


| | | | | |
|---|---|---------------------|-------------------|----------|
|  | UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA | | | |
| | Documento | Código | Fecha | Revisión |
| | FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO | F-AC-DBL-007 | 08-07-2021 | B |
| | Dependencia | Aprobado | | Pág. |
| DIVISIÓN DE BIBLIOTECA | SUBDIRECTOR ACADEMICO | | 1(62) | |

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

| | | | |
|--|--|-------------------|-----------|
| AUTOR | Cesar Dámaso Rodríguez Monterroza | | |
| FACULTAD | Ingeniería | | |
| PLAN DE ESTUDIOS | Ingeniería Mecánica | | |
| DIRECTOR | MSc. Fernando Jesús Regino Ubarnes | | |
| TÍTULO DE LA TESIS | Diseño de una estrategia de control moderna proporcional integral generalizado para regular la temperatura de proceso de fundición de aluminio en el laboratorio de la Universidad Francisco de paula Santander Ocaña. | | |
| TITULO EN INGLES | Design of a generalized integral proportional modern control strategy to regulate the temperature of the aluminum smelting process in the laboratory of Universidad Francisco De Paula Santander sectional Ocaña | | |
| RESUMEN | | | |
| <p>El propósito principal de este estudio es mejorar la precisión y eficiencia del control de temperatura en el proceso de fundición de aluminio. Para lograr esto, se utiliza una estrategia de control moderna llamada "proporcional integral generalizado", que combina elementos de control proporcional e integral con ajustes específicos para adaptarse mejor a las características del proceso de fundición. Asimismo, se aplican los principios teóricos de control en un entorno práctico y mejorar la eficiencia de la fundición de aluminio. Al implementar esta estrategia de control moderna, se logra una regulación más precisa de la temperatura del proceso, lo que a su vez podría llevar a una mejora en la calidad de los productos finales y a una mayor eficiencia en el uso de recursos.</p> | | | |
| RESUMEN EN INGLES | | | |
| <p>The main purpose of this study is to enhance the precision and efficiency of temperature control in the aluminum smelting process. To achieve this, a modern control strategy called "generalized proportional integral" is employed, which combines proportional and integral control elements with specific adjustments to better suit the characteristics of the smelting process. Additionally, theoretical control principles are applied in a practical setting to enhance aluminum smelting efficiency. By implementing this modern control strategy, more precise regulation of the process temperature is achieved, potentially leading to improved quality of final products and greater resource efficiency.</p> | | | |
| PALABRAS CLAVES | Estrategia de control, fundición de aluminio, control moderno, PI, control de temperatura. | | |
| PALABRAS CLAVES EN INGLES | Control strategy, aluminum casting, modern control, PI, temperature control. | | |
| CARACTERÍSTICAS | | | |
| PÁGINAS: 61 | PLANOS: 0 | ILUSTRACIONES: 17 | CD-ROM: 0 |



**Diseño de una estrategia de control moderna proporcional integral generalizado
para regular la temperatura de proceso de fundición de aluminio en el laboratorio de la
Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña**

Cesar Dámaso Rodríguez Monterroza

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Especialización en Automatización Industrial

MSc. Fernando Jesús Regino Ubarnes

25 de agosto de 2023

Índice

| | Pág. |
|--|-----------|
| Capítulo 1. Diseño de una estrategia de control moderna proporcional integral generalizado para regular la temperatura de proceso de fundición de aluminio en el laboratorio de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña | 8 |
| 1.1. Planteamiento del problema..... | 8 |
| 1.2. Formulación del problema | 9 |
| 1.2.1 Objetivos | 9 |
| 1.2.2 Objetivo general | 9 |
| 1.2.3 Objetivos específicos | 9 |
| 1.3 Justificación | 10 |
| 1.4 Delimitaciones..... | 11 |
| 1.4.1 Delimitación Operativa | 11 |
| 1.4.2 Delimitación Conceptual | 11 |
| 1.4.3 Delimitación Geográfica..... | 11 |
| 1.4.4 Delimitación Temporal..... | 11 |
| 2 Capítulo 2. Marco referencial..... | 12 |
| 2.2 Marco histórico..... | 12 |
| 2.2.1 Antecedentes a nivel internacional | 12 |

| | |
|--|----|
| 2.1.2. Antecedentes a nivel nacional. | 13 |
| 2.1.3. Antecedentes de las condiciones socioculturales del personal que labora en el sector de la construcción a nivel regional. | 13 |
| 2.1. Marco contextual..... | 14 |
| 2.3. Marco teórico..... | 18 |
| 2.3.1 Modelado matemáticos de sistemas de control | 18 |
| 2.3.2 Sistemas de control automáticos..... | 18 |
| 2.3.3 Clasificación de los controladores industriales | 19 |
| 2.3.4 Controladores PID | 23 |
| 2.3.5 La teoría de control moderna | 24 |
| 2.3.6 Fundición del Aluminio | 27 |
| 2.4. Marco legal..... | 30 |
| 2.4.1 Normas Internacionales..... | 31 |
| 3. Capítulo 3. Diseño metodológico | 32 |
| 3.1. Tipo de investigación..... | 32 |
| 3.1.1. Etapas del proyecto..... | 32 |
| 3.2. Población y muestra | 33 |
| 3.2.1. Población..... | 33 |
| 3.2.1. Muestra | 33 |

| | |
|---|--------------------------------------|
| 3.3. Diseño de instrumentos de recolección de la información y técnicas de análisis de datos | 34 |
| 3.3.1. Fuentes primarias | 34 |
| 3.3.1. Fuentes secundarias | 34 |
| 3.4. Análisis de información | 34 |
| 4. Capítulo 4. Resultados | 35 |
| 5. Capítulo 5. Conclusiones | 50 |
| Referencias..... | 51 |
| Apéndice..... | ¡Error! Marcador no definido. |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 Elementos de un diagrama de bloques | 19 |
| Figura 2 Procesos de transferencia de calor por convección | 27 |
| Figura 3 Gráfica del tratamiento térmico del aluminio..... | 30 |
| Figura 4 Documentos publicados por año | 36 |
| Figura 5 Documentos publicados en los ultimos 5 años..... | 36 |
| Figura 6 Distribución de publicaciones por tematicas..... | 37 |
| Figura 7 Gráfica del proceso de fundición del aluminio..... | 38 |
| Figura 8 Gráfica del instrumento virtual para la toma de datos..... | 39 |
| Figura 9 Gráfica de los datos de temperatura del proceso | 40 |
| Figura 10 Gráfica del modelo aproximado arrojado por Matlab PIDtuner | 41 |
| Figura 11 Gráfica de la respuesta al paso del sistema | 42 |
| Figura 12 Busqueda de Sistema medicos..... | 43 |
| Figura 13 Documentos publicados desde el 2010..... | 43 |
| Figura 14 Gráfica | 44 |
| Figura 15 Gráfica | 47 |
| Figura 16 Gráfica | 48 |
| Figura 17 Gráfica | 48 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1 Cronograma del proyecto medido en semanas | 55 |
| Tabla 2 Recursos humanos del proyecto | 56 |
| Tabla 3 Recursos financieros del proyecto | 57 |

Lista de apéndice

| | |
|------------------|----|
| Apéndice A | 54 |
| Apéndice B..... | 59 |

Capítulo 1. Diseño de una estrategia de control moderna proporcional integral generalizado para regular la temperatura de proceso de fundición de aluminio en el laboratorio de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

1.1. Planteamiento del problema

A través de los años las distintas revoluciones industriales a nivel mundial, han presentado con sus avances mayor demanda de materiales y energía, además de traer consigo nuevos avances tecnológicos siendo estos quienes las impulsan. Es aquí cuando se vuelve necesario optimizar y controlar los procesos con la finalidad de cumplir con las necesidades mundiales, lo cual actualmente nos lleva también a ser responsables con el medio ambiente. Como industrias, el sector de manufactura no es ajeno a estos avances, este ha logrado la mejora de sus procesos involucrando ciertos factores como calidad, tiempo y recursos (Yang et al., 2021). El proceso de fundición de aluminio no es ajeno a estos avances, debido a que este proceso de manufactura es importante para numerosas aplicaciones industriales. Esta importancia se ve reflejada en el incremento de los requisitos de calidad en las industrias de aluminio, demandando un control estable del proceso desde su inicio y durante su procesamiento (Riedel et al., 2021). Actualmente la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña (UFPSO), cuenta con un laboratorio de fundición de aluminio, en el cual los alumnos de pregrado de Ingeniería Mecánica realizan prácticas académicas utilizando un horno crisol que utiliza aceite combustible para motor (ACPM) como combustible para fundir. Este proceso se realiza de forma completamente manual, y el éxito de este depende de la experticia del docente para la operación del horno.

Ejecutar este proceso de forma manual genera pérdidas de tiempo y recursos ya que no se tiene control de la temperatura alcanzada para la fundición del material. Por eso se hace necesario proponer una solución que emigre este control manual rudimentario que se tiene hasta el momento hacia un control automatizado, que regule la temperatura del proceso y esté acorde con los avances de la industria. Es en este contexto surgen la llamada teoría de control moderna que abarca una gran cantidad de técnicas de carácter matemático que van desde las variables de estado, métodos estocásticos, soluciones algebraicas entre otros (*Teoría moderna, s/f*).

1.2. Formulación del problema

2. ¿De qué forma se puede controlar la temperatura de fundición en un horno de crisol para mantenerla en un rango deseado utilizando una estrategia de control moderna?

1.2.1 Objetivos

1.2.2 Objetivo general

Diseñar una estrategia de control moderna proporcional integral generalizado para regular la temperatura de proceso de fundición de aluminio en el laboratorio de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

1.2.3 Objetivos específicos

Identificar cada una de las variables del proceso de fundición a través de revisiones bibliográficas y pruebas de campo para definir un modelo aproximado del sistema.

Diseñar una estrategia de control proporcional integral generalizado a través de métodos algebraicos que permita regular la temperatura del horno de crisol.

Comprobar la robustez de la estrategia de control a través de pruebas de variación de parámetros para verificar el buen funcionamiento del sistema.

