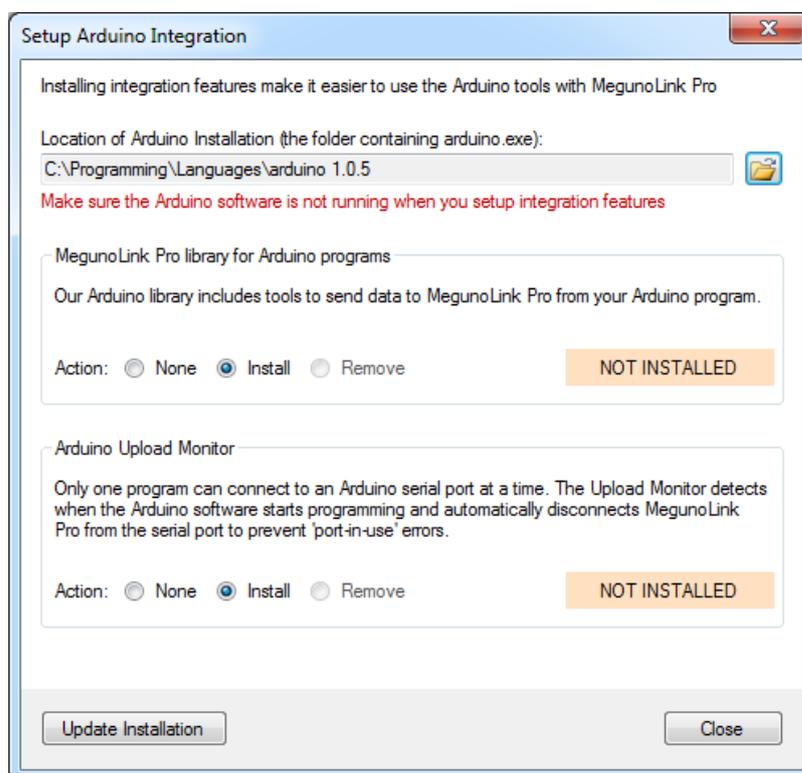


Figura N° 48. Instalación de Librerías MegunoLink 1
Fuente: (MegunoLink, 2010)

Clic en *Update Installation* y se instalan las librerías.

Interfaz gráfica

Los datos que recibe el controlador de la interfaz gráfica son el área de la pieza en [cm²], el espesor de la capa [um] y el número de piezas. De acuerdo a esto se calcula el setpoint y el tiempo que debe estar la pieza en el baño de anodizado.

Para la creación de la interfaz gráfica se debe hacer clic en *Show Visualizers->Interface panel->Designer*

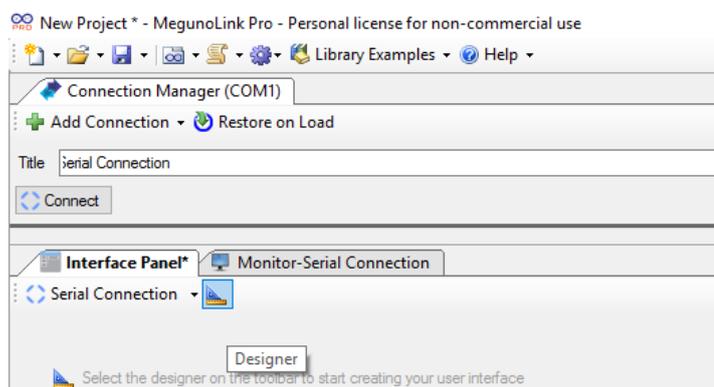


Figura N° 49. Interfaz Gráfica Show Visualizers
Fuente: (MegunoLink, 2010)

Se abre una nueva ventana con todos los comandos que se pueden utilizar. En la interfaz los textos son objetos tipo *Label*, los valores a ingresar son objetos tipo *NumericUpDown*, el botón para enviar datos es objeto tipo *Button*, la gráfica para visualizar los valores es objeto tipo *Time Plot*.

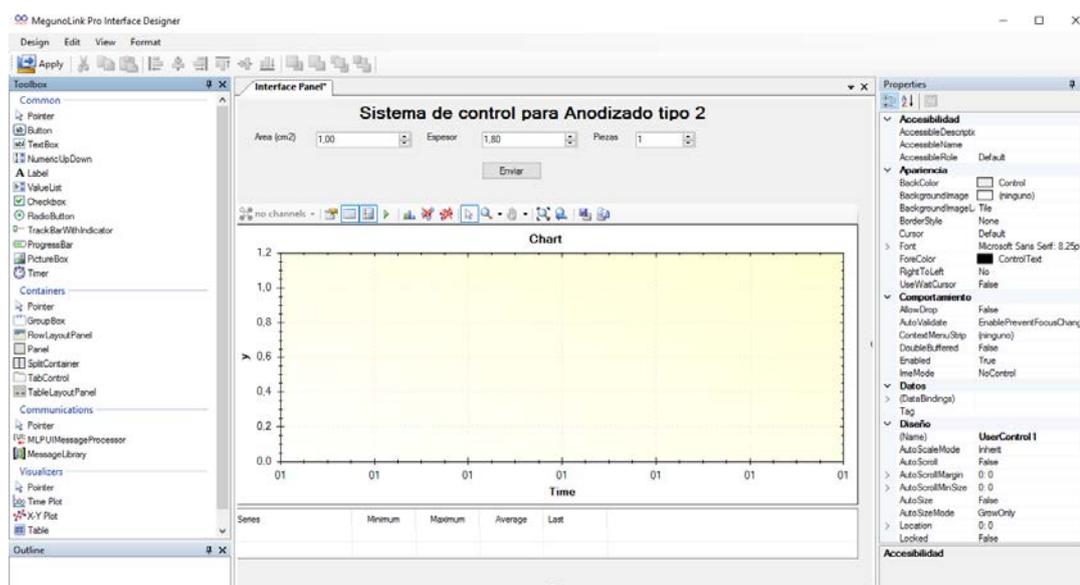


Figura N° 50. Interfaz gráfica Sistema de Control para Anodizado tipo 2

Al hacer clic en el botón enviar, se programa la acción que va a realizar. En este caso se envía el valor del área en [cm²] multiplicado por el número de piezas, se separa estos caracteres con [*], y se envía el valor del espesor, al final de la cadena de caracteres se separa con [*].

