

**AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE UNA CELDA
ELECTROQUÍMICA**

AUTOR:

JUAN PABLO MUÑOZ VIDAL

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTADA DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA**

2019

**AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE UNA CELDA
ELECTROQUÍMICA**

AUTOR:

JUAN PABLO MUÑOZ VIDAL

DIRECTOR:

M. Sc. HERNANDO GONZÁLEZ ACEVEDO

CODIRECTOR:

M. Sc. LUIS EDUARDO JAIMES REATIGA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTADA DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA**

2019

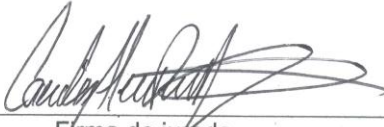
Notas de Aceptación



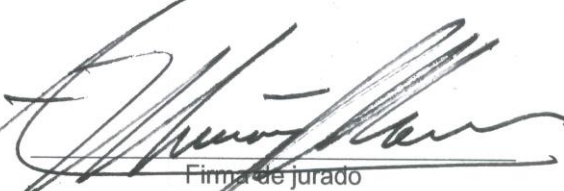
Firma de director de proyecto



Firma de codirector de proyecto



Firma de jurado



Firma de jurado

DEDICATORIA:

En primer lugar, a Dios, por permitirme concluir esta etapa de mi vida, darme sabiduría y fortaleza para mantenerme siempre en pie ante cualquier adversidad.

A mis padres Jaime Muñoz y Leonor Vidal por su amor y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.

A mis Hermanos Tania Muñoz y Felix Muñoz por enseñarme cualidades de rectitud y honestidad.

A mis abuelos Carmen Machado y Alfonso Vidal por estar siempre ahí en todo momento durante mi carrera universitaria.

A mis tíos Omaira Muñoz y William Martínez por su paciencia y brindarme su apoyo en todo momento.

A mis profesores, por instruirme en esta hermosa carrera, por la exigencia cuando fue necesario y la motivación para dar lo mejor de mí en cada trabajo, incentivando mi espíritu creador.

Y a todos mis amigos y demás familiares, que han contribuido de alguna manera, a que esta etapa sea culminada con éxito y gratitud.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su bendición e iluminación para que todas las cosas salieran bien de principio a fin.

A mis padres Jaime Muñoz y Leonor Vidal, por todo su amor, comprensión y apoyo, pero sobre todo gracias infinitas por la paciencia que me han tenido. No tengo palabras para agradecerles las incontables veces que me brindaron su apoyo en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida.

A mis tios Omaira Muñoz y William Martínez, por acertarme todo este tiempo en su hogar y darme todo el apoyo incondicional en todo este tiempo.

A mi director M. Sc. Hernando González por su dirección y acompañamiento en este proyecto.

A mi codirector M. Sc. Luis Eduardo Jaimes por su asesoría en todo el trascurso del proyecto.

A los Auxiliares de laboratorio Jegnny Rocio Pabon, Gabriel Franco y Marvin Torres por todo su acompañamiento en el desarrollo de este proyecto.

A todos mis amigos, que han contribuido de alguna manera, a que esta etapa sea culminada con éxito y gratitud.

A mi respetada Universidad Autónoma de Bucaramanga, por abrirme sus puertas para formarme como un profesional integro, apto para cualquier reto profesional.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. OBJETIVOS..... | 2 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL: | 2 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS: | 2 |
| 3. ANODIZADO DE ALUMINIO | 3 |
| 3.1. CELDA ELECTROQUÍMICA | 3 |
| 3.2. ANODIZADO | 4 |
| 3.3. CINÉTICA DE LA FORMACIÓN DE OXIDO DE ALUMINIO ANODIZADO 7 | |
| 3.3.1. MECANISMO DE FORMACIÓN DE POROS | 7 |
| 3.3.2. REACCION ELECTROQUÍMICA DURANTE LA ANODIZACIÓN..... | 8 |
| 3.4. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE ANODIZADO | 9 |
| 3.5. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA CORRIENTE DE ANODIZADO | 10 |
| 4. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS | 11 |
| 4.1. DISEÑO MECÁNICO..... | 11 |
| 4.2. DISEÑO ELECTRÓNICO | 13 |
| 4.2.1. INSTRUMENTACIÓN | 18 |
| 4.2.1.1. SENSOR DE TEMPERATURA..... | 18 |
| 4.2.1.2. SENSOR DE CORRIENTE | 20 |
| 4.2.1.3. SENSOR DE VELOCIDAD | 21 |
| 4.3. DISEÑO DE INTERFAZ HOMBRE-MAQUINA | 23 |
| 5. SISTEMA DE CONTROL | 27 |
| 5.1. CONTROL DE CORRIENTE | 27 |
| 5.1.1. CONTROL DE RETROALIMENTACIÓN CUANTITATIVA (QFT)..... | 30 |
| 5.1.2. ESPECIFICACIONES DE DESEMPEÑO DEL CONTROLADOR | 32 |
| 5.1.3. ESPECIFICACIONES GENERALES | 33 |
| 5.1.4. EL RECHAZO DE RUIDO EN EL SENSOR | 33 |
| 5.1.5. RECHAZO DE PERTURBACIONES A LA SALIDA..... | 34 |
| 5.1.6. EL ESFUERZO DE CONTROL..... | 34 |
| 5.1.7. EL SEGUIMIENTO DE REFERENCIA..... | 35 |
| 5.1.8. LOOP-SHAPPING DEL CONTROLADOR QFT | 35 |
| 5.2. CONTROL DE TEMPERATURA. | 39 |
| 6. VALIDACIÓN DEL SISTEMA | 45 |

| | |
|--|----|
| 6.1. NORMAS DE SEGURIDAD | 50 |
| 7. CONCLUSIONES | 51 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA | 52 |
| 9. ANEXOS | 55 |
| 9.1. MANUAL DE OPERACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE ANODIZADO | 55 |
| 9.1.1. DESCRIPCION DE LA UNIDAD | 55 |
| 9.1.2. INSTALACION | 55 |
| 9.1.3. OPERACIÓN DE LA INTERFAZ | 57 |
| 9.1.4. DIMENSIONES | 57 |
| 9.1.5. PRECAUCIONES DE SEGURIDAD | 58 |
| 9.2. MULTÍMETRO FLUKE 187 | 59 |
| 9.3. TACÓMETRO EXTECH RPM10 | 60 |
| 9.4. CÓDIGO ARDUINO | 61 |
| 9.5. LÓGICA EN LABVIEW | 66 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Movimiento de iones en la celda electrolítica. [2] | 3 |
| Figura 2. Movimiento de iones en la celda galvánica. [2] | 4 |
| Figura 3. Mecanismo de crecimiento del sustrato Poroso de anodizado [8]..... | 8 |
| Figura 4. Modificaciones realizadas a la mesa de laboratorio. [Autor] | 12 |
| Figura 5. Sistema térmico a controlar en el banco de pruebas [Autor]..... | 13 |
| Figura 6. Circuito equivalente a un convertidor DC/DC [Autor] | 14 |
| Figura 7. a) circuitos equivalentes de regulador reductor con iL continua. [Autor] b) | |
| Forma de onda de regulador reductor con iL continua. [17]..... | 16 |
| Figura 8. Comparación de la medición de la temperatura. [Autor] | 19 |
| Figura 9. Comparación de la medición de la temperatura corregida. [Autor]..... | 20 |
| Figura 10. Comparación de la medición de la corriente. [Autor]..... | 21 |
| Figura 11. Comparación de la medición de la velocidad. [Autor]..... | 22 |
| Figura 12. Esquema de la unificación del sistema [Autor] | 23 |
| Figura 13. Protocolo de comunicación entre LabView y Arduino. [Autor]..... | 24 |
| Figura 14. Lógica utilizada en la programación del banco de pruebas. [Autor] | 25 |
| Figura 15. Sistema SCADA diseñado [Autor]..... | 26 |
| Figura 16. Datos de entrada para validación del modelo de convertidor DC/DC. [Autor]..... | 28 |
| Figura 17. Datos de salida para validación del modelo de convertidor DC/DC. [Autor]..... | 29 |
| Figura 18. Estructura de control QFT [Autor]..... | 30 |
| Figura 19. Planta insertada en la toolbox de QFTCT [Autor]..... | 31 |
| Figura 20. Plantillas del espacio de incertidumbre del sistema [Autor] | 32 |
| Figura 21. Diagrama de Bode de la planta nominal. [Autor] | 33 |
| Figura 22. Loop-shaping del controlador QFT [Autor] | 36 |
| Figura 23. Respuesta de la planta con prefiltro en el dominio de la frecuencia [Autor]..... | 37 |
| Figura 24. Respuesta de la planta en lazo cerrado con prefiltro en el dominio del tiempo [Autor] | 37 |
| Figura 25. Estructura implementada en la simulación para validar el controlador QFT. [Autor]..... | 38 |
| Figura 26. Comparación del sistema en lazo cerrado con datos experimentales y datos simulados del control de corriente. [Autor]..... | 39 |
| Figura 27. Datos de identificación de entrada. [Autor]..... | 40 |
| Figura 28. Datos de identificación de salida. [Autor] | 40 |
| Figura 29. Datos de validación de entrada. [Autor] | 41 |
| Figura 30. Datos de validación de salida. [Autor] | 41 |
| Figura 31. Comparación de los datos de identificación con el modelo obtenido. [Autor]..... | 42 |
| Figura 32. Comparación de los datos de validación con el modelo obtenido. [Autor] | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 33. Estructura utilizado para validar el modelo simulado y la planta real del control de temperatura. [Autor]..... | 44 |
| Figura 34. Comparación del sistema en lazo cerrado con datos experimentales y datos simulados del control de temperatura. [Autor] | 44 |
| Figura 35. a) Evidencias de la construcción del banco de pruebas. b) Evidencia del proceso de limpieza a la pieza de aluminio [Autor] | 45 |
| Figura 36. Monitoreo de la Corriente en la Prueba. [Autor] | 46 |
| Figura 37. Monitoreo de la Temperatura en la Prueba. [Autor] | 46 |
| Figura 38. Recubrimiento de oro a la pieza de aluminio. [Autor] | 47 |
| Figura 39. Equipo QUANTA FEG 650. [Autor] | 47 |
| Figura 40. Medición de la capa anódica creada en la superficie del aluminio. [Autor]..... | 48 |
| Figura 41. a) Zona donde se realizó el análisis químico. b) Grafico en donde se observa el espectro resultante que indica que elementos se encuentran presentes en la capa anódica. [Autor]..... | 49 |
| Figura 42. Piezas anodizadas a diferente valor de corriente [Autor]. | 49 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Procesos de anodizado más comunes, con sus parámetros de proceso, aplicaciones y otras características comunes. [5] | 6 |
| Tabla 2. Parámetros calculados para el modelo del convertor DC/DC [Autor] | 17 |
| Tabla 3. Datos de medición de temperatura [Autor] | 19 |
| Tabla 4. Datos de medición de temperatura corregidos [Autor] | 20 |
| Tabla 5. Datos de medición de corriente [Autor] | 21 |
| Tabla 6. Datos de medición de velocidad de agitador [Autor] | 22 |
| Tabla 7. Análisis químico en peso y masa atómica de cada elemento presente en la zona del material base.[Autor] | 49 |

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos electroquímicos son un tema que para los ingenieros debe ser de importancia por la gran cantidad de energía que estos procesos demandan en la actualidad y la considerable aplicación en la industria Colombiana, en su mayoría son pequeñas y medianas empresas, que requieren reducir estos consumos energéticos basados en las actuales y futuras crisis energéticas.

Las celdas electroquímicas son un dispositivo usado para la descomposición de sustancias ionizadas por medio de la corriente eléctrica, estas cuentan con un ánodo y un cátodo. El ánodo es el encargado de la oxidación y el cátodo es el encargado de la reducción en la celda electroquímica. Estas tienen muchas aplicaciones en la industria, tal como es el proceso de anodizado de aluminio. El principal uso de las celdas electroquímicas es el recubrimiento de metales con una capa de espesor y con esto mitigar la corrosión del material. Con la ejecución de este proyecto se pretende fortalecer la investigación que se desarrolla al interior de los programas de Ingeniería Mecatrónica y Energía a través de los proyectos de aula, integradores y de grado, porque permite acercar a los estudiantes a un entorno científico con un tema de interés nacional e industrial. Este proyecto tiene como finalidad automatizar el banco de pruebas de una celda electroquímica para el proceso de anodizado, utilizando instrumentación adecuada para la medición de parámetros de funcionamiento del sistema, que serán registrados para su estudio. El proceso cuenta con un acondicionamiento de señales registradas de los parámetros de funcionamiento como: corriente y temperatura; que se enviarán a LabView, para el monitoreo y almacenamiento de los comportamientos de las variables en tiempo real.

Este banco de pruebas apoyará al programa de ingeniería en energía, para apoyar los estudios en los procesos químicos. Este proyecto hace parte de un proyecto de investigación titulado "MONTAJE DE UN BANCO ELECTROQUÍMICO PARA APLICACION ACADÉMICA E INVESTIGATIVA EN LAS AREAS DE ENERGIA, SIMULACION Y CONTROL". El cual fue aprobado en convocatoria bienal 2017-2019. El banco de pruebas contará con un control de temperatura, también se implementará una fuente con la cual se buscará realizar el control de corriente al interior de la celda.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL:

- Automatizar un banco de pruebas de una celda electroquímica para el proceso de anodizado de una placa de aluminio.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Diseñar un banco de pruebas para una celda electroquímica capaz de realizar el proceso de anodizado a una placa de aluminio.
- Diseñar dos sistemas de control independientes para regular la temperatura y corriente en una celda electroquímica para el proceso de anodizado de una placa de aluminio.
- Validar las estrategias de control y la lógica aplicada en la etapa de automatización de la celda electroquímica.
- Determinar el efecto de la temperatura y la corriente para un proceso de anodizado de una placa de aluminio.

3. ANODIZADO DE ALUMINIO

3.1. CELDA ELECTROQUÍMICA

Consiste en la formación por medio de dos electrodos que se encuentran sumergidos en una solución electrolítica, conectados mediante un puente salino, qué mediante una excitación de voltaje en los electrodos, se produce una reacción química que a su vez genera como resultado energía eléctrica.

Existen dos tipos de celdas electroquímicas, las celdas galvánicas o voltaicas, donde ocurren reacciones espontáneas, y las celdas electrolíticas donde ocurren reacciones no espontáneas. Ambos tipos de celda contienen electrodos donde la oxidación y la reducción ocurren. La oxidación ocurre en el electrodo llamado ánodo y la reducción en el electrodo llamado cátodo.

Las reacciones en las celdas electrolíticas no son espontáneas, por lo que se necesita energía eléctrica para inducir la electrólisis. En una celda electrolítica, el electrodo cargado negativamente se denomina cátodo, y el cargado positivamente se denomina ánodo. En la figura 1 podemos observar como en una celda electrolítica cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta, los iones positivos (o cationes) son atraídos al cátodo, donde se reducen, creando lo que se conoce como corriente catódica, mientras que los iones negativos (o aniones) se desplazan hacia el ánodo, donde se oxidan, creando lo que se conoce como corriente anódica. La energía necesaria para movilizar los iones e incrementar su concentración en los electrodos, proviene de una fuente eléctrica que mantiene la diferencia de potencial entre los electrodos. [1]

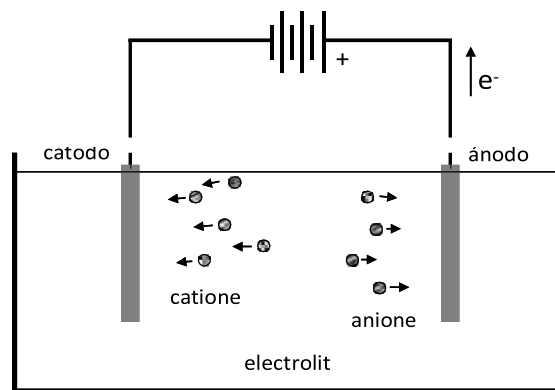


Figura 1. Movimiento de iones en la celda electrolítica. [2]

Por su parte, el ánodo de la celda galvánica está cargado negativamente, dado que la oxidación espontánea del ánodo es la fuente de electrones o carga negativa. Como podemos observar en la figura 2 el cátodo de la celda galvánica es el terminal positivo y esta consiste en dos medias-celdas, conectadas a través de un puente de

sal. Un puente de sal se hace típicamente de un gel de una solución acuosa salina concentrada, que permite el flujo de los iones y completa el circuito eléctrico [1].

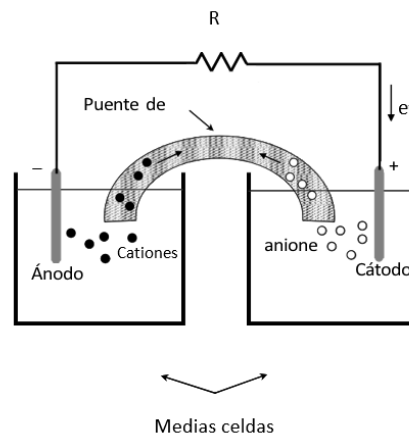


Figura 2. Movimiento de iones en la celda galvánica. [2]

En ambos tipos de celda (galvánica y electrolítica), la oxidación ocurre en el ánodo y los electrones fluyen, en el circuito eléctrico, desde el ánodo hasta el cátodo.

3.2. ANODIZADO

Es una técnica utilizada para modificar la superficie del aluminio. Se conoce como anodizado a la formación de la capa protectora de óxido de aluminio, conocida como alúmina, la cual se puede producir natural o artificialmente mediante procedimientos electrolítico, de manera que se consigue una mayor resistencia y durabilidad del aluminio.

Con estos procedimientos se consigue la oxidación de la superficie del aluminio, creando una capa de alúmina que protege la pieza. La protección del aluminio dependerá en gran medida del espesor de esta capa.

El nombre del proceso deriva del hecho que la pieza a tratar está conectada al ánodo del circuito eléctrico en este proceso electrolítico. La anodización es usada frecuentemente para proteger el aluminio y el titanio de la abrasión y la corrosión, y también para poder ser coloreado en una amplia variedad. [3]

El anodizado de aluminio se desarrolla en una gran variedad de electrolitos, empleando diferentes condiciones de operación incluyendo la concentración y composición del electrolito, temperatura, voltaje y amperaje. Dependiendo de las condiciones de proceso, el anodizado proporcionará una superficie con propiedades específicas, según las expectativas y la aplicación deseada. Algunas de las razones para aplicar anodizado al aluminio y sus aleaciones se mencionan a continuación [4]:

- *Aumentar la resistencia a la corrosión:* Los recubrimientos anódicos de óxido de aluminio son altamente resistentes a la corrosión, ataques atmosféricos y ambientes salinos. El recubrimiento anódico protege el metal base sirviendo como barrera contra los agentes corrosivos.
- *Mejorar la apariencia decorativa:* Todos los recubrimientos anódicos son brillosos y presentan una resistencia a la abrasión relativamente buena. Por lo tanto, estos recubrimientos son usados como tratamiento de acabado final cuando la apariencia natural del aluminio es deseada o cuando un patrón mecánico se desea conservar. La mayoría de los aluminios utilizados en aplicaciones arquitectónicas son anodizados.
- *Aumentar la resistencia a la abrasión:* Los procesos de anodizado duro producen recubrimiento que pueden variar desde 25 μm hasta más de 100 μm de espesor. Estos recubrimientos, con la dureza propia del óxido de aluminio, cuentan con el espesor suficiente para su uso en aplicaciones que involucran partes rotativas donde la resistencia a la abrasión es ampliamente requerida.
- *Aumentar la adhesión de pinturas:* El recubrimiento anódico proporciona una activación química superficial para la mayoría de los sistemas de pintura. Los materiales de base aluminio que son pintados para proporcionar servicio en ambientes corrosivos severos, comúnmente son anodizados antes de ser pintados.
- *Mejorar la adhesión en juntas:* Una pequeña capa de anodizado con electrolitos de ácido fosfórico o ácido crómico mejora los esfuerzos de frontera y la durabilidad en juntas. Dichos recubrimientos son ampliamente empleados en las estructuras de fuselaje de la mayoría de las aeronaves modernas.
- *Proporcionar aislamiento eléctrico:* El óxido de aluminio es dieléctrico. El voltaje de ruptura de la película anódica varía desde solo algunos volts hasta varios cientos, dependiendo de la aleación y de la naturaleza y espesor de la película. El grado de sellado también afecta las propiedades de aislamiento.

Una gran cantidad de electrolitos han sido probados, usados y patentados durante el último siglo, dejando solamente algunos procesos industriales importantes. "The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and its Alloys" por Wernick, Pinner and Sheasby, los tres procesos más importantes son el de ácido crómico, ácido sulfúrico o ácido oxálico. Electrolitos como ácido fosfórico y la combinación de ácido bórico sulfúrico son usados hoy en día en el mercado de anodizado para la industria aeroespacial. Otros procesos son usados con menor frecuencia o para propósitos especiales, como lo son el de ácido sulfúrico con ácido oxálico, ácido bórico, ácido sulfosalicílico o ácido tartárico. Con excepción de los recubrimientos de espesor delgado producidos en los procesos de anodizado duro, la mayoría de los recubrimientos anódicos presentan un rango de espesor que va desde 5 hasta 18 μm [5].

El anodizado con ácido crómico fue el primer proceso de anodizado comercial patentado en 1923 por Bengough y Stuart, seguidos casi inmediatamente por el primer proceso de anodizado con ácido sulfúrico patentado en 1927. El ácido oxálico fue introducido por los Japoneses a mediados de los años 1950's. El mayor interés en la actualidad es desarrollar electrolitos con mezclas de ácidos en anodizados de recubrimientos duros para producir recubrimientos más duros en tiempos menores que los obtenidos con electrolitos de solo ácido sulfúrico. Los anodizados con ácido fosfórico y ácido sulfúrico – bórico fueron ambos desarrollados por la compañía Boeing, el primero como superficie para juntas estructurales y el segundo como reemplazo de anodizados con ácido crómico para piezas sometidas a fatiga no crítica. El proceso más común de anodizado es el de ácido sulfúrico, pero para aplicaciones en la industria aeroespacial el tema se torna diferente [6].