1.3 Justificación

Es de suma importancia en la industria tener el control de los procesos con la finalidad de mitigar las variaciones y así evitar que estos salgan de su respectivo punto de operación, lo cual ha llevado a desarrollar distintos sistemas de control para los procesos industriales. Estos controladores se encargan de mantener un proceso en un estado de trabajo estable, por así decir en un rango óptimo, cuando en la ejecución del proceso se presenten variaciones controladas o aleatorias el sistema por medio de una función de transferencia y los parámetros de sintonización del controlador se encargará de regresar el sistema a su respectivo punto de operación. (Jiménez-Ceciliano, 2014)

Dada la problemática presentada para llevar a cabo el proceso de fundición de aluminio, es menester controlar automáticamente este tipo de procesos para así reducir la intervención directa con el horno del operario, el cual es el encargado del monitoreo del proceso y el apagado final en directo contacto con el horno. en caso dado de llegarse a implementar este sistema, se podrá controlar la temperatura del horno mediante el flujo del combustible, lo cual garantizará que siempre se mantenga en el punto de fusión deseado. Además, la comunidad académica se acercará a escenarios más reales de la industria, permitiendo incluso que los estudiantes tengan la

oportunidad de ejecutar el proceso de fundición y a su vez conseguimos la mejorar el rendimiento de recursos utilizados durante el proceso

1.4 Delimitaciones

1.4.1 Delimitación Operativa

Este proyecto se va ejecutar en el laboratorio de automatización las asesorías requeridas se solicitarán a los tutores con conocimiento en el área.

1.4.2 Delimitación Conceptual

En este proyecto se abordarán los conceptos de fundición de aluminio, automatización, control y sintonización PID, temperatura, caudal, sensor, instrumento virtual, función de transferencia, control por lazo cerrado, retroalimentación.

1.4.3 Delimitación Geográfica

El desarrollo del se llevará a cabo en el municipio de Ocaña, Norte de Santander, en las instalaciones de la Universidad Francisco de Paula Santander - Ocaña.

1.4.4 Delimitación Temporal

El periodo estimado para la realización de este proyecto es de 4 meses.

2 Capítulo 2. Marco referencial

2.2 Marco histórico

En la realización de este proyecto se contemplan algunas publicaciones anteriores que nos permiten conocer el avance de la temática a desarrollar, las cuales han sido una gran contribución para el desarrollo de esta área de estudio. A continuación, se hará mención de algunos autores que enfocaron sus investigaciones hacia esta problemática.

2.2.1 Antecedentes a nivel internacional

Durante el desarrollo y estructuración de este proyecto se realizó una amplia búsqueda de artículos y proyectos relacionados en bases de datos, y se identificaron los siguientes.

En Brasil en el 2014 se desarrolló un control por realimentación de estados, el cual se tituló Control óptimo de retroalimentación de estado de datos muestreados de sistemas lineales, realizado por Matheus Souza, Gabriela GT Vital, José C. Geromel, en la Universidad de Campinas.

En Ecuador para el 2020, se realizó el proyecto Diseño de estructura de control de optimización automática en combustión de lecho fluidizado circulante de oxcombustible, desarrollado por Laura Niva, Enso Ikonen, Jenö Kovacs, para la Revista internacional de control de gases de efecto invernadero.

Automatización de un horno para fundición de aluminio y cobre, realizado por Gabriel Vaca y Carlos Corrales de Ecuador, para la revista de investigación científica TSE'DE, 2021.

2.1.2. Antecedentes a nivel nacional.

En la búsqueda de antecedentes nacionales la información recolectada fue verdaderamente escasa en este tipo de estudio en específico, pero se encontraron similares, es decir, documentación relacionada con el control a nuestra variable de interés.

Sintonización de un controlador de temperatura a través de un autómata programable, artículo realizado por Daniel Cera, Jesús Ortiz y Oscar Gualdrón de la Universidad de Pamplona para la revista de investigación, desarrollo e innovación, 2018.

Control PID de temperatura y dosificación de PH para la producción de gas metano a partir de la digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos, artículo desarrollado por Brayhan Criollo, Jose David Alvarado y Humberto Numpaque de la Universidad de Cundinamarca para la revista colombiana de tecnologías de avanzada, 2014.

2.1.3. Antecedentes de las condiciones socioculturales del personal que labora en el sector de la construcción a nivel regional.

En la revisión de la documentación de la universidad se encuentra una tesis de pregrado del año 2017 enfocada hacia esta área de estudio, no se encontró alguna otra documentación relacionada.

Diseño de un sistema automático para el accionamiento del horno de crisol y colado centrifugo vertical para el taller de fundición de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

2.1. Marco contextual

El desarrollo de este proyecto se realizará en las instalaciones de la sede La Primavera de la Universidad Francisco de Paula Santander, seccional Ocaña, centrándose en el laboratorio de fundición de aluminio de ingeniería mecánica.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Teoría de control moderna

La teoría de control moderna involucra muchos campos de investigación con un conjunto de métodos rigurosos de análisis y síntesis. En la teoría de sistemas de control, el análisis de estabilidad es la base de casi todos los enfoques. Teniendo en cuenta las incertidumbres del sistema, la llamada estabilidad robusta es también un tema de investigación candente en los últimos veinte años. Los conceptos de estabilidad asintótica, estabilidad asintótica uniforme global, estabilidad estocástica, etc. suelen apuntar a los puntos de equilibrio de los sistemas dinámicos. La profundidad y amplitud de sus desarrollos teóricos van mucho más allá de resolver problemas específicos de ciertos sistemas de control. Como condición suficiente, La estabilidad de Lyapunov es un enfoque simple y directo para abordar el problema del análisis de estabilidad eligiendo o construyendo correctamente una función de Lyapunov.

Sin embargo, desde el punto de vista de la ingeniería, inevitablemente introduce un carácter conservador hasta cierto punto. Por lo tanto, muchos esfuerzos de investigación se dedican al problema de reducción del conservadurismo, por ejemplo, diseñar LF dependiente de parámetros, discutir la condición de necesidad, etc. Algunos de estos enfoques redujeron con

éxito el conservadurismo hasta cierto punto; otros enfoques obtuvieron los resultados del análisis, pero trajeron serias dificultades a la síntesis del controlador. Sin embargo, ninguno de estos enfoques resolvió fundamentalmente todos los problemas de análisis y síntesis de los sistemas controlados. En general, se cree que, si no se rompe el marco de estabilidad de Lyapunov basado en el punto de equilibrio, la búsqueda excesiva de las condiciones necesarias eliminará gradualmente la investigación del trasfondo de la ingeniería. De hecho, muchos problemas de ingeniería solo pueden resolverse con condiciones suficientes.

Aluminio: El aluminio es liviano, dúctil, tiene buena conductividad eléctrica y térmica y puede hacerse resistente mediante aleación. Una propiedad química ventajosa del aluminio es su reactividad con el oxígeno, lo que conduce a la formación de una capa densa de Al_2O_3 en la superficie que protege al metal base de una mayor interacción ambiental. (Starke, 2001)

Automatización: La automatización es el proceso de reducción de la intervención de la mano de obra humana en la ejecución de una tarea o labor. (Wall, 2017)

Caudal: Es el volumen del flujo de fluido que pasa por una sección por unidad de tiempo. (Mott, 1996)

Combustible: Sustancia o materia que al combinarse con oxígeno es capaz de reaccionar desprendiendo calor, especialmente las que se aprovechan para producir calor. (Oxford Languages, 2022)

Controlar: significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto del valor deseado. (Ogata, 2010)

Controladores automáticos: Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina acción de control. (Ogata, 2010)

Control realimentado: El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia. Aquí sólo se especifican con este término las perturbaciones impredecibles, ya que las perturbaciones predecibles o conocidas siempre pueden compensarse dentro del sistema. (Ogata, 2010)

Fundición: Proceso también conocido como esmelter para fabricación de piezas metálicas, mediante el cual se vierte metal en forma líquida o se le fuerza para que fluya en una cavidad llamada molde, donde se enfría hasta la solidificación, con lo que adopta la forma del molde. (Manosalva Rincón & Herrera Alvarez, 2017)

Horno Crisol: Mantiene el calor encerrado para realizar la fundición de aluminio, posee una alta potencia de fusión ya que evacua los gases a través del crisol. Está compuesto por materiales de aislamiento que permite ahorrar consumo de energía y soporta un rango de temperatura de 30 a 1000 °C. (Quiroga et al., 2020)

MATLAB: MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada por millones de ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. (MathWorks, 2022a)

Sensor: es un dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, como un desplazamiento, una presión o un voltaje, que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada de referencia. (Ogata, 2010)

Simulink: Simulink es un entorno de diagramas de bloque que se utiliza para diseñar sistemas con modelos multidominio, simular antes de implementar en hardware y desplegar sin necesidad de escribir código. (MathWorks, 2022b)

Temperatura: Aun cuando estamos familiarizados con la temperatura como una medida del “calor” y el “frío”, no es fácil ofrecer una definición exacta de este concepto. Con base en nuestras sensaciones fisiológicas, se expresa el nivel de temperatura de modo cualitativo con palabras como *frío helador*, *frío*, *tibio*, *caliente* y *al rojo vivo*; sin embargo, no es posible asignar valores numéricos a temperaturas basándose únicamente en las sensaciones. (Çengel & Boles, 2014)

Termocupla: La termocupla es un sensor que permite la medición de la temperatura, está formado de dos cables acoplados de diferentes materiales, los cuales al estar expuestos a la temperatura producen una pequeña variación del voltaje. (Quiroga et al., 2020)

Termocupla tipo K: Se usan en aplicaciones industriales como fundición de metales: aluminio, cobre, plata, ya que permite la medición de temperaturas elevadas de los hornos, su rango de medición es de 0 a 1300° C. (Quiroga et al., 2020)

2.3. Marco teórico

2.3.1 Modelado matemáticos de sistemas de control

Los modelos matemáticos pueden adoptar muchas formas distintas. Dependiendo del sistema del que se trate y de las circunstancias específicas, un modelo matemático puede ser más conveniente que otros. Por ejemplo, en problemas de control es provechoso usar representaciones en el espacio de estados. En cambio, para los análisis de la respuesta transitoria o de la respuesta en frecuencia de sistemas lineales con una entrada y una salida invariantes en el tiempo, la representación mediante la función de transferencia puede ser más conveniente que cualquier otra. Una vez obtenido un modelo matemático de un sistema, se usan diversos recursos analíticos, así como computadoras para estudiarlo y sintetizarlo.

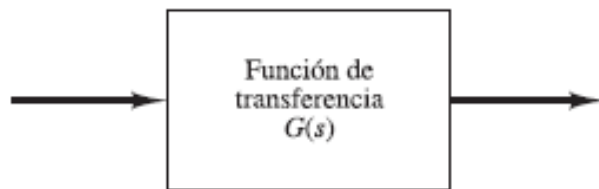
2.3.2 Sistemas de control automáticos

Los regímenes de flujo multifásico pueden clasificarse en cuatro categorías como se muestra a continuación en la figura 1.

