



***Trabajo final presentado
en opción al Título de
Máster en Automática***

Autor: René R. Barreiro González

Tutor: Dr. C. Guillermo González Yero

Dr. C. Yunier Valeriano Medina

Santiago de Cuba

2022



UNIVERSIDAD
DE ORIENTE

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Ingeniería en Automática

*Trabajo final presentado
en opción al Título de
Máster en Automática*

Título: Modelado y control del sistema de posición de
electrodos de un Horno de Arco Eléctrico

Autor: René R. Barreiro González

Tutores: Dr. C. Guillermo González Yero

Dr. C. Yunier Valeriano Medina

Pensamientos

“Nunca consideres el estudio como una obligación sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”

Albert Einstein

Dedicatoria

A la Tata por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

Al Guille mi amigo y tutor.

Resumen

El control de sistema de posición de los electrodos de hornos de arco eléctrico es un tema que suscita el interés de los investigadores. El modelado, simulación y control son elementos que generan constantes desafíos a resolver en este tipo de procesos debido a las altas complejidades del mismo y a las no linealidades en el presente. Esta tesis presenta y valida un modelo del sistema posición de los electrodos que tiene en cuenta las variaciones en el tiempo de los parámetros del horno de arco eléctrico. Con el modelo obtenido, mediante la identificación experimental, se realiza el ajuste de un controlador utilizando el toolbox de Matlab PIDtuner. Este controlador es evaluado según el compromiso entre robustez, rechazo a perturbaciones y esfuerzo de control. La identificación del sistema y el ajuste del controlador, así como las simulaciones necesarias para ello, se realizaron utilizando la herramienta Matlab®.

Abstract

The position system control of electric arc furnace electrodes is a subject that arouses the interest of researchers. Modeling, simulation and control are elements that generate constant challenges to solve in this type of process due to its high complexity and non-linearities in the present. This thesis presents and validates a model of the electrode position system that takes into account the variations in time of the parameters of the electric arc furnace. With the model obtained, through the experimental identification, the adjustment of a controller is carried out using the Matlab PIDtuner toolbox. This controller is evaluated according to the compromise between robustness, disturbance rejection and control effort. The identification of the system and the adjustment of the controller, as well as the necessary simulations for it, were carried out using the Matlab® tool.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1. Marco teórico	6
Introducción.....	6
1.1. El sistema de posición de los electrodos en un HAE.....	6
1.1.1. El sistema de suministro de energía eléctrica	7
1.1.2. El sistema de posicionamiento de los electrodos.....	9
1.1.3. El controlador.....	11
1.2. Modelado del sistema de posición de los electrodos en un HAE.....	15
1.3. Estrategias de control en el sistema de posición de electrodos.....	21
Conclusiones.....	23
Capítulo 2. Modelado del sistema de posición de los electrodos y ajuste del controlador PI.....	24
Introducción.....	24
2.1. El sistema de posición de los electrodos del HAE de ACINOX Las Tunas.....	24
2.2. El controlador	29
2.3. El sistema de posicionamiento de los electrodos	30
2.3.1. Modelado del sistema de posicionamiento de los electrodos.....	31
2.4. El sistema eléctrico del hae	36
2.4.1. Experimento, selección de la estructura y validación del modelo obtenido.....	36
2.5. Diseño del lazo de control del sistema de posición de los electrodos.....	37
2.5.1. Controlador proporcional-integral utilizando pidtuner.....	38
2.5.2. Análisis del resultado de la simulación.....	39
2.6. Análisis de los índices de desempeño.....	44
2.7. Análisis valorativo de los aspectos económicos y medioambientales.....	46

Conclusiones	47
Conclusiones.....	48
Recomendaciones	49
Bibliografía	50
Anexos	56
Anexo 1	¡Error! Marcador no definido.

Lista de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas

AMIGO: Aproximate MIGO

a: Coeficiente modelo Ayrton

b: Coeficiente modelo Ayrton

C(s): Controlador

c: Coeficiente modelo Ayrton

ct: Señal de control tratada

d: Coeficiente modelo Ayrton

e: Error de control

et: Error tratado

FOPID: PID de orden fraccional

fc: Función multiobjetivo

G: Conductancia

g: Conductancia del arco

Ge: Función de transferencia del subsistema eléctrico

GSH: Función de transferencia del subsistema hidráulico

HAE: Horno de Arco Eléctrico

HV/MV: Transformador de alta a media tensión

I: Corriente

I1: Corriente fase 1

I2: Corriente fase 2

I3: Corriente fase 3

Is: Corriente de salida del convertidor de corriente en tensión

ia: Corriente del arco

it: Corriente tratada

IAE: Integral Absoluta del Error

ISE: Integral Cuadrada del Error

K: Ganancia del subsistema hidráulico

Lista de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas

Kd: Ganancia Derivativa

Ki: Ganancia Integral

Kp: Ganancia Proporcional

LPV: Lineal Variante en el Tiempo

MIGO: M constrained Integral Gain Optimization

MIMO: Múltiples entradas – Múltiples salidas

MV/LV: Transformador de media a baja tensión

NPI: PI no lineal

NPID: PID no lineal

PCC: Punto de Acoplamiento Común

PID: Proporcional Integral Derivativo

R: Resistencia

SBPA: Secuencias Binarias Pseudoaleatorias

SISO: Una entrada – Una salida

SPE: Sistema de position de los electrodos

T: Constante de tiempo del subsistema hidráulico

TV: Variación total

ts: tiempo de establecimiento

τ : Retardo del subsistema hidráulico

τ_a : Constante de tiempo del arco eléctrico

$u(t)$: salida del controlador

U1: Tensión de la fase 1

U2: Tensión de la fase 2

U3: Tensión de la fase 3

U12: Tensión entre la fase 1 y la fase 2

U23: Tensión entre la fase 2 y la fase 3

U31: Tensión entre la fase 3 y la fase 1

U0: Tensión del arco en estado estático

V: Tensión

V1: Tensión de la fase 1 sin caída de la tensión del transformador

V2: Tensión de la fase 2 sin caída de la tensión del transformador

Lista de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas

V_3 : Tensión de la fase 3 sin caída de la tensión del transformador

V_a : Tensión del arco

V_m : Punto de potencial neutro

X : Reactancia

X_{el} : Reactancia de los electrodos

X_{sc} : Impedancia de cortocircuito

Y : Admitancia

Z : Impedancia

Z_{tr} : Impedancia del transformador

Z_{linea} : Impedancia de línea

Z_{arco} : Impedancia del arco

Z_{media} : Impedancia media

ΔZ : Error de impedancia

Z_t : Impedancia tratada

INTRODUCCIÓN

Los hornos de arco eléctrico (HAE) se utilizan para producir acero mediante la fusión de chatarra junto con otras materias primas utilizando la electricidad como fuente principal de energía [1]. Los electrodos de grafito, conectados al suministro eléctrico, se utilizan para convertir la energía eléctrica en calor extensivo por medio de arcos eléctricos de alta corriente entre las puntas de los electrodos y la carga metálica [2]. Fue patentado entre los años 1878 y 1879 por el reconocido ingeniero alemán Charles William Siemens, desde entonces ha evolucionado y actualmente son la vía para producir el 28% del acero crudo global; que al cierre del 2021 ascendió a 1 690 millones de toneladas [2, 3].

Los HAE's utilizados globalmente tienen diversas características, pero en todos existen objetivos comunes: maximizar la seguridad del proceso y mejorar la economía y la ecología de la tecnología [4, 5]. Este contexto propicia el desarrollo para los fabricantes de acero y para los proveedores de sus tecnologías, permitiendo perfeccionar las mediciones y el control de sus procesos [6, 7]. En el esfuerzo para cumplir estos propósitos y alcanzar mayor eficiencia en la producción, la automatización ha desempeñado un papel protagónico [8].

El campo de la automatización para los HAE's es propio de países desarrollados [8-15] y existen tres compañías internacionales que producen la mayor parte de las tecnologías modernas para este proceso: *Danieli* [8, 9, 15], *Siemens VAI*, *Primetals Technologies* [10-12] y *Amec-Spie* [13, 14]. En Cuba no existen empresas de este tipo, las pocas acciones de mejora realizadas se han hecho importando hornos o partes de estos. En el año 2016, se logró un resultado discreto con el desarrollo de un controlador para el sistema de posición de los electrodos en una de las acerías cubanas [16].

El rendimiento del control de la posición de los electrodos en los procesos de fundición es muy importante, determina la eficiencia y calidad energética [17, 18]. Su objetivo es garantizar que las longitudes de arco permanezcan lo más constantes posible utilizando la impedancia o la corriente como variable de control.

Para proporcionar un control eficiente al cambiar las condiciones de producción en un HAE, es necesario conocer la estructura y los principios operativos de los elementos involucrados en el proceso de fundición [19, 20].

El aspecto más importante de un proceso es el conocimiento de su dinámica [21], es decir, como se comporta la señal de salida frente a una variación de la señal de entrada. Un conocimiento preciso de la relación entrada/salida permite predecir la respuesta del sistema y basado en ella seleccionar la acción de control adecuada para mejorarla [21-23].

Un gran número de trabajos se ocupan del modelado basados en las características tensión-corriente [24-26], en la modulación de la frecuencia [27], en el circuito equivalente [28, 29] o en el caso de la vía experimental, la inteligencia artificial [28-33]. Consideran diferentes enfoques para las descripciones matemáticas de los arcos eléctricos y analizan las formas de simulación apropiada de perturbaciones aleatorias y condiciones asimétricas en hornos de arco eléctrico. Sin embargo, el sistema de posición de los electrodos (SPE) no se ha descrito a profundidad y sus modelos no se han desarrollado en detalle, solo hay algunos artículos que describen la estructura de los dispositivos de control aplicados en la práctica [34] .

En la actualidad, este sistema está controlado principalmente por controladores Proporcional Integral Derivativo (PID) [34, 35], este predominio es en gran medida resultado de las propiedades del controlador PID y su bondad para combinarse con otros esquemas de control más avanzados [36]. No obstante, estudios previos han reportado que solo el 20-30% de los controladores en la industria de procesos están sintonizados satisfactoriamente; dos de las principales razones que lo propician es la falta de conocimiento y tiempo del personal técnico [36]. Como consecuencia, muchos controladores están configurados en valores predeterminados.

En la empresa siderúrgica ACINOX Las Tunas se encuentra en funcionamiento un horno de arco eléctrico trifásico al cual, desde su puesta en funcionamiento, hace ya tres décadas, no se le ha realizado ningún tipo de ajuste al sistema de control de la posición de los electrodos a pesar de sufrir la instalación cambios a través de los años. Cambios que afectan la dinámica del proceso y generan un control menos

efectivo, reflejado en el deterioro paulatino de los índices de consumo energéticos para HAE's de estas características.

Este sistema de control también presenta como dificultad que su controlador es analógico y los valores de sus componentes se han devaluado con el paso de los años, no existiendo repuestos en el mercado internacional para este tipo de tecnología dada su obsolescencia.

Para nuestro país, y en especial para la empresa ACINOX Las Tunas, resulta estratégico disminuir los consumos de energía eléctrica en el HAE. Esto solo es posible si se logra optimizar el control del arco eléctrico a través del sistema de posición de los electrodos.

En base a lo anterior, se define como **problema de la investigación**: las insuficiencias existentes en el sistema de posición de los electrodos del HAE de ACINOX Las Tunas en relación al ajuste de su controlador el cual no asegura un alto desempeño, robustez y precisión.

Una vía de solución para este problema consiste en realizar un modelado del SPE en un horno de arco eléctrico trifásico y así conocer las funciones de transferencia de los elementos que lo componen. El mismo debe considerar las características del proceso en los diferentes puntos de operación.

Entonces, se puede afirmar que el **objeto de investigación** es el sistema de posición de los electrodos de un HAE y el **campo de acción** se enmarca en el modelado y control del SPE del horno de arco eléctrico.

El **objetivo de la investigación** es: diseñar y probar a escala de simulación un controlador que tenga error a estado estacionario igual acero y un tiempo de establecimiento menor que el existente, en el sistema de posición de los electrodos del HAE de ACINOX Las Tunas.

Por lo tanto, se plantea la **hipótesis** siguiente: si se logra obtener un modelo que caracterice el HAE de la empresa ACINOX Las Tunas y sobre la base de éste se sintoniza un controlador, se obtendrá un mejor control de la posición de los electrodos.

Para el cumplimiento del objetivo propuesto se han asumido las siguientes tareas de investigación:

1. La caracterización desde el punto de vista teórico, histórico y contextual del sistema de posición de los electrodos del HAE.
2. La realización de una revisión bibliográfica sobre el modelado y control del SPE del horno de arco eléctrico.
3. La realización de un conjunto de experimentos que permitan obtener una base de datos con las principales variables que caracterizan un horno de arco eléctrico.
4. La obtención de un modelo a partir de los datos obtenidos que caracterice el sistema de posición de los electrodos del horno de arco eléctrico.
5. La sintonización de un controlador para el sistema de posición de los electrodos basado en el modelo obtenido.
6. La comprobación de la pertinencia y factibilidad de los resultados obtenidos mediante simulaciones.

Para la realización de esta tesis se emplearon métodos de investigación teóricos y experimentales. Se inició con el método histórico-lógico a través de la revisión bibliográfica de las técnicas para el modelado de hornos de arco eléctrico, así como los posibles métodos de diseño de controladores profundizando en aquellas más abordadas en la bibliografía utilizada.

El método de análisis-síntesis se utilizó para analizar las ventajas y desventajas de las estrategias de control utilizadas con mayor frecuencia en el sistema de control de posición de los electrodos y a partir de este seleccionar el más adecuado para este trabajo.

El uso de métodos experimentales, como el diseño y la simulación permitió la recopilación de los datos pertenecientes al proceso de fundición en el horno de arco eléctrico, y el procesamiento de estos para luego con la herramienta de software Matlab® llevar a cabo la obtención de un modelo del proceso, el diseño del controlador correspondiente y la realización de las simulaciones necesarias para comprobar los resultados obtenidos.

El informe de esta investigación se organiza en introducción, desarrollo que contiene dos capítulos, las conclusiones, las recomendaciones, las referencias bibliográficas y los anexos.