En la Tabla 1 se presentan los procesos de anodizado más comunes desarrollados tanto para aplicaciones de ingeniería como para fines decorativos y de arquitectura, también se puede observar los parámetros de proceso (%Baño electrolítico, temperatura dentro del proceso, volteje suministrado al proceso y el tiempo del proceso), aplicaciones y otras características comunes para cada uno de los procesos presentados [5].

Tabla 1. Procesos de anodizado más comunes, con sus parámetros de proceso, aplicaciones y otras características comunes. [5]

| Proceso de Anodizado | Parámetros de Proceso | | | | Espesor de película (µm) | Aplicaciones y otras características |
|----------------------|--|-----------|---------------|--------------|--------------------------|---|
| | Baño Electrolítico (% peso) | Temp (°C) | Volts (V) | Tiempo (min) | | |
| 1. Acido Crómico | 3 a 10 % CrO ₃ . | 35 - 40 | 40 20 - 22 | 30 - 40 | 2 - 5 | <ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones en ambientes marinos, dispositivos de aeronaves como tratamiento de pre-pintura y en ensambles con remaches o soldadura. • Genera una película de anodizado extremadamente delgada. • Excelente resistencia a la corrosión. • Presenta problemas de salud por considerarse altamente cancerígeno. |
| 2. Acido Sulfúrico | *NOTA: Es dividido en recubrimientos tipo II y tipo III. | | | | | |
| 2.1 Tipo II | 12 – 20 % H ₂ SO ₄ . | 15 - 27 | Varia | 12 - 30 | 2.5 - 18 | <ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones decorativas, de protección o arquitectónicas en exteriores e interiores. |
| 2.2 Tipo III | 10 – 22.5 % H ₂ SO ₄ . | -2 - 10 | Varia | Varia | Delgado | <ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones de ingeniería como la industria aeroespacial. • Presenta complicaciones de anodizado con aleaciones de la serie 2000. • Desarrolla un óxido de alta dureza, densidad y resistencia a la abrasión. • Conocido como anodizado |

| | | | | | | |
|------------------------------------|--|---------|---------------|-------|----------|---|
| | | | | | | duro (Hardcoating) |
| 3. Ácido Oxálico | 3 – 10 % C ₂ H ₂ O ₄ . | 26 - 32 | 50 | Varia | Hasta 50 | |
| 4. Ácido Fosfórico | 3 – 20 % H ₃ PO ₄ . | 32 | 10 – 15 60 | Varia | Varia | <ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones en industria aeronáutica para juntas estructurales en ambientes de alta humedad. • Presenta gran durabilidad bajo condiciones adversas, superando al ácido crómico y sulfúrico. |
| 5. Ácido Sulfúrico - Bórico | 4.5 – 5 % H ₂ SO ₄ . 0.8 % H ₃ BO ₃ . 5 % H ₃ BO ₃ . | 26 | 15 | 20 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> • Actualmente en desarrollo. • Se presenta como principal alternativa al electrolito de ácido crómico. |

La morfología de la película de óxido obtenida durante los procesos de anodizado se controla dependiendo del electrolito y las condiciones de anodizado usadas. Si el óxido no es soluble en el electrolito, este crecerá solamente tanto como la resistencia del óxido permita el flujo de corriente. El óxido resultante será muy delgado, no poroso y no conductivo. Si el óxido anódico es ligeramente soluble en el electrolito, entonces se formarán óxidos porosos. Como el óxido crece bajo la influencia de la corriente DC aplicada, este también disuelve y desarrolla poros. Las condiciones del proceso de anodizado tienen una gran influencia en las propiedades del óxido formado. El uso de temperaturas y concentraciones de ácido bajas va a permitir menor porosidad y películas más duras (recubrimiento duro). Temperaturas y concentraciones altas, así como tiempo de anodizado largo van a producir unos recubrimientos menos duros y de mayor porosidad. Se debe recordar que el cambio de uno de los parámetros cambiara los otros, debido a que todos estos están íntimamente relacionados [6].

3.3. CINÉTICA DE LA FORMACIÓN DE OXIDO DE ALUMINIO ANODIZADO

3.3.1. MECANISMO DE FORMACIÓN DE POROS

La forma hexagonal del óxido puede ser fácilmente formada por la anodización de aluminio en regímenes de densidad de corriente o potencial constante. Cuando un voltaje constante es aplicado, la densidad de corriente decrece rápidamente con el tiempo, y un mínimo de densidad de corriente es rápidamente alcanzado. Un incremento lineal lleva a la obtención de un máximo local. Después de alcanzar el máximo, la densidad de corriente disminuye levemente y se alcanza un estado

estable, en donde la densidad de corriente es invariable [7]. El proceso de anodización está dividido en cuatro etapas como se muestra en la figura 3. En la etapa(I), el descenso lineal de la densidad de corriente genera un crecimiento de una capa barrera de óxido de aluminio. La etapa (II) está relacionada con la generación de zanjas sobre la capa de óxido compactada, esta etapa es catalogada como el paso de iniciación en la formación de la estructura porosa. Después de alcanzar el mínimo local de densidad de corriente, etapa (III), empieza el rompimiento de la capa compacta de óxido, generando unos pequeños cráteres los cuales se acrecientan para dar formación a los poros. Finalmente, durante el estado estable, etapa (IV), donde la densidad de corriente es constante las estructuras porosas empiezan a acelerar su crecimiento alcanzando una velocidad de disolución constante, permitiendo el crecimiento de la estructura porosa. [8]

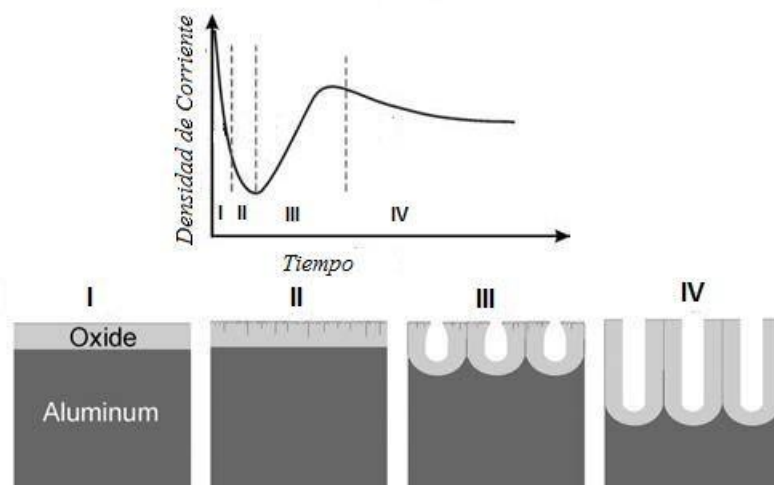
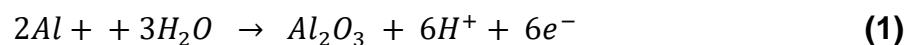


Figura 3. Mecanismo de crecimiento del sustrato Poroso de anodizado [8]

3.3.2. REACCION ELECTROQUÍMICA DURANTE LA ANODIZACIÓN

El proceso de anodización de aluminio ha sido ampliamente investigado [5], [9], [10], [11], pero algunos procesos complejos aún no han sido aclarados. Debido a esto las investigaciones enfocadas al proceso de anodización, han llevado a observar el comportamiento de la polarización anódica del aluminio en electrolitos ácidos, cuya finalidad radica en el crecimiento de una capa de óxido la cual es generada por la reacción química de la ecuación 1.



El principal contribuyente a la corriente anódica en el aluminio esta dado por la reacción de la ecuación 2.



En el proceso se puede presentar ciertas formaciones de burbujas de oxígeno en la interface aluminio-oxido, estas proceden debido a la presencia de impurezas o segundas partículas. También se establece que esta evolución de oxígeno es conectada directamente con el crecimiento de la capa de alúmina porosa, cuyas reacciones anódicas se hacen más complejas en la presencia de electrolitos con aniones susceptibles a la oxidación. Es ampliamente reconocido que el crecimiento de los poros ocurre principalmente en la interfase oxido-aluminio debido a la presencia de electrolitos ácidos como sulfúrico, fosfórico y oxálico. [8]

3.4. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE ANODIZADO

La temperatura de la solución de oxidación anódica es el parámetro del proceso dominante que afecta las propiedades de la película de óxido. Cuando la temperatura aumenta, la viscosidad de la solución disminuye, la densidad de la corriente aumenta (mientras que el voltaje es constante), o cuando la tensión disminuye y la corriente es constante, el consumo de energía puede reducirse y la eficiencia de producción puede mejorarse.

Cuando la temperatura de la solución es superior a 24[°C], la velocidad de disolución de la capa de película aumenta, lo que provocó que la velocidad de producción de la película, la dureza de la película y el espesor de la capa de película se reduzcan, la capacidad de resistencia al desgaste y la corrosión La resistencia baja, y la película de óxido se suelta. Sin embargo, cuando la temperatura de la solución es demasiado baja, digamos que, por debajo de 10[°C], la buena noticia es que el espesor de la película de óxido se puede aumentar, y la capacidad de resistencia al desgaste también es mejor; Pero la fragilidad de la película de óxido aumenta, la porosidad es pequeña y el teñido es difícil. Por lo tanto, al anodizar perfiles de aleación de aluminio, la temperatura de la solución debe controlarse estrictamente para evitar que la solución sea demasiado fría. [12]

La oxidación anódica es la reacción exotérmica; La formación de la película de óxido se acompaña de la producción de energía, de modo que la temperatura de la solución aumenta rápidamente. Al anodizar es necesario tomar las medidas correspondientes para controlar la temperatura de la solución en la especificación del proceso normal, para garantizar que la formación de película de óxido pueda continuar con la calidad. [13]

3.5. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA CORRIENTE DE ANODIZADO

En cierta condición, con la densidad de corriente aumenta, la película anodizada, pero el tiempo de anodización disminuye y, mientras que la película es porosa y se tiñe fácilmente, la dureza y la resistencia al desgaste aumentan. Si la densidad de corriente es demasiado alta, se verá afectada por pérdidas de energía, lo que aumentará la temperatura de la superficie y la temperatura de la solución. La densidad de corriente es demasiado baja, y la tasa de crecimiento de la película será lenta, mientras tanto, la densidad, la dureza y la resistencia al desgaste de la película son menores. [14]

En condiciones de temperatura normal (aproximadamente 20[°C]), excepto la formulación de proceso especiales, la densidad de la corriente eléctrica de los perfiles de aluminio y la extrusión de aleación de aluminio industrial debe controlarse entre 1 [A/dm²] a 1.5 [A/dm²] al anodizar. La selección de la densidad de la corriente eléctrica debe concordar con la temperatura, la concentración de la solución, las formas del perfil y otras condiciones relevantes del proceso.

Bajo condiciones posibles, el aumento apropiado de la densidad de corriente es beneficioso para la velocidad de formación de la película de oxidación, acorta el tiempo de oxidación anódica y aumenta la porosidad de la capa de película para mejorar el efecto de coloración. Pero cuando se aumenta la densidad de corriente, el perfil de aluminio se ve afectado de manera persistente por el calor en el proceso de oxidación: el efecto endotérmico del orificio de la membrana aumenta y el calentamiento local es significativo, lo que provocará la disolución de la película de óxido anódico. La velocidad de las membranas desciende. Incluso puede dar como resultado una distribución desigual de la corriente y afectar el efecto de coloración. La selección de la densidad de corriente adecuada puede acelerar la tasa de crecimiento de la película en un cierto rango, pero cuando supera un cierto valor, la velocidad de la membrana disminuye. [15]

4. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

Con el diseño del banco de pruebas se buscó obtener un sistema capaz de brindar la seguridad adecuada para el usuario en el transcurso del proceso, evitando que el usuario quedara en contacto con los sistemas electrónicos y consiguiera tener un amplio rango de movilidad en el banco de pruebas. En este capítulo se explicará las pautas tomadas para la elaboración del banco de pruebas como lo son el diseño mecánico, diseño electrónico y el diseño de la interfaz hombre máquina.

4.1. DISEÑO MECÁNICO

Para la construcción del banco de pruebas se tomó como base una mesa de laboratorio a la cual se le realizaron ciertas modificaciones, en la figura 4 se observa la mesa de laboratorio inicial y el prototipo obtenido después de realizar las modificaciones a la mesa de laboratorio. Las modificaciones se basaron en obtener un sistema con movilidad en sus componentes consiguiendo realizar diferentes pruebas fácilmente, estas fueron:

- Poder regular la distancia de los cátodos por el usuario para poder realizar varios experimentos a diferentes distancias. En la figura 4 se presenta la solución implementada donde se observa el desplazamiento que se puede realizar en el mecanismo implementado.
- Hacer un tanque resistente a la corrosión para realizar el proceso de anodizado evitando posibles contaminaciones en el proceso. En la figura 4 se presenta la solución implementada donde se utilizó un tanque de acero inoxidable el cual se encuentra completa mente aislado del marco de la mesa del banco de pruebas.
- Poder realizar fácilmente el suministro del electrolito dentro del tanque de anodización, realizando un movimiento horizontal de los cátodos y ánodos. En la figura 4 se presenta la solución implementada la cual observa el desplazamiento que se puede realizar en el sistema para poder tener un buen manejo del espacio en el banco de pruebas.

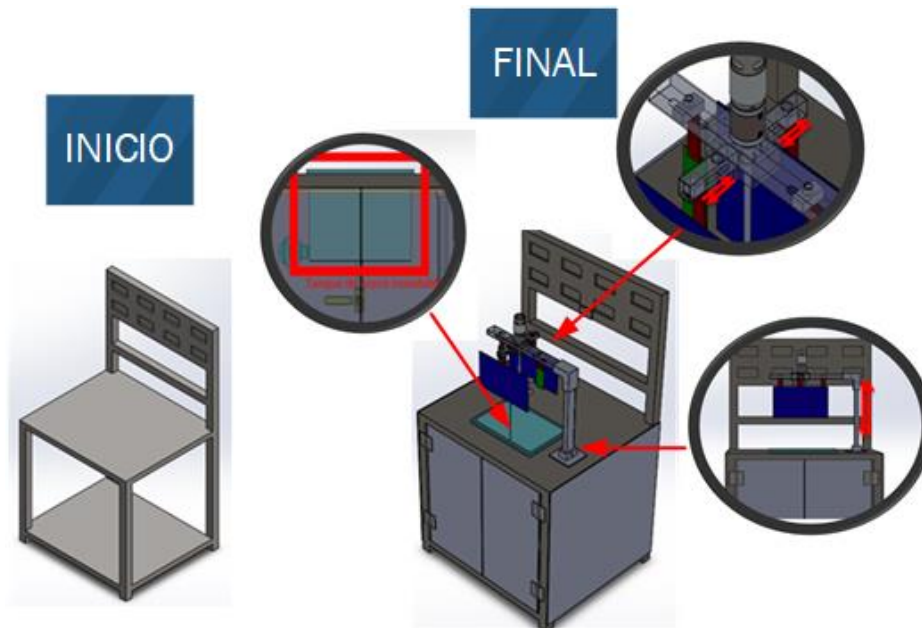


Figura 4. Modificación realizadas a la mesa de laboratorio. [Autor]

Para un buen funcionamiento del banco, es importante definir una buena selección de material para el cátodo y el ánodo. Las propiedades deseables para el ánodo y el cátodo, se indican a continuación.

El material del ánodo debe exhibir las siguientes propiedades:

- Eficiente agente reductor
- Buena conductividad
- Estable
- Facilidad de fabricación
- Bajo costo
- Metales como el zinc y el litio se utilizan a menudo como materiales anódicos.

El material de cátodo debe exhibir las siguientes propiedades:

- Eficaz agente oxidante.
- Estable cuando está en contacto con electrolito
- Voltaje de trabajo útil
- Facilidad de fabricación
- Bajo costo
- Los óxidos metálicos, son utilizados a menudo como materiales de cátodo

Las combinaciones de materiales ánodo-cátodo más deseables son aquellas que dan como resultado celdas ligeras con alto voltaje y capacidad. Dichas combinaciones pueden no ser siempre prácticas como resultado de factores atenuantes tales como la dificultad de manejo del material, la reactividad con otros

componentes de la celda y la dificultad de fabricación. Con el fin de asegurar una buena conductividad en el sistema se usaron piezas de cobre para el soporte del cátodo y el ánodo. El usuario también tendrá la oportunidad de cambiar el material del cátodo y el ánodo a su gusto para la realización de sus pruebas.

4.2. DISEÑO ELECTRÓNICO

El banco de pruebas cuenta con un sistema de calentamiento del electrolito, el sistema se presenta en la figura 5, este consiste en el suministro de calor a un tanque por medio de una resistencia calefactora de inmersión el cual cuenta con un agitador y un aislamiento térmico en las paredes, para evitar pérdidas del calor en el sistema.

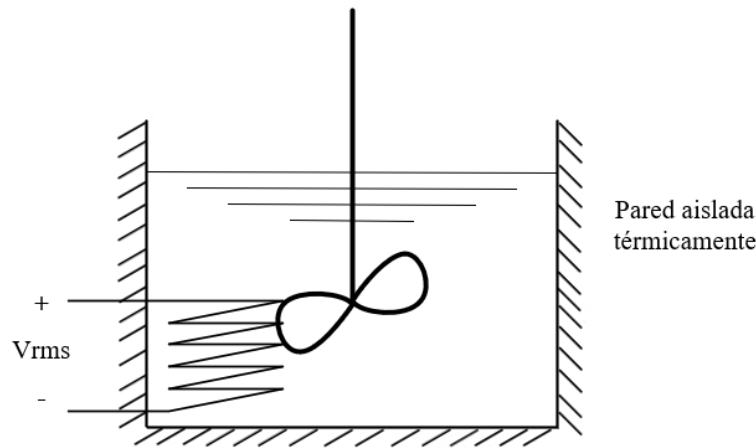


Figura 5. Sistema térmico a controlar en el banco de pruebas [Autor]

Para realizar una adecuada selección de la resistencia calefactora, se establecieron primero las siguientes condiciones:

- Volumen de agua a calentar $V = 12$ [Litros] ($0.012 m^3$)
- Densidad del agua ($20^\circ C$) $\rho = 998.29$ [$\frac{Kg}{m^3}$]
- Capacidad calorífica del agua ($20^\circ C$) $= Cp = 0.4270$ [$\frac{KJ}{Kg} ^\circ C$]
- Diferencia de temperatura requerida $= \Delta T = 10$ [$^\circ C$]
- Tiempo límite para el calentamiento $= t_{limite} = 180$ [seg]

Se hacen estos cálculos tomando los valores de la solución como si fuera agua debido a que las soluciones electrolíticas utilizadas son ácidos disueltos, un cierto porcentaje en agua.

Teniendo en cuenta estos datos, se calcula el flujo de calor que requiere generar la resistencia calefactora mediante la ecuación 3, donde se define $Q_{resistencia}$ como la energía consumida durante un tiempo (t_{limite}) para realizar un cambio de temperatura (ΔT) [16].

$$\frac{Q_{resistencia}}{t_{\limite}} = \frac{M * Cp * \Delta T}{t_{\limite}} = \frac{V * \rho * Cp * \Delta T}{t_{\limite}} \quad (3)$$

Se obtiene que la resistencia debe suministrar un flujo de calor de 3 [KW] equivalente a una carga de 13.63 [Ω] con una alimentación de 220 [V]. Además, se decidió utilizar un porcentaje del error al 10% en los cálculos con el fin de asegurar un calentamiento rápido de la solución electrolítica.

Para el suministro de corriente se decidió implementar un convertor DC/DC tipo Buck con el fin de poder regular la corriente suministrada entre el ánodo y el cátodo de la celda electroquímica. En la figura 6 se presenta el circuito correspondiente a un convertor DC/DC tipo Buck para el cual se toman como parámetros de diseño los valores del capacitor (C) y del inductor (L), para realizar el calculo de estos dos componentes es necesario considerar dos momentos en el circuito cuando el transistor Q1 conduce y otro momento cuando el transistor Q1 no conduce, cumpliendo un ciclo de encendido y apagado en el transistor Q1. La corriente equivalente correspondientes a los modos de operación se muestran en la figura 7b y las formas de onda correspondiente a los voltajes y las corrientes para un flujo continuo de corriente en el inductor (L) se presentan en la figura 7a.

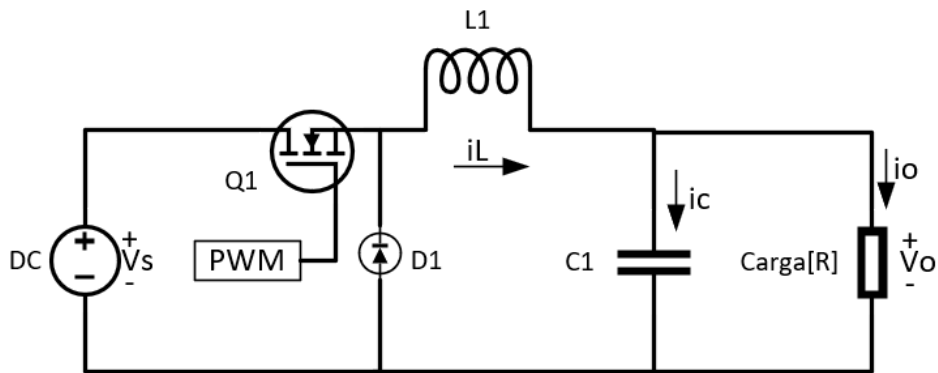


Figura 6. Circuito equivalente a un convertor DC/DC [Autor]

Dependiendo de la frecuencia de conmutación, de la inductancia y de su capacitancia, la corriente del inductor puede ser discontinua.