Un sistema de control puede tener varios componentes. Para mostrar las funciones de cada componente en la ingeniería de control, por lo general se usa una representación denominada *diagrama de bloques*.

Un diagrama de bloques de un sistema es una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente y el flujo de señales. Tales diagramas muestran las relaciones existentes entre los diversos componentes. A diferencia de una representación matemática puramente abstracta, un diagrama de bloques tiene la ventaja de indicar de forma más realista el flujo de La Figura 1 muestra un elemento del diagrama de bloques. La punta de flecha que señala el bloque indica la entrada, y la punta de flecha que se aleja del bloque representa la salida. Tales flechas se conocen como *señales*. las señales del sistema real.

Figura 1
Elementos de un diagrama de bloques



Nota. Datos tomados de (Ogata, 2010)

2.3.3 Clasificación de los controladores industriales

Los controladores industriales se clasifican, de acuerdo con sus acciones de control, como:

1. De dos posiciones o controladores on-off
2. Controladores proporcionales
3. Controladores integrales

4. Controladores proporcionales-integrales
5. Controladores proporcionales-derivativos
6. Controladores proporcionales-integrales-derivativos

Acción de control de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off): En un sistema de control de dos posiciones, el elemento de actuación sólo tiene dos posiciones fijas, que, en muchos casos, son simplemente encendido y apagado. El control de dos posiciones o de encendido y apagado es relativamente simple y barato, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Acción de control proporcional. Para un controlador con acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$u(t) = K_p e(t) \quad Ec. (2.1)$$

o bien, en cantidades transformadas por el método de Laplace,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad Ec (2.2)$$

donde K_p se considera la ganancia proporcional.

Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de operación, el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con una ganancia ajustable.

Acción de control integral. En un controlador con acción de control integral, el valor de la salida del controlador $u(t)$ se cambia a una razón proporcional a la señal de error $e(t)$.

Es decir,

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \text{ Ec. (2.3)}$$

O bien

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \text{ Ec. (2.4)}$$

donde K_i es una constante ajustable. La función de transferencia del controlador integral es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \text{ Ec. (2.5)}$$

Acción de control proporcional-integral. La acción de control de un controlador proporcional-integral (PI) se define mediante

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ec. (2.6)}$$

o la función de transferencia del controlador es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{Ec. (2.7)}$$

donde T_i se denomina *tiempo integral*.

Acción de control proporcional-derivativa. La acción de control de un controlador proporcional-derivativa (PD) se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ec. (2.8)}$$

y la función de transferencia es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad \text{Ec. (2.9)}$$

donde T_d es el tiempo derivativo

Acción de control proporcional-integral-derivativa. La combinación de la acción de control proporcional, la acción de control integral y la acción de control derivativa se denomina acción de control proporcional-integral-derivativa. Esta acción combinada tiene las ventajas de

cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada está dada por

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad Ec. (2.10)$$

o la función de transferencia es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right) \quad Ec. (2.11)$$

donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo.

2.3.4 Controladores PID

Actualmente se usan en la industria formas modificadas del control PID, tales como el control I-PD y el control PID con dos grados de libertad. Es posible obtener muchos métodos prácticos para una conmutación sin choque (desde la operación manual hasta la operación automática) y una programación del aumento.

La utilidad de los controles PID estriba en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control. En particular, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y, por lo tanto, no se pueden emplear métodos de diseño analíticos, es cuando los controles PID resultan más útiles. En el campo de los sistemas para control de procesos, es un hecho bien conocido que los esquemas de control PID básicos y modificados han demostrado su

utilidad para aportar un control satisfactorio, aunque tal vez en muchas situaciones específicas no aporten un control óptimo.

2.3.5 La teoría de control moderna

Esta involucra muchos campos de investigación con un conjunto de métodos rigurosos de análisis y síntesis. En la teoría de sistemas de control, el análisis de estabilidad es la base de casi todos los enfoques. Teniendo en cuenta las incertidumbres del sistema, la llamada estabilidad robusta es también un tema de investigación de mucho interés en los últimos veinte años. Los conceptos de estabilidad asintótica, estabilidad asintótica uniforme global (GUAS), estabilidad estocástica, entre otros, suelen apuntar a los puntos de equilibrio de los sistemas dinámicos. La profundidad y amplitud de sus desarrollos teóricos van mucho más allá de resolver problemas específicos de ciertos sistemas de control (Azarskov et al., 2013).

Una característica destacada de la teoría de control moderna es la adopción de un modelo de espacio de estados, que utiliza un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden en la descripción de la dinámica de entrada-salida del sistema. Los estados de una planta pueden ser sus variables físicas reales o algunas de sus combinaciones lineales. Por lo general, no todos estos estados se pueden manipular y/o medir directamente. Por lo tanto, una cuestión esencial es si es posible maniobrar el estado de una planta a un valor deseable usando entradas factibles y estimar un estado de la planta a través de mediciones de variables accesibles. El primero suele llamarse controlabilidad de la planta, mientras que el segundo su observabilidad (Zhirabok & Shumsky, 2010).

La controlabilidad y la observabilidad son formuladas e investigadas principalmente por Kalman en su búsqueda de análisis y síntesis de sistemas utilizando un modelo de espacio de estado. A través de extensas actividades de muchos investigadores, se han obtenido varios resultados para la verificación de la controlabilidad y observabilidad de un sistema.

Originalmente, este problema se investiga para un sistema dinámico lineal sin restricciones en las entradas, estados y salidas de la planta. Posteriormente, estos resultados se extienden a situaciones más prácticas en las que las entradas y/o estados y/o salidas de la planta se restringen a algunos conjuntos prescritos y a sistemas dinámicos no lineales con la ayuda de paréntesis de Lie y álgebras de Lie. También existen estudios sobre las relaciones entre la controlabilidad/observabilidad de un sistema y su estructura, que suelen denominarse controlabilidad estructural y observabilidad estructural, respectivamente. En lugar de los parámetros del sistema.

2.1.3. Transferencia de calor

La transferencia de calor (o calor) es energía térmica en tránsito debido a una diferencia de temperatura espacial. Existen diferentes formas para la transferencia del calor, estas son: conducción, convección y radiación.

Conducción

La conducción puede ser vista como la transferencia de energía de la más energética a las menos partículas energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las partículas. (Incropera & Dewitt, 2011)

Convección

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debido al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se transfiere por el movimiento masivo o macroscópico del fluido. Este movimiento fluido está asociado con el hecho de que, en cualquier instante, un gran número de moléculas se mueven colectivamente o como agregados. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Debido a que las moléculas en el agregado retienen su movimiento aleatorio, la transferencia de calor total se debe a una superposición del transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y por el movimiento general del fluido.

La transferencia de calor por convección se puede clasificar según la naturaleza del flujo como se observa en la figura 10.

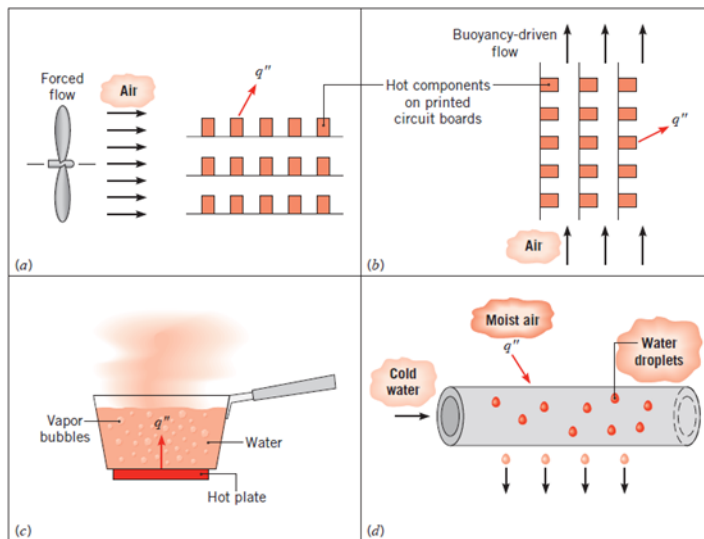
Hablamos de convección forzada cuando el flujo es provocado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos.

Por el contrario, para la convección libre (o natural), el flujo es inducido por fuerzas de flotabilidad, que se deben a diferencias de densidad causadas por variaciones de temperatura en el fluido.

Hemos descrito el modo de transferencia de calor por convección como la transferencia de energía que ocurre dentro de un fluido debido a los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido a granel. Normalmente, la energía que se transfiere es la energía sensible o térmica interna del fluido. Sin embargo, para algunos procesos de convección, existe además un intercambio de calor latente. Este intercambio de calor latente generalmente está asociado con

un cambio de fase entre los estados líquido y vapor del fluido. Dos casos especiales de interés son la ebullición y la condensación.

Figura 2
Procesos de transferencia de calor por convección



Nota: a) convección forzada, b) convección natural, c) ebullición, d) condensación. (Incropera & Dewitt, 2011)

2.3.6 Fundición del Aluminio

El aluminio es un elemento químico, de símbolo Al y número atómico 13. El Aluminio es un metal no ferroso. Es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales.

En estado natural se encuentra en muchos silicatos (feldespatos, plagioclasas y micas). Como metal se extrae del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación

primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio mediante electrólisis.

Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad (2700 kg/m^3) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Es buen conductor de la electricidad, se mecaniza con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello es el metal que más se utiliza después del acero.

Fue aislado por primera vez en 1825 por el físico danés H. C. Oersted. El principal inconveniente para su obtención reside en la elevada cantidad de energía eléctrica que requiere su producción. Este problema se compensa por su bajo coste de reciclado, su dilatada vida útil y la estabilidad de su precio. (Pando & Zapatán, 2012)

Características físicas:

- Es un metal ligero, cuya densidad o peso específico es de 2700 kg/m^3 (2,7 veces la densidad del agua).
- Tiene un punto de fusión bajo: 660°C (933 K).
- El peso atómico del aluminio es de 26,9815.
- Es de color blanco brillante.
- Límite de resistencia en tracción: 160-200 N/mm² [160-200 MPa] en estado puro, en estado aleado el rango es de 1400-6000 N/mm².
- Material que forma aleaciones con otros metales para mejorar las propiedades mecánicas.

- Permite la fabricación de piezas por fundición, forja y extrusión.
- Material soldable.

Características químicas:

Estructura atómica del aluminio.