En el primer capítulo se resumen las principales características de los hornos de arco eléctrico y de los sistemas de control de la posición de electrodos. Además, se analizan las ventajas y desventajas de las principales técnicas de modelado y control abordadas en la literatura sobre este tipo de sistemas y a partir de ellas se seleccionan las más adecuadas para el sistema objeto de la investigación.

En el segundo capítulo se obtienen los modelos del subsistema de posicionamiento de los electrodos y del subsistema eléctrico a través de la identificación experimental. Estos dos modelos se unen para conformar el modelo del sistema de posición de los electrodos y a partir de él se realiza el ajuste del controlador. La respuesta y desempeño de este controlador se compara con el controlador actual tomando como referencia los requerimientos previamente establecidos.

Capítulo 1. MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

El SPE es un componente esencial para el funcionamiento de cualquier horno de arco. Su finalidad es mantener el punto de trabajo exigido por el operador.

El objetivo en un horno de arco eléctrico es fundir chatarra en el menor tiempo posible consumiendo la menor cantidad de energía. Esto se logra con el calor de un arco con potencia y longitud adecuadas. En el presente capítulo se realiza un resumen de los principales aspectos referentes a las características de los hornos de arco eléctrico de tipo cuchara y de su sistema de regulación de impedancia. También se realiza un estudio de los métodos utilizados en la actualidad para el modelado del sistema antes mencionado, así como las principales técnicas de control existentes.

1.1. EL SISTEMA DE POSICIÓN DE LOS ELECTRODOS EN UN HAE

Durante la etapa de fundición y de afino es necesario ajustar la potencia del arco cambiando la cantidad de energía de la entrada pues la fundición constante del acero causa variaciones en la longitud de arco, y a su vez en la energía de alimentación, si el sistema no es controlado de forma adecuada [37, 38].

La potencia activa del arco es ajustada cambiando el voltaje del secundario del transformador a través de los conmutadores del transformador o, en caso de tener un voltaje constante, cambiando la corriente o impedancia del circuito eléctrico del horno.

Ambas variables, corriente e impedancia, son controladas mediante un sistema de control, Fig. 1.1, que mueve los electrodos verticalmente para ajustar su valor de acuerdo al valor de referencia requerido [39]. La distancia entre electrodo y la carga metálica, es decir, la longitud del arco eléctrico, determina la impedancia del mismo y, en consecuencia, el resto de parámetros eléctricos de la operación [40]. Es obligatorio decir que se trabaja de forma que se extraiga del arco la mayor potencia posible.

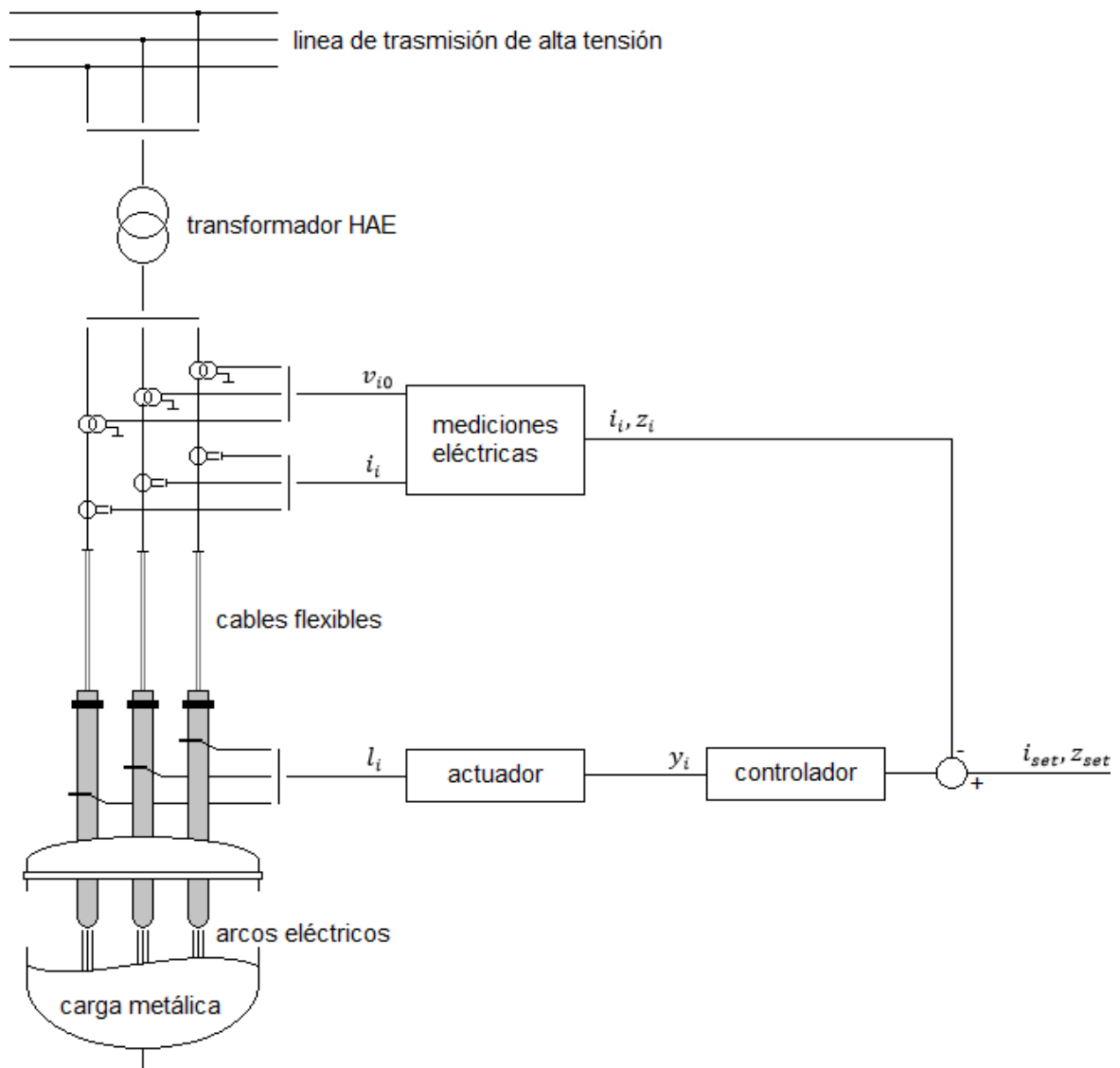


Figura 1.1 Sistema de regulación de los electrodos [12].

1.1.1. EL SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El comportamiento eléctrico de los HAE depende de las tensiones del transformador, la disposición geométrica de los conductores de alta corriente y las reactancias resultantes. En la Fig. 1.2 se muestra un diagrama unifilar típico de un horno de arco eléctrico de corriente alterna.

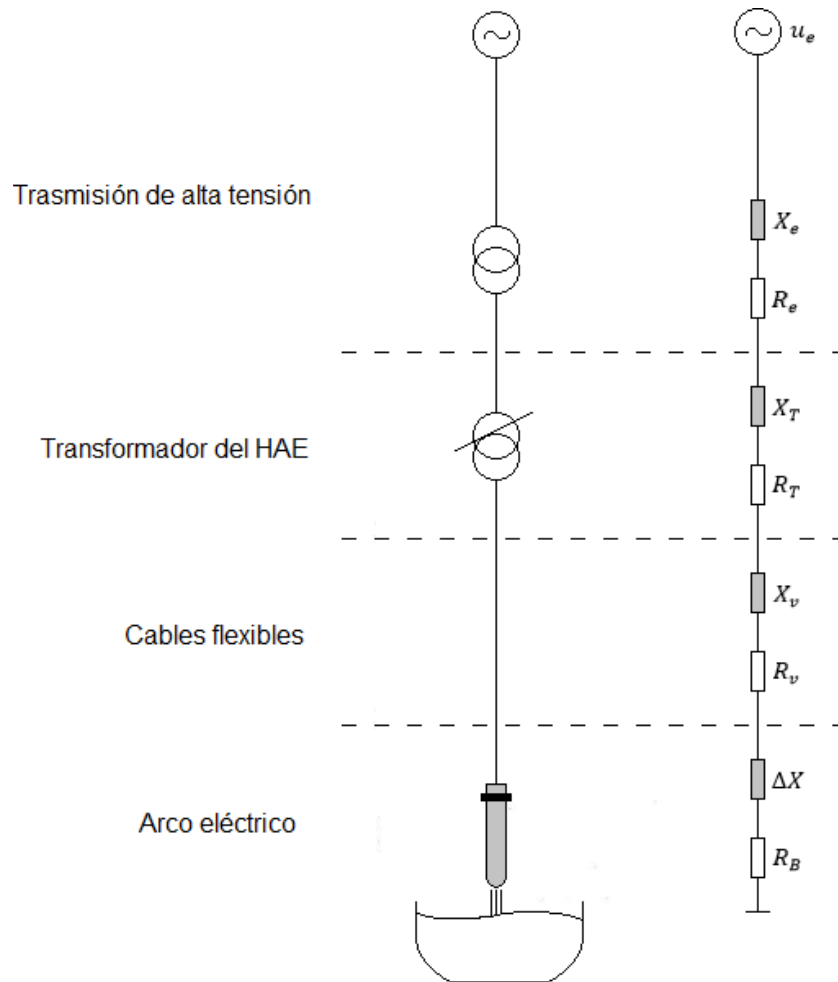


Figura 1.2 Red equivalente del sistema.

Donde las X_i representan los valores de reactancia y las R_i los de resistencia de cada sección del sistema. Los valores de u_e , X_e y R_e tienen como referencia base el punto de operación del transformador del HAE.

El carácter no estacionario y la forma de onda no sinusoidal de la tensión de arco [41] conducen a una mayor reactancia del sistema, ΔX , principalmente al comienzo de la fusión [42].

1.1.1.1. EL ARCO ELÉCTRICO

El arco eléctrico es la principal no linealidad en el proceso de un horno de arco y la polaridad de los electrodos de grafito con referencia a la carga metálica tiene un efecto significativo en la estabilidad del este.

El arco eléctrico, caracterizado por una alta corriente y una baja tensión, es una descarga eléctrica en un gas que genera una ionización térmica del medio en contacto [43]. Este arco que se forma por la ionización del gas y la creación del plasma permite el paso de la corriente eléctrica [44, 45].

Si en un arco alimentado por corriente alterna se miden la tensión y la corriente, se encuentran curvas deformadas que dependen del medio del arco, del material de los electrodos y de la frecuencia de la corriente [46]. En la Figura 1.3 se muestra esta curva para un arco en aire, con electrodos de carbón y con una frecuencia de 60Hz.

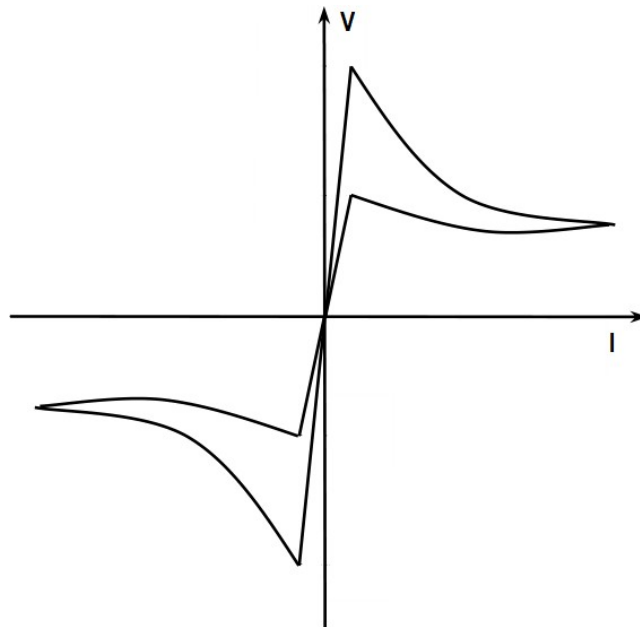


Figura 1.3 Curva típica de V-I de un arco eléctrico en CA [43].

1.1.2. EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DE LOS ELECTRODOS

El ajuste de la longitud del arco se realiza mediante el posicionamiento de los electrodos. Se deben mover masas considerables por medio de equipos hidráulicos que influyen en el funcionamiento del horno, así como en el diseño del controlador. En la Fig. 1.4 se muestra un diagrama hidráulico típico del movimiento de un electrodo.

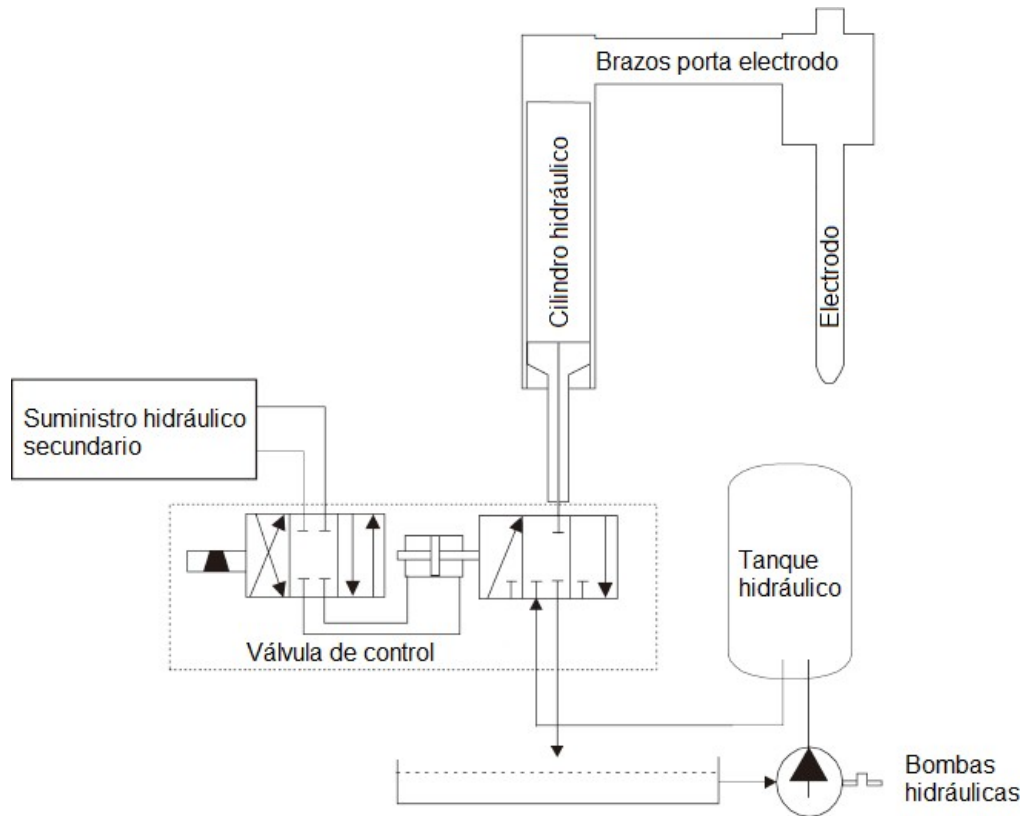


Figura 1.4 Representación simplificada del sistema de posicionamiento de electrodos [47].