El voltaje a través del inductor L es, en general la ecuación 4

$$e_L = L \left(\frac{di}{dt} \right) \quad (4)$$

Si suponemos que la corriente del inductor se eleva linealmente desde I_1 hasta I_2 en el tiempo t_1 , podemos escribir la ecuación 5.

$$V_s - V_a = L \left(\frac{I_2 - I_1}{t_1} \right) = L \left(\frac{\Delta I}{t_1} \right) \quad (5)$$

Es decir que,

$$t_1 = \frac{\Delta I L}{V_s - V_a} \quad (6)$$

Y también suponemos que la corriente del inductor se abate linealmente desde I_2 hasta I_1 en el tiempo t_2 , dando la ecuación 7.

$$-V_a = -L \left(\frac{\Delta I}{t_2} \right) \quad (7)$$

O bien,

$$t_2 = \frac{\Delta I L}{V_a} \quad (8)$$

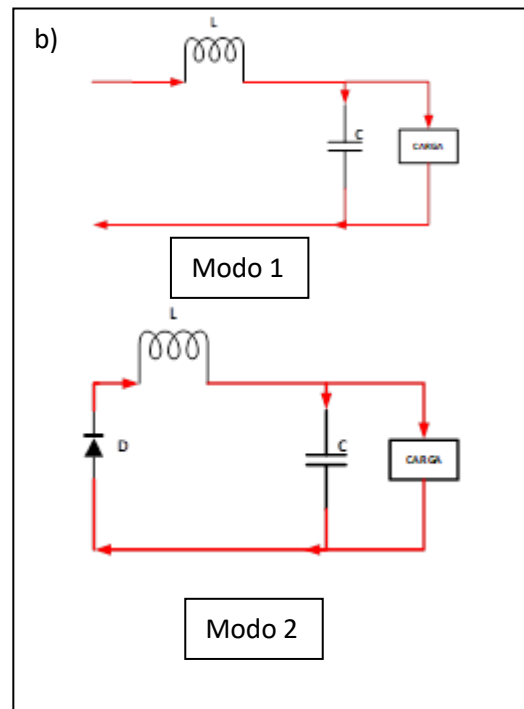
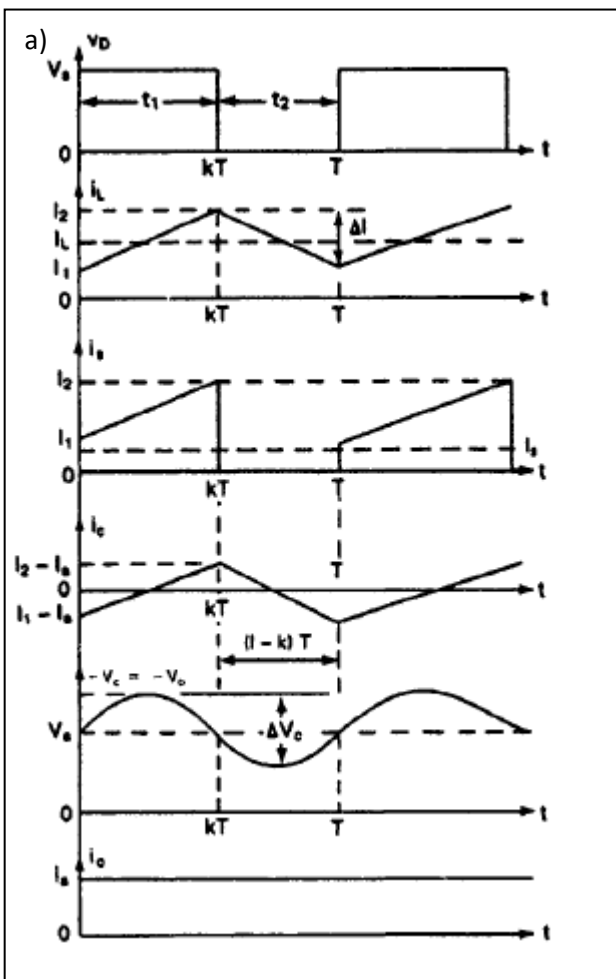


Figura 7.a) circuitos equivalentes de regulador reductor con i_L continua. [Autor] b) Forma de onda de regulador reductor con i_L continua. [17]

Donde $\Delta I = I_2 - I_1$ es la corriente de la componente ondulatorio pico a pico del inductor L . Igualando el valor de ΔI en las ecuaciones 5 y 7, obtenemos

$$\Delta I = \frac{(V_s - V_a)t_1}{L} = \frac{V_a t_2}{L} \quad (9)$$

Si sustituimos $t_1 = k T$ y $t_2 = (1 - k) T$ obtenemos el voltaje promedio de salida equivalente a la ecuación 10.

$$V_a = \frac{V_s t_1}{T} = k V_s \quad (10)$$

Si suponemos un circuito sin pérdidas, $V_s I_s = V_a I_a = k V_s I_a$ y la corriente promedio de entrada

$$I_s = k I_a \quad (11)$$

El periodo de conmutación T se puede expresar como en la ecuación 12,

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I L}{V_s - V_a} + \frac{\Delta I L}{V_a} = \frac{\Delta I L V_s}{V_a (V_s - V_a)} \quad (12)$$

Lo que nos da la corriente de la componente ondulatoria de pico a pico en función del inductor (ecuación 13)

$$\Delta I = \frac{V_a (V_s - V_a)}{f L V_s} \quad (13)$$

Utilizando la ley de corriente de Kirchhoff, podemos escribir la corriente del inductor i_L como la suma de la corriente del condensador y la corriente de la carga (ecuación 14).

$$i_L = i_c + i_o \quad (14)$$

Si suponemos que la corriente de la componente ondulatoria de la carga Δi_o es muy pequeña y despreciables, $\Delta i_L = \Delta i_c$. la corriente promedio del capacitor, fluye para $\frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} = \frac{T}{2}$, es (ecuación 15)

$$I_c = \frac{\Delta I}{4} \quad (15)$$

El voltaje del capacitor se expresa como en la ecuación 16

$$v_c = \frac{1}{C} \int i_c dt + v_c(t = 0) \quad (16)$$

Y el voltaje de la componente ondulatoria pico a pico del capacitor es dado por la ecuación 17

$$\Delta V_c = v_c - v_c(t = 0) = \frac{1}{C} \int_0^{T/2} \frac{\Delta I}{4} dt = \frac{\Delta I T}{8 C} = \frac{\Delta I}{8 f C} \quad (17)$$

Si sustituimos el valor de Δi de la ecuación 13 en la ecuación 17, obtenemos el voltaje de la componente ondulatoria pico a pico en función del capacitor y del inductor (ecuación 18).

$$\Delta V_c = \frac{V_a (V_s - V_a)}{8 L C f^2 V_s} \quad (18)$$

Utilizando las ecuaciones 13 y 18 podemos hallar el valor del capacitor y del inductor, el valor hallado de estos y los parámetros utilizados para los cálculos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros calculados para el modelo del convertidor DC/DC [Autor]

| PARAMETROS | VALOR |
|---------------------------------|---------------|
| TENSION DE ENTRADA, V_s | 12[V] |
| CICLO DE TRABAJO, D | VARIABLE |
| FRECUENCIA DE CONMUTACION, f | 500[Hz] |
| RESISTENCIA DE CARGA, R | 1,7[Ω]-7[Ω] |
| TENSION DE SALIDA, V_o | 1[V]-7[V] |
| CORRIENTE DE SALIDA, i_o | 0,01[A]-10[A] |
| RIZADO DE CORRIENTE, Δi | 0.01 [A] |
| RIZADO DE VOLTAJE, ΔV_o | 0.01 [V] |

| | |
|-------------------------------------|-------------|
| INDUCTANCIA, L | 0.583 [H] |
| CAPACITANCIA, C | 0.00025 [F] |

Para manipular la velocidad del agitador se utilizará un modulo L290N para control de motores, el driver L298N es un dispositivo que permite controlar el sentido de funcionamiento de motores a una corriente de salida por canal de hasta 2 [A]. Este módulo cuenta con un disipador de calor acorde a las características de este driver, su diseño le permiten un rendimiento excepcional, puede llegar a trabajar hasta con un nivel de tensión de entrada de 46[V], aunque por cuestiones de seguridad se recomienda usar niveles de tensión algo debajo de este valor límite. Este módulo tiene gran capacidad de filtrado de ruido, cuenta con un diodo de protección ante corriente inversa, haciendo que su funcionamiento sea más estable y fiable. Para el agitador se seleccionó un motorreductor con un torque de 18[Kg] y 80 [RPM] debido a que las soluciones agitadas son ácidos no es recomendado manejar velocidades de agitación tan altas, este motorreductor también cuenta con un encoder para medir a velocidad de giro el cual lo hace perfecto para nuestra aplicación.

4.2.1. INSTRUMENTACIÓN

Para realizar la medición de la corriente, temperatura y la velocidad de agitación se buscaron sensores que brindara la mayor exactitud posible en sus mediciones. En el caso que los sensores no estén diseñados para ser medidos con un Arduino se procede a realizar el acoplamiento de señal para conseguir la medición de este. Para obtener una mejor medición de los sensores se diseño un filtro pasa bajas del tipo Butterworth con una frecuencia de corte de 0.1[Hz] para cada uno de los sensores implementados. La ecuación 19 corresponde al filtro pasa bajas en continua y la ecuación 20 es el filtro discretizado con un tiempo de muestreo de 0.025 [Seg].

$$F(s) = \frac{0.3948}{s^2 + 0.8886 * s + 0.3948} \quad (19)$$

$$F(z) = \frac{0.000122 * z + 0.000122}{z^2 - 1.978 * z + 0.978} \quad (20)$$

4.2.1.1. SENSOR DE TEMPERATURA

Para realizar la medición de la temperatura se utilizó una PT100 del tipo industrial de tres hilos, para poder realizar la medición con este elemento se utilizó un Sitrans TH200 el cual cumple la función de un transmisor, este elemento se configura para medir una temperatura de 0°C a 100 °C , el elemento entregara una salida de 4 [mA]

a 20 [mA] esto quiere decir que cuando tengamos 0 °C nos dará una salida de 4 [mA] y cuando tengamos 100°C nos dará una salida de 20 [mA], con una relación lineal. Con el fin de tener una salida de voltaje entre un rango de 0[V] a 5 [V] se realiza una caída de tensión con una resistencia de 250 [Ω] con esta resistencia tenemos una salida en voltaje la cual equivale a 1 [V] cuando tenemos 4 [mA] y una salida 5 [V] cuando tenemos 20 [mA], e igualmente manteniendo la relación lineal en la conversión. La ecuación 21 nos permite calcular la temperatura con respecto a la salida del voltaje obtenido de la resistencia de 250 [Ω].

$$Temperatura [^{\circ}C] = (V_{out} - 1) * \frac{100}{4} \quad (21)$$

Para validar la medición de la temperatura medida con la PT100, se hace la comparación de los datos medidos con la medición de una termocupla de un multímetro Fluke 187 el cual cuenta con una precisión de $\pm 1,0\%$. Con este proceso esperamos tener una medición igual a la del multímetro Fluke 187, los datos medidos se presentan en la tabla 3 y en la figura 8 se comparan los datos.

Tabla 3. Datos de medición de temperatura [Autor]

| Temperatura medida desde el banco de pruebas [°C] | Temperatura medida con termocupla Fluke [°C] |
|---|--|
| 21,2 | 22,7 |
| 25,8 | 26,9 |
| 30,9 | 31,9 |
| 35,1 | 36,4 |
| 40,5 | 41,8 |
| 45,7 | 46,8 |
| 50,5 | 51,6 |
| 55,3 | 56,2 |
| 60,2 | 61,4 |

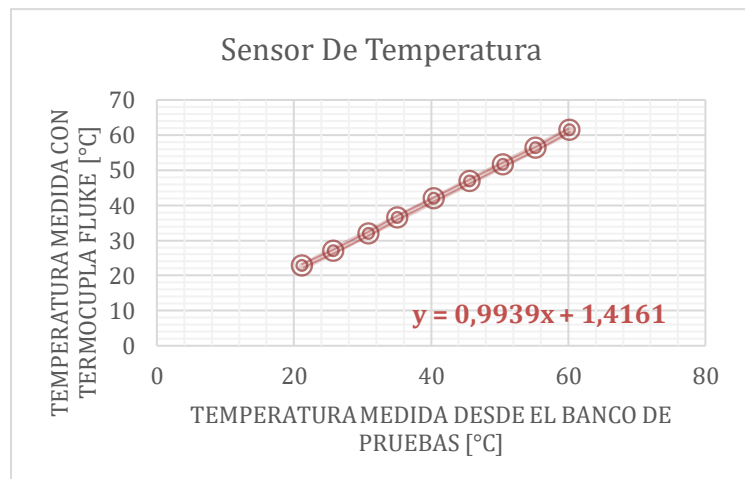


Figura 8. Comparación de la medición de la temperatura. [Autor]

En la comparación de los datos de la figura 8 se espera obtener la ecuación de una línea recta, en la cual la pendiente tienda a 1 y el desfase a 0, lo cual se traduce como que los datos entre la medición de la PT100 y el multímetro Fluke son iguales. Como se obtuvo que esta ecuación de la recta presentaba un desfase un poco alto se decidió corregir los datos utilizando la ecuación de la recta hallada y tomar de nuevo los datos con los cuales se obtuvo los datos de la tabla 4 y la figura 9 donde se hace la comparación de los datos corregidos.

Tabla 4. Datos de medición de temperatura corregidos [Autor]

| Temperatura medida desde el banco de pruebas [°C] | Temperatura medida con termocupla Fluke [°C] |
|---|--|
| 21,2 | 22,5 |
| 25,8 | 27,1 |
| 30,9 | 32,1 |
| 35,1 | 36,3 |
| 40,5 | 41,7 |
| 45,7 | 46,8 |
| 50,5 | 51,6 |
| 55,3 | 56,4 |
| 60,2 | 61,2 |

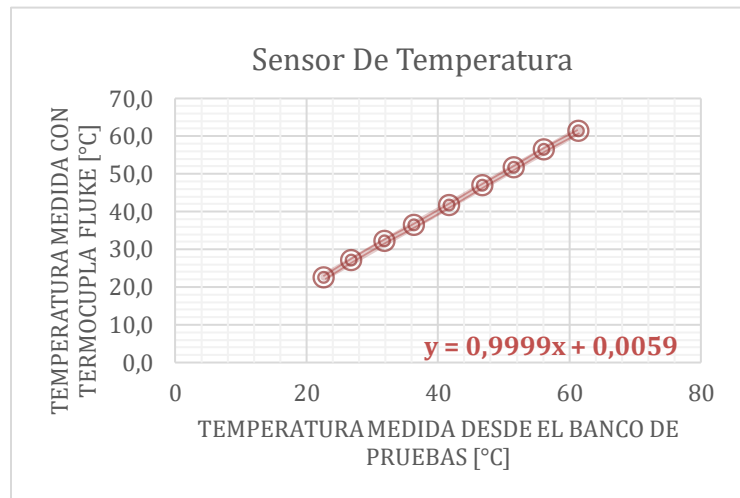


Figura 9. Comparación de la medición de la temperatura corregida. [Autor]

Con esta nueva toma de datos se corrigió la medición y podemos observar en la figura 9 la ecuación de la recta resultante entre la comparación de los datos donde esta presenta una pendiente muy cercana a 1 y un desfase casi igual a 0, con lo cual podemos concluir que los datos son muy similares entre los dos elementos.

4.2.1.2. SENSOR DE CORRIENTE

Para realizar la medición de la corriente se utilizó un módulo de corriente ACS712 de 5 [A]. Este módulo de corriente provee una solución económica y precisa para la medición de corriente DC. Este dispositivo funciona en base al chip ACS712 el cual permite el sensado de niveles de corriente de hasta 5A. Su funcionamiento es a base del efecto Hall por lo que no existe ningún tipo de interferencia con el circuito que se está midiendo. Este módulo es comúnmente usado para medición de corrientes en motores, resistencias, etc. o protección de sobrecargas o como retroalimentación de circuitos de control de potencia. Este módulo permite sensar la corriente y su sentido, si la corriente es positiva se lee un valor de 2.5 [V] a 5 [V] y si la corriente es negativa se obtendrá un valor de 2.5 [V] a 0 [V], manejando una sensibilidad de 180 [mV/A]. La ecuación 22 corresponde al cálculo realizado para calcular la corriente por medio del módulo.

$$Corriente[A] = (V_{out} - 2.5) * \frac{5}{2.5} \quad (22)$$

Para validar la medición de la corriente medida con el módulo de corriente ACS712, se hace la comparación de los datos medidos con la medición de un multímetro Fluke 187 el cual cuenta con una precisión de $\pm 0,15\%$. Con este proceso esperamos

tener una medición igual a la del multímetro Fluke 187, los datos medidos se presentan en la tabla 5 y en la figura 10 se comparan los datos.

Tabla 5. Datos de medición de corriente [Autor]

| Corriente medida desde el banco de pruebas [A] | Corriente medida con multímetro Fluke [A] |
|--|---|
| 0,1 | 0,0927 |
| 0,2 | 0,197 |
| 0,3 | 0,2911 |
| 0,4 | 0,4021 |
| 0,5 | 0,4975 |
| 0,6 | 0,6042 |
| 0,7 | 0,697 |
| 0,8 | 0,8038 |
| 0,9 | 0,8966 |
| 1 | 1,0089 |
| 1,1 | 1,1166 |
| 1,2 | 1,2131 |
| 1,3 | 1,3072 |
| 1,4 | 1,4005 |
| 1,5 | 1,514 |
| 1,6 | 1,6083 |
| 1,7 | 1,718 |
| 1,8 | 1,82 |
| 1,9 | 1,9208 |
| 2 | 2,0137 |
| 2,1 | 2,1175 |

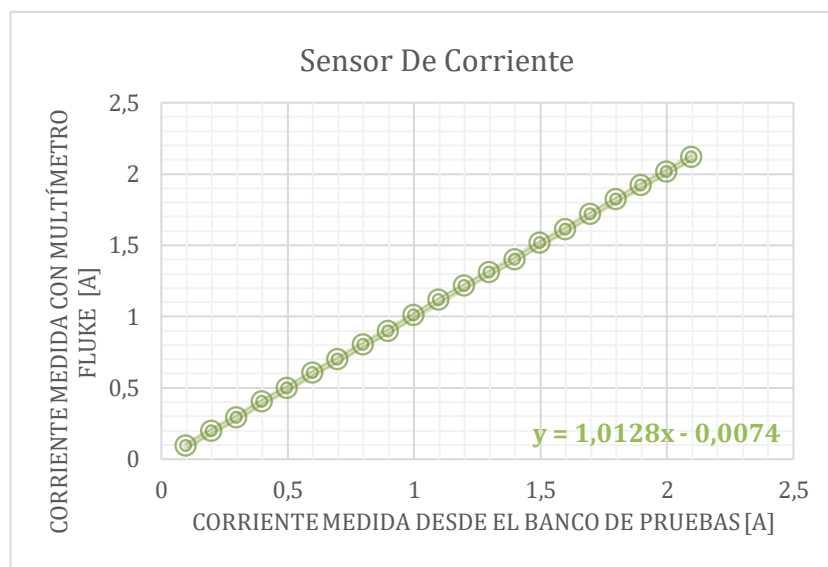


Figura 10. Comparación de la medición de la corriente. [Autor]

En la figura 10 se presenta la ecuación de la recta resultante entre la comparación de los datos tomados, donde esta presenta una pendiente muy cercana a 1 y un desfase casi igual a 0. Con lo cual podemos asegurar que los datos entre las dos mediciones son muy similares lo que se traduce como una buena medición del sensor ACS712.

4.2.1.3. SENSOR DE VELOCIDAD

Para realizar la medición de la velocidad se utilizó un encoder el cual viene acoplado al motorreductor seleccionado para el agitador. El encoder es de efecto hall y provee

una resolución de 64 pulsos por vuelta, ya que el encoder está en el eje del motor, en la salida del motorreductor tenemos que en una vuelta se producen 8400 pulsos, dando una precisión significativa para cualquier aplicación de control de movimiento. Para medir la velocidad con un encoder es necesario multiplicar la frecuencia de los pulsos por 60 para pasar a minutos dividido entre el número de pulsaciones a que equivale una vuelta. La ecuación 23 equivale a el valor de la velocidad con respecto al número de pulsaciones.

$$Velocidad [RPM] = \left(\frac{1}{\frac{T_m}{N}} \right) * 60 * \frac{1}{8400} \quad (23)$$

Para validar la medición de la velocidad medida con el encoder, se hace la comparación de los datos medidos con la medición de un tacómetro Extech RPM10 el cual cuenta con una precisión de $\pm 0,05\%$. Con este proceso esperamos tener una medición igual a la del tacómetro Extech RPM10, los datos medidos se presentan en la tabla 6 y en la figura 11 se comparan los datos.

Tabla 6. Datos de medición de velocidad de agitador [Autor]

| Velocidad medida desde el banco de pruebas [RPM] | Velocidad medida con tacómetro Extech RPM10 [RPM] |
|--|---|
| 23,1 | 23,4 |
| 31,7 | 31,3 |
| 40 | 39,9 |
| 46 | 45,8 |
| 50,6 | 50,4 |
| 54,3 | 54,1 |
| 59,6 | 59,4 |
| 61,8 | 61,9 |
| 64 | 64 |
| 65,7 | 65 |
| 68,1 | 67,8 |
| 69,5 | 68,6 |
| 71,7 | 71,4 |
| 72,5 | 72 |

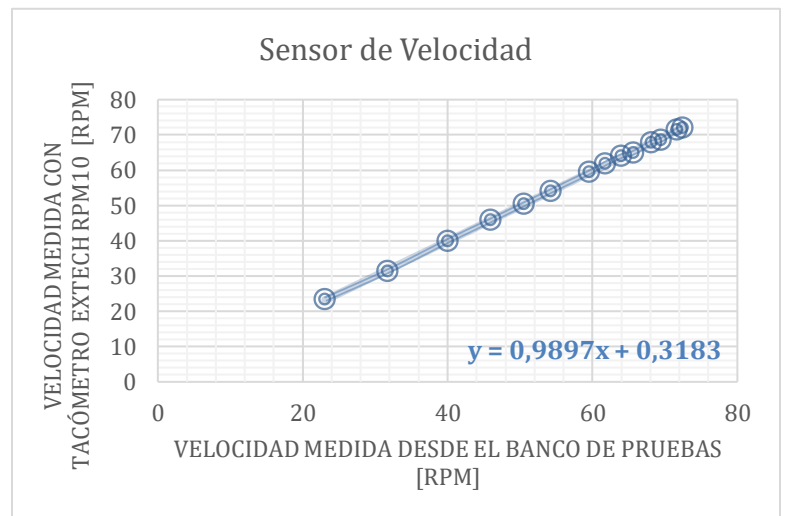


Figura 11. Comparación de la medición de la velocidad. [Autor]

En la figura 11 se presenta la ecuación de la recta resultante entre la comparación de los datos donde esta presenta una pendiente muy cercana a 1 y un desface casi igual a 0. Con lo cual podemos asegurar que los datos entre las dos mediciones son muy similares lo que se traduce como una buena medición de la velocidad con el encoder.