- Debido a su elevado estado de oxidación se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido de aluminio (Alúmina Al_2O_3) impermeable y adherente que detiene el proceso de oxidación, lo que le proporciona resistencia a la corrosión y durabilidad. Esta capa protectora, de color gris mate, puede ser ampliada por electrólisis en presencia de oxalatos.
- El aluminio tiene características anfóteras. Esto significa que se disuelve tanto en ácidos (formando sales de aluminio) como en bases fuertes (formando aluminatos con el anión $[Al(OH)_4]^-$) liberando hidrógeno.
- La capa de óxido formada sobre el aluminio se puede disolver en ácido cítrico formando citrato de aluminio.
- El principal y casi único estado de oxidación del aluminio es + III como es de esperar por sus tres electrones en la capa de valencia.

2.3.6.1 Etapas de fundición del aluminio. A continuación, se mencionan las etapas para la fundición del aluminio.

Calentamiento

En el caso específico, el aluminio debe elevar su temperatura de manera homogénea, hasta alcanzar su punto de fusión ($660\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Permanencia

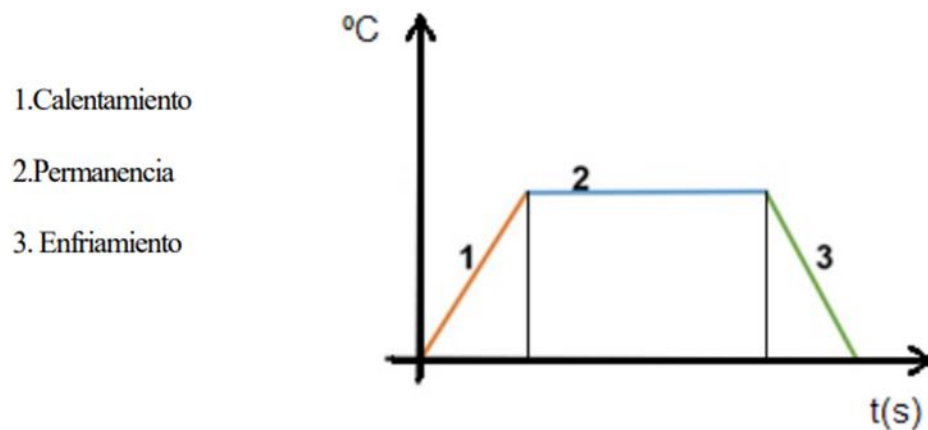
Es el proceso en el cual se tiene que mantener el material a una temperatura constante para llegar a la fundición completa del aluminio.

Enfriamiento

Es el proceso en el cual se tiene que mantener el material a una temperatura del aluminio y regresa a su estado sólido, en la figura 11 se muestra.

Figura 3

Gráfica del tratamiento térmico del aluminio



Nota: Etapas del tratamiento térmico, temperatura vs tiempo. (Quiroga et al., 2020)

2.4. Marco legal

2.4.1 Normas Internacionales

Para la ejecución de este proyecto se tienen en cuenta las siguientes normas:

-ANSI/ISA: El propósito de esta norma es establecer un medio uniforme de designación los instrumentos y los sistemas de la instrumentación usados para la medición y control.

-ASTM: Son un conjunto de normas que ayudan a construir infraestructuras para industrias competitivas y seguras, y se incorporan a contratos, códigos, leyes y reglamentos de todo el mundo.

Para el control PID:

- ANSI/ISA – S5.1 (Identificación y símbolos de instrumentación)
- ISA-S5.3 (Símbolos gráficos para control distribuido, sistemas lógicos y computarizados)
- ANSI/ISA-S5.4 (Diagramas de lazo de instrumentación)
- ANSI/ISA-S5.5(Símbolos gráficos para visualización de procesos)

Para la fundición del aluminio:

- ASTM B316 Grade 7075 T6 (ASTM 7075 es una aleación de alta resistencia que ofrece buena resistencia al agrietamiento por tensión y corrosión.)

3. Capítulo 3. Diseño metodológico

Para la realización del proyecto se implementa una metodología cuantitativa; pues el proyecto se basa en la obtención de datos medibles, cuantificables y modelables matemáticamente.

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación tiene un enfoque de tipo descriptivo. El proyecto está dividido en tres fases cada una corresponde al desarrollo de cada uno de los objetivos específicos, el alcanzar cada uno de estos lleva como fin la realización del objetivo general y por ende el desarrollo total del proyecto

3.1.1. *Etapas del proyecto*

3.1.4.1. Fase I. Identificar cada una de las variables del proceso de fundición para definir un modelo aproximado del sistema a través de revisiones bibliográficas y pruebas de campo.

Actividad 1. Realizar una revisión bibliográfica de documentos académicos, que permitan establecer las variables del proceso de fundición.

3.1.4.1.1. Actividad 2. Describir cada una de las etapas del proceso de fundición.

3.1.4.2. Fase II. Diseñar una estrategia de control proporcional integral generalizado que permita regular la temperatura del horno de crisol, a través de métodos algebraicos.

3.1.4.2.1. Actividad 1. Realizar una búsqueda avanzada acerca de la aplicación en sistemas térmicos.

3.1.4.2.2. Actividad 2. Identificar los márgenes de ganancia y de fase mediante un diagrama de bode.

3.1.4.2.3. Actividad 3. Diseñar una estrategia de control moderna que lleve el error asintóticamente a cero.

Fase III. Comprobar la robustez de la estrategia de control para verificar el buen funcionamiento del sistema, a través de pruebas de variación de parámetros.

3.1.4.2.4. Actividad 1. Aplicar el modelo de control diseñado.

3.1.4.2.5. Actividad 2. Realizar pruebas de variación de parámetros.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

Para el desarrollo de este proyecto el estudio contempla una población finita y accesible, siendo esta los controladores basados en variables de estado y los parámetros para la fundición de aluminio.

3.2.1. Muestra

Para la definición de la muestra se toman como referencia las bases de datos teniendo en cuenta todos los estudios realizados acerca de la población de interés del proyecto en cuestión.

3.3. Diseño de instrumentos de recolección de la información y técnicas de análisis de datos

3.3.1. Fuentes primarias

El proyecto de investigación cuenta con datos experimentales propios obtenidos en el laboratorio de fundición para el análisis y desarrollo del modelo matemático.

3.3.1. Fuentes secundarias

Se identifica como fuentes secundarias a toda la información relacionada con proyectos y tesis semejantes a nuestro tema de investigación, para la implementación del mismo.

3.4. Análisis de información

Luego de la obtención de la información requerida, los datos serán procesados mediante herramientas computacionales necesarias para el análisis, desarrollo e implementación de este proyecto.

4. Capítulo 4. Resultados

Para diseñar la estrategia de control moderna en la regulación de la temperatura dentro del proceso de fundición de aluminio en el laboratorio de fundición de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, se han desarrollado las siguientes etapas:

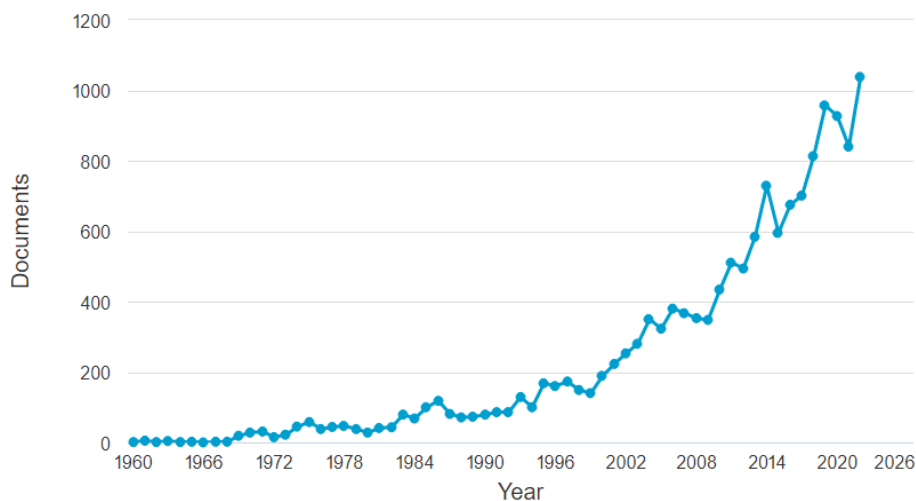
4.1 Identificación de variables en el proceso de fundición

El reconocimiento de las variables involucradas dentro del proceso de fundición se realiza para el establecimiento de un modelo aproximado del sistema a través de revisiones bibliográficas y pruebas de campo. La identificación de las variables se llevó a cabo mediante las siguientes actividades

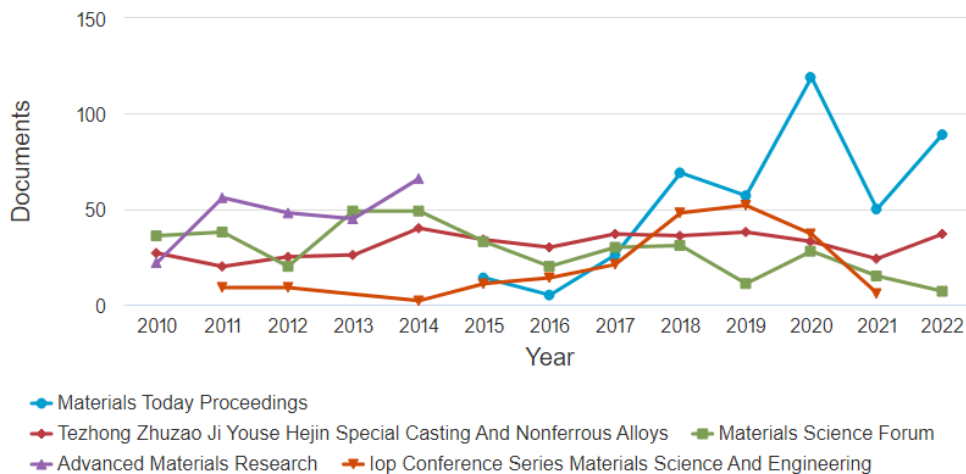
4.1.1 Revisión bibliográfica

La búsqueda de información fue apoyada en Scopus, una base de datos indexada y disponible en la UFPSO. Fueron analizados distintos textos (artículos) publicados desde el año 1960 hasta 2020, con el fin de identificar las partes y las variables del proceso.

En la Figura 4 se muestran los documentos por año, de lo cual se expresa que, aun siendo el proceso de fundición del aluminio una técnica ejecutada por más de un siglo, sólo a partir del año 2002 se aprecia el interés por investigar dicho proceso.

Figura 4*Documentos publicados por año*

Del mismo modo, se indaga sobre las revistas científicas que han publicado documentos en los últimos cinco años, en relación con el proceso de fundición del aluminio. La revista indexada *Materials Today Proceedings* resulta ser la mayor contribuyente con el tema de investigación, registrando 384 publicaciones en los últimos 5 años, tal como puede verse en la Figura 5.