1.1.2.1. LA VÁLVULA DE CONTROL

La válvula de control es el único componente que está directamente influenciado por el controlador. Tiene que adaptarse tanto al controlador como a las masas a mover. Debe existir una correlación adecuada entre el rango de la señal de salida del controlador y la velocidad deseada del electrodo durante el modo de regulación. La velocidad máxima debe alcanzarse en el entorno del 80% del rango de salida [47].

El tiempo de respuesta de la válvula también es una característica muy importante. En la Fig. 1.5 se muestra la respuesta a diferentes escalones de un servo-válvula marca Rexroth [48]. Un valor típico es 80 ms desde la posición cerrada a la abierta, mientras que un electrodo que incluye la estructura de soporte puede acelerarse de cero a 80 mm/s en 500 ms en el mejor de los casos.

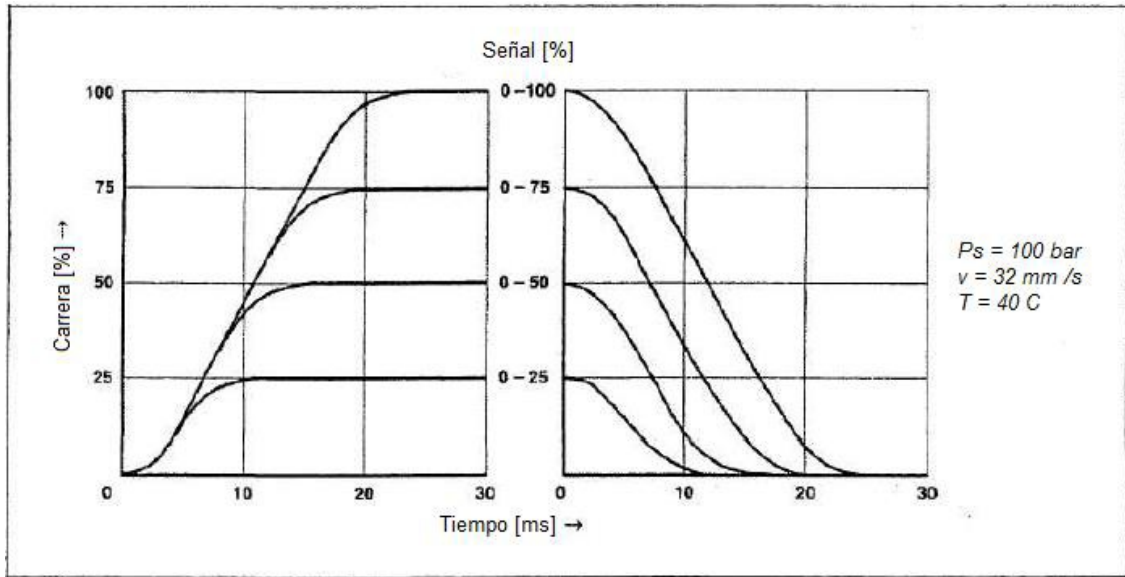


Figura 1.5 Respuesta escalonada de un servo-válvula [48].

Además, el sistema formado por masas mecánicas y fluido hidráulico compresible es un oscilador. Su frecuencia de resonancia depende del tamaño de las masas, las dimensiones del soporte del electrodo y la longitud de las tuberías hidráulicas.

1.1.3. EL CONTROLADOR

Algunas características básicas de un controlador de electrodos son esenciales para permitir una operación adecuada del horno y evitar daños a sus componentes eléctricos y mecánicos.

Bajo la consideración de que el controlador de electrodos solo puede actuar por medio de la tensión y la corriente medidas, solo puede realizar aquellas tareas que están directamente relacionadas con estas variables. Principalmente, estas se limitan a:

1. iniciar el encendido del arco evitando la rotura del electrodo,
2. evitar cortocircuitos,
3. mover el electrodo para alcanzar el punto de ajuste.

Para el desempeño de su tarea principal, el controlador necesita un punto de trabajo. Esto está representado por los datos eléctricos del arco deseado. Para definir estos datos es inevitable el conocimiento del diagrama del circuito equivalente. Durante

muchas investigaciones científicas se ha intentado establecer un diagrama de circuito equivalente que describiera el proceso del horno de forma fiable. En [49, 50] se exponen los resultados y las dificultades relacionadas con la no linealidad, la asimetría, la varianza en el tiempo y el acoplamiento electromagnético.

Para facilitar el análisis podemos auxiliarnos del diagrama de circuito equivalente que se muestra en la Fig. 1.6 donde:

1. todas las reactancias están representadas por la reactancia de los conductores de alta corriente X_i
2. todas las resistencias están representadas por la resistencia de los conductores de alta corriente R_{vi}
3. el arco eléctrico es una resistencia R_{Bi} y es proporcional a su longitud,
4. todos los componentes son lineales y constantes en el tiempo,
5. las tres fases son independientes entre sí.

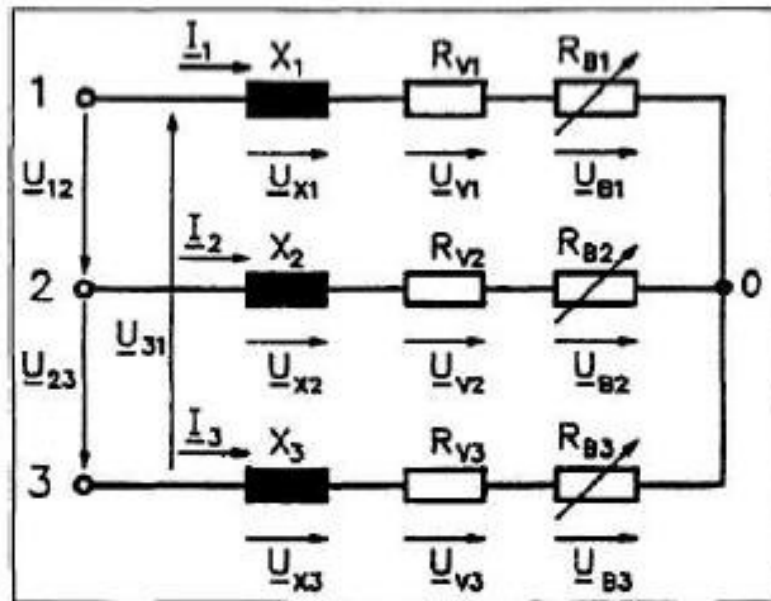


Figura 1.6 Diagrama de circuito equivalente simplificado del horno de arco eléctrico [51].

Por lo tanto, el proceso del horno se caracteriza por el diagrama circular de la Fig. 1.7. Un punto de trabajo solo puede estar en una línea de tensión constante dentro de los límites del área de trabajo.

Estos límites son:

1. máxima corriente de electrodo de acuerdo con el diseño del transformador y los conductores,
2. máxima potencia aparente suministrada por el transformador,
3. máxima tensión,
4. límite de arco estable (máximo $\cos\theta$),
5. mínima tensión,
6. línea de cortocircuito (mínimo $\cos\theta$).

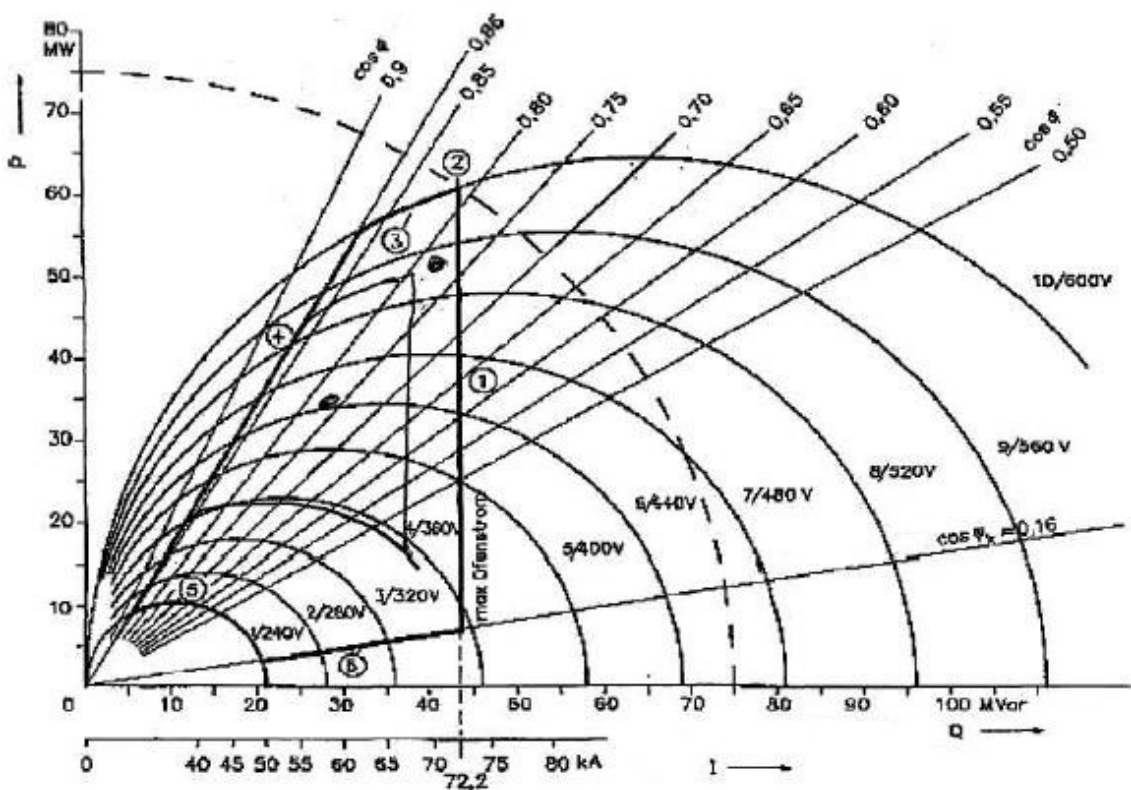


Figura 1.7 Diagrama circular simplificado de un horno de arco de AC [52].

Para el funcionamiento del horno, el usuario debe seleccionar al menos un punto de trabajo por derivación de tensión y que esté en correspondencia con los requisitos de producción. Este punto de trabajo del horno define la tensión y la corriente y, en consecuencia, los valores dependientes de la potencia activa, la potencia reactiva y la relación entre el $\cos\theta$ y la longitud del arco [52].

1.1.3.1. LA VARIABLE CONTROLADA

Para lograr los parámetros de proceso deseados, uno de ellos debe definirse como la variable a controlar. Dado que la tensión del electrodo y la corriente del electrodo son los únicos valores disponibles por medición, el punto de ajuste básico del controlador es una referencia de corriente y la desviación $D = I - I_{ref}$ es compensada por el controlador. En la práctica, hay dos opciones para I_{ref} :

1.1.3.2. CONTROL DE CORRIENTE

I_{ref} puede ser la corriente de electrodo solicitada que se ingresa como el punto de ajuste I_{set} para cada toma del transformador. Eso significa que el controlador opera en modo de control de corriente compensando la desviación $D = I - I_{set}$ para cada fase. Debido al acoplamiento entre las fases debido a $\sum_{i=1}^3 I_i = 0$, el control de corriente tiene un uso limitado, solamente es una solución alternativa para cumplir con las condiciones secundarias especiales, como la calidad o la estabilidad de la fuente de alimentación. Sin embargo, puede ser ventajoso durante el sobrecalentamiento del acero líquido después de la fusión o en cucharas [53].

1.1.3.3. CONTROL DE IMPEDANCIA

Para una mejor independencia de las fases y una longitud de arco más constante, I_{ref} se calcula a partir de la impedancia de fase deseada, por lo que el punto de ajuste del controlador se convierte en la impedancia ponderada con la corriente de fase que forma la desviación.

$$D = I_m - I_{ref}^* \Rightarrow I_m - \frac{U_m}{Z_{ref}} = \frac{I_m}{Z_{ref}} \left(\frac{U_m}{I_m} - Z_{ref} \right) \quad (1.1)$$

con

$$Z_{ref} = \frac{U_{p,ref}}{\sqrt{3}I_{ref}} \quad (1.2)$$

Donde:

I_m es la corriente de fase medida,

U_m es la tensión de fase medida,

Z_{ref} es la impedancia de fase de referencia,

$U_{pp,ref}$ es la tensión de fase a fase y

I_{ref} es la corriente de fase de referencia.

Como U_{pp} no sufre grandes fluctuaciones, especialmente durante el período de fusión [54], el control de impedancia tiene un uso extendido [20].

1.1.3.4. MEDICIÓN DE TENSIÓN Y CORRIENTE REALES

Los valores de tensión y corriente necesarios para el cálculo de los puntos de consigna están fácilmente disponibles. Es suficiente y económico medir en el lado de baja tensión del transformador y tomar los valores. La tensión se toma directamente de las barras colectoras secundarias en la sala del transformador y luego se transforma al nivel de señal necesario para el controlador. La corriente del electrodo se puede medir con transformadores de corriente a ambos lados del transformador.

1.2. MODELADO DEL SISTEMA DE POSICIÓN DE LOS ELECTRODOS EN UN HAE

Para adentrarse en el objetivo de perfeccionar el esquema del sistema investigado es recomendable obtener un modelo específico para esta aplicación [55]. Los modelos dinámicos de procesos como el del arco eléctrico posibilitan estudios de simulación para realizar análisis de comportamiento fuera del proceso, elaborar propuestas de control y optimización, así como comprender muchos detalles del sistema [56].