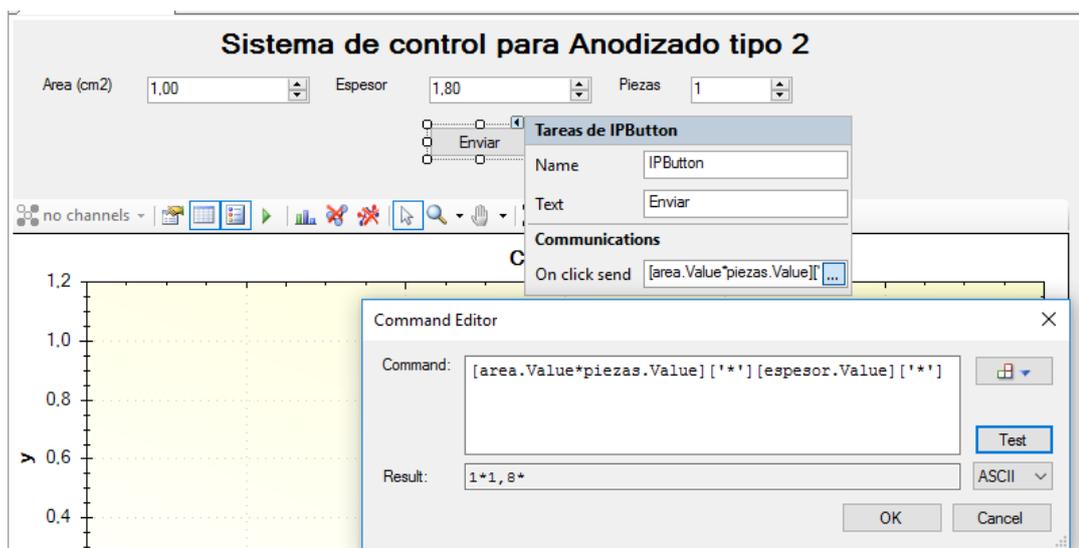


Figura N° 51. Interfaz gráfica Sistema de Control

Programación del botón enviar

Se puede probar la programación del botón dando clic en *Test*, en la figura anterior los datos son Área=1, Piezas=1, Espesor=1,8 se observa que se manda el valor de 1*1,8*.

Arduino y MegunoLink

Para enviar los datos de Arduino a MegunoLink se incluye la librería MegunoLink.h, se declara el objeto TimePlot y se utiliza la instrucción Plot.SendData(“nombre del grafico”, valor).

Para recibir los datos de MegunoLink se realiza una lectura del puerto serial y se realiza una separación de datos.

En el ejemplo siguiente se lee la entrada analógica del Arduino y se despliega en Meguno este valor, mientras que se recibe los valores del serial en a1 y a2 para ser ocupados posteriormente.

```
#include "MegunoLink.h" // libreria
TimePlot Plot1;          // declaración objeto TimePlot
int sensorPin = A0;
const int pin = 2;
double out=0,valor=0,i=0, sensorValue = 0,a1,a2;
int aux1;
String inString = "",Ssp,St;
boolean stringComplete = false;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  TimePlot Plot1("Corriente"); // se establece un nombre a Plot1
  inString.reserve(10);
}
void loop()
{
  sensorValue = analogRead(sensorPin); // lectura del valor analogico
  out = map(sensorValue, 0, 1023, 0, 255);
  valor=(out*5)/255; //0-5V
  Plot1.SendData("Corriente", valor); // envio de datos
  while (Serial.available() > 0) { // recepción de datos
    int inChar = Serial.read(); // se lee los caracteres del serial
    if (inChar != '*') { // mientras sea diferente de * se guarda la cadena
      en inString
      inString += (char)inChar;
    }
    else { //la primera vez que llega *
      aux1=aux1+1;
    }
  }
}
```

```
if(aux1==1){
    Ssp=inString;        // se asigna el inString a Ssp
    a1=Ssp.toFloat();    //se convierte Ssp a flotante
}
if (aux1==2){           // la segunda vez que llega *
    St=inString;        // se asigna inString a St
    a2=St.toFloat();    // se convierte St a flotante
    aux1=0;
}
inString="";           // se vacia la cadena de caracteres para volver a recibir
}
}
}
```

2.2.10 Descripción de la estructura

Para realizar el diseño de la estructura es necesario conocer la medida de los tanques, en el perfil de tesis se había especificado que las cubas iban a ser de 0.7x0.5x0.5 [m], sin embargo fue difícil conseguir unos tanques de plástico de tales medidas, se informó esto a la empresa y se redujo el tamaño de los tanques por unos que existieran comercialmente.

El tamaño final de los tanques es de 0.40x0.35x0.25 [m]

La estructura se adecuó de acuerdo a la medida de los tanques y el espacio disponible en la empresa, ocupando un área de 2.63 [m²]. Además se consideró la altura de una mesa de trabajo y espacio para manipulación.

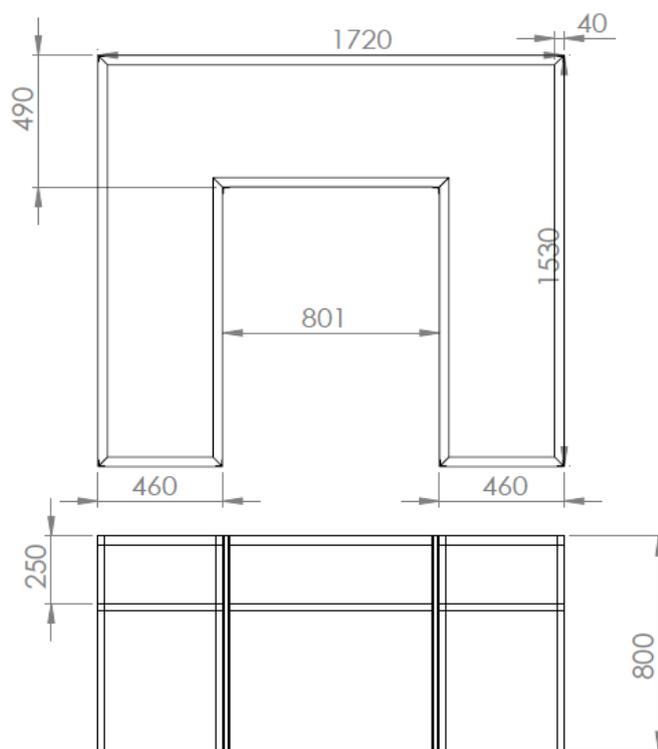


Figura N° 52. Plano de la estructura



Figura N° 53. Estructura finalizada

CAPÍTULO III

PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez calculado el controlador se puede verificar el funcionamiento del mismo. Para comprobar el funcionamiento del controlador se necesita preparar la pieza. (Véase el Anexo C y D para conocer los materiales adicionales que se requieren) Al inicio del proceso se observa que la pieza tiene continuidad.