Figura 5*Documentos por revista publicados en los últimos 5 años*

Gracias a la revisión bibliográfica, se logró identificar que algunos de los parámetros clave relacionados con el proceso de fundición son la temperatura de fusión y la temperatura del molde; también se encontró que una velocidad de enfriamiento más rápida puede generar estructuras más finas y una mayor dureza, pero también puede provocar tensiones internas y defectos en la fundición. Asimismo, el diseño del sistema de alimentación es esencial para evitar defectos como las porosidades y las inclusiones.

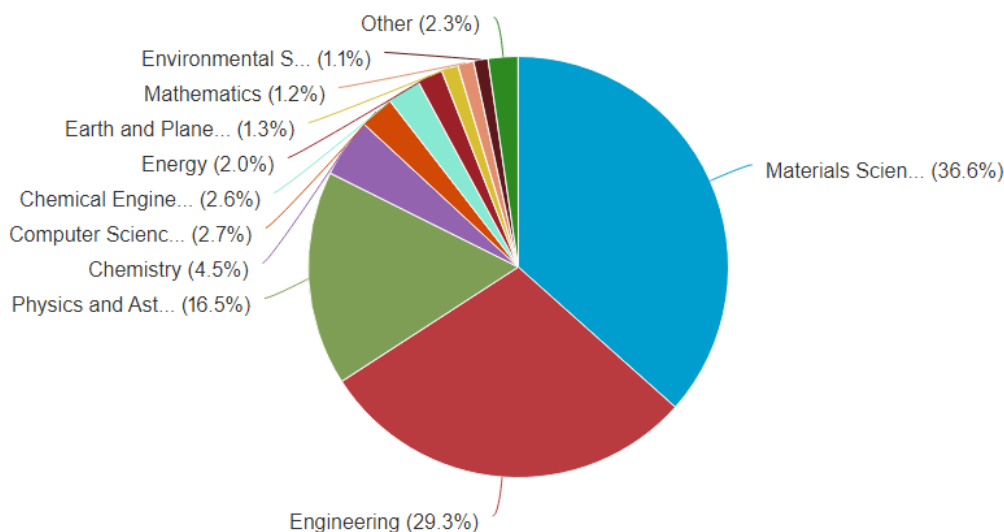
Por otro lado, la elección de la aleación y los aditivos utilizados en la fundición puede afectar las propiedades finales de la pieza de fundición. Los aditivos pueden mejorar la fluidez, reducir la porosidad, mejorar la resistencia o modificar otras características del material fundido.

Otro dato interesante, es la distribución de las publicaciones por áreas temáticas, siendo ciencia de los materiales la que presenta la mayoría de artículos publicados, seguida de ingeniería, física y astronomía como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Distribución de publicaciones por tematicas

Documents by subject area

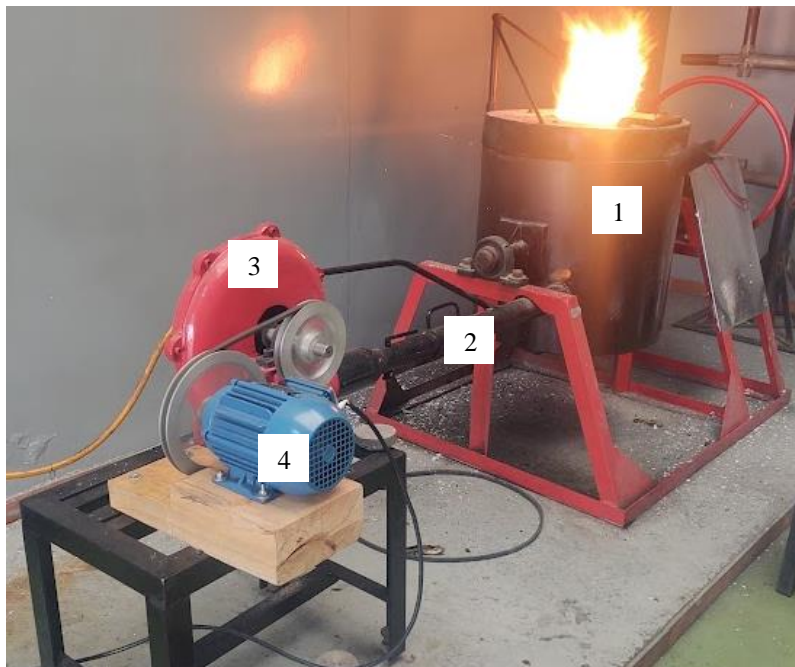


4.1.2 Descripción de las etapas del proceso de fundición.

En la Figura 7 se muestran los elementos que intervienen en el proceso de fundición del aluminio, el cual consta de un horno cilíndrico de crisol conectado a una toma por donde ingresa la mezcla de ACPM y aire, esta mezcla se da en el ducto donde el combustible ingresa por gravedad, controlado por una válvula de estrangulación con un flujo constante.

Por otra parte el aire es inyectado al sistema por un ventilador centrífugo movido por un motor trifásico de 1HP de potencia a 1730rpm controlado por un variador de velocidad, con el cual se controla la temperatura del horno.

Figura 7
Gráfica del proceso de fundición del aluminio

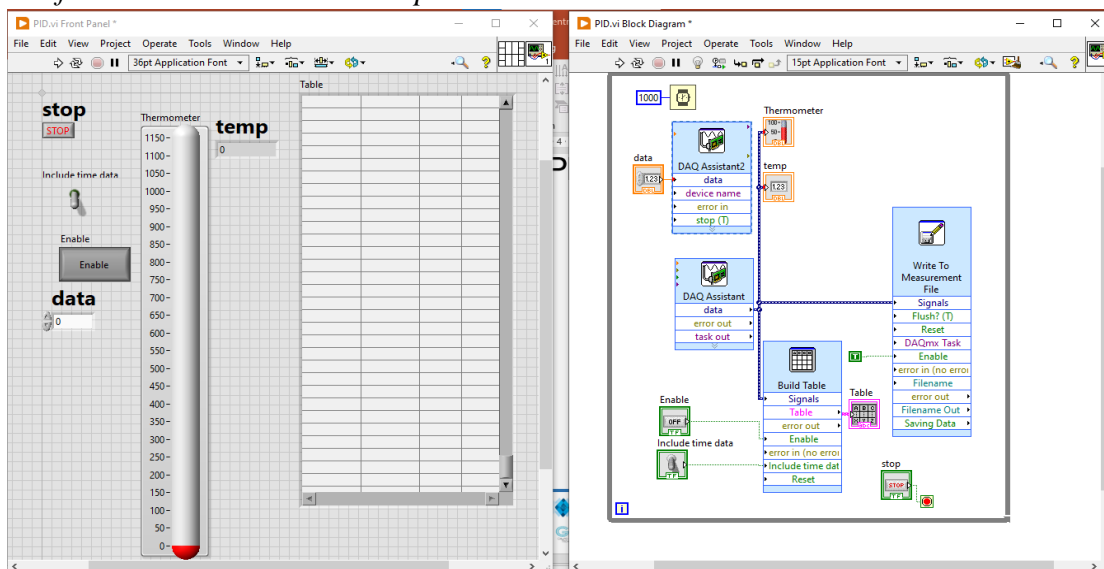


- 1 Horno Cilíndrico
- 2 Ducto
- 3 Ventilador Centrifugo
- 4 Motor Trifásico
Variador (No mostrado)

El registro de los datos de temperatura y control de la velocidad del motor se realizó con la ayuda de un instrumento virtual en el software LabVIEW, tomando como referencia al

proyecto de investigación *Implementación de una estrategia de control proporcional integral derivativo (PID)* inscrito en la División de investigación y Extensión de la UFPSO. En dicho proyecto se propuso la automatización del proceso de fundición de aluminio en un horno de Crisol, el cual se muestra en la Figura 8. La adquisición de datos se realizó a través un Chasis NI CompactDAQ - cDAQ-9178, para esto se conectó un termopar tipo k al chasis a través de un Módulo de Entrada de Temperatura de la Serie C NI 9213.

Figura 8
Gráfica del instrumento virtual para la toma de datos



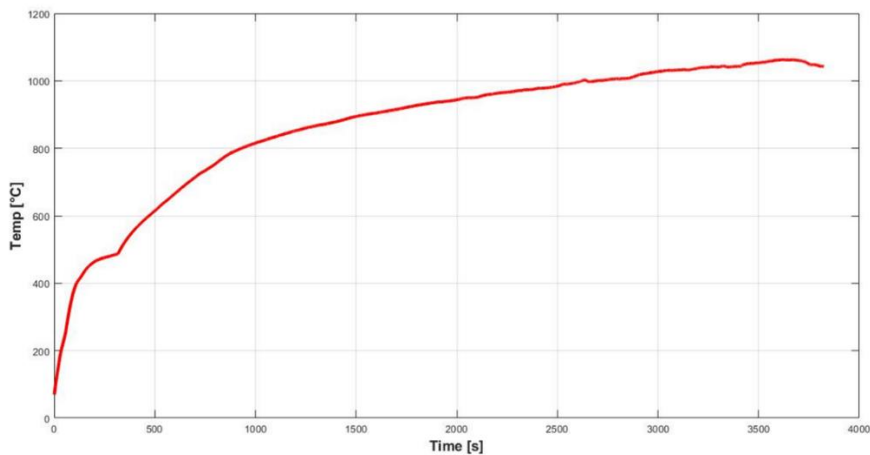
Nota: imagen tomada del proyecto *Implementación de una estrategia de control proporcional integral derivativo (PID)* inscrito en la División de investigación y Extensión de la UFPSO.

Se debe incluir la nota al pie de la figura, indicando una breve descripción y su respectiva bibliografía en el caso que no sea de su autoría.

4.1.3 Identificación del modelo del horno crisol

Para la identificación del modelo matemático aproximado del sistema se envió una señal tipo paso al sistema en lazo abierto y se tomaron los datos de temperatura de respuesta del sistema como se muestra en la Figura 9.