En la literatura se han presentado diferentes definiciones de modelo [57, 58], una de estas expresa que se trata de una representación de aspectos esenciales del sistema en una forma adecuada y que puede ser experimentalmente verificada con el objetivo de aclarar dudas sobre el sistema. Por otro lado, se conoce que la forma y contenido del modelo dependerá de los objetivos planteados y del conocimiento disponible y que un método sistemático para el modelado comprende una fase de

análisis del sistema original, una fase de consecución y refinamiento y una fase de evaluación [56-58].

En la Fig. 1.8 se muestra el diagrama de bloques del sistema de posición de los electrodos.

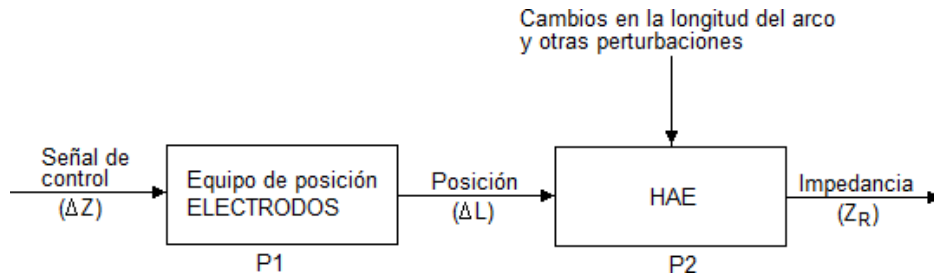


Figura 1.8 Diagrama en bloques del SPE.

P1 establece la posición de los electrodos en respuesta a las señales de control y P2, la dinámica en la impedancia del horno, es decir, los efectos del posicionamiento sobre las impedancias en las fases. Además, una estimación de las perturbaciones que afectan las impedancias en las fases es importante, generadas principalmente por el voltaje variable entre el electrodo y el material para la fundición.

En la Fig. 1.9 se muestra el equipo de posición de electrodos, compuesto por el controlador y el equipamiento hidráulico y mecánico que posibilita el desplazamiento de los electrodos.

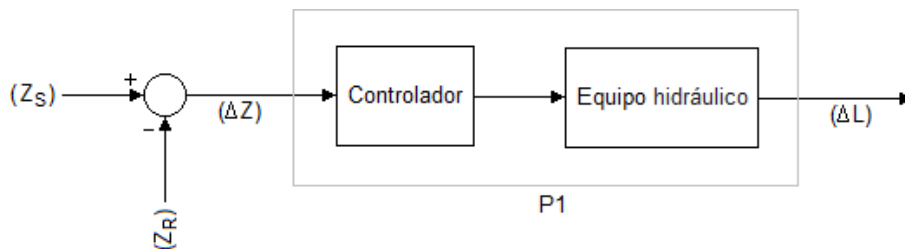


Figura 1.9 Equipo de posición de electrodos.

P2 puede ser modelado como un circuito eléctrico representándose el arco eléctrico por una resistencia variable [33-36,54]. Son modelos basados en la curva tensión-corriente característica de la carga, obtenida a partir de mediciones y ensayos con la intención de simplificar parámetros dentro de un modelo del arco eléctrico. Sin embargo, la necesidad de contar previamente con curvas características y su

dependencia de la carga reduce la simpleza del análisis, perdiendo así parte de su ventaja sobre otros métodos [43].

Un modelo de horno de arco eléctrico Cassie-Mayr capaz de representar el comportamiento estático y dinámico de la carga del horno de arco eléctrico con suficiente precisión se ha estudiado en [59].

El modelo de Cassie considera la densidad de corriente y la temperatura del canal del arco eléctrico constantes, el campo eléctrico y el área de sección transversal variables en función de la corriente, y la conductancia proporcional a la sección transversal. La pérdida de energía se da por convección y es proporcional a la energía almacenada por unidad de volumen.

La ecuación x muestra la expresión matemática del modelo.

$$\frac{1}{g} \frac{\partial g}{\partial t} = \frac{1}{\tau_a} \left(\frac{v_a^2}{U_0^2} - 1 \right) \quad (1.3)$$

donde: g es la conductancia del arco eléctrico; v_a es la tensión del arco eléctrico; U_0 es la tensión del arco en estado estático y τ_a la constante de tiempo del arco eléctrico.

El modelo de Mayr, considerado como uno de los modelos básicos del arco eléctrico, plantea que la transferencia de calor al medio se realiza en toda la periferia del arco, de sección transversal constante, por conducción y que la conductividad varía exponencialmente con la energía almacenada.

La ecuación x muestra la expresión matemática del modelo:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial g}{\partial t} = \frac{1}{\tau_a} \left(\frac{v_a i_a}{P_0} - 1 \right) \quad (1.4)$$

donde: g es la conductancia del arco eléctrico y P_0 es la potencia del arco al momento de la interrupción.

Como las características del arco dependen de varios factores, como el material del electrodo, la geometría de los electrodos, la separación entre los electrodos, la posición de los electrodos, el tipo y la presión del gas es imposible establecer

parámetros invariantes, es necesario la identificación experimental en los puntos de operación del HAE utilizados [60, 61].

Un modelo de “caja negra” es aquel en el cual el sistema es modelado mediante una única función de transferencia que aproxima el comportamiento determinado de una salida ante una entrada considerada [62]. Este tipo de modelado requiere el trabajo entorno a un punto de equilibrio considerado pues fuera de este punto de funcionamiento el comportamiento del sistema real no encaja con el de la función de transferencia [62].

En la literatura podemos encontrar dos vertientes fundamentales en cuanto a la identificación para la obtención de un modelo de caja negra, la identificación experimental mediante señales típicas [56, 63, 64] y la identificación paramétrica [64]. La identificación experimental mediante señales especiales o identificación clásica resulta ser el enfoque más directo y el que permite obtener el modelo de un proceso a más corto plazo. Las señales utilizadas con más frecuencia son los escalones y las llamadas secuencias binarias pseudoaleatorias [65].

La restricción más importante de esta solución es la necesidad de introducir señales de prueba que perturban de manera indeseable al proceso, y que a menudo tropiezan con la resistencia de los operadores de planta. Una limitación muy importante de estos métodos es que, como resultado del proceso de identificación, se obtienen exclusivamente modelos determinísticos, sin considerar los posibles modelos de perturbación, lo que redundará en un grado de aproximación, en ocasiones excesivo, no apropiado para el desarrollo de estrategias de control sofisticadas.

A diferencia de los métodos de identificación clásica, los de identificación paramétrica permiten caracterizar de forma más ajustada a los modelos, ya que incorporan en su estructura modelos de perturbación lo que los hacen ideales para el empleo de estrategias de control sofisticadas [65].

Los procedimientos para construir modelos e identificar sistemas involucran las técnicas antes mencionadas que deben tener en cuenta la planificación experimental, la selección de la estructura del modelo, la estimación de parámetros y la validación.

La construcción de modelos a partir de datos implica tres elementos básicos:

1. los datos,
2. un conjunto de modelos candidatos y
3. una regla por medio de la cual los modelos candidatos puedan ser parametrizados y evaluados usando los datos.

En resumen [65], se plantea algunas recomendaciones útiles para una correcta estrategia de identificación, siendo algunas de las más relevantes:

En la etapa de análisis debe tenerse en cuenta que, aunque el sistema sea no lineal, puede ser útil adoptar un modelo lineal con el objetivo de estudiar su comportamiento ante variaciones relativamente pequeñas sobre un punto de trabajo.

Pueden utilizarse hipótesis simplificadoras para describir el comportamiento de un sistema mediante un modelo de orden reducido más fácil de identificar y luego de utilizar.

En el análisis debe tenerse en cuenta la determinación del tiempo de duración de las experiencias, porque pueden existir parámetros que varíen en función de perturbaciones lentas no medibles, o aparecer no linealidades que no están presentes en un estado transitorio alrededor de un punto de trabajo.

Debe analizarse si el sistema cuyo modelo será identificado, trabajará a lazo cerrado o a lazo abierto, caso este que requiere mayor precisión.

Es importante considerar el ruido presente. Ante señales muy ruidosas es recomendable filtrar la información que se va a procesar, para que los datos analizados reflejen de forma más exacta el comportamiento real del sistema.

Es importante validar la concordancia entre los resultados del análisis del modelo matemático obtenido, y los resultados del estudio experimental del sistema físico.

Si se desea obtener un sistema de control eficiente, es muy importante comprender la mecánica del sistema hidráulico responsable del movimiento de los electrodos, revisamos un modelo presentado en [66], que es típico de muchas instalaciones [50] y se representa como una combinación de una masa, un resorte y un amortiguador, como en la Fig. 1.10.

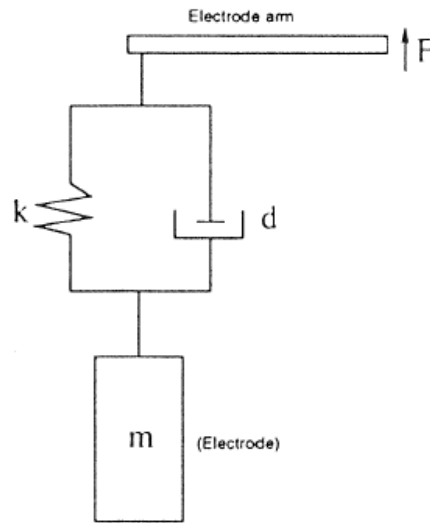


Figura 1.10. Sistema de posicionamiento de los electrodos [50].

Por lo tanto, la dinámica de los electrodos está representada por un sistema de segundo orden amortiguado:

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = F + d \frac{\partial x}{\partial t} + kx - mg \quad (1.5)$$

Donde x representa la posición del electrodo, F es la fuerza hidráulica, d y k representan las constantes del amortiguador y del resorte, m es la masa del electrodo y g es la aceleración de la gravedad.

En [67], la siguiente función de transferencia proporciona un modelo simple de segundo orden con retraso del equipo de posicionamiento de electrodos:

$$G_{EP}(s) = \frac{K}{(Ts+1)s} e^{-\tau s} \quad (1.6)$$

donde K es la ganancia, T y τ son constantes de tiempo estimadas utilizando mediciones en lazo cerrado.

Hasta aquí ha podido notarse la importancia de adentrarse en el modelado del caso de estudio a través de la vía experimental para obtener los parámetros de cada

función de transferencia, lo cual puede facilitarse considerando estructuras de resultados anteriores. Ello puede posibilitar un mejor diseño y evaluación a escala de simulación de la estrategia de control que se va a proponer.

1.3. ESTRATEGIAS DE CONTROL EN EL SISTEMA DE POSICIÓN DE ELECTRODOS

Entre los primeros reportes de control para un sistema de posición de electrodos en un HAE, está la patente de Edwin J. Borrebach en 1969 [68] orientada a proporcionar un equilibrio entre las fases a través de un controlador con acción proporcional.

Muy temprano, en la década de los 70 del pasado siglo se utilizaron consideraciones de diseño más elaboradas que el controlador PID, un controlador adaptativo, que utiliza la temperatura ambiente del arco como un parámetro de control adicional para ponderar la retroalimentación del error fue propuesto [69], modificándose su algoritmo posteriormente [70].

El rendimiento y la robustez de los controladores PID se pueden mejorar mediante su generalización a controladores fraccionados [71, 72]. Varios trabajos recientes propusieron la aplicación de controladores de orden fraccional a hornos industriales [16, 73-75]. Describen los diferentes comportamientos que se pueden lograr en los sistemas controlados cambiando el orden fraccional de los operadores diferenciales / integrales.

Varios de los diseños de control existentes utilizan técnicas de adaptación [76-83], sin embargo, no consideran completamente la no linealidad del sistema; ignoran el efecto de la no linealidad de la zona muerta en el sistema hidráulico o pasan por alto la no linealidad del arco eléctrico.

Una estrategia de control avanzada, basada en los principios del control algorítmico con modelo autoajutable y diseñado para acomodar las características no lineales y variables en el tiempo del proceso del HAE [84], fue propuesto en 1988 y utilizado como referencia en varios trabajos posteriores [85].

A partir de la teoría del control adaptativo difuso para sistemas no lineales en la década de 1990, el control adaptativo difuso ha sido objeto frecuente de investigación [35, 86-95], donde se consideran los impactos del error de seguimiento y el error de aproximación a la ley adaptativa de parámetros. También se han

sugerido controladores inteligentes, en [96] ofrecieron una red neuronal para controlar la posición del electrodo, que puede aprender en línea durante el proceso de fusión. [97] presentó un sistema de control inverso adaptativo basado en una red neuronal de funciones de base radial, que identificaba y desacoplaba el proceso en tiempo real.

La mayoría de ellos son controladores complejos que para su implementación en la práctica requieren una alta velocidad en la adquisición de los datos y en los dispositivos de procesamiento, elemento este que dificulta su implantación práctica en la industria. Otro elemento a tener en cuenta con respecto a los controladores inteligentes antes mencionados es que no son capaces de garantizar al mismo tiempo la estabilidad y la robustez del proceso.

En la actualidad, este sistema está controlado principalmente por controladores PID [34, 35], la estructura de un controlador PID clásico viene dada por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (1.7)$$

Al observar (1.7) se tiene que la salida del controlador, $u(t)$, no es más que la suma de la salida de tres términos: K_p es el parámetro proporcional y se puede interpretar como el valor de la ganancia del controlador, K_i es el parámetro integral y permite que el valor de la salida del controlador cambie a una razón proporcional a la señal de error $e(t)$ y, K_d es el parámetro derivativo y permite que la magnitud de la salida del controlador sea proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error [87].

La mayoría de los métodos de diseño de sistemas de control convencionales, se basan en el diseño de una configuración fija, en el que en un principio el diseñador decide la configuración básica del sistema completo y el lugar donde el controlador estará colocado en relación con el proceso controlado [88].

En términos generales, los controladores PID se han diseñado utilizando dos enfoques diferentes: control basado en modelo y sintonía directa. Los basados en modelos comienzan con un modelo matemático sencillo del proceso, generalmente un sistema de primer orden con retardo de tiempo. Los basados en sintonía directa

aplican un controlador al proceso, y se efectúan algunos experimentos sencillos para obtener los parámetros del controlador [89].