Figura N° 54. Prueba de continuidad de la pieza

Una vez mecanizada la pieza se procede a quitar las limallas con una lijadora, después se sumerge la pieza en las cubas previas al anodizado: limpieza, decapado, desoxidado. (Véase el Anexo E para conocer cómo preparar los baños)

Tabla N° 8.

Proceso de limpieza previo al Anodizado

| Baños | Solución | Temperatura |
|------------------------------|--|-------------|
| Limpieza o desengrase | 1[l] Desengrasante 9[l] agua destilada | 25 °C |
| Decapado | 1350[g] Sosa caustica 9[l] agua destilada | 25°C |
| Desoxidante | 1[l] Desoxidante 7.3[l] agua destilada | 25 °C |

Después de cada etapa es necesario enjuagar la pieza por inmersión para evitar la contaminación en la siguiente cuba y realizar la prueba de rotura de agua para determinar si esta lista para pasar la siguiente etapa.

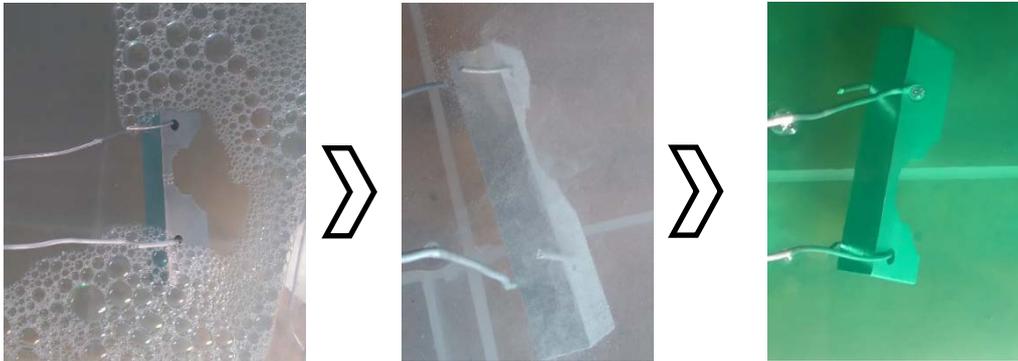


Figura N° 55. Pieza a través de los baños de limpieza, decapado y desoxidante

Cuando la pieza se encuentra limpia de impurezas se procede a sumergir la pieza en la cuba de anodizado. Para esta pieza de medidas 77x25x12 [mm] se requiere una corriente de 0.8 [A]

$$\begin{aligned}
 A &= 2(ab + ac + bc) \\
 A &= 2(77 * 25 + 77 * 12 + 25 * 12) \\
 A &= 6298 [mm^2] \\
 A &= 6298 [mm^2] * \frac{10.7639 [ft^2]}{1 [m^2]} * \frac{1 [m^2]}{1000000 [mm^2]} = 0.067 [ft^2]
 \end{aligned}$$

$$I = A [ft^2] * \#piezas * [ASF]$$

$$I = 0.067 [ft^2] * 1 * 12 \left[\frac{A}{ft^2} \right]$$

$$I = 0.8 [A]$$

Para calcular el tiempo asumiendo un espesor de la capa de 0.16mil (1 mil = 25.4um)

$$\begin{aligned}
 720 &= \frac{12 [ASF] * [min]}{[mil]} \\
 t [min] &= \frac{720 * 0.16 [mil]}{12 [ASF]} \\
 t &= 9.6 [min]
 \end{aligned}$$

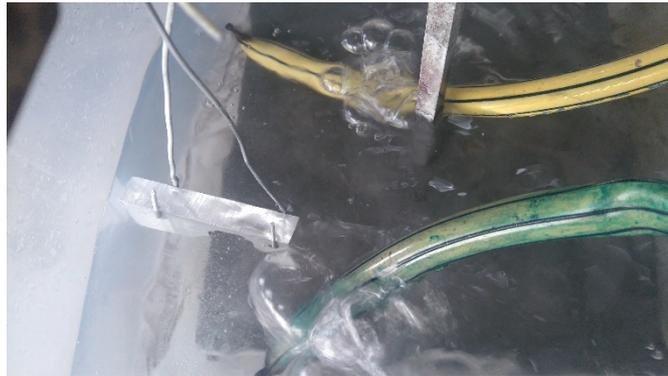


Figura N° 56. Pieza en la cuba de anodizado

Se procede a probar el controlador en la planta con un SP=0.8

```
#include <TimerOne.h>
#include "MegunoLink.h"
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>

Adafruit_MCP4725 dac;
uint32_t counter;
TimePlot Plot1,Plot2,Plot3;

//declaracion de variables
double u,e,u1,e1,e2,i,i1,i2,T,Kc,Ki,Kd,Ti,Td,sp,a1,a2;
int sensorPin = A1,aux1,aux2,temp;
double aux,x,y,y1=0,y2=0,y3=0,y4=0,y5=0,y6=0,y7=0,y8=0,y9=0,t=2,tiempo;
String inString,Ssp,St;
int Relay=4,CT;

void control(){
  aux=(analogRead(sensorPin)); // lectura del sensor de corriente
  x=((aux*5)/(1024*0.05)); //conversion del sensor a corriente de 0-100A
  //filtro IIR
  y=0.1*(x+y1+y2+y3+y4+y5+y6+y7+y8+y9);
  // actualizacion de variables
  y9=y8; y8=y7; y7=y6; y6=y5; y5=y4;
  y4=y3; y3=y2; y2=y1; y1=y;
  // Controladores PI
  i=y;
  if(i<0)
    i=0;
  e=sp-i;
  u=u1-(Kc*(i-i1))+(Ki*T*e)-((Kd/T)*(i-2*i1+i2)); //PID Tipo C
  // actualizacion de variables
  u1=u;
```

```

e2=e1; e1=e;
i2=i1; i1=i;
//limites de control
if(u>0){
  if (u<30)
    u=u;
  else          //limite de control superior
    u=30;
}
else          //limite de control inferior
  u=0;
counter=(u*4095)/30; // escritura de valor analogo en la DAC
aux2=(counter*15)/4095; //valor de la DAC de 0-15V
CT=CT+1;
if(CT==tiempo){
  digitalWrite(Relay,LOW);
  sp=0; u=0;
}
}
void setup() {
  Kc=5.92; //constante proporcional
  Ti=20; //tiempo integrativa
  Td=0; //tiempo derivativo
  T=0.1; //Tiempo de muestreo
  Ki=Kc/Ti; //constante integrativa
  Kd=Kc*Td; //constante derivativa
  sp=0; //setpoint
  t=0;
  u1=0; e=0; e1=0; e2=0; i1=0; i2=0; //inicializacion de variables
  aux1=0; aux2=0;
  inString="";
  Timer1.initialize(100000); //100000 // Dispara cada 100 ms
  Timer1.attachInterrupt(control);
  pinMode(sensorPin,INPUT);
  Serial.begin(9600);
  TimePlot Plot1("Control"), Plot2("Corriente"),Plot3("Setpoint");
  dac.begin(0x60); //Inicializacion de la DAC
  pinMode(4,OUTPUT); // Relay pin 4
  digitalWrite(Relay,LOW);
  CT=0;
}
void loop(){
  dac.setVoltage(counter,false);
  while (Serial.available() > 0) {
    int inChar = Serial.read();
    if (inChar != '*') {
      inString += (char)inChar;
    }
  }
}