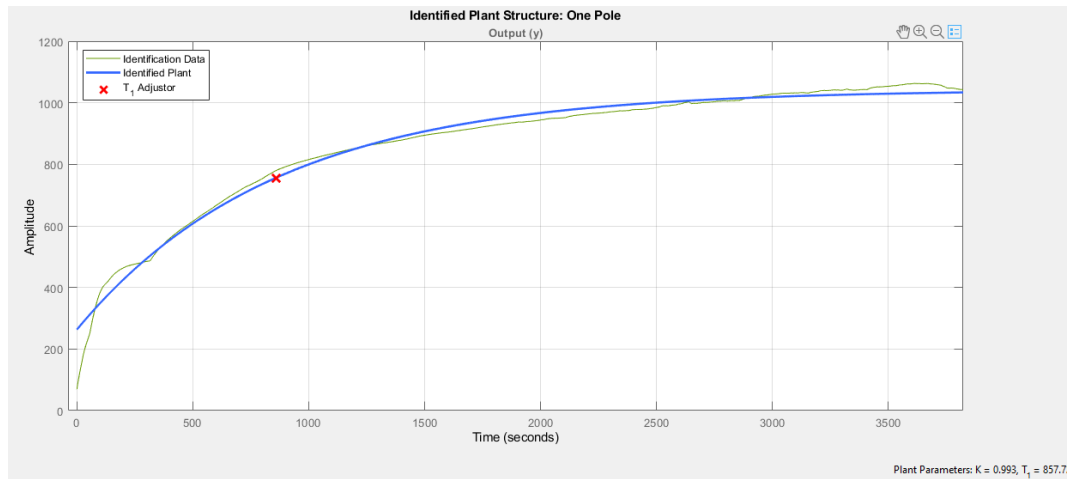
Figura 9
Gráfica de los datos de temperatura del proceso



Dando como resultado el modelo aproximado el modelo mostrado en la Figura 10, en donde la línea verde representa la respuesta al modelo real y la azul el modelo aproximado arrojado por la App de MatLab *PIDtuner*.

Figura 10

Gráfica del modelo aproximado arrojado por Matlab PIDtuner



Este modelo está representado por la función de transferencia de la siguiente ecuación.

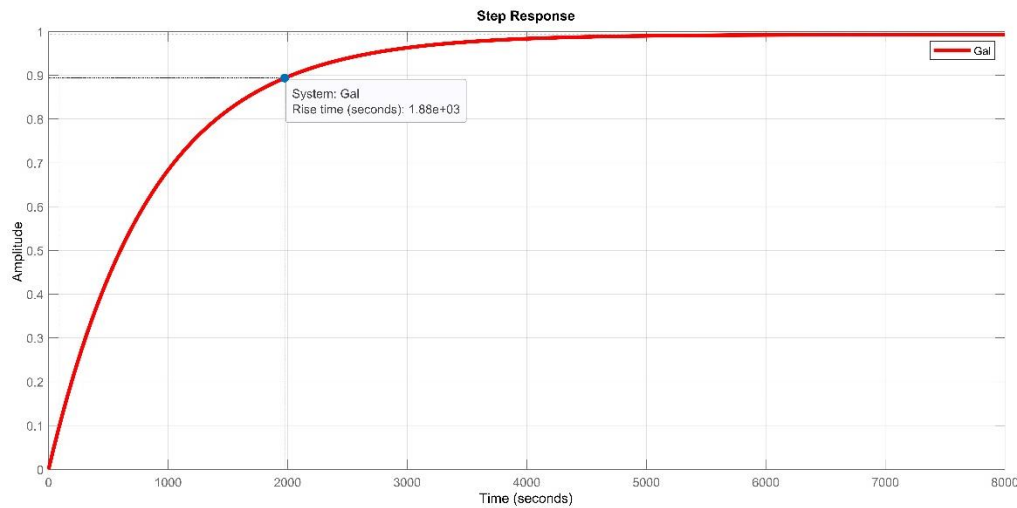
$$G(s) = \frac{0.993}{857.72s+1} \quad (1)$$

La ecuación representa el modelo simplificado del sistema, en este se no se tiene en cuenta las características endógenas y exógenas que afectan la dinámica del comportamiento del sistema, sin embargo, es útil para el análisis.

En la figura 11 se presenta la gráfica de respuesta al paso del sistema e donde τ representa la constante de tiempo del sistema equivalente al 63.2% del valor final de la señal, el cual es 857.72 segundos y un tiempo de subida de 1880 segundos.

Figura 11

Gráfica de la respuesta al paso del sistema



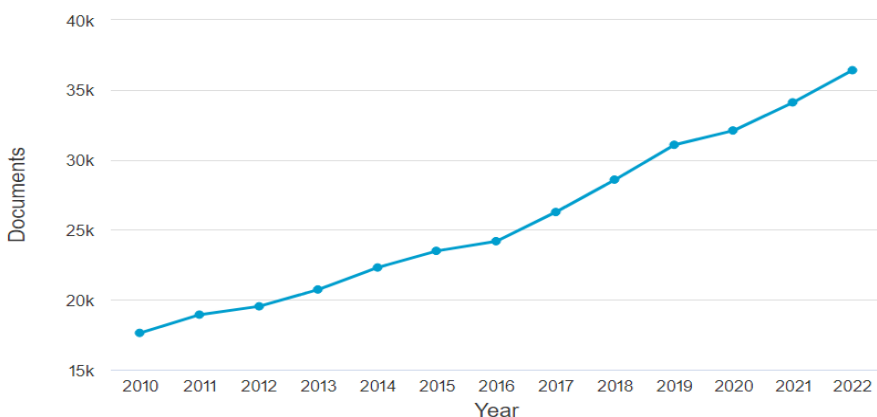
4.2 Estrategia de Control Proporcional Integral Generalizado

Con el fin de regular la temperatura dentro del horno de crisol, se diseña una estrategia de control a través de métodos algebraicos.

4.2.1 Búsqueda avanzada acerca de la aplicación en sistemas térmicos.

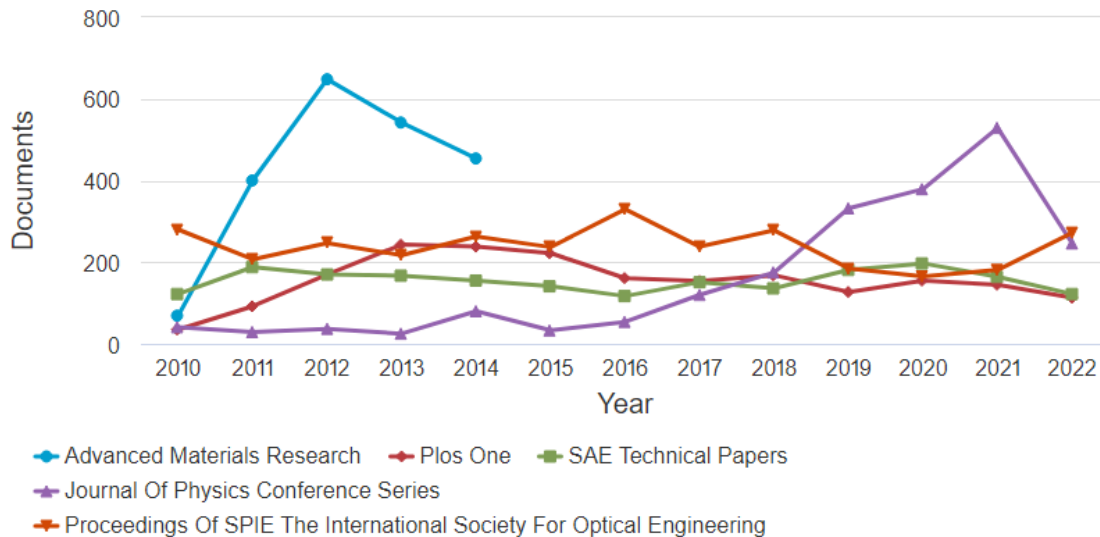
De igual forma se realizó una búsqueda avanzada acerca de los sistemas térmicos y las estrategias de control en sistemas térmicos, parte fundamental en este proyecto, de esta búsqueda se encontró que en el último año se escribieron más de treinta y cinco mil artículos al respecto como se muestra en la siguiente gráfica.

Figura 12
Búsqueda de Sistema médicos



Así mismo *Journal Of Physics Conference Series* es la revista que más documentos a publicado al respecto en los últimos años, pero son *Proceedings Of SPIE The International Society For Optical Engineering*, *Plos One* y *SAE Technical Papers* las que más constancia an tenido con publicaciones al respecto, como se muestra en la siguiente gráfica.

Figura 13
Documentos publicados desde el 2010

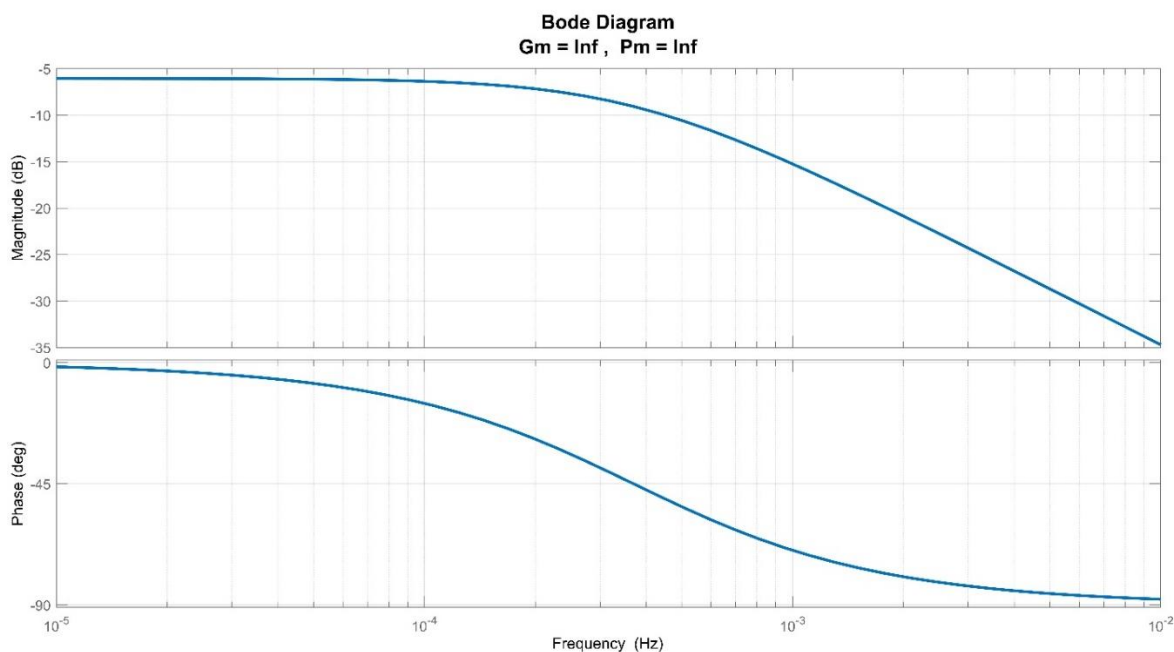


4.2.2 Márgenes de ganancia y de fase mediante un diagrama de bode.

Teniendo en cuenta el modelo identificado se plantea la automatización de este proceso, específicamente con el diseño de una estrategia de control, que cumpla con las características de trabajo del sistema, que son el seguimiento de una señal resultante de la combinación de una señal tipo rampa y una señal tipo paso con un sobre pico menor al 25% y un error de seguimiento menor al 15%.