CONCLUSIONES

Los modelos obtenidos por la vía analítica presentan como principal desventaja que usualmente utilizan tal cantidad de parámetros que su correcta aplicación no es posible para la mayoría de los usuarios. De igual forma, los obtenidos a través de las características tensión-corriente necesitan contar previamente con curvas características, lo que reduce la simpleza del análisis. Por lo antes expuesto para el desarrollo de este trabajo se utilizará la técnica de modelado a través de una caja negra.

Por otra parte, los controladores inteligentes son una herramienta poderosa cuando no se conoce con exactitud el comportamiento del proceso, pero requiere en su implementación una capacidad computacional elevada, y no son capaces de garantizar a la vez la estabilidad y la robustez del sistema.

El controlador PID lineal es fácil de ajustar y es capaz de lograr desempeños satisfactorios en torno a un punto de trabajo, resultando adecuado para un proceso donde el punto de operación no varía constantemente.

Como el objetivo de este trabajo es lograr un buen compromiso entre el máximo sobre paso y el error a estado estacionario, se seleccionó para el control el PID, tomando en cuenta sus propiedades y su bondad para combinarse con otros esquemas de control más avanzados [56].

Capítulo 2. MODELADO DEL SISTEMA DE POSICIÓN DE LOS ELECTRODOS Y AJUSTE DEL CONTROLADOR PI

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se obtiene el modelo matemático que describe el comportamiento del subsistema hidráulico del sistema de posición de los electrodos. A continuación, se obtiene el modelo matemático del subsistema eléctrico de dicho sistema. Luego se unen ambos subsistemas para conformar en su totalidad el sistema de posición y a partir del mismo se ajustan los parámetros correspondientes a un controlador PID. Por último, el controlador PID se compara con el controlador existente en el momento de realizados los experimentos en el sistema, ajustados a partir del modelo del sistema obtenido mediante experimentos.

2.1. EL SISTEMA DE POSICIÓN DE LOS ELECTRODOS DEL HAE DE ACINOX LAS TUNAS

La planta objeto de estudio la constituye el horno de arco eléctrico de la empresa ACINOX Las Tunas, Cuba. El mismo es un horno de corriente alterna trifásico con una capacidad de producción de 60 t y un consumo aproximado de 525 kWh/t. Entre los sistemas que lo conforman se encuentra el de la posición de los electrodos. Este sistema constituye una parte importante del horno, pues la posición del electrodo determina de manera directa la impedancia del arco y por consecuencia la longitud del arco.

Entre los tipos de sistemas de regulación de hornos de arco eléctrico más difundidos se encuentran SIMELT, Q-REG, DIGITARC y ARCELEC [99]. En el caso específico de ACINOX Las Tunas la tecnología utilizada desde su fundación es la que brinda el SIMELT, Fig. 2.1. Las funciones del mismo varían desde el tratamiento de las señales que llegan desde el proceso hasta el control de la posición de los electrodos y el acondicionamiento de la señal que va hacia la servo-válvula.

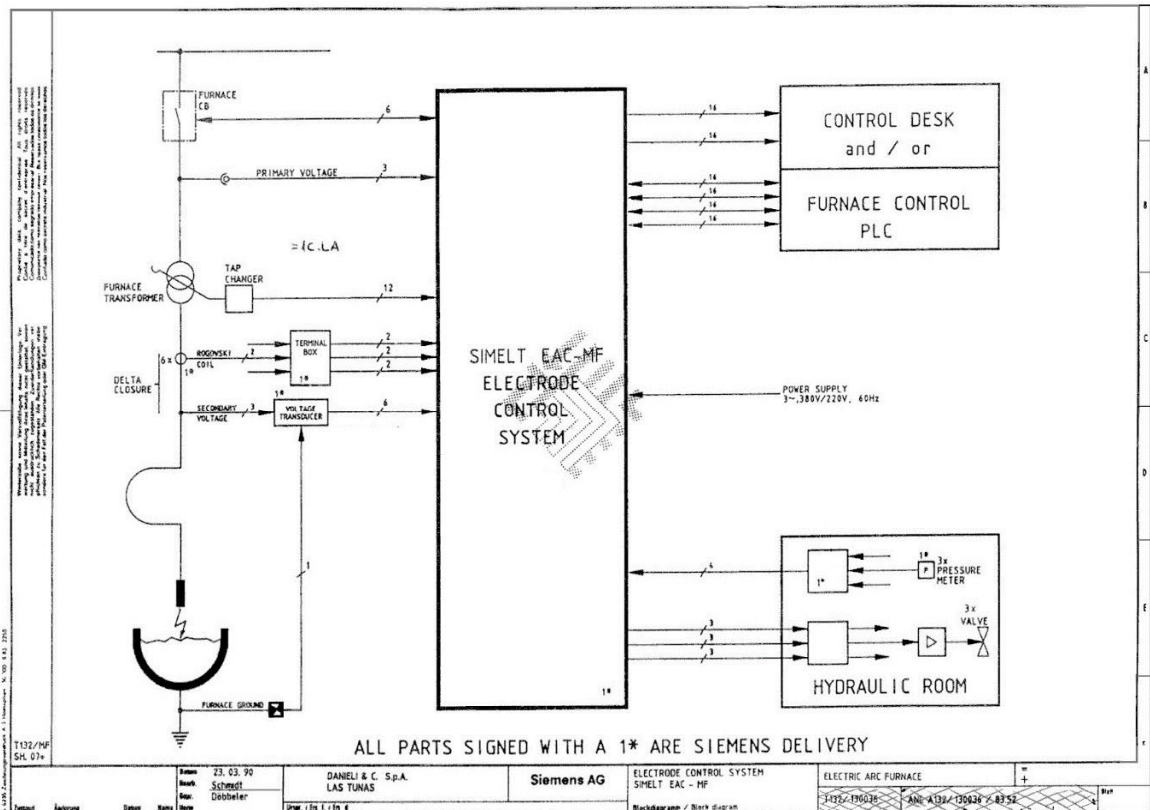


Fig. 2.1 Esquema del SIMELT del horno de arco eléctrico de ACINOX Las Tunas.

Los primeros bloques que conforman el esquema del SIMELT se encargan de escalar las señales de tensión y corriente de fase, convirtiendo la tensión de fase de 0-750 VAC en 0-10 VDC, y la corriente de fase de 0-50 kA AC en 0-10 VDC, Fig. 2.2. En los bloques posteriores se acondicionan ambas señales antes de pasar a un bloque donde se dividen para obtener el valor de la impedancia, Fig. 2.3. A esta señal de impedancia también se le realiza un tratamiento para luego ser comparada con la referencia, Fig. 2.4 y el error que se obtiene de esta comparación llega al controlador de impedancia, Fig. 2.5. Para el caso específico del horno de ACINOX el controlador que en el momento de realizado los estudios se encontraba en funcionamiento es del tipo proporcional. Por último, la señal de control es acondicionada antes de ser enviada hacia la entrada del subsistema hidráulico.

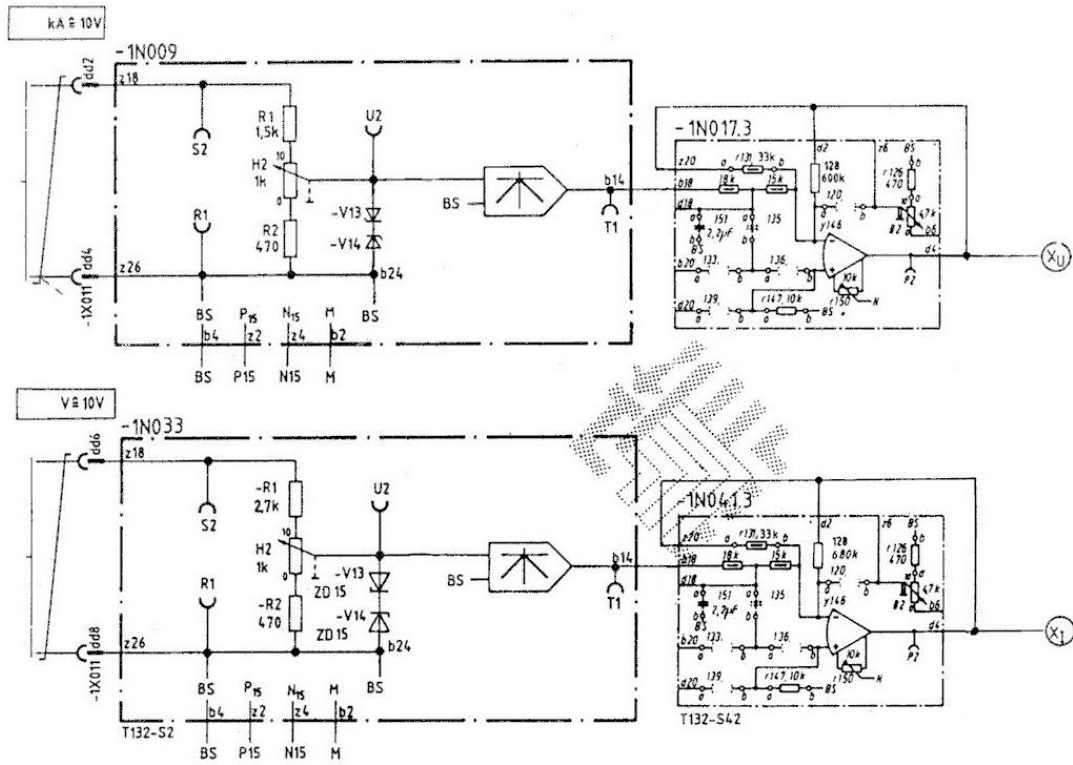


Fig. 2.2 Bloques para escalar las señales de tensión y corriente de fase.

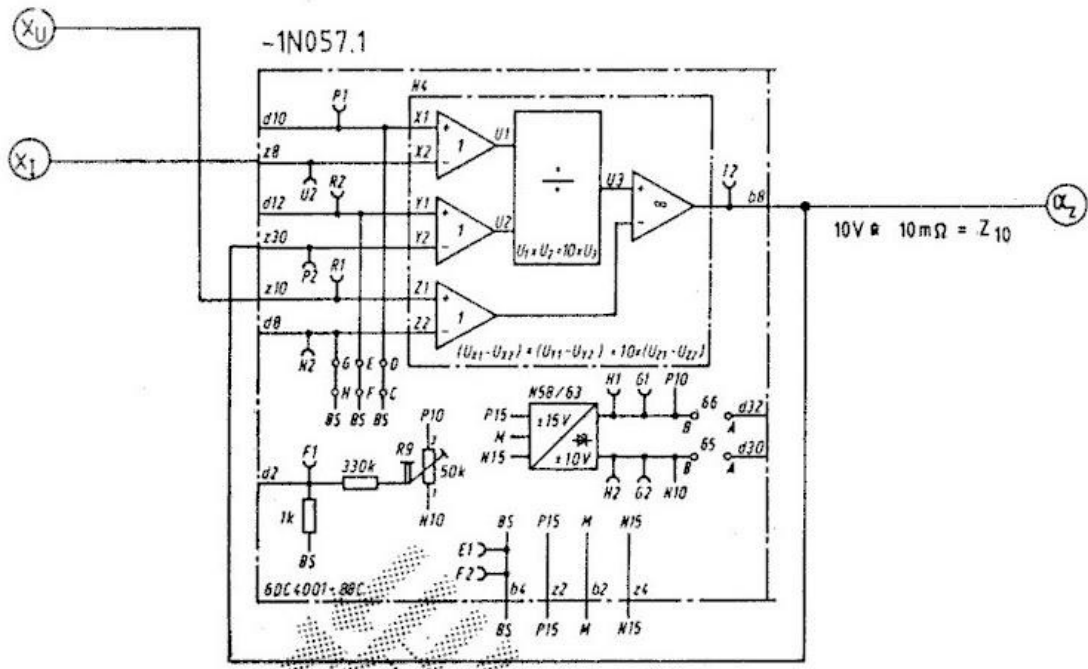


Fig. 2.3 Bloque para escalar la señal de impedancia de fase.

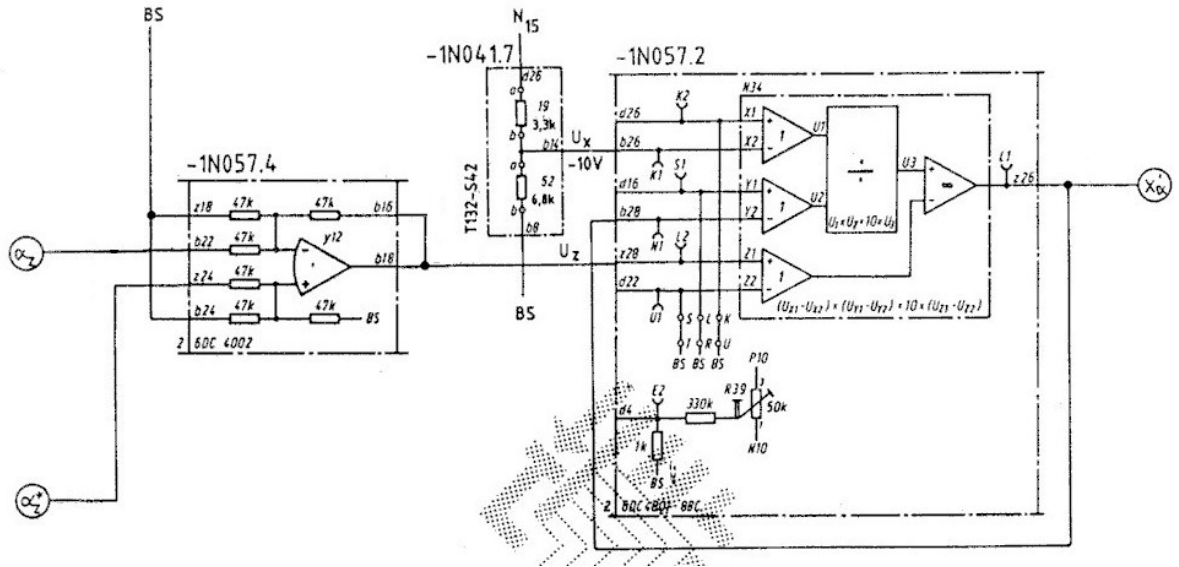


Fig. 2.4 Bloque para escalar la señal desviación de la impedancia.