4.3. DISEÑO DE INTERFAZ HOMBRE-MAQUINA

En el proyecto se implementó un sistema scada el cual usa un protocolo de comunicación serial por medio de un puerto USB tipo B usando un Arduino UNO R3 Con CH340 como sistema embebido para realizar la implementación de los controladores y monitoreo de las variables principales definidas para el proyecto. Se escogió este Arduino debido a que cuenta con 14 pines digitales de entrada y salida de los cuales 6 proporcionan salidas de PWM y también brinda 6 entradas análogas, igualmente el bajo costo de este y la facilidad de acceso a estos dispositivos. En el desarrollo de este proyecto tomaremos solamente 3 salidas digitales de las cuales 2 son de PWM, estas corresponden a la entrada del conversor DC/DC y el puente H del motor del agitador, la salida digital resultante se utiliza para variar el tiempo de encendido de la resistencia calefactora, y una entrada digital esta servirá para medir la velocidad con la cual gira el agitador, también usaremos 2 entradas analógicas estas serán utilizadas para medir la temperatura y la corriente en el banco. El sistema se unifica como se ilustra en la figura 12 donde se puede observar la conexión y los tipos de puertos los cuales se necesitan para realizar la medición y variación de las variables.

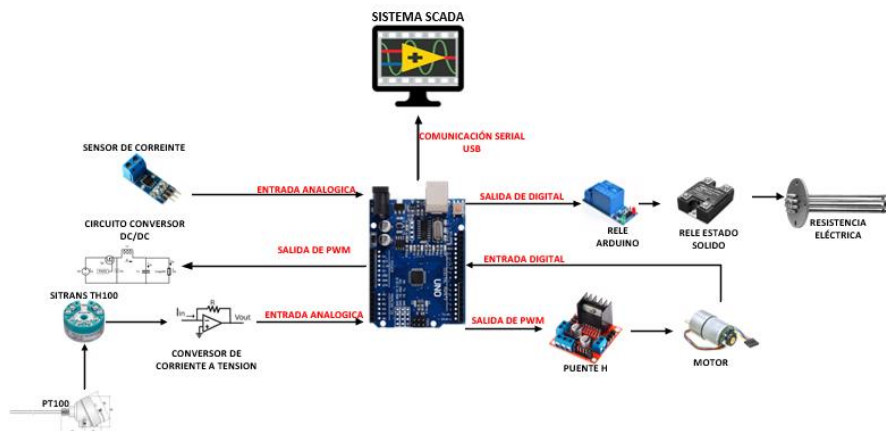


Figura 12. Esquema de la unificación del sistema [Autor]

La comunicación entre el Arduino y LabView es implementada utilizando una velocidad de transmisión de 9600 baudios la cual se considera una buena velocidad

de comunicación entre dos dispositivos. Para poder realizar la comunicación entre Arduino y Labview se planteó un protocolo de comunicación el cual facilitara el poder identificar los datos enviados entre Arduino y LabView. El protocolo de comunicación consiste en dos partes, una cuando el dato viaja de Arduino a LabView y otro cuando el dato viaja de LabView al Arduino. Cuando el dato viaja de Arduino a LabView el dato es necesario encapsularlo entre dos letras de esta manera cuando el dato sea leído por Labview preguntara solo por el dato que se encuentra entre las dos letras seleccionadas. Si el dato es enviado de LabView al Arduino es un poco mas sencillo debido a que solo necesitamos enviar el dato con una letra al principio de esta manera cuando el dato llegue al Arduino el solo preguntara por cual es el dato numérico que se encuentra después de esa letra. En la figura 13 podemos observar con un poco mas de claridad la estructura utilizada del protocolo de comunicación entre LabView y Arduino.

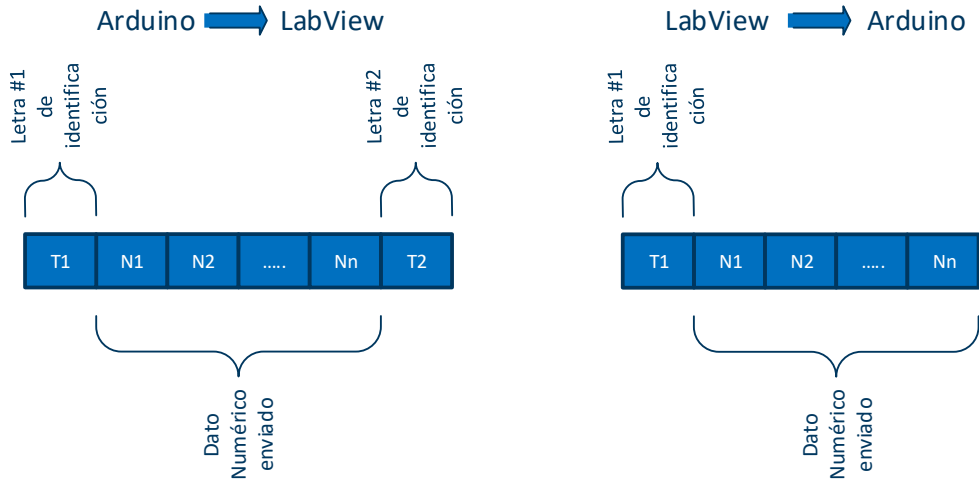


Figura 13. Protocolo de comunicación entre LabView y Arduino. [Autor]

La lógica implementada para el diseño del sistema scada del banco de pruebas es presentada en la figura 14, esta consiste en una serie de secuencias para que se lleve un funcionamiento seguro y estable.

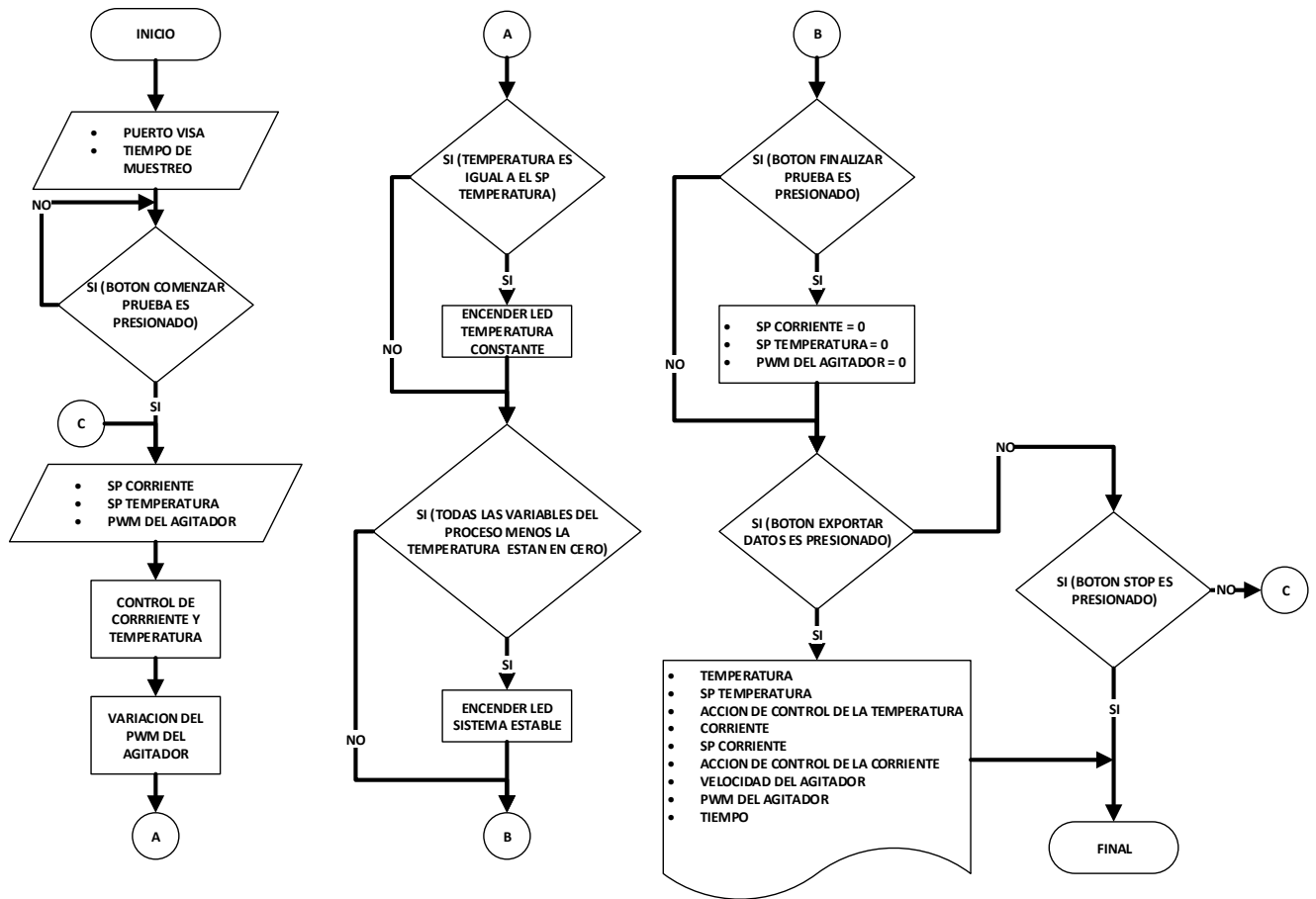


Figura 14. Logica utilizada en la programación del banco de pruebas. [Autor]

El sistema scada se diseñó siguiendo la lógica de la figura 14 para poder realizar el monitoreo de las variables principales en el proceso, en la figura 15 se presenta el sistema scada diseñado donde se resaltan las partes del sistema scada las cuales son:

- A. Monitoreo de la variable temperatura y el setpoint.
- B. Visualizador del valor de la temperatura y el setpoint.
- C. Monitoreo de la variable corriente y el setpoint.
- D. Visualizador del valor de la corriente y el setpoint.
- E. Selector de PWM del agitador.
- F. Indicador de la velocidad del agitador.
- G. Indicador de sistema estable.
- H. Indicador para temperatura constante.
- I. Tiempo de muestreo de las muestras tomadas.
- J. Setpoint de la corriente.
- K. Setpoint de la temperatura.
- L. Puerto serial a conectar.

M. Botones de operación (Inicio, finalizar, exportar y parada).

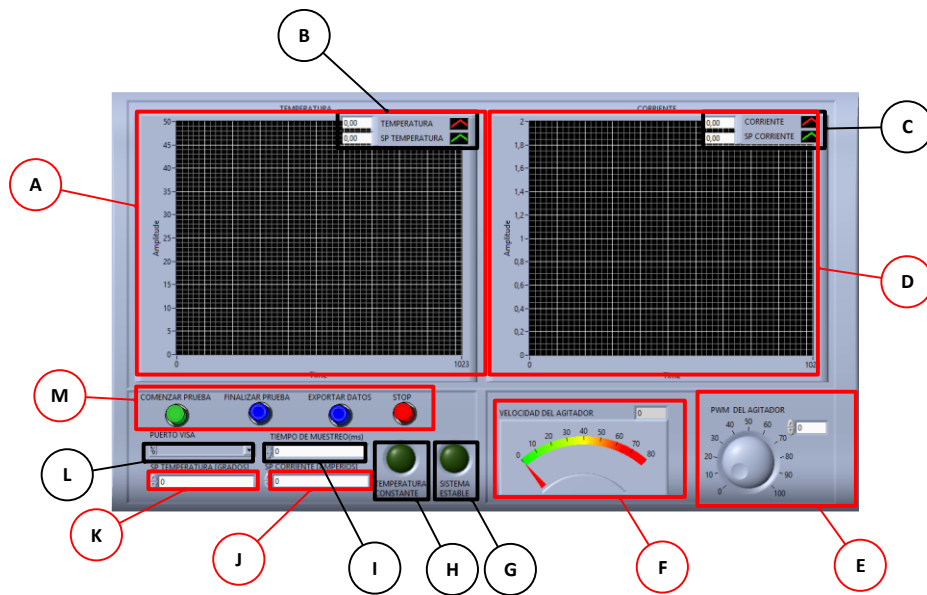


Figura 15. Sistema scada diseñado [Autor]

Es muy importante tener en cuenta que en el momento de exportar los datos el sistema entrega un archivo en formato Excel el cual tendrá 9 columnas, la primera columna corresponde a los datos de la temperatura tomados, la segunda columna es el valor del SetPoint del control de temperatura, la tercera columna son los datos de la acción de control de la temperatura, la cuarta columna es los datos de la corriente medidos, la quinta columna es el valor del SetPoint del control de corriente, la sexta columna son los datos de la acción de control de la corriente, la séptima columna es la velocidad del agitador, la octava columna es el valor del PWM del agitador y la novena columna es el valor del tiempo en el que se tomaron los datos.

5. SISTEMA DE CONTROL

En el proceso de anodizado de aluminio se consideran variables relevantes la temperatura y la corriente, por este motivo se diseñó dos sistemas de control. Para los dos sistemas se utilizaron estrategias de control diferentes las cuales van acorde a la naturaleza del sistema a controlar.

5.1. CONTROL DE CORRIENTE

El modelo matemático del convertidor Buck se realizará en modo de conducción continua en donde la corriente del inductor y el voltaje del capacitor adquieren un valor constante y de un valor promediado. En la ecuación 24, se puede observar las condiciones de conducción continua del convertidor reductor, el cual está ligado con la carga, la frecuencia de conmutación y el ciclo de trabajo al cual opera μ .

$$\frac{2Lf}{R} > (1 - \mu) \quad (24)$$

En la dinámica del circuito ocurren dos etapas, los cuales son determinados por el estado en que se encuentre el mosfet del circuito. Cuando el mosfet se encuentra cerrado, el diodo se polariza en modo inverso y el circuito equivalente es el que se muestra en la figura 7b en el modo 2.

A partir del circuito, la expresión que representa la tensión en la bobina está dada por la ecuación 25.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (25)$$

Cuando el mosfet se encuentra abierto el diodo se polariza en modo directo para permitir el paso de la corriente en la bobina. En la figura 7b el modo 1 se presenta como el esquema del circuito bajo esta condición de operación.

Suponiendo que el mosfet se encuentra abierto, la tensión en la bobina está dada por la ecuación 26.

$$\frac{di_L}{dt} = -V_o \quad (26)$$

Si analizamos la corriente de línea en los dos modos de operaciones utilizando la ley de corriente de Kirchhoff obtenemos que siempre se cumplirá la ecuación 27.

$$i_L = C \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R} \quad (27)$$

Para obtener las ecuaciones matemáticas del convertidor se analiza el funcionamiento del sistema en las conmutaciones de abierto y cerrado que se

muestran en las figuras 7b. Reduciéndolo a la ecuación 28 y 29 dejando como variable de control de estado el circuito (μ) la cual asume un valor entre 0 y 1 para determinar el estado del sistema en continua.

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_o}{L} + \frac{V_{in}}{L}\mu \quad (28)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{RC} + \frac{i_L}{C} \quad (29)$$

Utilizando las ecuaciones 28 y 29 podemos hallar la función de transferencia que relaciona las variaciones en la corriente de salida $i_o = i_L$ con respecto a μ , la cual es dada por la ecuación 30.

$$G(s) = \frac{\frac{V_{in} * s}{L} + \frac{V_{in}}{LRC}}{s^2 + \frac{1}{RC} * s + \frac{1}{LC}} \quad (30)$$

Con el fin de validar el modelo de la ecuación 29, se toman datos experimentales con entradas de PWM variables colocando una carga de $4[\Omega]$ y usando los parámetros de la tabla 2. La figura 16 equivale a los datos de entrada y la figura 17 son los datos de salida del modelo y los datos experimentales obtenidos de la planta.

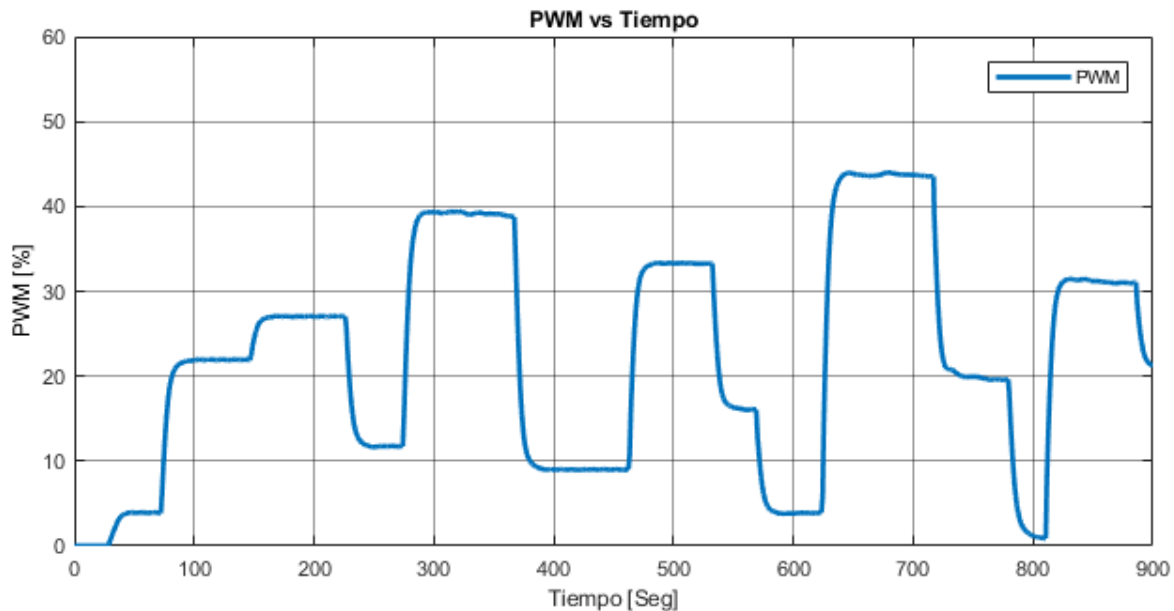


Figura 16. Datos de entrada para validación del modelo de convertor DC/DC. [Autor]

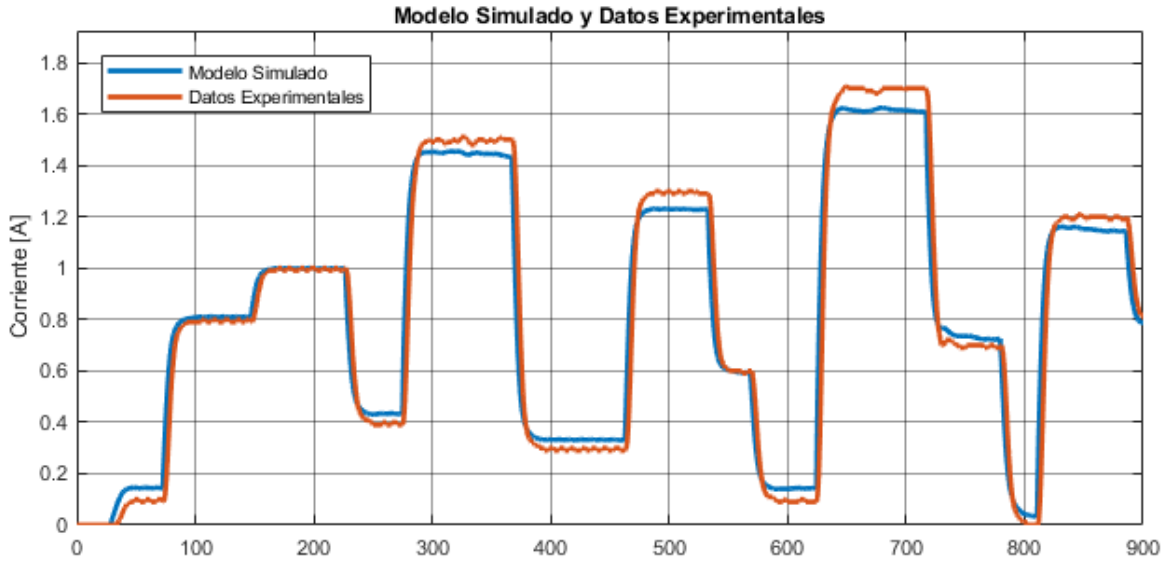


Figura 17. Datos de salida para validación del modelo de convertor DC/DC. [Autor]

Realizando la comparación entre los datos del modelo simulado y los datos experimentales de la figura 17, se observó que los datos experimentales presentan un retardo de 0.8636 [Seg] en la respuesta del sistema, se consideró importante agregar este retardo al modelo hallado de la ecuación 30, para obtener un mejor diseño del controlador, la ecuación 31 corresponde al modelo del sistema considerando el retardo de los datos experimentales.

$$G(s) = \frac{\frac{V_{in} * s}{L} + \frac{V_{in}}{LRC}}{s^2 + \frac{1}{RC} * s + \frac{1}{LC}} * e^{-0.8636*s} \quad (31)$$

Para validar el modelo se halló el parámetro de BestFit el cual se define por la ecuación 32.

$$BestFit = 100 \left(1 - \frac{norma(y_s - y_E)}{norma(y_E - \bar{y}_E)} \right) \quad (32)$$

donde y_s corresponde a los datos simulados, y_E a los datos experimentales y \bar{y}_E a la media de los datos experimentales. Se halló un BestFit del 86.68%, debido a que los datos de BestFit no son menores del 70%, se consideró un modelo valido para la planta.