Para el diseño del compensador lo que se hace es dibujar el diagrama de bode de la repuesta en frecuencia del sistema e identificando los márgenes de fase y de ganancia con la función *Margin* de Matlab, la gráfica arroja como resultado un margen de ganancia infinito, ya que la gráfica nunca pasa por la línea de 0dB, lo mismo sucede con la gráfica de fase.

Figura 14
Gráfica de frecuencia vs fase



4.2.3 Estrategia de control moderna para el error cero.

Para esto se propone una estrategia de control basada en el rechazo activo de perturbaciones (ADRC). La estrategia de control GPI, esta provee una herramienta de diseño de controladores capaces de rechazar diferentes tipos de perturbaciones estructuradas que se suman a la respuesta del sistema, siendo más robusto frente a las constantes desconocidas (Zurita-Bustamante et al., 2011).

Este tipo de controlador utiliza el modelo simplificado del sistema y rechaza las dinámicas no modeladas (perturbaciones de carácter endógeno y exógeno del sistema).

Se diseña en el marco del “rechazo activo de perturbaciones” (Coral-enriquez et al., 2015), e incluye un modelo polinomial en el tiempo de las perturbaciones dependientes del estado y de aquellas que son de carácter exógeno sin estructura especial alguna (Cortés-romero, 2015).

4.3 Robustez de la estrategia de control para funcionamiento del sistema

Mediante el diseño de la estrategia de control y la variación de parámetros, se procede a comprobar la robustez apropiada para el buen funcionamiento del sistema. A continuación, se describen las actividades desarrolladas para dar cumplimiento a la tercera fase.

4.3.1 Diseño de la estrategia de control GPI

Como se especificó en la ecuación 1 que representa el modelo matemático simplificado del sistema, este se puede expresar como

$$G(s) = \theta_{(s)} / \alpha_{(s)}$$

Donde, $\theta_{(s)}$ representa la temperatura de salida del sistema y $\alpha_{(s)}$ la entrada del sistema.

Entonces se puede decir que la ecuación 1 se puede expresar como:

$$\frac{\theta_{(s)}}{\alpha_{(s)}} = \frac{0.993}{857.72s + 1} \approx \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2)$$

En donde τ representa la constante de tiempo del sistema (858 segundos), en este mismo sentido la ecuación 2 se puede expresar en función del tiempo como:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{\tau} \alpha - \frac{1}{\tau} \theta \quad (3)$$

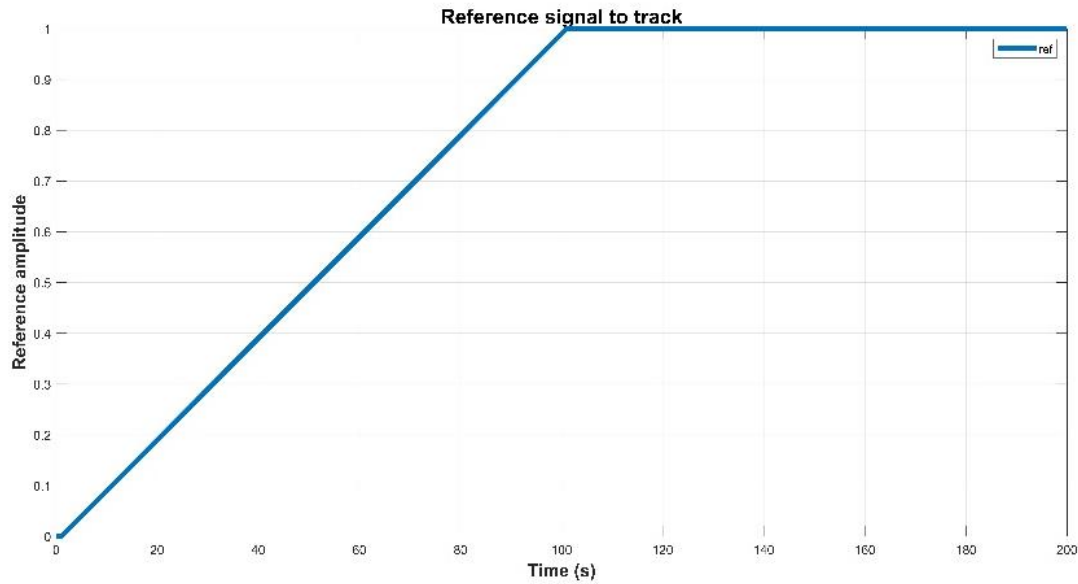
La ecuación 3 que representa el comportamiento dinámico de la temperatura del sistema, tiene la estructura de un sistema lineal perturbado representado por la ecuación 4 según (Regino et al., 2018).

$$y^{(n)}(t) = \kappa u(t) + \xi(t) \quad (4)$$

La estructura del control GPI se muestra en la ecuación 5, en donde κ es $1/\tau$ y la salida Y del sistema es la temperatura θ en el crisol del horno; m es el orden del polinomio con el que se aproxima la perturbación; n es el orden del sistema; K_{n+m}, \dots, K_1, K_0 corresponden las ganancias del polinomio del numerador; y Y^* es la señal de referencia que para este caso equivale a la combinación de una señal tipo rampa y una señal tipo paso como se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Señal de referencia tipo Rampa y Paso



$$U = \frac{1}{K} \left[y^{*(n)} + \left(\frac{K_{n+m}s^{n+m} + \dots + K_1s + K_0}{s^{m+1}(s^{n-1} + K_{2n+m-1}s^{n-2} + \dots + K_{n+m+1})} \right) (y^* - y) \right] \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que el sistema es de primer orden y se desea aproximar la perturbación con un polinomio de orden 2 la ecuación 5 queda:

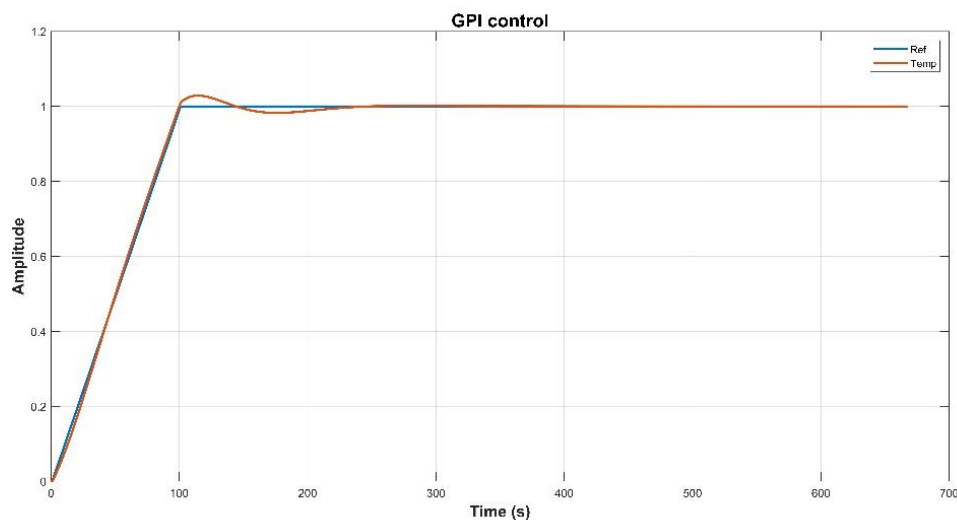
$$U = \tau \left[y^{*(1)} + \left(\frac{K_3s^3 + K_2s^2 + K_1s + K_0}{s^3} \right) (y^* - y) \right] \quad (6)$$

Los coeficientes K_3 , K_2 , K_1 y K_0 se escogen de tal forma que las raíces del polinomio estén en el lado izquierdo del plano complejo, el error de seguimiento será acotado y la cota puede hacerse tan pequeña como se quiera.

En la Figura 16 se presenta el seguimiento de la señal de referencia al aplicar una estrategia de control GPI. Al compararse las dos señales el error cuadrático medio resultante de la aplicación de esta estrategia de control es de 0.433%,

Figura 16

Seguimiento de la señal de referencia sometida a un control GPI

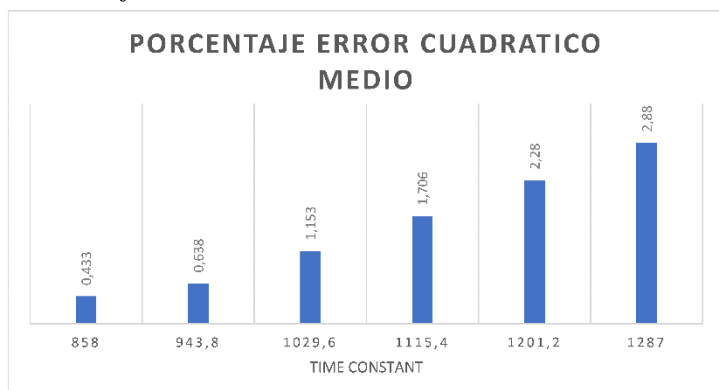


4.3.2 Realizar pruebas de variación de parámetros.

Se realizó una variación de parámetros a la constante de tiempo para estimar el porcentaje de error cuando se aplica el controlador con distintas constantes. En la Figura 17 se aprecia el comportamiento del error de acuerdo con la variación en los parámetros.

Figura 17

Porcentaje de Error Medio



De acuerdo con los datos suministrados, existe un aumento en el error de seguimiento desde 0,43% hasta 2,88% como se muestra en el gráfico de la Figura 17, considerando que, constante de tiempo se varió del 10% al 50%.

En el anexo B se presenta el código en Matlab del diseño y las simulaciones de la estrategia de control y de donde se sacó el error cuadrático medio entre la señal de referencia y la salida del sistema.

5. Capítulo 5. Conclusiones

La búsqueda de información mediante la herramienta informática Scopus, permitió identificar que las variables involucradas en el proceso de fundición afectan la calidad y las características de las piezas y, es útil como punto de partida para el de diseño de la estrategia de control. La optimización de estas variables y la atención cuidadosa a cada paso del proceso son importantes para obtener piezas de fundición de aluminio de alta calidad.

Las estrategias de control basadas en el rechazo activo de perturbaciones como el control GPI, presentan ventajas sustanciales frente a una estrategia de control tradicional como el control PID, esto se evidencia en el error de seguimiento, donde el control GPI obtuvo un porcentaje de error cuadrático medio inferior a la unidad. En el proceso de diseño de la estrategia de control se seleccionaron las constantes de tal forma que el error de seguimiento fuera o más pequeño posible y este permaneciera acotado, mostrando así la efectividad de la estrategia planteado a lo largo de este proyecto.