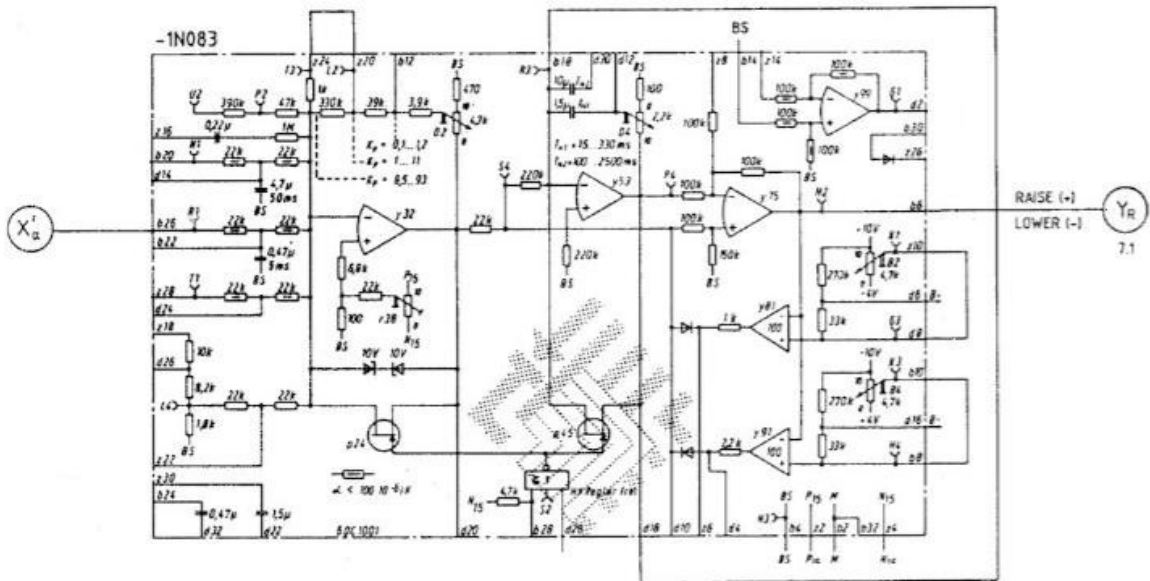


Fig. 2.5 Controlador del sistema de posición de electrodos.

El set de impedancia, α_z^* , puede variar en dependencia del perfil de calor con la que se esté trabajando. Antes de que el error obtenido, X'_{α} , de la comparación entre el set

y la impedancia medida, α_Z , llegue a la entrada del controlador el mismo pasa por un proceso de tratamiento con el objetivo de estabilizar la señal.

La señal de control resultante, Y_R constituye la entrada del subsistema hidráulico encargado de posicionar el electrodo en dependencia del valor de impedancia medido. Esta posición influye directamente en el valor de la corriente y la tensión que puede ser traducido en un valor de impedancia específica, siendo esta última una medición indirecta de la longitud del arco. Las señales de tensión y corriente de fase tomadas para el cálculo del valor de la impedancia son tratadas en el propio SIMELT para minimizar los ruidos presentes en la medición. El esquema de la Fig. 2.1 se puede resumir en el sistema de control a lazo cerrado de la Fig. 2.6.

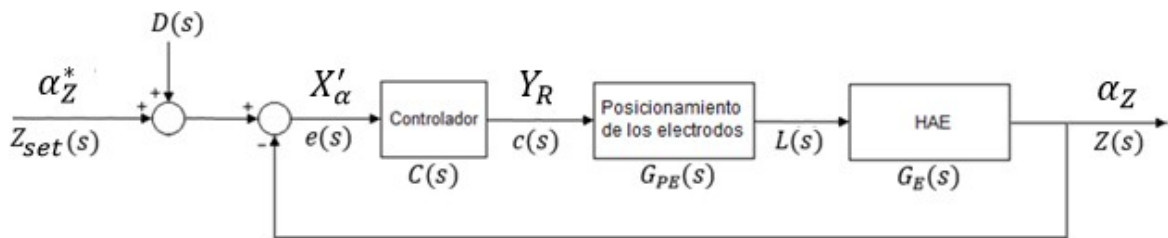


Fig. 2.6 Lazo cerrado del sistema de posición de los electrodos simplificado.

A la hora de realizar la identificación de este tipo de sistemas los autores suelen obtener por separado ambos subsistemas y luego los unen para obtener un único sistema [11, 39, 40, 45]. En base a esto la identificación se realizará de la siguiente manera:

1. La identificación del controlador existente se realizará a lazo abierto, aplicándole una señal del tipo escalón en X'_α .
2. La identificación de los parámetros de los modelos de los subsistemas de posicionamiento y eléctrico se realizará a lazo cerrado, aplicándole una secuencia binaria pseudoaleatoria (SBPA) en D .
3. La magnitud de la SBPA será de $\pm 2\text{VDC}$ equivalente a $\pm 2\text{ m}\Omega$.
4. El tiempo y la cantidad de muestras se definirán excitando el sistema en D con un escalón de magnitud $\pm 2\text{VDC}$.

5. Los experimentos a lazo cerrado se realizarán en el TAP 16 (650 VAC), en el estado de fusión de la última carga (11 minutos después de iniciada la fundición) y con un set de impedancia de $7.5 \text{ m}\Omega$.
6. La adquisición y generación de las señales se realizarán a través de la tarjeta de adquisición de datos TDA NI USB 6008.
7. La medida del desplazamiento del electrodo se realizará con el sensor de tracción por cable SGP/1.
8. Los datos obtenidos por medio de los experimentos serán procesados en el toolbox de identificación y a partir de ellos se obtienen el modelo. En este estudio se estableció como criterio de selección del modelo un ajuste igual o superior al 60%.

2.2. EL CONTROLADOR

De la documentación de la planta, mostrada en la Fig. 2.5, se deduce que el actual controlador es de tipo proporcional, aunque el valor de la ganancia es desconocido por lo que se procedió a identificar dicho valor analizando la respuesta Y_R a un escalón de magnitud 1V generado en X'_α . La Fig. 2.7 muestra las señales de entrada y de salida del controlador. Se seleccionó como estructura para la estimación del modelo la de ganancia sin ceros, polos o retardo obteniéndose un valor de ganancia de 3.8 con un ajuste del 100%.

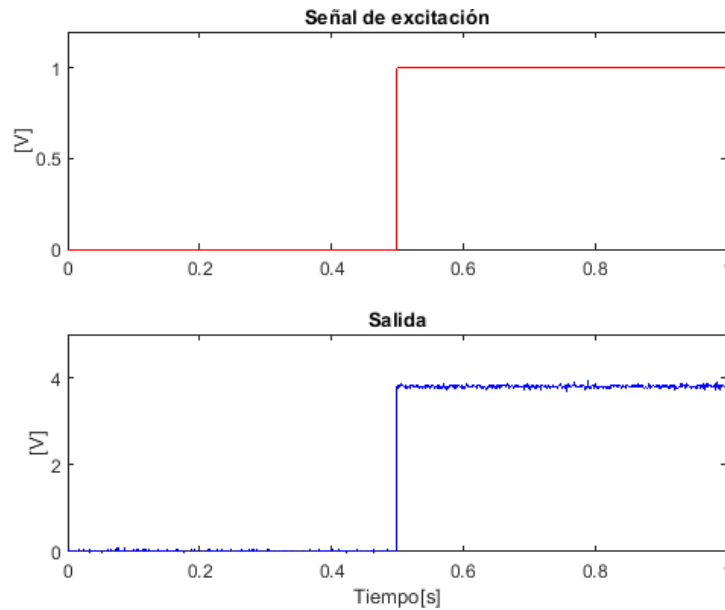


Fig. 2.7 Respuesta de X'_α ante un escalon de magnitud 1V en Y_R .

2.3. EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DE LOS ELECTRODOS

La transmisión hidráulica es la más utilizada para el movimiento de los electrodos de los hornos de arco eléctrico. Comparado con los de transmisión electromecánicos poseen varias ventajas: ninguna transmisión mecánica compleja, altas velocidades y la capacidad de mover grandes masas con altas aceleraciones [100].

Los actuadores hidráulicos son elementos que transforman la energía hidráulica proporcionada por la bomba en energía mecánica [101]. Según el movimiento y el trabajo que realicen se pueden agrupar en lineales (cilindros) o rotativos (motores). En particular los cilindros son actuadores que transforman la energía hidráulica en una fuerza lineal, siendo utilizada en donde se requiere grandes fuerzas de empujes y desplazamientos. En los cilindros de simple efecto, como en el caso de estudio, el fluido sale y entra por una sola cámara, y su movimiento en sentido contrario se realiza por fuerzas externas al propio sistema hidráulico como puede ser la fuerza de gravedad.

La dinámica de este tipo de sistemas está caracterizada por la presencia de no linealidades como son las fuerzas de fricción, la dinámica de la válvula, la compresibilidad del aceite, y la influencia de las cargas [102].

En el caso particular de los modelos en el dominio de la frecuencia los autores se dividen entre los modelos de tercer orden con integrador (2.1) [100, 103, 104] y de segundo orden con integrador y retraso de transporte (2.2) [39, 105]. De estas dos variantes la más utilizada en el caso particular de los actuadores de los sistemas de posición de electrodos de un horno de arco eléctrico es la (2.2).

$$\frac{L(s)}{U(s)} = \frac{K}{s(T_1s+1)(T_2s+1)} \quad (2.1)$$

$$\frac{L(s)}{U(s)} = \frac{K}{(Ts+1)s} e^{-\tau s} \quad (2.2)$$

En la identificación de este tipo de sistemas se pueden distinguir dos tipos de señales [103]: la señal de entrada que se envía al sistema y que el actuador debe reproducir (señal que se envía a la servo-válvula) y la señal de salida que indica cómo se está comportando dicho actuador (señal recogida del sensor de posición).

Para implementar el modelo en herramientas de simulación, es necesario tener en cuenta que en el camino entre la señal de entrada y la de salida se deben incluir las no linealidades estáticas. Una zona muerta, visible de forma experimental, pues los electrodos no comienzan a desplazarse hasta que la señal que llega del controlador no sobrepasa un umbral determinado. También, aparece la saturación al encontrarse acotado el recorrido del actuador por las propias características físicas de la instalación.

2.3.1. MODELADO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DE LOS ELECTRODOS

Para comenzar el diseño del experimento a través del cual se establecen los límites que conforman la zona muerta del subsistema se determinó el rango de salida del controlador y el comportamiento del sistema en base a esta salida. El controlador varía su valor de salida en un rango de $\pm 10V$ de tal forma que ante un valor negativo el electrodo se desplaza hacia abajo y en caso de un valor positivo en sentido contrario.

En el desplazamiento hacia arriba se generó una señal de tensión partiendo de 0 V y aumentando en escalones de 0.1 V hasta que se detecte que el brazo porta-

electrodos comienzan a desplazarse. Este desplazamiento se detecta colocando un transductor de posición lineal a la salida del subsistema y conectando el mismo a un PLC que muestra la señal de posición medida en la PC. Para el caso del desplazamiento hacia abajo se realiza la operación análoga al del sentido opuesto, solo que en este caso partiendo de 0 V disminuyendo a continuación en escalones de -0.1 V.

Para lograr mayor exactitud en la determinación de la zona muerta se partió del valor inmediato inferior del valor en el que se detectó el inicio del desplazamiento positivo y se comenzó a generar escalones que aumentaban dicha señal en 0.01 V hasta detectar el movimiento el brazo porta-electrodos. De manera análoga se realizó para el desplazamiento en sentido contrario.

La zona muerta del proceso se determinó al comprobarse que el cilindro comienza a desplazarse cuando a su entrada están presentes valores de tensión superiores a 0.9 V en el desplazamiento hacia arriba e inferiores a los -0.8 V en el desplazamiento hacia abajo.

En el caso de la saturación las propias características físicas del cilindro hidráulico limitan el desplazamiento del mismo. Para determinar los valores límites de la saturación se colocó el brazo porta-electrodos en el tope inferior y se tomó este como punto cero y a continuación se desplazó el brazo hasta que llegó a su tope superior determinado por un limitador físico presente en la instalación. El desplazamiento antes mencionado se midió a continuación utilizando una cinta métrica dando como resultado que el mismo se mueve en un rango de 0 a 390 cm, siendo estos los límites de la saturación.

Se reconoce que el subsistema es de parámetros variables en el tiempo, no obstante, se estima que los parámetros varían muy lentamente en el tiempo y por ello el sistema puede considerarse lineal en cada punto de operación.

En la identificación de procesos mediante señales especiales, las utilizadas con más frecuencia son los escalones y las secuencias binarias pseudoaleatorias [106, 107]. Las señales aleatorias poseen, con respecto a otras como el escalón, la ventaja de que su amplitud puede ser muy pequeña, reduciéndose por tanto el grado de perturbación que se introduce en la planta objeto de identificación.

Una excelente combinación de señales para la identificación puede consistir en la aplicación previa de un escalón, como el mostrado en la Fig. 2.8, en la variable de control y después aplicar la SBPA. La respuesta al escalón permitiría estimar con mayor precisión tres parámetros importantes: la ganancia estacionaria, el tiempo de retardo y la constante de tiempo dominante. Los dos primeros pueden servir para chequear y corregir el resultado de la identificación obtenida mediante la SBPA, mientras el tercero permite seleccionar más acertadamente el período de conmutación de la SBPA de acuerdo con la regla práctica de que el período de conmutación debe ser de 5 a 7 veces menor que la constante de tiempo menor del proceso [106-108].