Durante el proceso de anodizado si es aplicado un voltaje constante, la densidad de corriente decrece rápidamente con el tiempo, y un mínimo de densidad de corriente es rápidamente alcanzado como se ilustra en la figura 3 y se explica en el índice

3.3. Por este motivo se tomó la teoría del control de retroalimentación cuantitativa (QFT) la cual es un método de ingeniería de control que propone explícitamente el uso de la realimentación para reducir simultáneamente los efectos de la incertidumbre de la planta y satisfacer las especificaciones de comportamiento deseadas, cuando existe incertidumbre en el modelo de la planta o cuando hay perturbaciones no medidas actuando sobre la misma, presentando una estructura la cual considera las perturbaciones al sistema, esta es ilustrada en la figura 18.

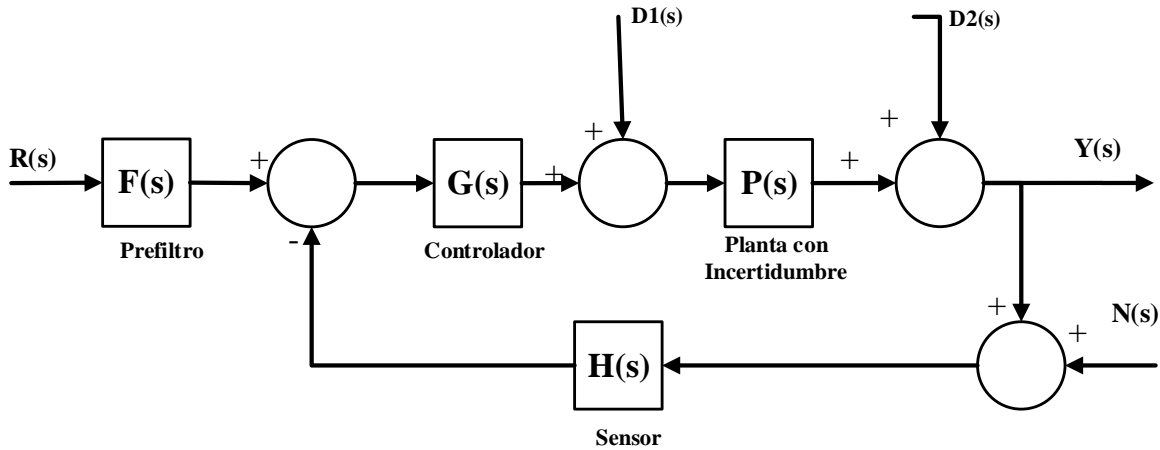


Figura 18. Estructura de control QFT [Autor]

5.1.1. CONTROL DE RETROALIMENTACIÓN CUANTITATIVA (QFT)

Para el diseño del controlador se utilizó la toolbox de QFT en Matlab llamada QFTCT [18], para insertar la planta en la toolbox se decidió igualar el retardo de la planta a un polo utilizando la aproximación de Pàde de orden (0,1) [19] como se presenta en la ecuación 33, una vez agregado el retardo a la planta en forma de un polo, se inserta en la toolbox de QFT como se presenta en la figura 19.

$$e^{-Td*s} = \frac{1}{Td * s + 1} \quad (33)$$

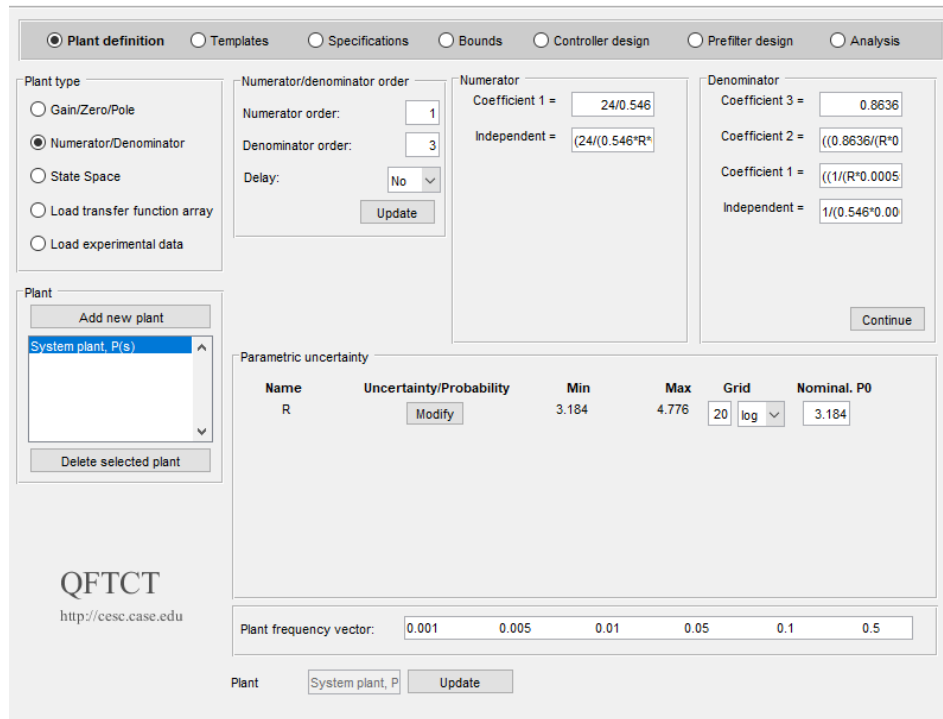


Figura 19. Planta insertada en la toolbox de QFTCT [Autor].

Para el diseño del controlador QFT de corriente a la celda electroquímica, es necesario identificar el espacio de incertidumbre que maneja la carga del circuito. El cual toma un valor nominal de $3.98 \text{ } [\Omega]$ a el cual se le establece una variación del 20%, dando como resultado un intervalo de variación de $[3.184 \text{ } \Omega, 4.776 \text{ } \Omega]$. Establecida la variación de la carga se establece un intervalo de incertidumbre para la resistencia de la carga $\Delta R = [3.184\Omega, 4.776\Omega] \forall R \in \mathbb{R}$, la cual permite crear múltiples plantas evaluadas ente un conjunto de frecuencias de interés entre $0.001 \text{ } [Hz]$ a $1000 \text{ } [Hz]$, obteniendo para cada frecuencia una representación de fase $[\circ]$ y magnitud $[\text{dB}]$ del conjunto de plantas tal como se muestra en la figura 20.

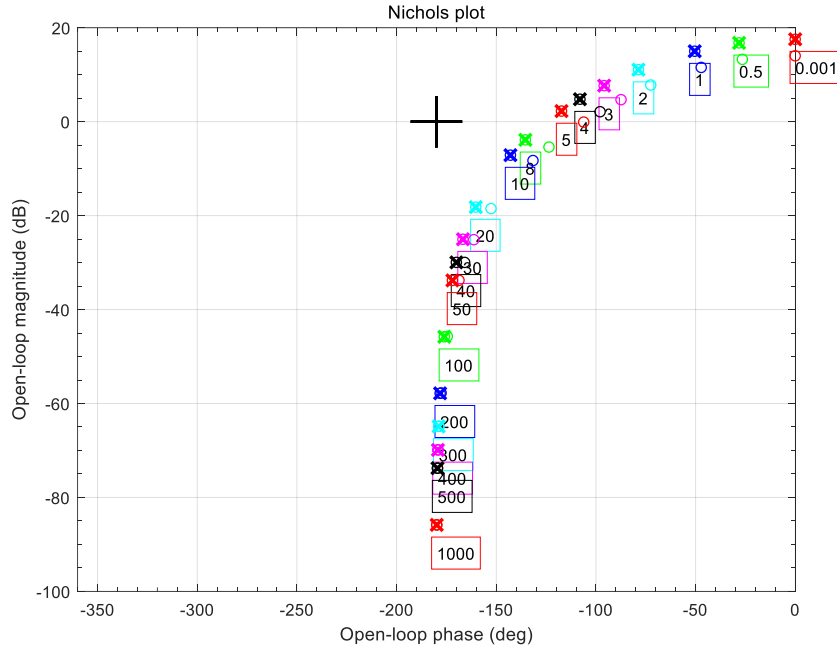


Figura 20. Templates del espacio de incertidumbre del sistema [Autor]

5.1.2. ESPECIFICACIONES DE DESEMPEÑO DEL CONTROLADOR

Debido a que en el transcurso del proceso de anodizado sucede un cambio en la resistencia eléctrica entre el cátodo y el ánodo, por causa del crecimiento de la capa anódica. Se definieron cuatro especificaciones de desempeño basados en el rechazo de ruido, rechazo de perturbaciones en la salida, esfuerzo de control y seguimiento de referencia, las cuales según la teoría de realimentación cuantitativa se definen en las ecuaciones 34, 35, 36 y 37, respectivamente.

$$\text{Rechazo de ruido: } \left| \frac{Y(j\omega)}{R(j\omega) * F(j\omega)} \right| = \left| \frac{P(j\omega) * G(j\omega)}{1 + P(j\omega) * G(j\omega)} \right| \leq \delta_r(\omega) \quad (34)$$

$$\text{Rechazo de perturbaciones en la salida } \left| \frac{Y(j\omega)}{D_2(j\omega)} \right| = \left| \frac{1}{1 + P(j\omega) * G(j\omega)} \right| \leq \delta_s(\omega) \quad (35)$$

$$\text{El esfuerzo de control } \left| \frac{U(j\omega)}{R(j\omega) * F(j\omega)} \right| = \left| \frac{G(j\omega)}{1 + P(j\omega) * G(j\omega)} \right| \leq \delta_e(\omega) \quad (36)$$

$$\text{El seguimiento de referencia } \alpha_L(\omega) \leq \left| \frac{Y(j\omega)}{R(j\omega)} \right| = \left| F(j\omega) * \frac{P(j\omega) * G(j\omega)}{1 + P(j\omega) * G(j\omega)} \right| \leq \alpha_u(\omega) \quad (37)$$

Para resolver estas inecuaciones, se debe cuantificar los parámetros $\delta_r(\omega)$, $\delta_s(\omega)$, $\delta_e(\omega)$, $\alpha_L(\omega)$ y $\alpha_u(\omega)$, bien sea como constantes o a partir de funciones de transferencia de filtros que representen la dinámica deseada de la planta.

Para determinar las frecuencias de corte de las penalidades, se determina la frecuencia a $-3dB$, la cual se utiliza como criterio de selección para los filtros diseñados de las penalidades. En la figura 21 se presenta el diagrama de bode de la planta nominal en el cual se determinó la frecuencia a $-3dB$ la cual corresponde a $0.183 [Hz]$.

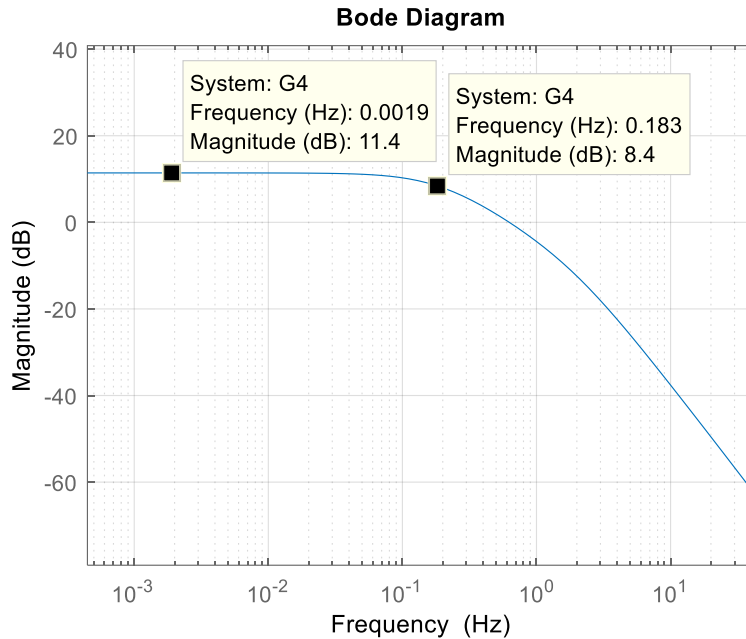


Figura 21. Diagrama de bode de la planta nominal. [Autor]

5.1.3. ESPECIFICACIONES GENERALES

El criterio de estabilidad robusta debe garantizarse en el intervalo global de frecuencias de trabajo del sistema, por medio de márgenes de fase y ganancia mínimos para todas las plantas. Como criterio general de diseño para obtener una estabilidad relativa aceptable se aconseja unos márgenes mínimos de fase y ganancias de 45° y 1.77 (o $5dB$), respectivamente. Aplicando las ecuaciones 38 y 39 resulta un mínimo $\delta_u(\omega) = 1.3$ en términos de QFT.

$$MF \geq 180^\circ - \arccos\left(\frac{0.5}{\delta_u^2} - 1\right) \quad (38)$$

$$MG \geq 1 + \frac{1}{\delta_u} \quad (39)$$

5.1.4. EL RECHAZO DE RUIDO EN EL SENSOR

El rechazo de ruido en el sensor de corriente se puede penalizar por medio del parámetro $\delta_r(\omega)$, esta implica tanto condiciones de comportamiento como de

estabilidad robusta sobre: los márgenes de estabilidad, el ancho de banda de lazo cerrado, el esfuerzo de control para el rechazo de perturbaciones en la entrada, $|U/D1|$ y la influencia en la salida de los ruidos introducidos por el sensor, $|Y/N|$. Con esta penalidad buscamos reducir los cambios en la respuesta de la corriente debido al cambio de resistencia que se dan en el proceso de anodizado. Para penalizar el rechazo de ruido del sensor de corriente se determinó la ecuación 40 esta corresponde a la ecuación de un filtro Butterworth y maneja una frecuencia de corte de 0.15 [Hz].

$$\delta_r(\omega) = \frac{s^2}{s^2 + 1.333 * s + 0.8883} \quad (40)$$

5.1.5. RECHAZO DE PERTURBACIONES A LA SALIDA

El rechazo de perturbaciones a la salida del suministro de corriente, es definida a partir del parámetro $\delta_s(\omega)$ [20]. Esta representa el concepto habitualmente denominado en control como “Sensibilidad” del sistema, la tolerancia $\delta_s(\omega)$ restringe la influencia en la salida (Y) de la perturbación que se producen en la propia salida de la planta ($D2$). Esta penalidad busca reducir los efectos que tiene el suministro de corriente en el proceso debido a los cambios de temperatura de los mosfet. Para penalizar el rechazo de perturbaciones a la salida del suministro de corriente se determinó la ecuación 41, esta corresponde a la ecuación de un filtro Butterworth y maneja una frecuencia de corte de 0.11 [Hz].

$$\delta_s(\omega) = \frac{0.4777}{s^2 + 0.9774 * s + 0.4777} \quad (41)$$

5.1.6. EL ESFUERZO DE CONTROL

El esfuerzo de control solicitado a los actuadores, es definido a partir del parámetro $\delta_e(\omega)$, este expresa la magnitud del esfuerzo de control debido a, la atenuación de perturbaciones en la salida $|U/D1|$, el rechazo del ruido en el sensor $|U/N|$ y el seguimiento de señales de referencias $|U/RF|$. Busca reducir el rango de frecuencia para evitar desestabilizar el sistema y/o la saturación de la acción de control, se determinó la ecuación 42, esta corresponde a la ecuación de un filtro Butterworth y maneja una frecuencia de corte de 0.12 [Hz].

$$\delta_e(\omega) = \frac{s^2}{s^2 + 1.066 * s + 0.5685} \quad (42)$$

5.1.7. EL SEGUIMIENTO DE REFERENCIA

Para el seguimiento de referencia se maneja una doble tolerancia variable con la frecuencia, $\alpha_U(\omega)$ que representa un modelo superior de comportamiento frente a señales de referencia y $\alpha_L(\omega)$ que especifica un modelo inferior. Entre ellos debe estar contenida la función de transferencia de lazo cerrado de la planta a pesar de la incertidumbre. Los modelos frecuenciales $\alpha_U(\omega)$ y $\alpha_L(\omega)$ se determinan a partir de modelos temporales, en los que se manejan índices de comportamiento típicos ante entradas escalón. Por ejemplo, para el modelo superior temporal $\alpha_U(\omega)$ es adecuado elegir un comportamiento subamortiguado característico de un sistema de segundo orden. Para el modelo inferior $\alpha_L(\omega)$ se suele optar por una dinámica sobreamortiguada. Ambos se pueden definir a partir de índices tales como el máximo sobreimpulso Mp , el tiempo de pico tp , el tiempo de establecimiento ts , el tiempo de respuesta tr y/o la ganancia estática Km .

Para el límite superior $\alpha_U(\omega)$ se determinó una respuesta subamortiguada con un sobrepaso de 20% y tiempo de establecimiento 30 [seg]. A partir de estos parámetros, se construye una función de transferencia de segundo orden con un cero que represente la respuesta dinámica superior deseada, tal como se muestra en la ecuación 43.

$$\alpha_U(\omega) = \frac{0.9 * s + 0.09}{s^2 + 0.78 * s + 0.09} \quad (43)$$

El límite inferior $\alpha_L(\omega)$ se ajustó a una función de transferencia con un polo real, cuyo polo responde al tiempo de establecimiento de 30 [seg]. La función de transferencia está definida en la ecuación 44.

$$\alpha_L(\omega) = \frac{0.1299}{s + 0.1299} \quad (44)$$

5.1.8. LOOP-SHAPPING DEL CONTROLADOR QFT

Mediante la técnica loop-shapping, se introduce un controlador $G(j\omega)$ que manipule la función de lazo cerrado hasta lograr cumplir con las restricciones impuestas por

las especificaciones de desempeño. La respuesta en lazo cerrado, en la frecuencia de interés debe quedar por encima del intercepto de los contornos en cada frecuencia de interés, tal como se muestre en la figura 22. Esto se logra agregando polos y ceros a la función de lazo cerrado hasta conseguir la respuesta deseada. La función de transferencia del controlador diseñado se muestra en la ecuación 45, la cual está conformada por un integrador, un polo real y dos ceros reales.

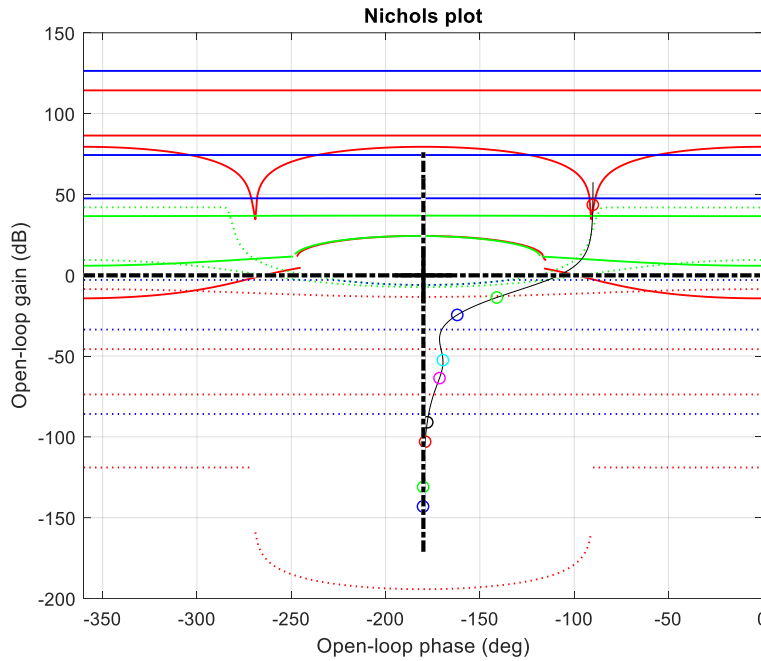


Figura 22. Loop-shapping del controlador QFT [Autor]

$$G(j\omega) = \frac{0.002692 * s^2 + 0.01523 * s + 0.02}{1.953 * s^2 + s} \quad (45)$$

En el diseño del prefiltro, se tomó como referencia la solución de la inecuación cuadrática así, se debe buscar que la respuesta en frecuencia de la planta se encuentre entre el límite superior y límite inferior de las funciones $\alpha_U(\omega)$ y $\alpha_L(\omega)$. El prefiltro permite modelar en cada frecuencia el comportamiento del lazo cerrado según la especificación robusta requerida en el seguimiento de señales. Para el sistema se ha planteado el prefiltro $F(j\omega)$ presentado en la ecuación 46. La respuesta del sistema se presenta en la figura 23.

$$F(j\omega) = \frac{4.981 * s + 1}{5.678 * 10^{-13} * s^4 + 1.161 * 10^{-09} * s^3 + 1.972 * 10^{-06} * s^2 + 0.001853 * s + 1} \quad (46)$$

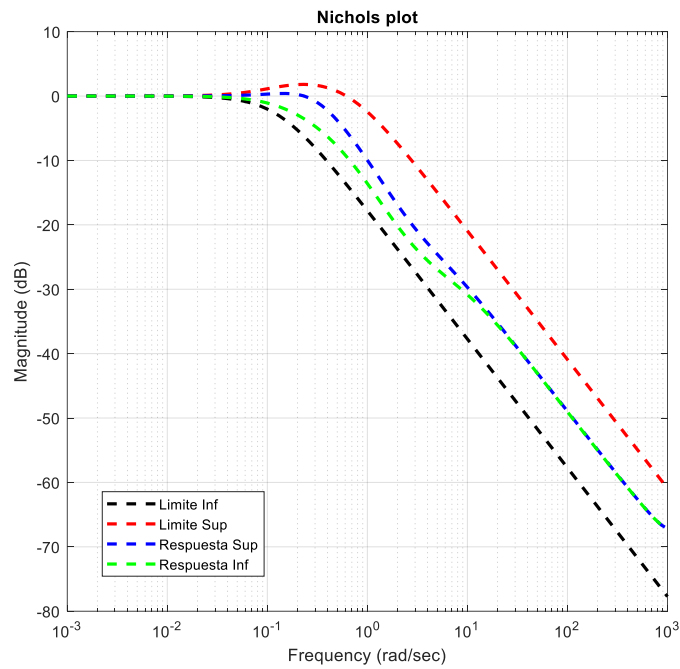


Figura 23. Respuesta de la planta con prefiltro en el dominio de la frecuencia [Autor]

La respuesta del sistema en el dominio del tiempo se muestra en la figura 24, donde se observa que la respuesta dinámica del conjunto de plantas del espacio de incertidumbre está dentro de la zona delimitada por las funciones de transferencia $\alpha_U(\omega)$ y $\alpha_L(\omega)$.