```

```
else {
    aux1=aux1+1;
    if(aux1==1){
        Ssp=inString;
        a1=Ssp.toFloat();
    }
    if (aux1==2){
        St=inString;
        a2=St.toFloat();
        aux1=0;
    }
    inString="";
}
}
sp=a1*10.7639*0.0001*12;
t=60*a2/25.4;
if(sp<=0){
    digitalWrite(Relay,LOW);
}
if(sp>0){
    digitalWrite(Relay,HIGH);
    tiempo=t*600;
    CT=0;
}
Plot1.SendData("Control", aux2); //control
Plot2.SendData("Corriente", i); //sensor
Plot3.SendData("SP ", sp);
}
```

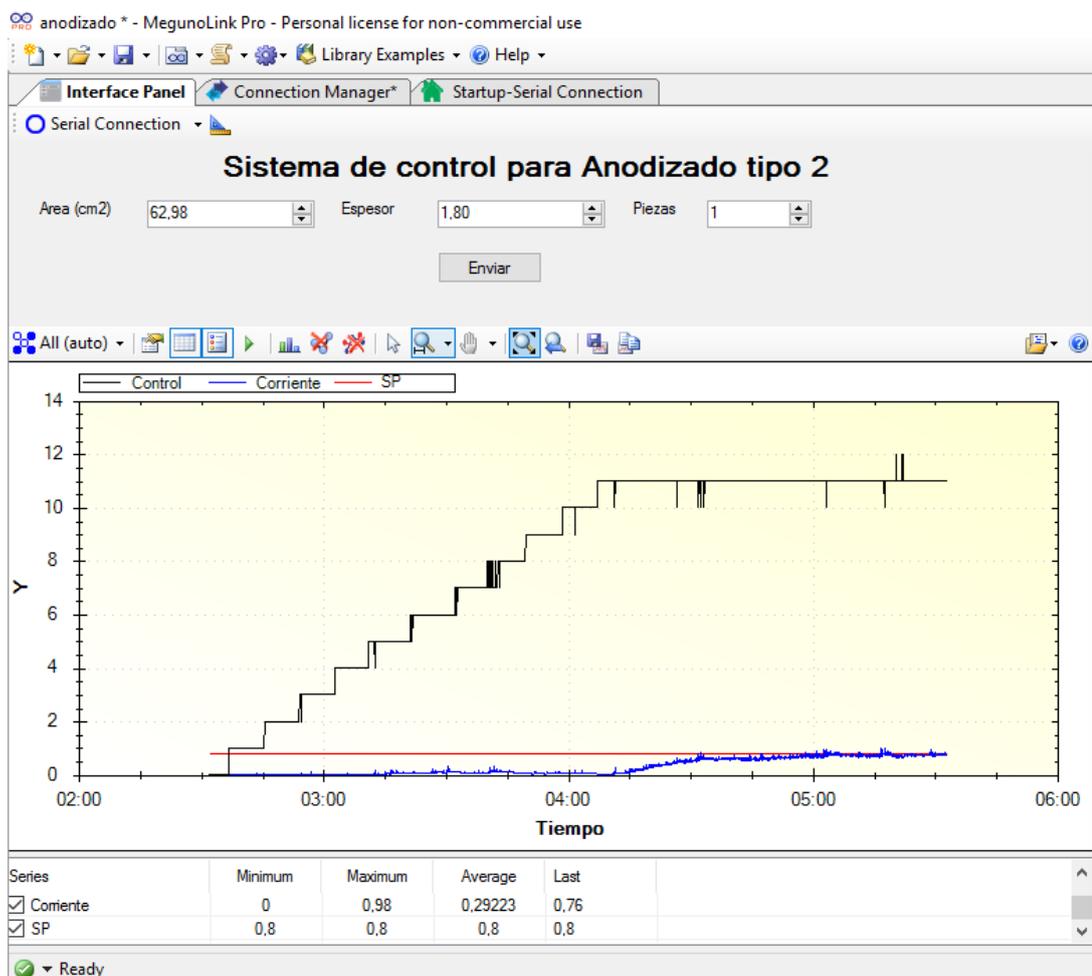


Figura N° 57. Grafica de control de corriente vs tiempo

Cuando pasan 10 minutos se procede a sacar la pieza y sellar en agua destilada a 100 [°C]

El resultado del proceso de anodizado en la pieza es el siguiente: la pieza no presenta continuidad, mejora la resistencia a la abrasión, prolongación de vida útil del material, protección contra la corrosión.



Figura N° 58. Prueba de continuidad en pieza anodizada

De la gráfica de control de corriente anterior se puede obtener el error

| Setpoint | Valor actual |
|----------|--------------|
| 0.8[A] | 0.76[A] |

$$Error = \frac{0.8 - 0.76}{0.8} * 100$$

$$Error = 5\%$$

Se procede a realizar más pruebas con diferentes piezas.

Las fórmulas que se van a ocupar son las siguientes:

$$A = 2(ab + ac + bc)$$

$$A_{pies} = A[cm^2] * \frac{10.7639[ft^2]}{1[m^2]} * \frac{1[m^2]}{10000[cm^2]}$$

$$I = A[ft^2] * \#piezas * [ASF]$$

$$I = A[ft^2] * \#piezas * 12 \left[\frac{A}{ft^2} \right]$$

Para calcular el tiempo

$$720 = \frac{12[ASF] * [min]}{[mil]}$$

$$t[min] = \frac{720 * espesor[um]}{12[ASF]} * \frac{1[mil]}{25.4[um]}$$

Tabla N° 9.