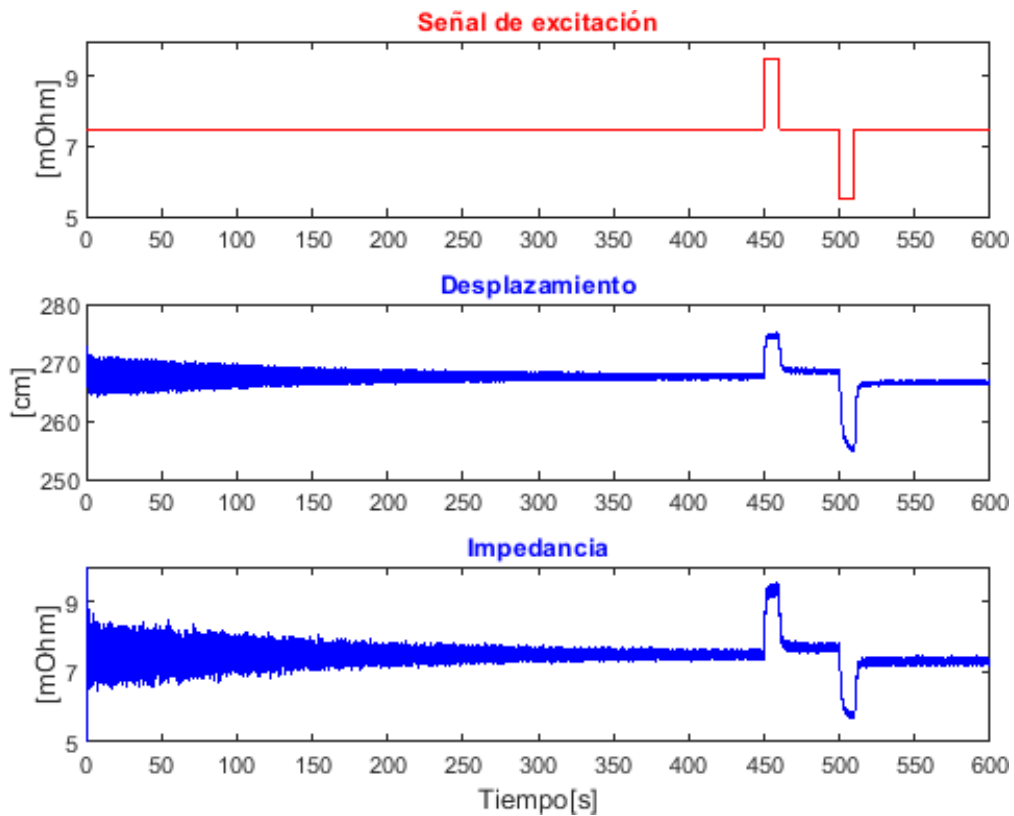


Fig. 2.8 Respuesta de L y Z ante un escalon de magnitud $\pm 2V$ en D.

En el proceso de diseño de la señal SBPA a utilizar en los experimentos, se excitó el sistema con una señal tipo escalón cuya amplitud correspondió al máximo valor que se puede tener a la entrada del proceso en el punto de operación seleccionado. La

respuesta, mostrada en la Fig. 2.8, ante esta excitación, fue procesada y se obtuvo la constante de tiempo dominante, la misma brinda la información necesaria para el correcto diseño de las señales pseudoaleatorias.

El movimiento realizado por el cilindro hidráulico es medido por un transductor de posición lineal. El mismo es calibrado de tal forma que cuando el cilindro se encuentra en la posición inicial genera un valor de salida mínimo de 0V, y cuando este llega a su tope mecánico, 390 cm, se tiene el valor máximo de 10V.

2.3.1.1. EXPERIMENTO, SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL MODELO OBTENIDO.

En la Fig. 2.9 y 2.10 se muestran las señales de excitación y desplazamiento del electrodo, una vez concluido el proceso de tratamiento de los datos se seleccionó la estructura de modelo a utilizar. En el caso de los actuadores hidráulicos, varios reportes consultados proponen modelos como (2.1) y (2.2) [39, 100, 104, 109]. En esta investigación se seleccionó la estructura (2.2), de segundo orden con integrador y retardo, por haber sido la más utilizada en los principales reportes de actuadores hidráulicos para los HAE [39, 40, 105]. Además, la misma al ser de bajo orden resulta conveniente para su uso con métodos de sintonía de controladores PID y se conoce que puede representar adecuadamente el comportamiento dinámico observado en este tipo de sistemas.

Los datos graficados en la Fig. 2.10 son procesados y a partir de ellos se obtienen el modelo que describe el comportamiento del sistema cuando este se desplaza obteniéndose un modelo con ajuste igual a 83%.

$$G_{PE}(s) = \frac{1.6}{(0.7s+1)s} e^{-0.2s} \quad (2.3)$$

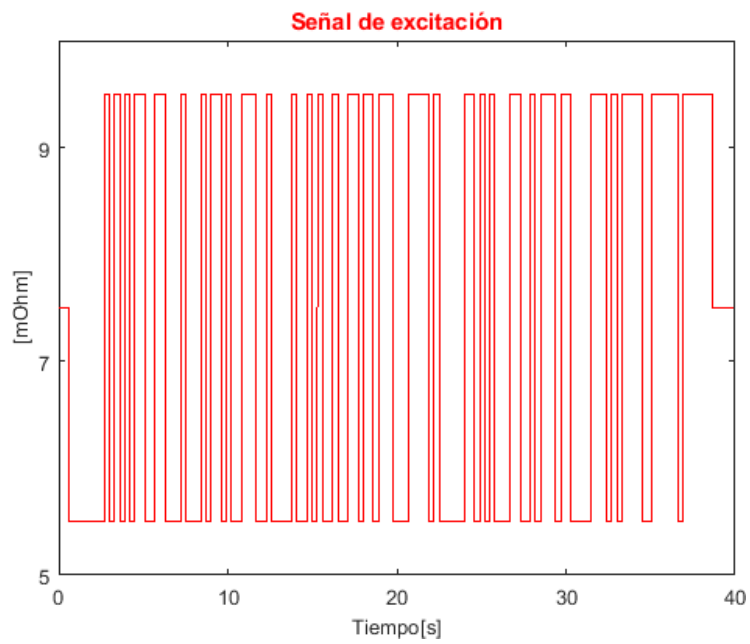


Fig. 2.9 Señal SBPA generada en D.

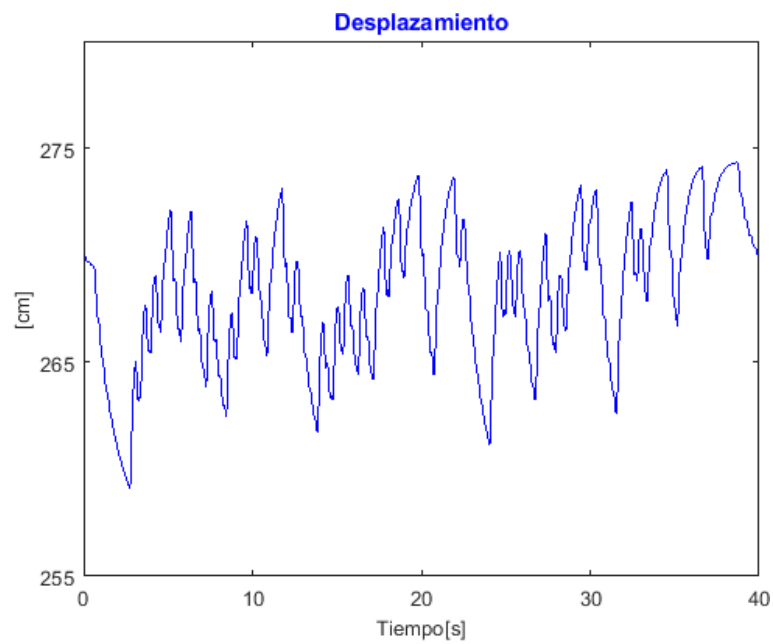


Fig. 2.10 Respuesta de L ante un Señal SBPA de magnitud $\pm 2VDC$ en D.

2.4. EL SISTEMA ELÉCTRICO DEL HAE

Variadas son las propuestas de los autores para la obtención de un modelo que represente este subsistema de acuerdo con el objetivo final [39, 100, 112, 113]. En [8, 39, 40] se propone un modelo en el dominio de la frecuencia cuya estructura de segundo orden sin retardo (2.4), que es utilizado, junto con el modelo del subsistema hidráulico, en el diseño y ajuste de controladores para dicho sistema de regulación.

$$\frac{Z(s)}{L(s)} = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} \quad (2.4)$$

En la identificación de este tipo de sistemas se pueden distinguir dos tipos de señales: la posición del electrodo como señal de entrada y la impedancia del arco como señal de salida. La primera constituye la salida del subsistema de posicionamiento del electrodo, mientras que la segunda es la medición indirecta de la longitud del arco.

2.4.1. EXPERIMENTO, SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL MODELO OBTENIDO.

En la Fig. 2.9 y 2.11 se muestran las señales de excitación e impedancia, a partir de ellas se obtiene el modelo que describe el comportamiento del sistema cuando este se desplaza obteniéndose un modelo con ajuste igual a 67%.

$$G_E(s) = \frac{0.19}{(0.25s+1)(0.025s+1)} \quad (2.5)$$

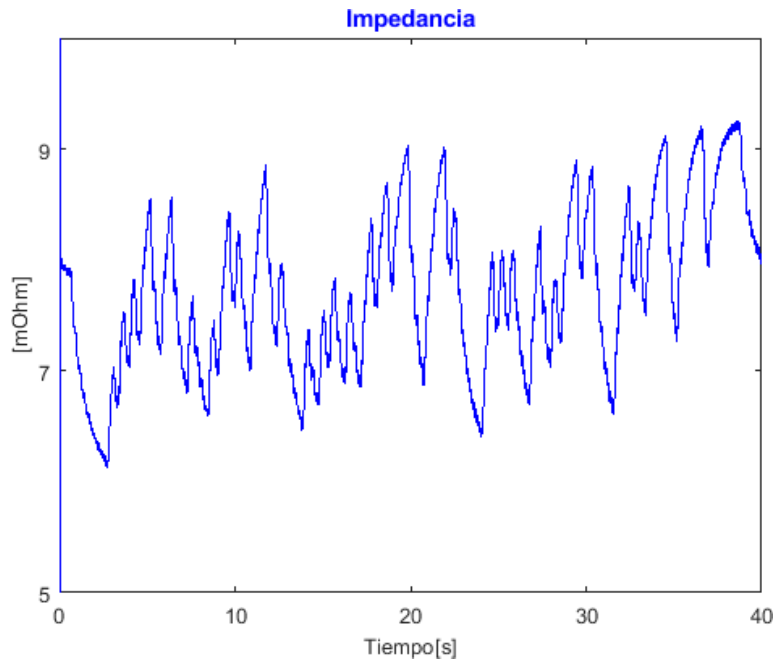


Fig. 2.11 Respuesta de Z ante un Señal SBPA de magnitud $\pm 2VDC$ en D.

2.5. DISEÑO DEL LAZO DE CONTROL DEL SISTEMA DE POSICIÓN DE LOS ELECTRODOS

En la Fig. 2.6 se muestra el lazo de control del sistema de regulación de la posición de los electrodos simplificados el que queda como se muestra en la Fig. 2.12 si sustituimos en el mismo los modelos obtenidos en (2.3) y (2.5).

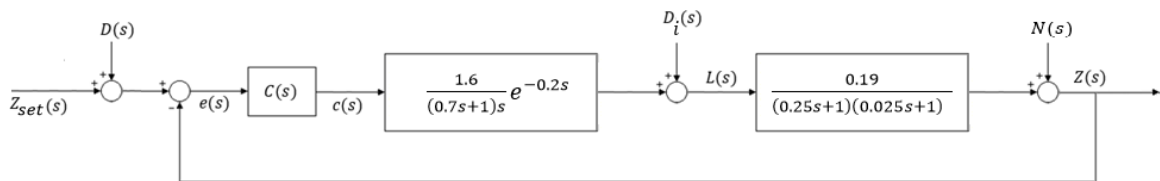


Fig. 2.12 Lazo cerrado del sistema de posición de los electrodos simplificado.

En la industria de procesos, la mayor parte de los controladores se utilizan para responder a un cambio en la perturbación, se requiere de una buena regulación, y no para seguir un cambio en el valor deseado, con excepción de los controladores esclavos en los sistemas de control en cascada [114].

Si el controlador se ha sintonizado para lograr una buena respuesta en un cambio en el valor deseado, no eliminará las perturbaciones en forma efectiva, si el sistema contiene un integrador o si su constante de tiempo es grande. Es importante, entonces, determinar los requisitos de funcionamiento del lazo de control para seleccionar el procedimiento de sintonización adecuado.

De las características presentes en lazo de control se derivan que el controlador a diseñar debe:

- Garantizar un error en estado estacionario igual a cero ante cambios en la referencia y un tiempo de establecimiento menor al existente.
- Garantizar un error en estado estacionario igual a cero ante perturbaciones entre el subsistema hidráulico y el subsistema eléctrico, y un tiempo de establecimiento menor al existente.
- Ser capaz de atenuar el ruido presente a la salida del proceso pues el mismo presenta valores relativamente elevados.

2.5.1. CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL UTILIZANDO PIDTUNER.

El Control System Toolbox™ del Matlab® proporciona algoritmos para analizar, diseñar y ajustar sistemas de control lineales de forma metódica. En el mismo el sistema puede ser especificado como una función de transferencia, como un sistema de espacio de estados, ceros, polos y ganancia o modelo de respuesta en frecuencia. Las funciones tales como los diagramas de respuesta escalón y los diagramas de Bode, permiten analizar y visualizar el comportamiento del sistema en los dominios del tiempo y la frecuencia.

Esta herramienta ajusta automáticamente compensadores SISO (una entrada, una salida) y MIMO (múltiples entradas, múltiples salidas), incluido los controladores PID. Es posible ajustar controladores de ganancia programada y especificar varios objetivos de ajuste, tales como seguimiento de la referencia, anulación de las perturbaciones y márgenes de estabilidad. De igual forma, es posible validar los diseños mediante requisitos como la verificación del tiempo de subida, el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento y los márgenes de ganancia y fase.

El ajuste busca mejorar la respuesta obtenida utilizando el controlador que actualmente se encuentra en funcionamiento. Como criterio de diseño para el caso del controlador se tiene que el sobrepaso, el tiempo de establecimiento y el error a estado estacionario deben ser menores al de la respuesta del controlador con ganancia igual a 3.8 ante cambios en la referencia, lo que implica que:

$$\begin{aligned}M_p &< 25\% \\t_s &< 12s \\e_{ss} &< 0.31 \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

donde M_p es el máximo sobre paso, t_s es el tiempo de establecimiento y e_{ss} es el error a estado estacionario.

Esta herramienta será utilizada para el diseño de un controlador PID del tipo proporcional integral tomando como modelo del proceso (2.6).

$$G(s) = \frac{1.6}{(0.7s+1)s} e^{-0.2s} \times \frac{0.19}{(0.25s+1)(0.025s+1)} \quad (2.6)$$

Obteniéndose los parámetros siguientes:

$$\begin{aligned}K_p &= 1.012 \\I &= 0.005\end{aligned}$$

donde K_p es la ganancia y I el valor integral del controlador.