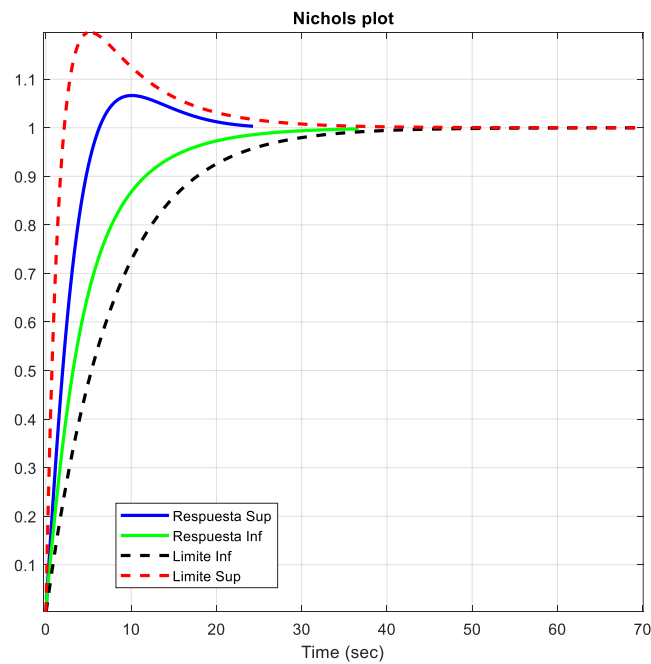


Figura 24. Respuesta de la planta en lazo cerrado con prefiltro en el dominio del tiempo [Autor]

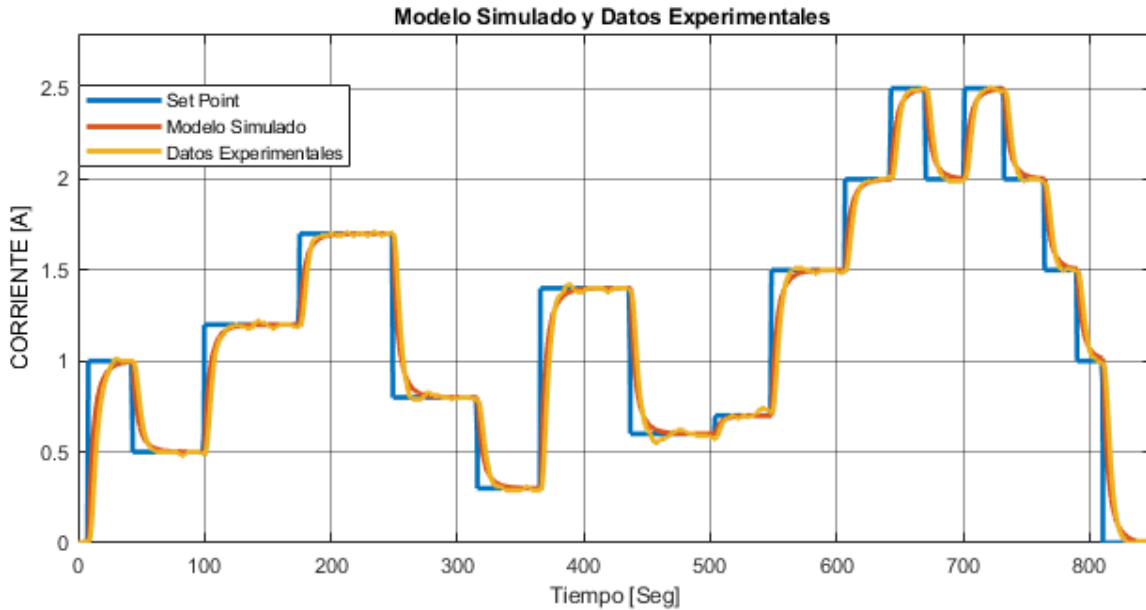


Figura 26. Comparación del sistema en lazo cerrado con datos experimentales y datos simulados del control de corriente. [Autor]

5.2. CONTROL DE TEMPERATURA.

Se realizó la identificación del sistema de calentamiento de la solución electrolítica usando un modelo de primer orden, el modelo de primer orden se puede utilizar en procesos simples o en otros más complejos si no se requiere mucha exactitud. Para la planta térmica propuesta se escogió este modelo para identificar la planta, puesto que como se sabe los sistemas térmicos tienden a ofrecer una respuesta monótona creciente sin oscilaciones [21]. La expresión matemática que identifica a un modelo de primer orden se presenta en la ecuación 49.

$$G(s) = \frac{K e^{-t_d s}}{\tau s + 1} \quad (49)$$

Donde K es la relación de ganancia que hay entre la entrada de PWM y la salida de la temperatura, el PWM maneja un rango de trabajo de 0% a 100% el cual cuenta con un periodo de trabajo de 10 [Seg].

Utilizando la Toolbox ident de Matlab se identificó el modelo, en el cual se utilizaron datos de identificación y datos de validación con el fin de validar el modelo obtenido, en la figuras 27 y 28 podemos observar los datos de entrada y salida que se tomaron como datos de identificación. Estos datos fueron tomados en lazo cerrado con un controlador proporcional de ganancia de 6, esto con el fin de evitar que el sistema alcance temperaturas muy altas.

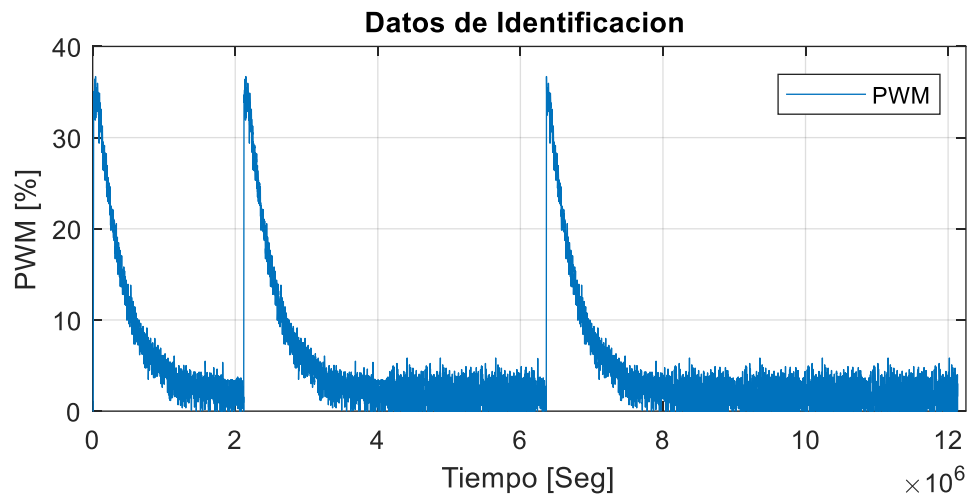


Figura 27. Datos de identificación de entrada. [Autor]

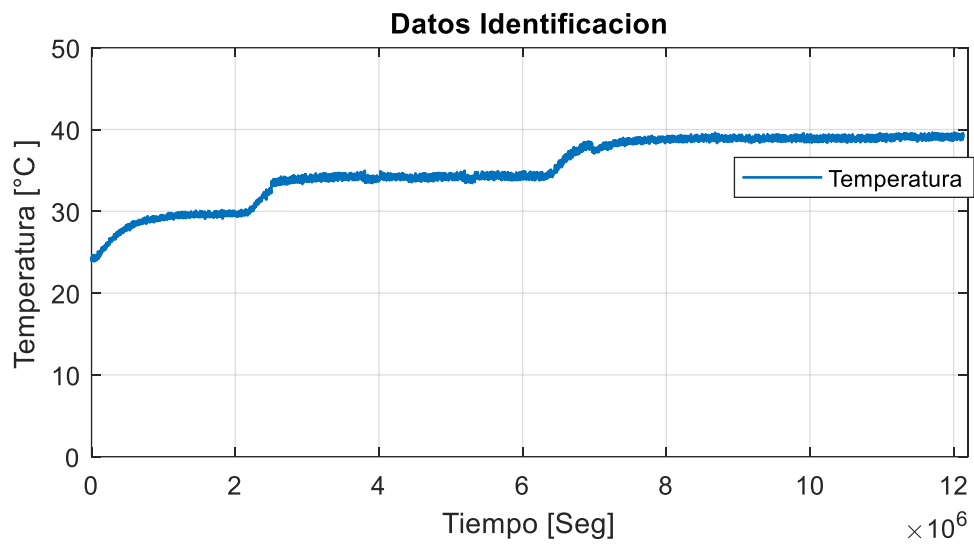


Figura 28. Datos de identificación de salida. [Autor]

En la figura 29 y 30 se muestran los datos utilizados de validación, tanto de entrada como de salida.

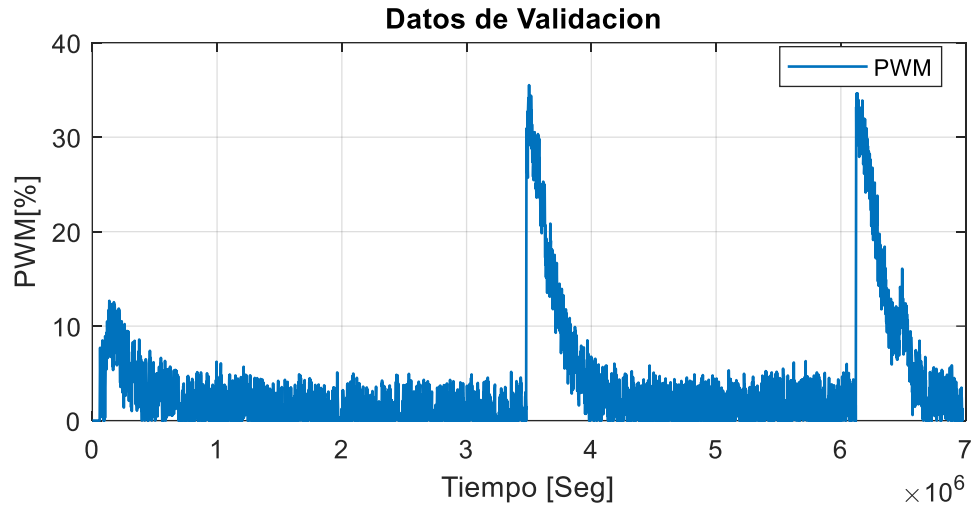


Figura 29. Datos de validación de entrada. [Autor]

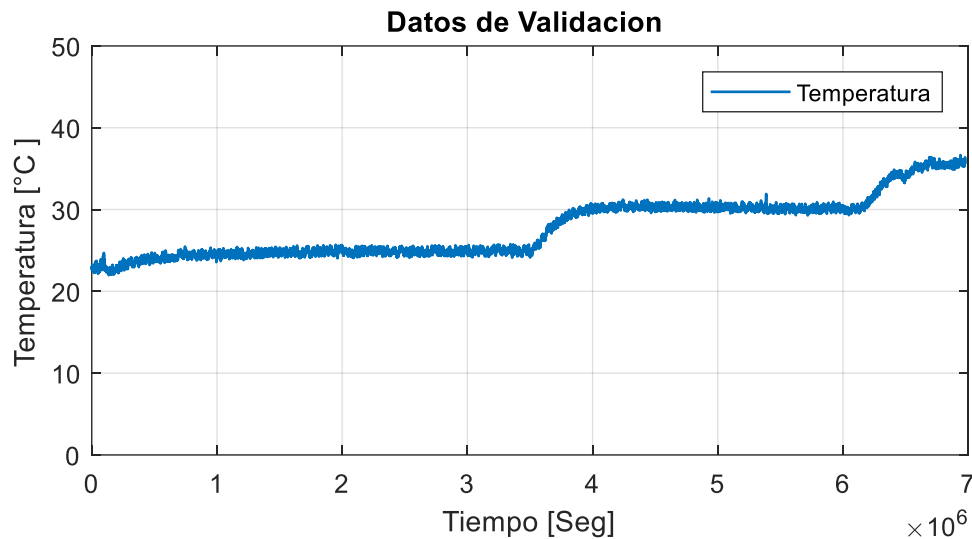


Figura 30. Datos de validación de salida. [Autor]

El modelo obtenido nos dio como resultado los siguientes valores: $K_T = 10.7056$, $t_d = 6$, $\tau = 8455.4$. Sustituyendo los valores se obtiene la ecuación 50.

$$G(s) = \frac{10.7056 * e^{-6s}}{8455.4 * s + 1} \quad (50)$$

Para verificar el modelo obtenido se procede a comparar los datos de identificación y validación con el modelo para verificar que el comportamiento concuerde con los datos. En la figura 31 y 32 se presenta las comparaciones entre los datos de identificación y validación con el modelo obtenido.

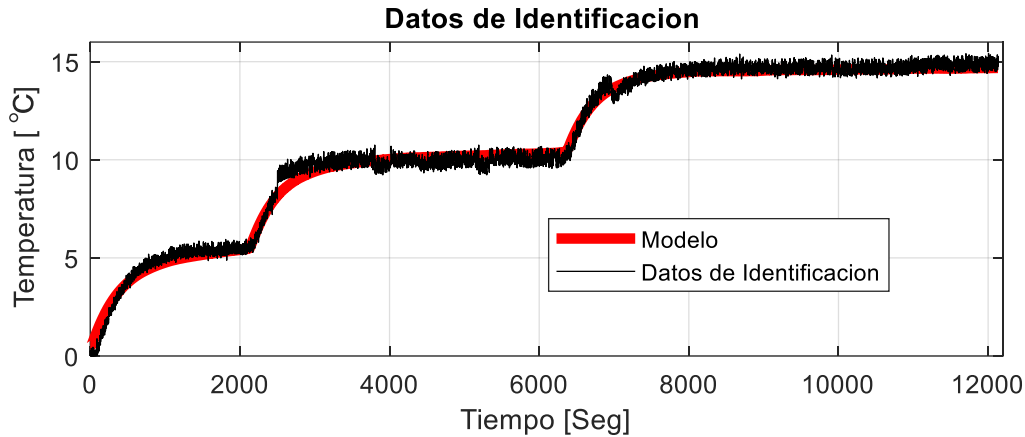


Figura 31. Comparación de los datos de identificación con el modelo obtenido. [Autor]

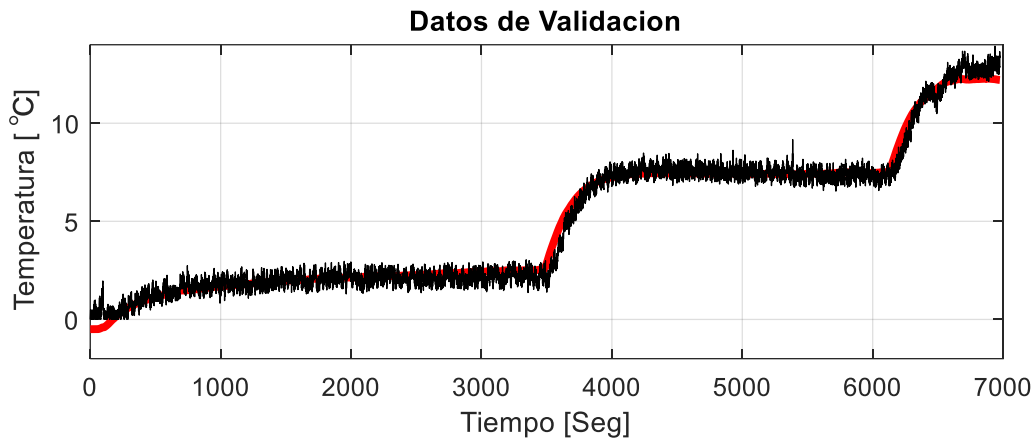


Figura 32. Comparación de los datos de validación con el modelo obtenido. [Autor]

Como criterio de selección de este modelo se halló el parámetro de BestFit el cual se define por la ecuación 31. Con los datos de identificación se halló un BestFit del 91.74% y con los datos de validación se obtuvo un BestFit del 88.88%, debido a que los datos de BestFit no son menores del 70%, se consideró un modelo válido para la planta.

Una vez realizada la identificación de la planta se diseña un controlador para asegurar la estabilidad de la temperatura. El control PID es muy usado en la industria para controlar sistemas térmicos presentado un excelente resultado. En la ecuación 51 se representa la expresión matemática en continua de un controlador PID.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (51)$$

Donde la función $e(t)$ es el error entre el punto de ajuste y la salida actual del proceso. El control PID hace una ponderación de $e(t)$, de la integral de $e(t)$ y de la

derivada de $e(t)$. Estas ponderaciones son las que hacen tan versátil en el control de procesos, la ponderación de $e(t)$ hace robusto al controlador frente a posibles ruidos, la ponderación de la integral de $e(t)$ reduce el error en estado estacionario a cero y la ponderación de la derivada de $e(t)$ hace que el tiempo de levantamiento del controlador sea más rápido o que el error tienda a cero más rápida mente. La función $u(t)$ de la ecuación 8 es la señal de control generada por el controlador PID que se aplicara a el proceso, la función de transferencia resultante del controlador es la ecuación 52 donde $K_d = K_p T_d$ y $K_i = K_p / T_i$.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (52)$$

La ecuación 37 es una función impropia debido a que su grado de polinomio del denominador es menor que el grado del polinomio del numerador. Esto se debe principalmente al término del derivador de la señal del error $K_d s$, para solucionar este problema se puede aproximar el termino derivador por una función de transferencia de primero orden como se presenta en la ecuación 53. [22]

$$K_d * s \cong \frac{K_d s}{1 + \frac{K_d s}{N}} \quad (53)$$

Con la ecuación 53 logramos aproximar la derivada a bajas frecuencias, pero la ganancia se limita por N a las altas frecuencias, de esta manera logramos que la función de transferencia del control PID se pueda escribir como en la ecuación 54 tomando el nombre de control PID con pseudoderivador.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{(K_d N + K_d) s^2 + (K_p N + K_i K_d) * s + K_i N}{(K_d s + 1) s} \quad (54)$$

Para hacer la sintonización del controlador se utilizó la técnica de ubicación de polos. [23] Con el fin de obtener un tiempo de establecimiento más corto y una respuesta sin oscilación, se optó por suprimir la constante integral del controlador PID utilizando un controlador PD (pseudo-derivado) manejando un error en estado estable del 0.4%, obteniendo como resultado la función de transferencia del controlador presentado en la ecuación 55.

$$CPD(s) = \frac{6.9548 * (s + 1.4)}{s + 0.7} \quad (55)$$

Como resultado se obtiene una respuesta sobreamortiguada en lazo cerrado presentando un tiempo de establecimiento de 682 [Seg] con un error en estado estable del 1% para la temperatura de la solución electrolítica de la celda electroquímica. Este controlador fue discretizado para su implementación con un tiempo de muestreo de 0.025 [Seg], la ecuación 56 corresponde al controlador discretizado con este tiempo de muestreo. Una vez implementado se tomaron datos experimentales haciendo el calentamiento de solamente agua, para comparar el modelo simulado y los datos experimentales, en la figura 33 se presenta la estructura implementada en la simulación del controlador y en la figura 34 se presenta los datos obtenidos de comparación entre el modelo simulado y la planta real. Para la toma de datos se programa un filtro Butterworth pasas bajas con una frecuencia de corte de 0.1 [Hz] con el fin de obtener una respuesta del sistema sin ruido.

$$CPD(z) = \frac{7.016 * z - 6.774}{z - 0.9827} \quad (56)$$

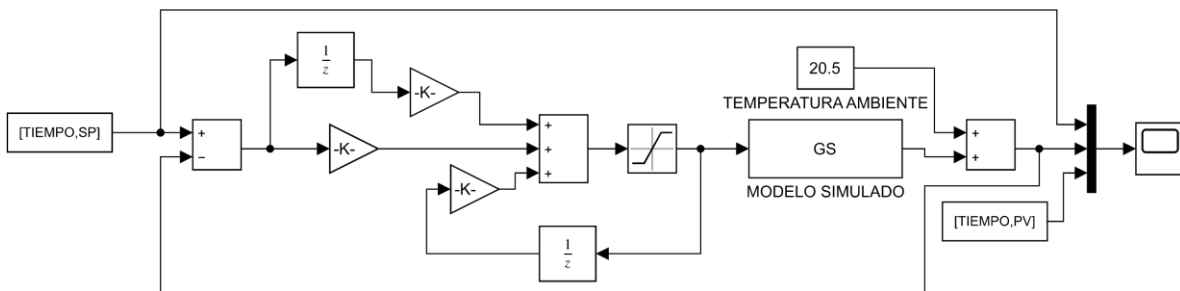


Figura 33. Estructura utilizado para validar el modelo simulado y la planta real del control de temperatura. [Autor]

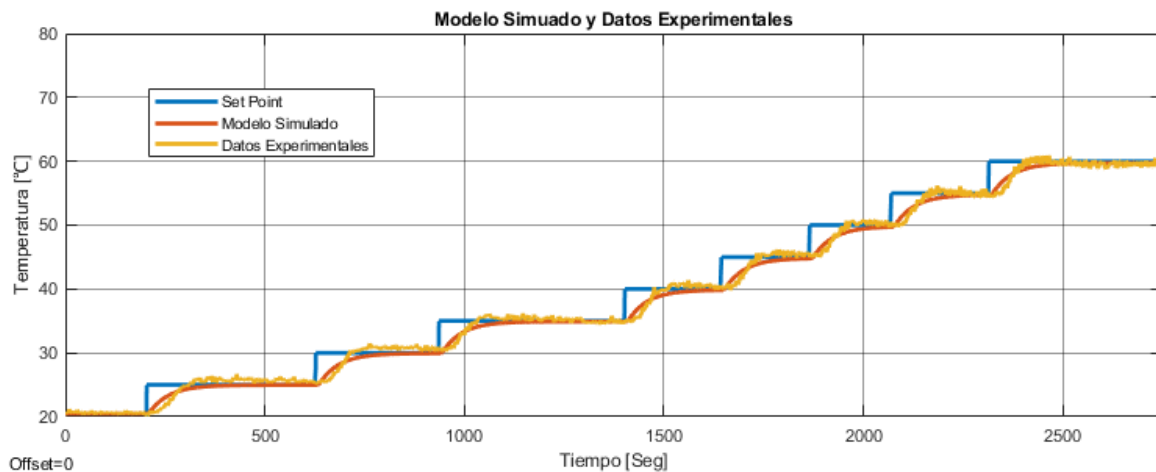


Figura 34. Comparación del sistema en lazo cerrado con datos experimentales y datos simulados del control de temperatura. [Autor]

6. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

El sistema fue unificado como se presenta en la figura 35a y se realizaron diferentes pruebas en este, revisando la respuesta del sistema funcionando en diferentes condiciones de operación. Primero antes de comenzar las pruebas es importante realizar una limpieza a la pieza con la cual vamos a trabajar, por este motivo se sumerge la pieza en hidróxido de sodio también conocida como soda caustica con el fin de quitar todas impurezas en la superficie de la pieza de aluminio como se presenta en la figura 35b.