Calculo de corrientes y tiempos para diferentes piezas

| Medidas de la pieza | | | Espesor | Área | Corriente | Tiempo |
|---------------------|------|-----|---------|--------|-----------|--------|
| a | b | c | [um] | [cm2] | [A] | [min] |
| 6 | 7.8 | 1.2 | 1.8 | 126.72 | 1.63 | 4.25 |
| 7.7 | 11.5 | 1.2 | 2 | 223.18 | 2.88 | 4.72 |
| 12 | 8.8 | 0.9 | 3 | 146.64 | 1.89 | 7.09 |
| 9 | 9 | 1.2 | 1.8 | 205.2 | 2.65 | 4.25 |

En algunas piezas se ha decidido ocupar el baño de tintura. Este proceso se lleva a cabo posteriormente del baño de anodizado. Cuando la pieza sale del baño de anodizado la pieza se enjuaga en agua destilada.

En el baño de tintura se precalienta el agua a 60°C, se sumerge la pieza por 20[min], se enjuaga y luego se sella la pieza en agua destilada a 100°C.

- Área de la pieza [cm²]: 126.72 Corriente: 1.63[A]
Tiempo: 4.25[min]

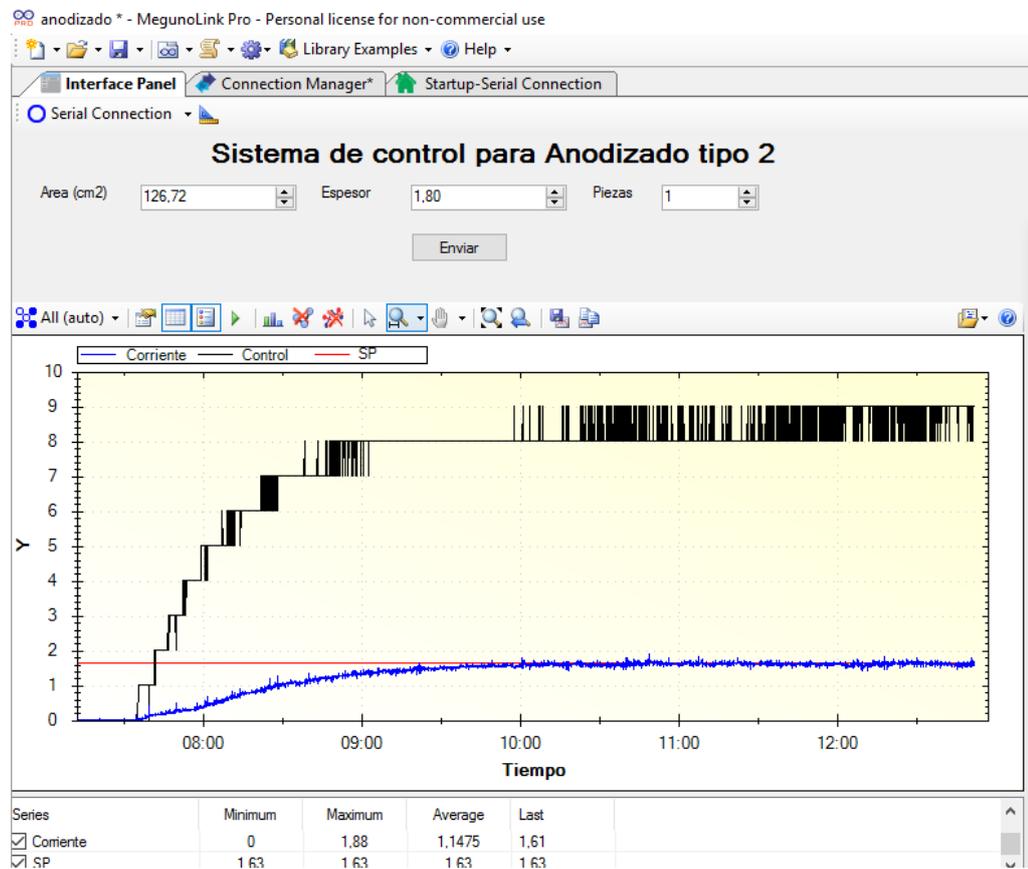


Figura N° 59. Grafica de control de corriente vs tiempo pieza 1



Figura N° 60. (a) Pieza terminada (b) Prueba de continuidad en la pieza 1

- Área de la pieza [cm²]: 223.18 Corriente: 2.88[A] Tiempo: 4.72[min]