La estrategia de control GPI cumplen los objetivos, en términos de variación de parámetros el control GPI tiene un rendimiento superior, ya que con una variación del 50% en el modelo, el porcentaje de error cuadrático medio fue inferior al 3%. Este es un buen indicador de robustez ante la incertidumbre que pueda presentar el modelo del sistema.

Referencias

- Azarskov, V. N., Skurikhin, V. I., Zhiteckii, L. S., & Lypoi, R. O. (2013). Modern Control Theory Applied to Inventory Control for a Manufacturing System. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9), 1200–1205. <https://doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00463>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). Termodinámica. En *Termodinámica* (Octava, Vol. 736, Número ISBN 978-607-15-0743-3). Mc Graw Hill.
- Coral-enriquez, H., Ramos, G. a., & Cort, J. (2015). *Power factor correction and harmonic compensation in an active filter application through a discrete-time active disturbance rejection control approach*. 5318–5323.
- Cortés-romero, J. A. (2015). *Control GPI-repetitivo para sistemas lineales con incertidumbre / variación en los parámetros GPI-repetitive control for linear systems with parameter uncertainty / variation*. 18(34), 13–24.
- Incropera, F. P., & Dewitt, D. p. (2011). *Fundamentos de transferencia calor y masa*.
- Jiménez-Ceciliano, P. J. (2014). *Conceptos de controladores PID e implementación en un horno de fundición de acero Concepts and implementation of PID controllers in a smelting furnace steel*. 32(506), 40.
- Manosalva Rincón, A., & Herrera Alvarez, W. (2017). *Diseño de un sistema automática para el accionamiento del horno de crisol y colado centrífugo vertical para el taller de fundición de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña*. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
- MathWorks. (2022a). *MATLAB*.

MathWorks. (2022b). *Simulink*.

Mott, R. (1996). *Mecánica de Fluidos Aplicada*. En S. Helba (Ed.), *News.Ge* (4a ed.). Pearson.

Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. En *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún* (Quinta, Vol. 5, Número 10). PEARSON EDUCATION. <https://doi.org/10.29057/ess.v5i10.3323>

Oxford Languages. (2022). *Combustible*.

Pando, F., & Zapatán, C. (2012). *Análisis del proceso de fundición de aluminio y propuestas de mejoras en la eficiencia de producción de bases dentadas en la empresa Press Forja S.A.*

Quiroga, J., Flores, E., Coba, A., & Tapia, J. (2020). Diseño e implementación de un sistema de control para un horno de crisol. *Minerva*, 1(2), 30–39. <https://doi.org/10.47460/minerva.v1i2.9>

Regino, F. J., Gomez, J. A., & Espinel, y E. E. (2018). Comparative study of three control techniques for the current loop of a Boost Bridgeless converter. *2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2018.8609810>

Riedel, E., Köhler, P., Ahmed, M., Hellmann, B., Horn, I., & Scharf, S. (2021). Industrial suitable and digitally recordable application of ultrasound for the environmentally friendly degassing of aluminium melts before tilt casting. *Procedia CIRP*, 98, 589–594. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.159>

Starke, E. A. J. (2001). Aluminum : Alloying. En *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 101–106).

Teoría moderna. (s/f). Recuperado el 4 de mayo de 2023, de

http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/teoria_moderna_de_control.htm

Wall, T. (2017). *Industry, innovation and infrastructure*. <https://doi.org/10.18356/ae7b4720-en>

Zhirabok, A. N., & Shumsky, A. Y. (2010). Linear Methods in Observability and Controllability of Nonlinear Systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(14), 308–313.

<https://doi.org/10.3182/20100901-3-IT-2016.00020>

Zurita-Bustamante, E. W., Linares-Flores, J., Guzmán-Ramírez, E., & Sira-Ramírez, H. (2011).

A comparison between the GPI and PID controllers for the stabilization of a dc-dc “buck” converter: A field programmable gate array implementation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(11), 5251–5262. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2123857>

Apéndices

Apéndice A. Cronograma de actividades

La tabla 1 muestra el cronograma de actividades en semanas proyectado para la realización del proyecto de investigación.

Fase I. Identificar cada una de las variables del proceso de fundición para definir un modelo aproximado del sistema a través de revisiones bibliográficas y pruebas de campo.

Actividad 1. Realizar una revisión bibliográfica de documentos académicos, que permitan establecer las variables del proceso de fundición.

Actividad 2. Describir cada una de las etapas del proceso de fundición.

Fase II. Diseñar una estrategia de control proporcional integral generalizado que permita regular la temperatura del horno de crisol, a través de métodos algebraicos.

Actividad 1. Realizar una búsqueda avanzada acerca de la aplicación en sistemas térmicos.

Actividad 2. Diseñar una estrategia de control moderna que lleve el error asintóticamente a cero

Fase III. Comprobar la robustez de la estrategia de control para verificar el buen funcionamiento del sistema, a través de pruebas de variación de parámetros.

Administración del proyecto

Recursos

En la gestión de cualquier tipo de proyecto necesariamente realizar una inversión de recursos con los cuales se van a ejecutar las distintas fases o etapas del mismo, para el presente proyecto de investigación se tienen en cuenta recursos humanos, institucionales y financieros. A continuación, se describen los por menores de cada uno de estos tipos.

Recursos humanos

La tabla 2 representa las personas directamente involucradas con lo concerniente al proyecto de investigación, se especifican las funciones que tendrán a cargo.

Tabla 2

Recursos humanos del proyecto

| Nombre | Función |
|------------------------------|-----------------------|
| MSc. Fernando Regino Ubarnes | Director del proyecto |
| Estudiante Cesar Rodriguez | Ejecutor del proyecto |

Recursos institucionales

Se hará uso de las bases de datos científicas y el material bibliográfico que posee la biblioteca Argemiro Bayona Portillo de la Universidad Francisco de Paula Santander. Las bases de datos son las siguientes: ScienceDirect, Scopus y eLibro

Recursos financieros

La tabla 3 resume los recursos financieros que se proyectan invertir en la realización del presente proyecto, el presupuesto está en pesos colombianos (COP).

Tabla 3

Recursos financieros del proyecto

| Rubro | Fuente de financiación | | Contrapartida | | Total |
|--|------------------------|----------|---------------|--|-------|
| | Efectivo | Efectivo | Especie | | |
| Equipos - herramientas | - | - | - | | 0 |
| Licencias de software | - | - | - | | 0 |
| Reactivos y material de laboratorio | - | - | - | | 0 |
| Materiales e insumos | - | - | - | | 0 |
| Papelería y útiles de escritorio | - | - | - | | 0 |
| Salidas de campo | - | - | - | | 0 |

| Rubro | Fuente de financiación | | Contrapartida | | T |
|-----------------------------------|------------------------|----------|---------------|-------|---|
| | Efectivo | Efectivo | Especie | total | |
| Servicios técnicos | - | - | - | 0 | |
| Documentación y bibliografía | - | - | - | 0 | |
| Análisis y pruebas de laboratorio | - | - | - | 0 | |
| Gastos de viaje | - | - | - | | |
| Inscripción a ponencias | - | - | - | 0 | |
| Imprevistos | - | - | - | - | |
| Total | - | - | - | - | |

Apéndice B. Código de Matlab del diseño del controlador

```
clear all
clc
s=tf('s');
```

Gal =

0.993

857.7 s + 1

Continuous-time transfer function.

```
Gal=0.993/(857.72*s+1)
```

Control GPI con m=2

```
Pol=poly([-20 -30 -40 -50]*0.0005)
```

Pol = 1×5

1.00

0.07

0.00

0.00

0.00

```
K3=Pol(2);
```

```
K2=Pol(3);
```

```
K1=Pol(4);
```

```
K0=Pol(5);
```

```
Cgpi=(K3*s^3+K2*s^2+K1*s+K0)/s^3
```

Cgpi =

0.07 s³ + 0.001775 s² + 1.925e-05 s + 7.5e-08

s³

Continuous-time transfer function.

Control GPI con m=3

```
Pol=poly([-20 -25 -30 -35 -40]*1)
```

```
Pol = 1×6
```

```
1.00      150.00      8875.00      258750.00      3715000.00 ...
```

```
K4=Pol(2);
K3=Pol(3);
K2=Pol(4);
K1=Pol(5);
K0=Pol(6);
Cgpi=(K4*s^4+K3*s^3+K2*s^2+K1*s+K0)/s^4
```

```
Cgpi =
```

```
150 s^4 + 8875 s^3 + 258750 s^2 + 3.715e06 s + 2.1e07
```

```
-----
```

```
s^4
```

```
Continuous-time transfer function.
```

Control GPI con m=4

```
Pol=poly([-20 -25 -30 -35 -40 -50]*1)
```

```
Pol = 1×7
```

```
1.00      200.00      16375.00      702500.00      16652500.00 ...
```

```
K5=Pol(2);
K4=Pol(3);
K3=Pol(4);
K2=Pol(5);
K1=Pol(6);
K0=Pol(7);
Cgpi=(K5*s^5+K4*s^4+K3*s^3+K2*s^2+K1*s+K0)/s^5
```

```
Cgpi =
```

$$200 s^5 + 16375 s^4 + 702500 s^3 + 1.665e07 s^2 + 2.068e08 s + 1.05e09$$

$$s^5$$

Continuous-time transfer function.

Control GPI con m=10

```
Pol=poly([-20 -25 -30 -35 -40 -45 -50 -55 -60 -65 -70 -75])
```

```
Pol = 1×13
```

```
1.00      570.00      147125.00      22728750.00      2339514375.00 ...
```

```
K11=Pol(2);
K10=Pol(3);
K9=Pol(4);
K8=Pol(5);
K7=Pol(6);
K6=Pol(7);
K5=Pol(8);
K4=Pol(9);
K3=Pol(10);
K2=Pol(11);
K1=Pol(12);
K0=Pol(13);
Cgpi=(K11*s^11+K10*s^10+K9*s^9+K8*s^8+K7*s^7+K6*s^6+K5*s^5+K4*s^4+...
      K3*s^3+K2*s^2+K1*s+K0)/s^11
```

```
Cgpi =
```

$$570 s^{11} + 147125 s^{10} + 2.273e07 s^9 + 2.34e09 s^8 + 1.689e11 s^7 + 8.773e12 s^6$$

$$+ 3.298e14 s^5 + 8.906e15 s^4 + 1.683e17 s^3 + 2.113e18 s^2 + 1.58e19 s$$