Figura 35. a) Evidencias de la construcción del banco de pruebas. b) Evidencia del proceso de limpieza a la pieza de aluminio [Autor]

Se realizó una prueba la cual se llevó a cabo usando ácido sulfúrico al 15% con un suministro de corriente de $0.6[A]$, temperatura ambiente y una velocidad de agitación de $30 [RPM]$, para una pieza con un área de $33 [cm^2]$ dándonos una densidad de corriente de $181.81 [A/m^2]$ la cual se suministró por $6000 [Seg]$. Durante el proceso se tomaron los datos del comportamiento de la corriente como se presenta en la figura 36 e igualmente se tomaron los datos del comportamiento de la temperatura en el proceso, la cual presenta un crecimiento en el transcurso del tiempo, este comportamiento se considera normal debido a la reacción química que se está produciendo con el suministro de corriente y la agitación de la sustancia electrolítica. El proceso se llevó a temperatura ambiente debido a que el proceso de anodizado con ácido sulfúrico 15% se lleva a temperaturas bajas y no altas, como se presenta en la tabla 1.

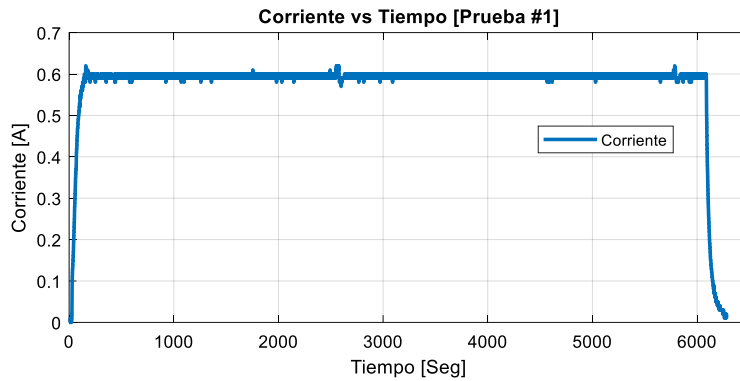


Figura 36. Monitoreo de la Corriente en la Prueba. [Autor]

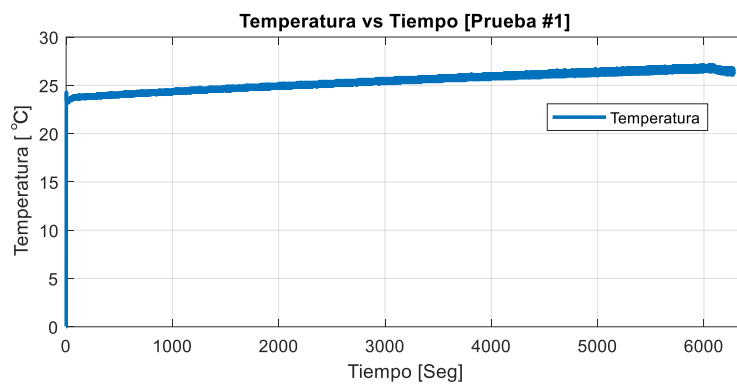


Figura 37. Monitoreo de la Temperatura en la Prueba. [Autor]

Cuando se terminó el proceso la pieza fue sumergida en agua caliente a una temperatura de 60 [°C] con el fin de realizar el proceso de sellado de la capa anódica, para conseguir superficie de óxido de aluminio uniforme, compacta y de alta resistencia a la corrosión.

Con el fin de verificar el crecimiento de la cama anódica las piezas fueron llevadas a un laboratorio de microscopia para observar las propiedades de la capa anódica. Las piezas fueron sometidas a un proceso de recubierto de oro con un equipo de revestimiento de pulverización catódica de referencia Q150R ES el cual se presenta en la figura 38, esto con el fin de aumentar la conductividad de la pieza y tener una mayor precisión con el equipo de microscopia.



Figura 38. Recubrimiento de oro a la pieza de aluminio. [Autor]

La microscopía fue realizada con un equipo de referencia QUANTA FEG 650 (Field Emission Gun) este se presenta en la figura 39. El equipo fue configurado con las siguientes características para la realización de las pruebas:

- Alto vacío
- Voltaje de aceleración 15kV.
- Detector para imágenes:
- Electrones secundarios (**SE**): Everhart Thornley detector ETD (para observar morfología)
- Electrones retrodispersados (**BSE**): Back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD (para observar variaciones de composición).



Figura 39. Equipo QUANTA FEG 650. [Autor]

Una vez las piezas dentro del equipo de microscopia se elaboró una foto de la capa anódica la cual se presenta en la figura 40, en esta foto se realizó la medición de la capa anódica obtenido en el proceso, la cual obtuvo un valor entre 21.16 [um] y 20.18[um].

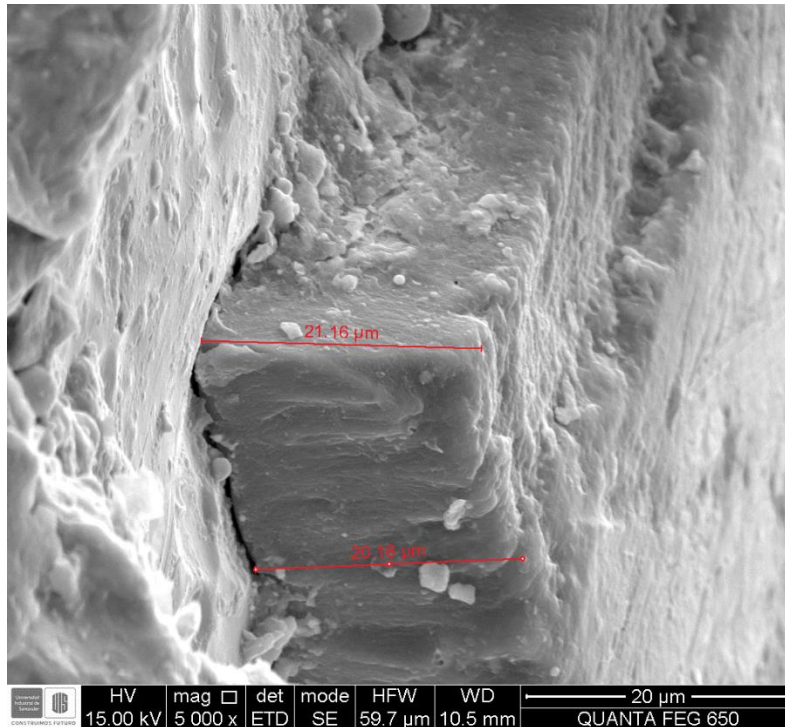


Figura 40. Medición de la capa anodica creada en la superficie del aluminio. [Autor]

Una vez realizada la medición de la capa anódica se elaboró un análisis químico con el cual se confirmó que existía presencia de oxígeno y aluminio en la capa analizada. Con el análisis químico se toma una pequeña sección de la superficie anodizada como se presenta en la figura 41a, en esta sección se realiza la medición de los componentes químicos presentes en esta zona, en la figura 41b se presenta el espectro resultante del análisis químico el cual indica que elementos están presente en la capa anódica. Los porcentajes en peso y porcentaje en masa atómica de cada elemento presente en el análisis químico elaborado se presentan en la tabla 7.

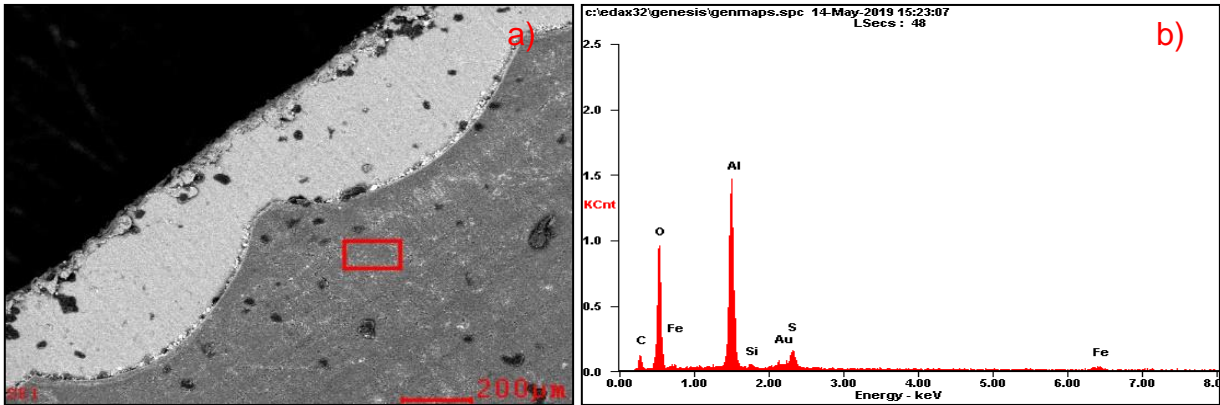


Figura 41. a) Zona donde se realizó el análisis químico. b) Grafico en donde se observa el espectro resultante que indica que elementos se encuentran presentes en la capa anódica. [Autor]

Tabla 7. Análisis químico en peso y masa atómica de cada elemento presente en la zona del material base. [Autor]

| Element | Wt% | At% |
|---------|------------|-------|
| C | 11.23 | 19.30 |
| O | 36.67 | 47.31 |
| Al | 35.06 | 26.82 |
| Si | 00.70 | 00.52 |
| Au | 05.22 | 00.55 |
| S | 05.10 | 03.28 |
| Fe | 06.03 | 02.23 |
| Matrix | Correction | ZAF |

Adicionalmente se tomaron tres pruebas, las cuales fueron piezas de la misma dimensión, pero se suministró diferente cantidad de corriente a cada una en el proceso, para las tres se utilizó ácido sulfúrico al 15% y se trabajó a temperatura ambiente. Las corrientes seleccionadas para realizar las pruebas fueron 0.3 [A], 0.4 [A] y 0.5 [A]. Una vez finalizado el proceso se sumergieron las piezas en agua caliente a una temperatura de 60[°C] para realizar el proceso de sellado de la capa anódica. Al final se obtuvieron tres diferentes piezas anodizadas como se presentan en la figura 42, con estas se observó un cambio de la superficie anodizada de acuerdo al suministro de corriente de cada una.

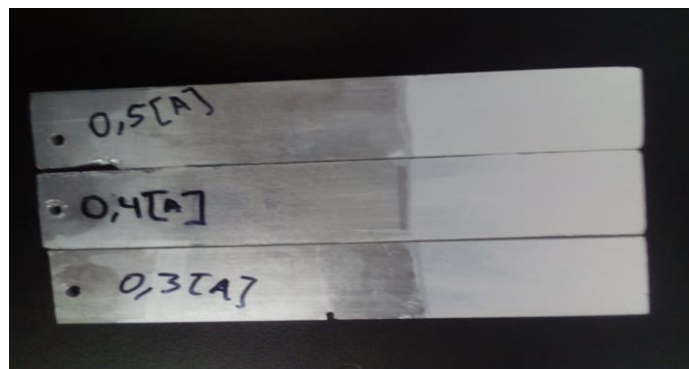


Figura 42. Piezas anodizadas a diferente valor de corriente [Autor].

6.1. NORMAS DE SEGURIDAD

Se recomienda que el usuario lea los protocolos de seguridad química [24], Directiva Ministerial N° 67 de Diciembre de 2015: Orientaciones para la construcción o ajustes en los establecimientos educativos del manual de normas de seguridad en los laboratorios de química y física, en el cual puede encontrar todo lo referente a la precaución en la manipulación de productos químicos y a las normas básicas de seguridad que todo profesional debería tener en cuenta en el desarrollo de su actividad en los laboratorios químicos de análisis o de investigación, igualmente se incluyen temas de interés como el almacenamiento de productos químicos y el tratamiento de residuos de laboratorio, además de conceptos básicos de peligrosidad de productos, primeros auxilios en caso de accidentes, etc.

7. CONCLUSIONES

- En el proceso de anodizado, a una densidad de corriente de 181.8 [A/m²] y tiempo de anodizado de 6000 [Seg] con ácido sulfúrico al 15%, La resistencia a la corrosión de una película de óxido de aluminio sellada, y el espesor de la película de óxido de aluminio, son altas, independientemente de que la temperatura en el proceso pueda llevar hasta 27 [°C].
- Es importante que la velocidad del agitador no este muy alta debido a que las altas velocidades de este, produce un crecimiento en la temperatura del proceso de anodizado y puede llevar a trabajar una temperatura no recomendada para el proceso, debido a que el controlador solo tiene un actuador para el calentamiento y no para el enfriamiento no se asegura la estabilidad de la temperatura al frente de este comportamiento.
- El controlador QFT presenta una excelente respuesta en el trascurso del proceso asegurando la estabilidad de la corriente, sin importar el cambio de resistencia debido al crecimiento de la capa anódica, esto aseguro un proceso estable para el crecimiento de la capa anódica, en donde el crecimiento de la capa anódica fue mayor al esperado, debido a la naturaleza del proceso utilizando ácido sulfúrico al 15%, con el cual se esperaba tener un espesor entre 2.5 [um] a 18 [um] pero se consiguió obtener un espesor más elevado de 20 [um] a 21 [um].
- Es muy importante que una vez terminado el proceso de anodizado inmediatamente se lleve a cabo el proceso de sellado, debido a que si la pieza dura mucho tiempo sin realizar el sellado la capa anodiza empieza a levantarse del aluminio perdiendo toda adherencia entre la superficie del aluminio y la capa anódica.
- Se determino que entre mayor sea el suministro de corriente en el proceso de anodizado se iba a tener un mayor espesor en la capa anódica y con una uniformidad mayor en toda la pieza anodizada.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. MacInnes, «The Principles of Electrochemistry,» Dover Publications, Inc. New York, 1961.
- [2] J. R. G. TOVAR, «DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA CELDA ELECTROLITICA DEL TIPO HALL-HEROULT,» UNIVERSIDAD SIMON BOLIVAR, INGENIERIA ELECTRONICA , SARTENEJAS, 2006.
- [3] A. M. B. MARTÍNEZ, «ESTUDIO SOBRE EL PROCESO DE ANODIZADO DE ALUMINIO Y DE UNA ALEACIÓN Al-Mg-Si,» UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, México, 2014.
- [4] J. A. S. y. F. A. S. J. Catherine M. Cotell, «Surface Engineering,» ASM International Handbook, Volume 5., 1994.
- [5] I. J. A. C. Hernández, «EFECTO DE LA ADICION DE ACIDO BORICO SOBRE LA PELICULA DE ANODIZADO DE LA ALEACION DE ALUMINIO 2024,» Cd. Chihuahua, Chihuahua, Enero de 2013.
- [6] A. Deacon, «Overview of Anodizing in the Aerospace Industry,» Technically Speaking, Aluconsult, LLC, San Diego, CA.
- [7] H. S.Kumar, Nanoscale pore formation dynamics during aluminum, CHAOS,12:240-251, 2001.
- [8] J. S. A. Henao, Sistesis y Caracterizacin de un catalizador nanoestructurado de Paladio Soportado sobre Alumina Anodizada, Manizales : Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingenieria y Arquitectura , 2009.
- [9] W. Aperador, E. Vera y L. M. Ipaz, «Efecto de la densidad de corriente sobre la morfologia y las propiedades electroquimicas en peliculas anodicas porosas, crecidas sobre AA 2024-T3,» *EIA*, nº 15, pp. 9-19, 2011.
- [10] C. D. F. N. V. I. E. R. Fajardo, EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL ANODIZADO DEL ALUMINIO DE ALTA PUREZA EN ÁCIDO SULFÚRICO PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN BIOMÉDICA, BUCARAMANGA: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS, 2011.

- [11] J. L. Paredes, «El uso de la anodización en materiales,» *Casa abierta al tiempo*, vol. IV, nº 28, pp. 59-65, 2010.
- [12] S. M. Junaid Zaidi y M. Z. Butt, «Influence of anodization temperature on the structural features of first-step anodized nanoporous alumina and of commercial aluminium substrate,» *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, vol. 12, nº 4, pp. 1175-1186, 2017.
- [13] T. Aerts, T. Dimogerontakis, I. De Graeve, J. Fransaer y H. Terryn, «Influence of the anodizing temperature on the porosity and the mechanical properties of the porous anodic oxide film,» *Surface & Coatings Technology*, 2007.
- [14] J. Thangthong y S. Prombanpong, «An Analysis of Burn Defect in Hard Anodized Process of AL 3003,» *ResearchGate*, 2015.
- [15] M. Alaa Elnaiem, A. M. Mebed, A. Gaber y M. A. Abdel Rahim, «Effect of the Anodization Parameters on the Volume Expansion of Anodized Aluminum Films,» *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2013.
- [16] Y. G. Fuertes Paucar, Diseño E Implementacion De Un Modulo Educativo Para El Control De Temperatura, Lima , Peru: Universidad Catolica Del Peru, 2017.
- [17] M. H. Rashid, *Electronica de potencia*, Mexico : Prentice hall hispanoamericana, S.A, 1995.
- [18] C. W. R. University, «Control & Energy Systems Center (CESC),» Case Western Reserve University , [En línea]. Available: <http://cesc.case.edu/OurQFTCT.htm>. [Último acceso: 01 junio 2019].
- [19] O. A. Gonzalez Najera, *Estabilización de sistemas de segundo orden con retardo aplicación a sistemas de alto orden*, Mexico: Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, 2009.
- [20] M. G.-M. y M.-S. J. Elso, «Quantitative feedback control for multivariable model matching and disturbance rejection,» *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 27, pp. 121-134, 2017.
- [21] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Madrid: Pearson Educación, 2010.
- [22] H. E. Rodríguez Trujillo, *Diseño de prototipo para análisis y control del nivel de acidez en los efluentes líquidos*, Sogamoso: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2016.
- [23] V. M. A. Leonardo J. Marín, «Sintonización de controladores por ubicación de polos y ceros,» *IEEE CONESCAPAN*, nº XXVI, pp. 12-14, 2007.

- [24] M. d. e. nacional, «Mineducacion,» Diciembre 2016. [En línea]. Available: https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-355749_recurso_normatividad.pdf. [Último acceso: 16 Junio 2019].
- [25] J. E. G. P. E. O. D. LUIS ALBERTO ALMONACID DELGADO, «PROTOTIPO DE CONVERTIDOR DE POTENCIA CONTROLADO PARA EL ANODIZADO DE ALUMINIO,» UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICOMECÁNICAS, BUCARAMANGA, 2017.
- [26] P. Q. S.A., Manual de seguridad en laboratorios químicos, Barcelona - España: Polígono Pla de la Bruguera.
- [27] E. R. A. F. A. R. MARTINEZ, EVALUACIÓN DEL ANODIZADO A VOLTAJE ESCALONADO DE UNA ALEACIÓN AA 7075-T6 EN ÁCIDO SULFÚRICO PARA SISTEMAS EXTERNOS DE FIJACIÓN ÓSEA, BUCARAMANGA: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS, 2012.
- [28] Protocolo de Seguridad Química, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [29] C. D. F. N. V. Iván Esteban Reyes Fajardo, «EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL ANODIZADO DEL ALUMINIO DE ALTA PUREZA EN ÁCIDO SULFÚRICO PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN BIOMÉDICA,» UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS, BUCARAMANGA, 2011.

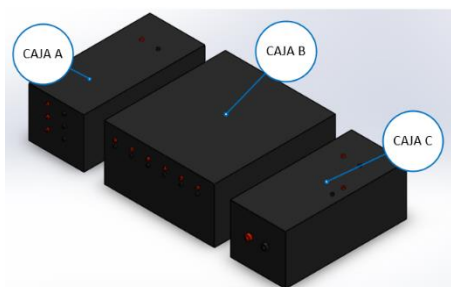
9. ANEXOS

9.1. MANUAL DE OPERACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE ANODIZADO

Se recomienda que el usuario lea los protocolos de seguridad química [24], Directiva Ministerial N° 67 de Diciembre de 2015: Orientaciones para la construcción o ajustes en los establecimientos educativos del manual de normas de seguridad en los laboratorios de química y física, en el cual puede encontrar todo lo referente a la precaución en la manipulación de productos químicos y a las normas básicas de seguridad que todo profesional debería tener en cuenta en el desarrollo de su actividad en los laboratorios químicos de análisis o de investigación, igualmente se incluyen temas de interés como el almacenamiento de productos químicos y el tratamiento de residuos de laboratorio, además de conceptos básicos de peligrosidad de productos, primeros auxilios en caso de accidentes, etc.

9.1.1. DESCRIPCION DE LA UNIDAD

El banco de pruebas para anodizado de aluminio es un sistema diseñado para apoyar a los docentes en el desarrollo de sus clases, para lograr que los estudiantes obtengan un conocimiento más amplio en el desarrollo del tema de celdas electroquímicas y lograr un acercamiento a un tema de interés industrial.