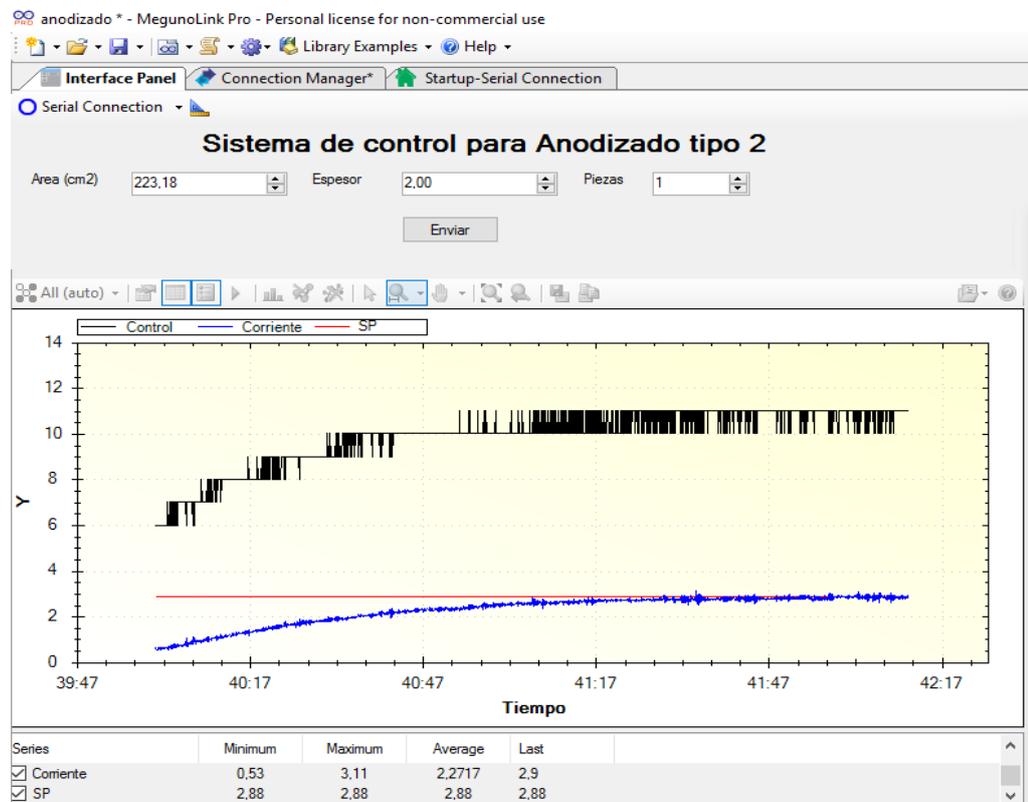


Figura N° 61. Grafica de control de corriente vs tiempo pieza 2

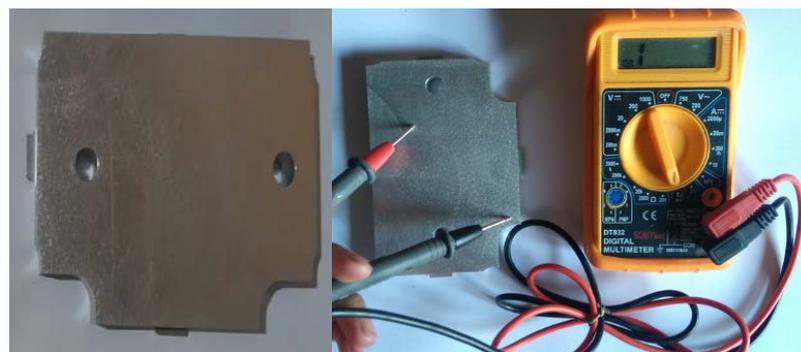


Figura N° 62. (a)Pieza terminada (b) Prueba de continuidad en la pieza 2

- Área de la pieza [cm²]: 146.64 Corriente: 1.89[A] Tiempo: 7.09[min]

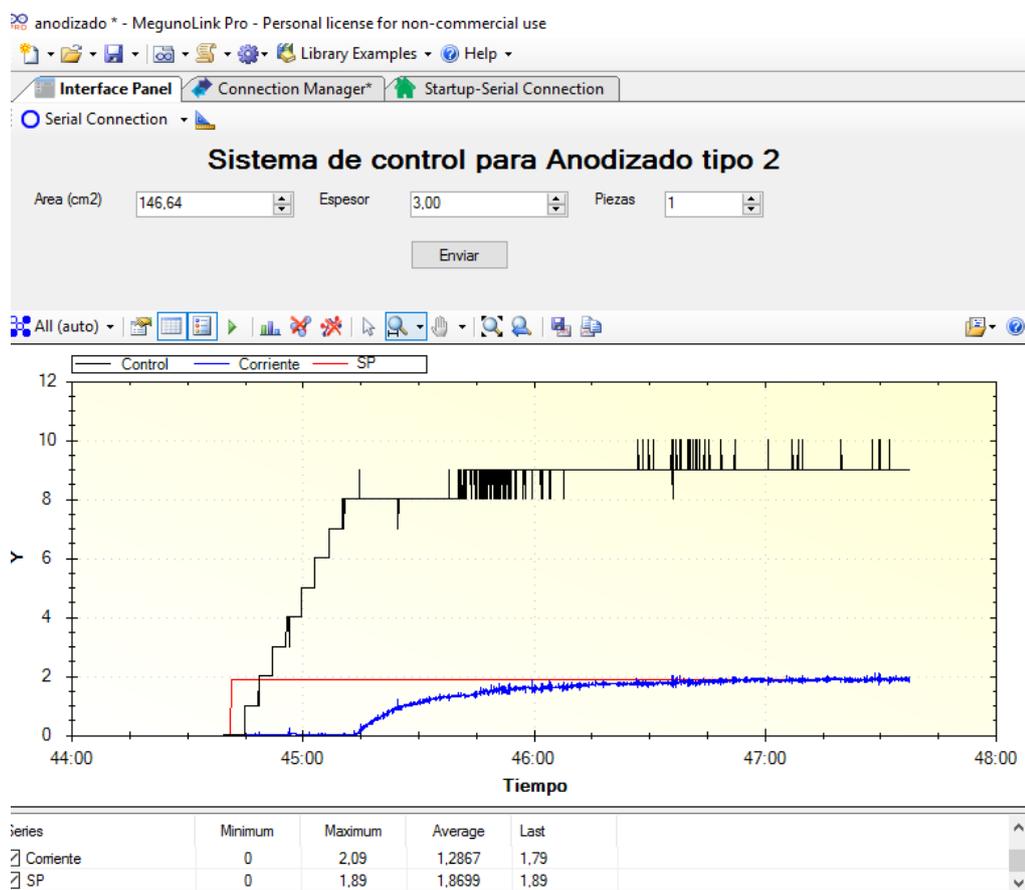


Figura N° 63. Grafica de control de corriente vs tiempo pieza 3

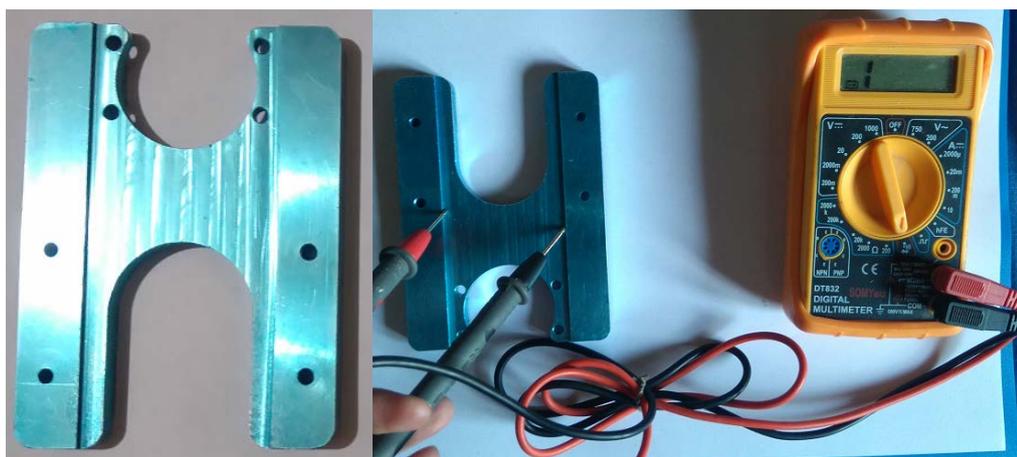


Figura N° 64. (a) Pieza terminada (b) Prueba de continuidad en la pieza 3

- Área de la pieza [cm²]: 205.2 Corriente: 2.65[A]
Tiempo: 4.25[min]

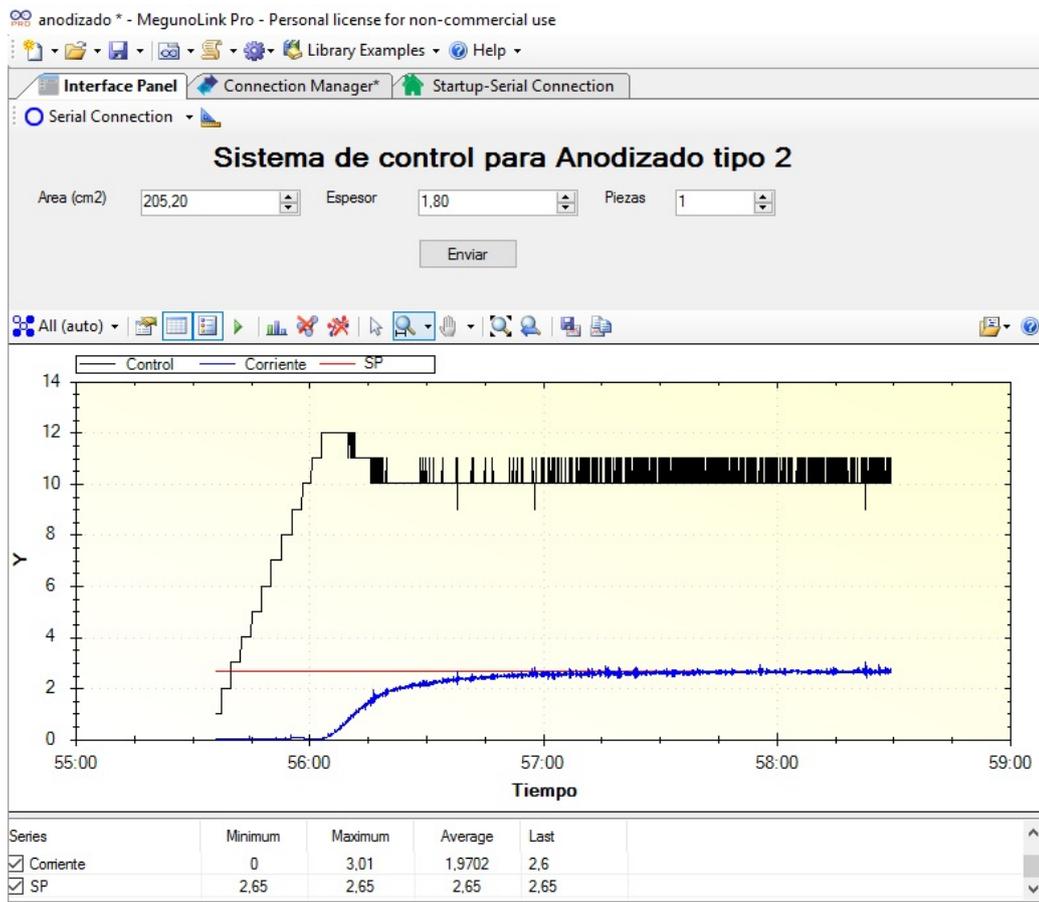


Figura N° 65. Grafica de control de corriente vs tiempo pieza 4



Figura N° 66. (a)Pieza terminada (b) Prueba de continuidad en la pieza 4

De las gráficas de control anteriores, se obtiene el error del controlador. Los errores se encuentran detallados en la siguiente tabla.

Tabla N° 10.

Errores obtenidos en la Piezas anodizadas

| Área [cm ²] | Tiempo [min] | Corriente [A] | Valor actual [A] | Error |
|----------------------------|-----------------|------------------|---------------------|-------|
| 126.72 | 4.25 | 1.63 | 1.61 | 1.22% |
| 223.18 | 4.72 | 2.88 | 2.9 | 0.69% |
| 146.64 | 7.09 | 1.89 | 1.79 | 5.29% |
| 205.2 | 4.25 | 2.65 | 2.6 | 1.89% |

Prueba fallida de anodizado

Es importante que al momento de anodizado, la cuba tenga agitación para que el anodizado quede uniforme.

También es importante que la pieza se encuentre lo más limpia posible. En los lugares que tenga grasa o manchas la pieza o incluso si el ácido esta con impurezas, el acabado del anodizado se verá pobre.

**Figura N° 67. Falla en el anodizado**

Soluciones de problemas de anodizado.

Tabla N° 11.

Solución de problemas de anodizado

| Problema | Solución |
|---|--|
| Las piezas no se tiñen | Si la parte no se tiñe, significa que no está anodizada completamente. La falta de teñido indica problemas en el método de anodizado o etapas anteriores. |
| Ganchos de piezas quemados | Asegúrese que la cuba de anodizado se encuentra con agitación. Si aparecen lugares o capas calientes, el cable se puede quemar. Verifique si la corriente no es excesiva. |
| Las piezas se tornan negras mientras se anodiza, no se tiñen bien, el color no es uniforme, lugares de pobre calidad | Realice la etapa de decapado por más tiempo. Las aleaciones de aluminio tienen otros metales que no son aluminio. A veces dependiendo de la aleación no se anodizará bien a pesar del decapado y desoxidado utilizado. |
| Las piezas no utilizan mucha corriente en el anodizado | Verifique la conexión eléctrica del cátodo y de las piezas. Incremente el tamaño del cátodo. El ácido está muy frío o tiene bajo porcentaje de ácido en el agua. (Bajas temperaturas pueden causar bajas corrientes). Mantenga la temperatura entre 20-22°C |
| Las piezas tienen una textura borrosa | El calor puede ser muy alto cuando se anodiza, verifique la temperatura del tanque. La pieza se pudo haber anodizado por un largo periodo, acorte el tiempo de anodizado. Utilice un sellador de acetato de níquel en lugar de agua hirviendo. Asegúrese que el tanque de sellado no esté muy caliente, si el sellador está caliente puede dejar residuos difusos en la pieza. |