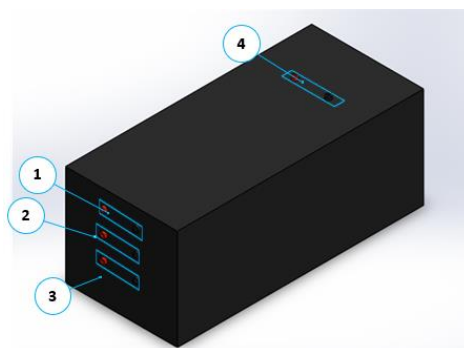


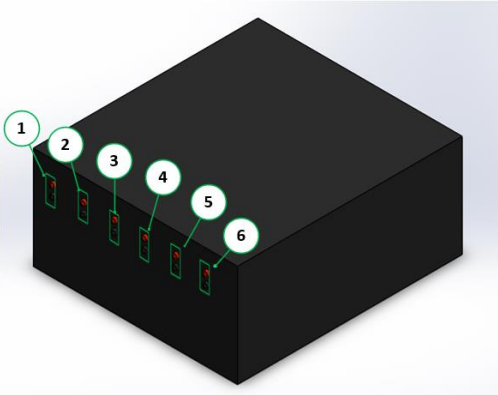
9.1.2. INSTALACION

El sistema cuenta con tres cajas, caja A, caja B y caja C. Cada una cumple una función importante en el sistema:

La caja A se le puede llamar caja fuente debido a que esta cuenta con tres salidas y estas equivalen una la salida de una fuente de 5[V], 12[V] y 24[V], cabe resaltar que también cuenta con una entrada AC que equivale a 120V.

1. Alimentación de 24[V] DC
2. Alimentación de 12[V] DC
3. Alimentación de 5[V] DC
4. Alimentación de 120[V] AC





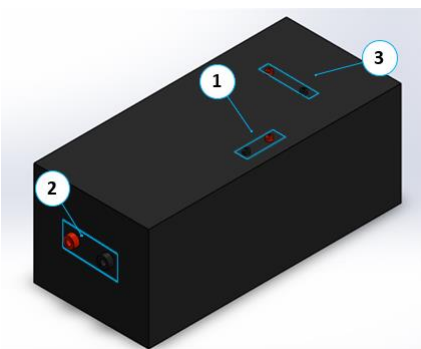
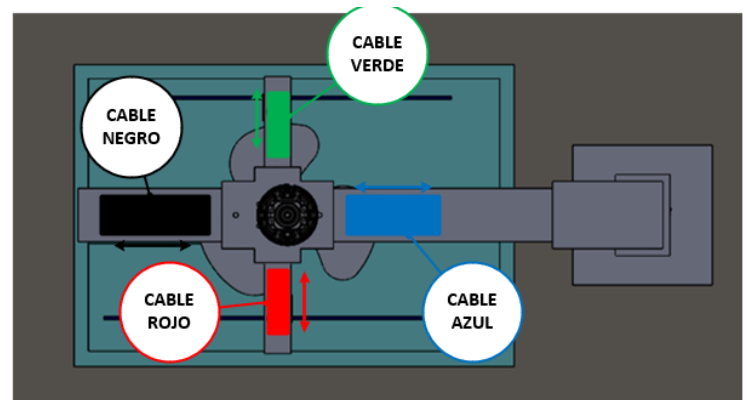
La caja B es la caja encargada del control de corriente y de la velocidad del agitador cuenta con seis entradas las cuales son:

1. Alimentación de 24[V] DC (Este voltaje puede ser tomado de la caja A)
2. Bobina
3. Carga (cables de cátodo y ánodo)
4. Entrada de Fuente principal (Usted puede conectar cualquier fuente, pero es importante tener en cuenta que entre mayor sea el voltaje de esta fuente mayor rangos de corriente podrá

alcanzar en el proceso).

5. Alimentación de 12[V] DC (Este voltaje puede ser tomado de la caja A)
6. Alimentación de 5[V] DC (Este voltaje puede ser tomado de la caja A)

La carga en la caja B es definida con una combinación de colores. Como se muestra en la figura cada brazo recibe un color diferente en el cable, de esta manera el usuario podrá definir qué posición quiere que tenga el cátodo o el ánodo.

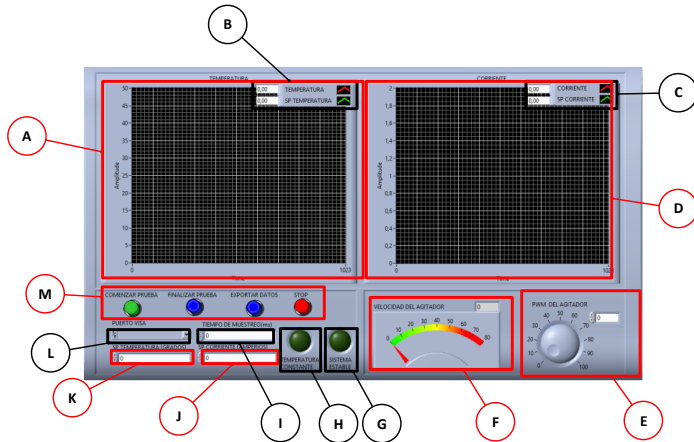


La caja C es la caja encargada del control de Temperatura esta cuenta con dos entradas y una salida las cuales equivalen a:

1. Alimentación de 5[V] DC (Este voltaje puede ser tomado de la caja A)
2. Entrada de la resistencia eléctrica.
3. Alimentación de 120[V] AC

Nota: se recomienda revisar bien estas conexiones debido a que, si no están correctamente realizadas, lo más probable es que se pueda realizar un corto en los componentes de los circuitos.

9.1.3. OPERACIÓN DE LA INTERFAZ



El sistema en operación es controlado desde la interfaz la cual esta compuesta por:

A. Monitoreo de la variable temperatura y el setpoint.

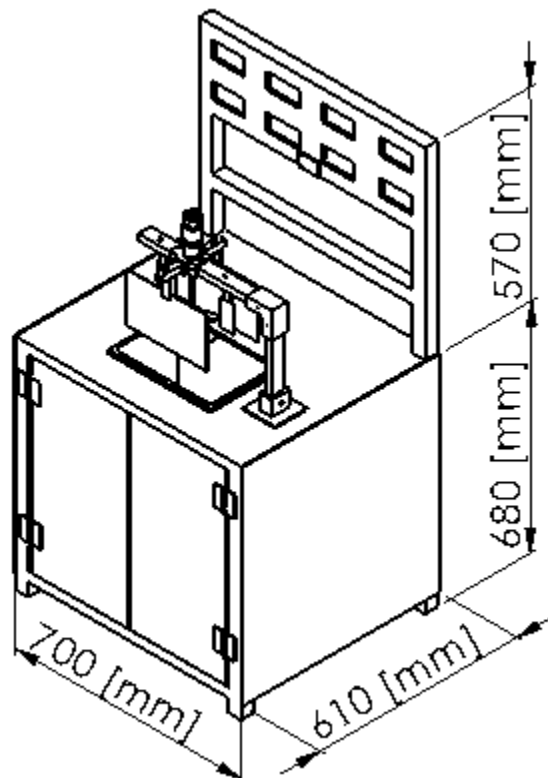
B. Visualizador del valor de la temperatura y el setpoint.

C. Monitoreo de la variable corriente y el setpoint.

D. Visualizador del valor de la corriente y el setpoint.

- E. Selector de PWM del agitador.
- F. Indicador de la velocidad del agitador.
- G. Indicador de sistema estable.
- H. Indicador para temperatura constante.
- I. Tiempo de muestreo de las muestras tomadas.
- J. Setpoint de la corriente.
- K. Setpoint de la temperatura.
- L. Puerto serial a conectar.
- M. Botones de operación (Inicio, finalizar, exportar y parada).

9.1.4. DIMENSIONES



9.1.5. PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

No toque los terminales mientras esté conectada la alimentación. Hacerlo podría provocar ocasionalmente lesiones físicas menores a consecuencia de descargas eléctricas.

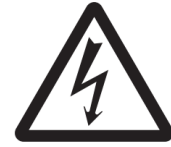
Evite que fragmentos de metal, recortes de cable o virutas metálicas finas producidas durante la instalación se introduzcan en el producto. Hacerlo podría provocar ocasionalmente fuego, descargas eléctricas o mal funcionamiento.

No utilice el producto en lugares expuestos a gases explosivos o inflamables. En caso contrario, podrían producirse lesiones causadas por una explosión.

Configure los parámetros del producto de tal manera que sean apropiados para el sistema a controlar. Si no son adecuados, un funcionamiento accidental inesperado puede ocasionar daños o accidentes.

No permita que se acumule suciedad ni polvo entre los pines de los cables. Podrían provocarse mal funcionamiento o incendios.

Asegúrese al final el proceso colocar todas las variables del proceso para evitar que el sistema continúe en funcionamiento y no presentarse elevaciones de temperatura y corriente.



9.2. MULTÍMETRO FLUKE 187

Características

| | 187 | 189 |
|--|----------------|----------------|
| Medida de verdadero valor eficaz | CA, CA+CC | CA, CA+CC |
| Ancho de banda en tensión y corriente | 100 kHz | 100 kHz |
| Nº de cuentas (predeterminada/seleccionable) | 50,000 / 5,000 | 50,000 / 5,000 |
| Pantalla múltiple con grandes dígitos y retroiluminación, que se actualiza 4 veces por segundo | ● | ● |
| Segmentos de barra gráfica analógica , que se actualizan con una frecuencia de 40 veces por segundo | 51 segmentos | 51 segmentos |
| Registro de mínimos, máximos y promedios con indicación de tiempo relativo | ● | ● |
| Registro rápido de mínimo y máximo | 250 µseg | 250 µseg |
| Modos Touch Hold* y Relativo para retención automática de lectura y medidas de referencia y desviación | ● | ● |
| Lectura de temperaturas con adaptador y termopar tipo K opcional | ● | ● |
| Pruebas acústicas de continuidad y diodos | ● | ● |
| Medida del ciclo de trabajo y ancho de pulso | ● | ● |
| Interface para PC para el intercambio de datos y calibración a carcasa cerrada | ● | ● |
| Memoria para almacenar hasta 3 días de registro autónomo continuo (1.000 puntos de memoria) | | ● |
| Memoria de lecturas (posiciones de memoria) | | 100 |
| Fácil cambio de baterías y fusibles sin necesidad de abrir todo el alojamiento | ● | ● |
| Carcasa ergonómica con funda protectora integrada | ● | ● |

Especificaciones (Compruebe el sitio Web de Fluke para obtener especificaciones detalladas)

| Funciones | Máximo | Resolución máxima | 187 y 189** |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------|
| Tensión CC | 1,000 V | 1 µV | ±(0,025%+5) |
| Tensión CA | 1,000 V | 1 µV | ±(0,4%+40) |
| Corriente CC | 10 A | 0,01 µA | ±(0,15%+2) |
| Corriente CA | 10 A | 0,01 µA | ±(0,75%+5) |
| Resistencia | 500 MΩ | 0,01 Ω | ±(0,05%+2) |
| Conductancia | 50 nS | 0,01 nS | ±(1,0%+10) |
| Capacidad | 50,000 µF | 0,001 nF | ±(1,0%+5) |
| Frecuencia | 1 MHz | 0,01 Hz | ±(0,005%+1) |
| Temperatura | -200 °C/+1.350 °C | 0,1 °C | ±(1%+1 °C) |
| dBm y dBV | -52/+60 dB | 0,01 dB | ± 0,1 dB |

9.3. TACÓMETRO EXTECH RPM10

Especificaciones

| | |
|---------------------------------|--|
| Base de tiempo | Cristal de cuarzo de 4.9152 MHz |
| Indicador | Pantalla LCD Reversible de 5 dígitos 16mm (0.6") |
| Fuente de luz láser | Menor a 1 mW; Diodo láser rojo clase 2 (645nm aprox.) |
| Distancia de detección | 50 a 2000 mm (2 a 79") dependiente de la iluminación ambiental y RPM |
| Memoria | Última lectura y MIN/MAX |
| Condiciones de operación | 0 °C a 50 °C (32 °F a 122 °F); RH 80% Máx |
| Fuente de tensión | 4 baterías 1.5 V AA |
| Consumo de energía | 24mA CD aprox. (>100hrs uso continuo) |
| Peso | 300g (10.6oz.) incluyendo batería |
| Tamaño | 210 x 80 x 50 mm (8.3 X 3.1 X 2.0") |
| Accesorios | (4) baterías 1.5 y cinta reflectiva 600 mm (24"), aditamentos giratorios (1) velocidad de superficie y (2) rpm y estuche |
| Nota patentada | U.S. Patente 7,111,981 |

Especificaciones de escala

| | Escala | Resolución | Precisión (% lect.) |
|--|---|--|----------------------------|
| Foto tacómetro | 10 a 99,999 RPM | 0.1 rpm (<1000rpm) 1 rpm (>1000 rpm) | ± (0.05% + 1d) |
| Tacómetro de contacto | 0.5 a 19,999 rpm | 0.1 rpm (<1000rpm) 1 rpm (>1000 rpm) | |
| Velocidad de Superficie | 0.2 a 6560 ft/min | 0.1 ft/min (<1000ft/min) 1 ft/min (>1000ft/min) | ± (1% + 1d) |
| Velocidad de Superficie | 0.05 a 1999.9 m/min | 0.01 M/min (<100m/min) 0.1 M/min (>100 m/min) | |
| Distancia de detección del fototacómetro | Típica* de 50 a 2,000 mm (2 a 79") * La especificación requiere el uso de trozos de cinta reflectiva de 10mm cuadrados y 1,800 rpm. La distancia máxima y mínima de detección cambiará con las diferencias en condiciones ambientales, cinta reflectiva y velocidades mayores a 1,800 rpm. | | |

Especificaciones del termómetro IR

| | | |
|-----------------------|--|-------|
| Escala / resolución | -20 a 315°C (-4 a 600°F) | 1°C/F |
| Precisión | ± 3% de la lectura o ± 3°C (6°F) la que sea mayor. Nota: La precisión está especificada para la siguiente escala de temperaturas ambientales: 18 a 28°C (64 a 82°F) | |
| Emisividad | 0.95 valor fijo | |
| Campo de visión | D/S = Aprox. Relación de 6:1 (D = distancia, S = punto) | |
| Potencia Láser | Menor a 1 mW | |
| Respuesta al espectro | 6 a 14 μm (longitud de onda) | |

9.4. CÓDIGO ARDUINO

```
#include <TimerOne.h>
////////////////////////////////////-Temperatura-Declaracion de variables
////////////////////////////////////
unsigned long tiempo1 = 0;
unsigned long tiempo2 = 0;
unsigned long tiempoSegundos = 0;
unsigned long timer1_counter = 0;
const int Pt100 = A0;
const int Rele = 8;
double Pwm = 0;
double enT_1 = 0;
double enT_2 = 0;
double unT_1 = 0;
double unT_2 = 0;
double UT = 0;
double dif_act = 0;
double enT = 0;
double SPtemperatura = 0;
double Senal_Pt100 = 0;
double FPT100 = 0;
double FFPT100 = 0;
double duty = 0;
double entradaT_1 = 0;
double entradaT_2 = 0;
double entradaT_3 = 0;
double salidaT_1 = 0;
double salidaT_2 = 0;
double entradaTT_1 = 0;
double entradaTT_2 = 0;
double entradaTT_3 = 0;
double entradaTT_4 = 0;
double salidaTT_1 = 0;
double salidaTT_2 = 0;
double salidaTT_3 = 0;
double salidaTT_4 = 0;
double unT = 0;
double TT = 0;
```

```

////////////////////////////////////-Corrinete--Declaracion de
variables////////////////////////////////////
// Sensibilidad del sensor en V/A
double SENSIBILITY = 0.13636364; // Modelo 5A
const int pinPWMCorriente = 6;
const int PINCorriente = A1;
double SpCorriente = 0;
double enC_1 = 0;
double enC_2 = 0;
double enC_3 = 0;
double unC_1 = 0;
double unC_2 = 0;
double UC = 0;
double enC = 0;
double tiempo = 0;
double unC = 0;
double PpwmCorriente = 0;
double voltage = 0;
double corriente = 0;
double I = 0;
double entradaC_1 = 0;
double entradaC_2 = 0;
double entradaC_3 = 0;
double entradaC_4 = 0;
double salidaC_1 = 0;
double salidaC_2 = 0;
double salidaC_3 = 0;
double Fcorriente = 0;
double voltajeSensor;
double entradaC1_1 = 0;
double entradaC1_2 = 0;
double entradaC1_3 = 0;
double salidaC1_1 = 0;
double salidaC1_2 = 0;
double Fcorrientel1 = 0;
double FSP = 0;
////////////////////////////////////-Velocidad--Declaracion de
variables////////////////////////////////////

const int pinPWMVelocidad = 11;
double rpm = 0;
double SpVelocidadA = 0;
double PpwmVelocidad = 0;
double entradaV_1 = 0;
double entradaV_2 = 0;
double entradaV_3 = 0;
double salidaV_1 = 0;
double salidaV_2 = 0;
double FVelocidad = 0;
volatile int contador = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(Rele, OUTPUT) ;
  pinMode(pinPWMCorriente, OUTPUT) ;
  pinMode(pinPWMVelocidad, OUTPUT) ;
  digitalWrite(Rele, HIGH);
}

```



```

// -----
//-----
////////////////////CONTROADORES////////////////////////////////////
////
//-----
//-----
// Implementación de la ecuación de diferencias.

////////////////////-Temperatura-
////////////////////
// Para PD
double T = SPtemperatura;
enT = ( T / 10 - FPT100);
unT = (0.982652235665073 * unT_1) + (7.015652946989986 * enT) + (-
6.774352484196888 * enT_1) ; // Controlador PD

if (unT < 0) {
    UT = 0;
}
if (0 < unT && unT < 100) {
    UT = unT;
}
if (unT > 100) {
    UT = 100;
}

duty = ((UT * 10000) / 100);
tiempo2 = millis();
if (tiempo2 >= (tiempo1 + duty)) { //Si ha pasado duty segundo ejecuta
el IF
    digitalWrite(Rele, HIGH); // poner el Pin en HIGH
} else {
    digitalWrite(Rele, LOW); // poner el Pin en LOW
}
if (tiempo2 >= (tiempo1 + 10000)) { //Si ha pasado 10000 segundo
ejecuta el IF
    tiempo1 = millis(); //Actualiza el tiempo actual
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////7
////////////////////////////////////-Corrinete-
////////////////////////////////////
// Para QFT
double P = SpCorriente;
FSP = (0.002109515333937 * salidaC_1) + (-0.000014630350940 *
salidaC_2) + (-0.000000000000046 * salidaC_3) + (49.831214021791560 *
entradaC_1) + (50.080690300545825 * entradaC_2) + (-49.332261464283036 *
entradaC_3) + (-49.581737743037294 * entradaC_4); //Prefiltro
entradaC_4 = entradaC_3;
entradaC_3 = entradaC_2;
entradaC_2 = entradaC_1;
entradaC_1 = P / 100;
salidaC_3 = salidaC_2;
salidaC_2 = salidaC_1;

```

```

salidaC_1 = FSP;

enC = FSP - Fcorriente1;

unC = ((1.987281571590291 * unC_1) + (-0.987281571590291 * unC_2) + (-0.002738017580075 * enC_1) + (0.001275322310450 * enC_2) + (0.001469054415679 * enC)); //Controlador QFT
if (unC < 0) {
    UC = 0;
}
if (0 < unC && unC < 1) {
    UC = unC;
}
if (unC > 1) {
    UC = 1;
}
PpwmCorriente = UC * 255;
analogWrite(pinPWMCorriente, PpwmCorriente);
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

//////////////////////////////////// actualización de registros del control de
Corriente////////////////////////////////////
enC_3 = enC_2;
enC_2 = enC_1;
enC_1 = enC;
unC_2 = unC_1;
unC_1 = unC;
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// actualización de registros del control de
Temperatura////////////////////////////////////
enT_2 = enT_1;
enT_1 = enT;
unT_2 = unT_1;
unT_1 = unT;
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
interrupts();
}

void loop() {
    ////////////////////////////////// Recibimos Datos de LabView por puerto
    Serial////////////////////////////////////
    if (Serial.available() > 0) {
        if (Serial.peek() == 'A') {
            SPtemperatura = Serial.parseInt();
        }
        if (Serial.peek() == 'B') {
            SpCorriente = Serial.parseInt();
        }
        if (Serial.peek() == 'C') {
            SpVelocidadA = Serial.parseInt();
        }
    }
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

```

```

    I = get_corriente(1000); //obtenemos la corriente promedio de 1000
muestras
    TT = (((analogRead(Pt100) - 204.8) * (100 / 819.2))); // Leer
Temperatura de la PT100
    PpwmVelocidad = (SpVelocidadA / 10) * (255 / 100);
    analogWrite(pinPWMVelocidad, PpwmVelocidad); // Variacion del PWM del
Agitador

    //////////////////////////////////////Enviar Datos encapsulados a
LabView////////////////////////////////////7
    Serial.print("D");
    Serial.print((0.9939 * FPT100 + 1.4161) * 10);
    Serial.print("E");
    Serial.print("F");
    Serial.print(UT * 100 * 100);
    Serial.print("G");
    Serial.print("H");
    Serial.print(Fcorriente1 * 100);
    Serial.print("I");
    Serial.print("J");
    Serial.print(UC * 100);
    Serial.print("K");
    Serial.print("L");
    Serial.print(FVelocidad * 10);
    Serial.print("M");
    //////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

}

double get_corriente(int n_muestras)
{
    double voltajeSensor;
    double corriente = 0;
    for (int i = 0; i < n_muestras; i++)
    {
        voltajeSensor = analogRead(PINCorriente) * (5.0 / 1023.0);/////lectura
del sensor de corriente
        corriente = corriente + (voltajeSensor - 2.5) / SENSIBILITY;
//Ecuación para obtener la corriente
    }
    corriente = abs(corriente / n_muestras);
    return (corriente);
}

void Pulsos()
{
    contador++;
}

```

9.5. LÓGICA EN LABVIEW