CONTINUA



| | |
|---|--|
| Las piezas tienen manchas | La temperatura del ácido pudo hacer estado muy caliente en el anodizado, verifique la temperatura del tanque y que las líneas de aire están agitando el baño. NO deje las partes en el ácido antes o después de anodizarlas. |
| Las piezas tienen pequeños puntos blancos después de tinturadas y selladas | Probablemente no se vieron hasta que el sellador se secó al 100%. El ácido sulfúrico fue llevado a los tanques de tinte y los contamina. Cambie el tinte. Enjuague mejor después del tanque de ácido. |
| Las piezas cerca de los orificios no están tinturadas | Un pobre enjuague puede causar descoloración cerca de los orificios roscados. Si existen rastros de ácido brotando durante el paso de tintura, el tinte no cogerá en esas áreas. Enjuague bien la próxima vez |
| Las piezas tienen marcas blancas en las esquinas | El ácido está muy fuerte diluya con un poco de agua destilada. Recuerde el ácido debe estar entre el 15-20% del volumen total de la cuba. |
| Las piezas tienen un color suave en el medio | El tanque de ácido no está siendo agitado lo suficiente o está muy caliente. La diferencia de calor generado en la pieza disipándose a diferentes valores provoca descoloración en la pieza debido a que secciones de la pieza se están anodizando a diferentes valores. |
| La pieza no está tinturada uniformemente | La pieza no debe estar 100% limpia. Utilice una buena limpieza antes de anodizar. La pobre limpieza y enjuague causan partes desiguales tinturadas. |

Fuente: (Newman, 2011)

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Como resultado de este trabajo se obtuvo las siguientes conclusiones:

- El sistema de control de anodizado fue construido para los requerimientos específicos de la empresa, con esto logramos adquirir mayor comprensión en el tema de anodizado a través de esta investigación.
- Se aplicó los conocimientos adquiridos en diferentes materias relacionadas con el tema de la Carrera de Control y Automatización.
- Se documentó el proceso y tratamiento del aluminio antes de ser expuesto al anodizado así como también los diferentes tipos de aluminio sus aleaciones dentro de la industria.
- Este equipo beneficiará a la Empresa Suprarain. Cía. Ltda. con el fin de dar un buen anodizado en las piezas de aluminio que ellos manejan.

4.2. Recomendaciones

Mediante varias pruebas se comprobó:

- Tener precauciones con el uso del equipo y los aditivos químicos como el ácido sulfúrico, la sosa caustica, desengrasante ya que pueden producir daños en la piel y a la salud.
- Los ganchos utilizados para enganchar las piezas a ser anodizadas se oxidan y tiende a romperse, observar si se encuentran en buen estado para ser utilizados.
- Mantener la temperatura del electrolítico específicamente en la cuba donde se hace el baño con ácido sulfúrico ya que así se formará la capa anódica por exceso de temperatura cerrado la superficie porosa del aluminio, la misma que no permitirá la trituración.
- Hay que tener en cuenta la pureza del aluminio entre más puro se realizará mejor el anodizado de la pieza y su coloración ya que no todas las aleaciones están dispuestas a ser coloreadas.
- La unión de la pieza con el lagarto conductor tiende a oxidarse en el punto de contacto con lo cual deja de conducir la corriente y no anodizada, se debe sujetar firmemente y comprobar su conductividad.
- Entre los varios tintes utilizados los que dieron mejor resultado son los tintes orgánicos siendo los más ventajosos para la coloración.
- El mejor terminado y sellado de la pieza de aluminio depende de la limpieza de la superficie para ello es indispensable los pasos previos de limpieza en una forma adecuada.

BIBLIOGRAFÍA

- Arbellot, L. (1965). *Manual práctico de recubrimientos electrolíticos*.
- Arduino Co. (2010). *Como instalar Arduino en Windows*. Obtenido de <http://arduino.cl/como-instalar-arduino-en-windows/>
- Arduino Co. (2014). *Arduino Uno Rev3*. Obtenido de <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- Arian Control & Instrumentación. (2009). *Qué son y como funcionan las termocuplas*. Obtenido de <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>
- Arroyo, P. (5 de Febrero de 15). *Bases de Química General*. Obtenido de www.quimicayalgomas.com
- Castaños, E. (s.f.). Obtenido de <https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/>
- Castellán, G. (24 de Febrero de 1998). *FisicoQuímica*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/52161812/Electroquimica#download>.
- CEPAL. (25 de Agosto de 2000). *Prácticas Ancestrales del medio Ambiente*. Obtenido de http://scholar.google.es/scholar?hl=es&q=practic+as+ancestrales+del+medio+ambiente&btnG=&lr=lang_es.
- Helper, L. (1998). *Manual Práctico de Carpintería Metálica. Principios de Química*, 10-16.
- MathWorks. (1998). *Introduction to System Identification Toolbox*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/videos/introduction-to-system-identification-toolbox-68901.html>
- MegunoLink. (2010). *Start a project*. Obtenido de <https://www.megunolink.com/introduction/start-a-project/>
- Microchip. (2010). *12 Bit Digital to Analog Converter*. Obtenido de <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/MCP4725.pdf>
- Newman, R. (2011). *Moonlite Anodizing*. Obtenido de A practical guide to anodizing aluminum: <http://www.uponone.com/howtos/1.pdf>
- Pancorbo, F. (2006). *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. Barcelona: Marcombo.

- Piña, R. (2013). *Organización y montaje mecánico e hidráulico de instalaciones solares térmicas*. México: IC Editorial.
- Ramirez, J. (2009). *Efecto del anodizado sobre la razón de desgaste de una aleación de aluminio*. Obtenido de http://ri.ues.edu.sv/1739/1/Efecto_del_anodizado_sobre_la_razon_de_desgaste_de_una_aleacion_de_aluminio_6061.pdf
- Rodriguez, L. (2013). *Teoría de circuitos y electrónica*. Obtenido de <http://www.gestiondecompras.com/es/productos/conformado-de-tubos-y-perfiles/extrusion-de-aluminio>.
- Shenzhen XinRuida Electric Power Equipments Co., Ltda. (2010). *Hall effect current sensor*. Obtenido de <http://www.szrtd.com/en/dccurrenttransducer/110-268.html>
- Universidad de Valencia. (10 de Enero de 1995). *Conductividad en disoluciones electrolíticas*. Obtenido de Laboratorio de Química y Física: https://www.uv.es/qflab/2017_18/descargas/cuadernillos/qf1/castellano/Teoria/Conductividad-F.pdf
- Velázquez, M., & Ordorica, M. (2000). *Soluciones Electrolíticas*. Obtenido de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiSi_23rrzQAhUJ2SYKHfCBVIQFggyMAQ&url=http%3A%2F%2Fecaths1.s3.amazonaws.com%2Ffisiquim2%2F1102121524.Unidad23.pdf&usg=AFQjCNHjIXP4UpRGPUqmIGuyQfuSu8euxg&sig2=4M3OdvM
- Yucoo Network Equipment Co. (2012). *Yucoo Network*. Obtenido de Adjustable Power Supply: http://www.ykpowersupply.com/product_show.asp?id=4614