2.5.2. ANÁLISIS DEL RESULTADO DE LA SIMULACIÓN.

En este epígrafe se realiza un análisis gráfico de los resultados de simulación utilizando el máximo sobrepaso, pues en este proceso estos picos de sobrepaso pueden significar inestabilidad del arco eléctrico y provocar armónicos en la red eléctrica, por tanto, mal funcionamiento de los equipos eléctricos y sobrecalentamiento de los mismos. También se analiza el tiempo de establecimiento,

este representa el tiempo en el que sistema alcance los valores de impedancia deseados.

Para la implementación de la simulación se les realizan pruebas a los controladores en situaciones reales durante el proceso de control de impedancia. Además, se le agrega a la simulación una señal de ruido. El ruido que más influye en la medición de las variables es el ruido electrostático provocado por el arco formado entre los electrodos y el baño líquido de acero durante la fase de afino [98]. Por esto se decidió utilizar un ruido de medida a escala de simulación que posee una desviación estándar de 10^{-10} [98, 99].

2.5.2.1. ESCALÓN POSITIVO Y NEGATIVO EN LA REFERENCIA

Los escalones positivos en el proceso de fundición son realizados en la búsqueda de un mayor arco para alcanzar la temperatura necesaria para el derretido de la chatarra. Durante la fase de afino un escalón positivo puede significar una chatarra no derretida y entonces es necesario aumentar el arco para lograr el baño líquido.

Luego de lograrse el derretido de la chatarra no es necesario una potencia de arco grande, lo que se busca es mantener una la temperatura y un arco más pequeño. Por tanto, al culminar la fase de fusión se realizan varios escalones negativos en búsqueda de las condiciones de la fase de afino. Con mejores condiciones de estabilidad es interesante observar cómo responden los controladores en esta fase del HAE.

En la Fig. 2.13 se puede observar que el controlador PI presenta un M_p del 8%, un tiempo de establecimiento igual a 7s y un e_{ss} igual a 0.01, valores, todos menores que el control proporcional y que cumplen con los requerimientos de diseños planteados en el epígrafe anterior.

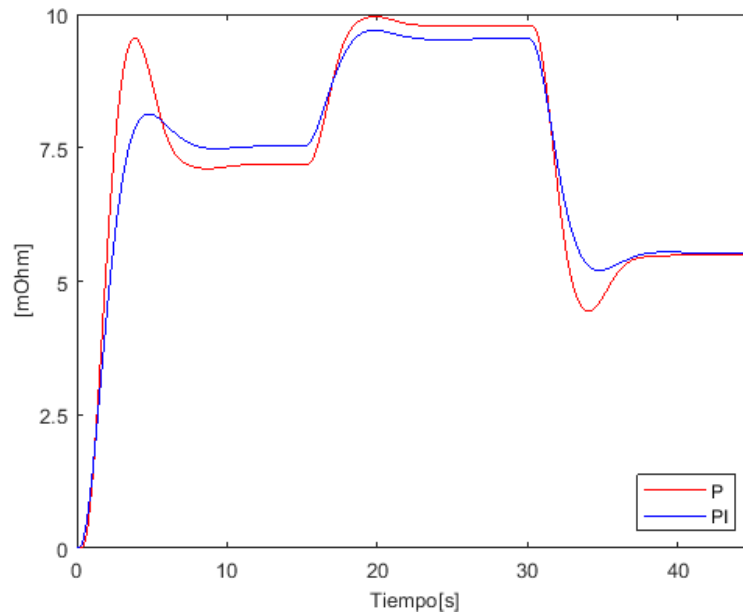


Figura 2.13 Respuesta del sistema ante un escalón positivo (a los 15s) y negativo (a los 30s) en la referencia.

2.5.2.2. PERTURBACIÓN EN LA LONGITUD DEL ARCO

En el proceso del HAE existen perturbaciones en la longitud del arco debido a la distribución irregular de la carga metálica en el inicio de la fundición y a las fuerzas electromecánicas y magnéticas en el periodo de baño líquido. Alcanzan un valor de hasta 10 cm [100] y se representa como un cambio en D_i de la Fig. 2.12.

En la Fig. 2.14 se puede observar que el controlador PI presenta un desempeño similar al P, pero tiene un tiempo de establecimiento y un error a estado estacionario menor.

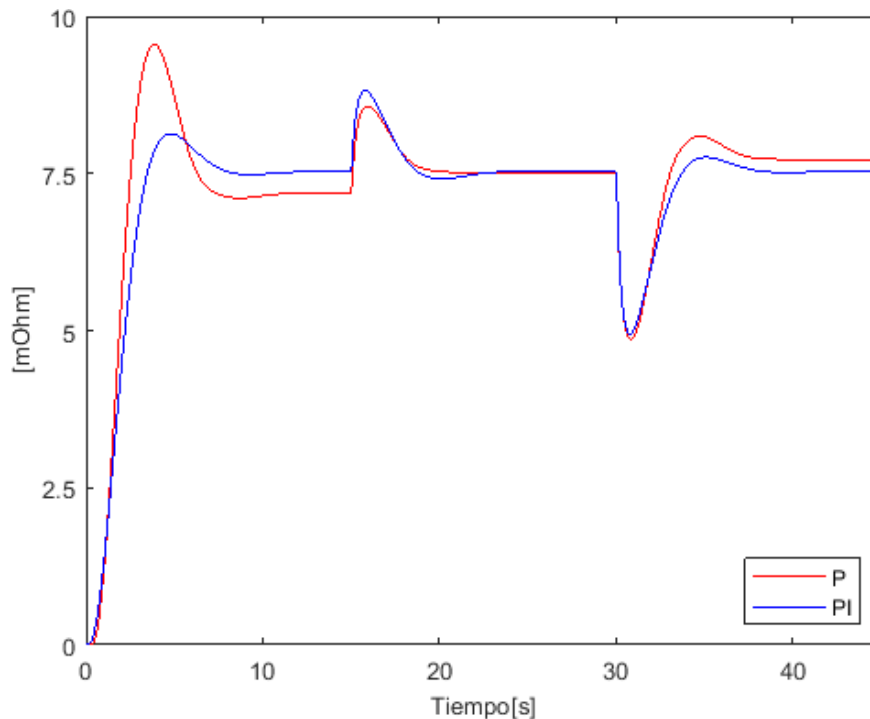


Figura 2.14 Repuesta del sistema ante una perturbación entre los subsistemas, positiva (a los 15s) y negativa (a los 30s).

2.5.2.3. RUIDO DE MEDICIÓN

En el proceso de fundición influyen muchos parámetros que provocan cambios en el comportamiento real de la impedancia. La inyección de oxígeno y carbono, el extractor de humo del horno, la apertura y cierre de la ventana del horno, la existencia o inexistencia de escoria espumosa, así como la extracción de la misma, entre otros son los ejemplos que se pueden ver como ruido de medición en el HAE. Los valores más utilizados en las literaturas consultadas [101] oscilan alrededor del 10% en magnitud a una frecuencia de 1kHz, simulado como una señal de N en la Fig. 2.12.

En la Fig. 2.15 y 2.16 se puede observar que el controlador PI presenta un desempeño en el tiempo similar al alcanzado en las simulaciones anteriores.

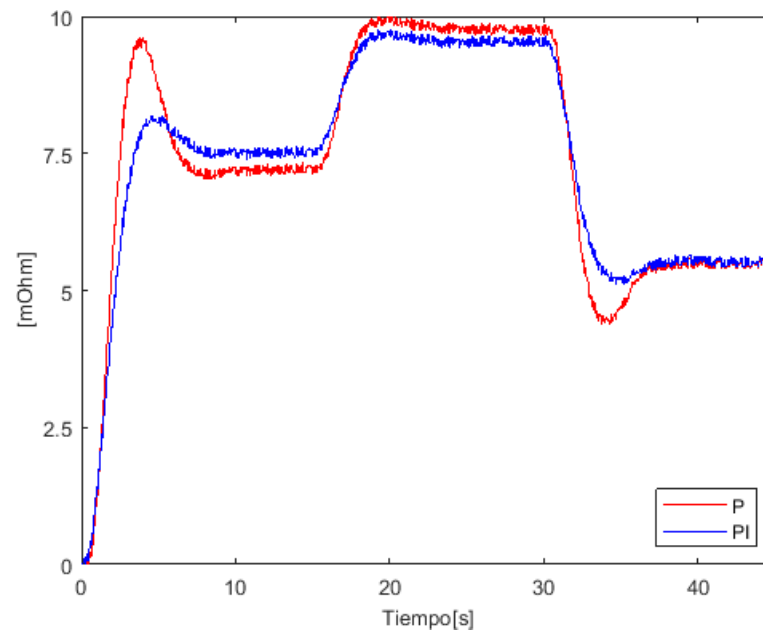


Figura 2.15 Respuesta del sistema en presencia de ruido ante un escalón positivo (a los 15s) y negativo (a los 30s) en la referencia.

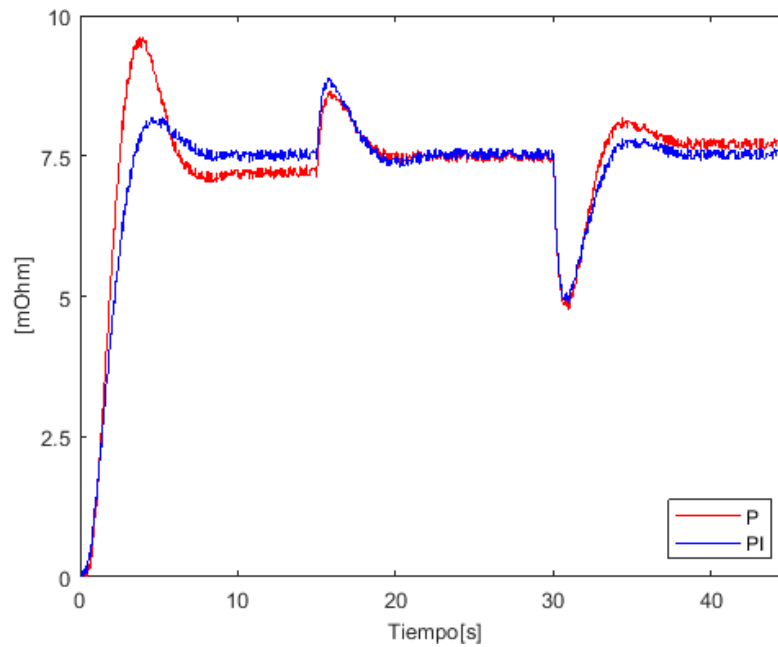


Figura 2.16 Respuesta del sistema en presencia de ruido, ante una perturbación entre los subsistemas, positiva (a los 15s) y negativa (a los 30s).

2.6. ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE DESEMPEÑO

Con el fin de evaluar el controlador PI con un desempeño integral, en esta sección se realiza un análisis estadístico de los resultados obtenidos en la simulación del controlador propuesto. Como primer índice se tiene la función de costo f_c (2.11) que cuantifica la relación de desempeño en los criterios integral absoluta del error (IAE), la integral del cuadrado de error (ISE) y el esfuerzo de control total (TV), cuyos valores de los se obtiene con:

$$f_1 = ISE = \int_0^{t_{sim}} e^2(t) dt, \quad (2.7)$$

$$f_2 = IAE = \int_0^{t_{sim}} |e(t)| dt \quad (2.8)$$

y

$$f_3 = TV = \sum_{j=1}^m |u_{j+1} - u_j| \quad (2.9)$$

donde t_{sim} y t_m son el tiempo de simulación y de muestreo respectivamente, y

$$m = \frac{t_{sim}}{t_m} \quad (2.10)$$

La función de costo con expresión general (2.11) tiene como objetivo caracterizar el controlador en los criterios de rechazo a perturbación y atenuación del ruido de medición con (2.8) y (2.9). También valora el desempeño del controlador en el esfuerzo de control en el elemento de acción final con el cálculo de (2.10).

$$f_c = \sum_{k=1}^3 w_k f_k \quad (2.11)$$

El vector de peso w_k debe cumplir que $w_k > 0$ y $\sum_{k=1}^3 w_k = 1$, en sus valores se reflejan la importancia relativa de (2.7), (2.8) y (2.9) en (2.11). El criterio para la elección adecuada de los coeficientes w_k en el vector de pesos depende esencialmente del contexto de diseño asociado al tipo de aplicación. Se propone un enfoque general de asignar a priori igual prioridad 40 % a los índices de desempeño ISE e IAE y que el aporte del índice TV sea solo del 20 %; para ello se debe calcular el vector de pesos

utilizando los valores obtenidos en (2.7), (2.8) y (2.9) junto a las siguientes expresiones:

$$w_1 = w_{ISE} = \frac{1}{|1 + ISE(\frac{1}{IAE})|_{2TV}}, \quad (2.12)$$

$$w_2 = w_{IAE} = \frac{ISE}{IAE} \times w_{ISE} \quad (2.13)$$

y

$$w_3 = w_{TV} = \frac{ISE}{2TV} \times w_{ISE} \quad (2.14)$$

Logrando asegurar así con esta función los valores de compromiso de relación en los criterios mencionados por Astrom en [56].

Con los resultados obtenidos para el cálculo de f_c , presentados en la tabla 2.1, se puede arribar a la conclusión de que el PI tuvo el mejor desempeño en la relación de compromiso entre rechazo a perturbación, robustez y esfuerzo de control.

Tabla 2.1 Resultados obtenidos de la función de costo

Controladores	Escalón	Perturbación	Ruido
P	0.72	0.49	0.71
PI	0.47	0.33	0.47

Los datos presentados en la Tabla 2.2 muestran como el controlador del tipo proporcional no es capaz de asegurar un error a estado estacionario igual a cero ante las perturbaciones y el cambio en la referencia. De los 2 controladores, el proporcional es el de menor rendimiento pues presenta los mayores tiempos de establecimiento y los mayores errores en estado estacionario al compararlo con PI sintonizado con el PIDTuner.

Tabla 2.2 Respuesta temporal del sistema ante las perturbaciones y el cambio en la referencia.

Controladores	Escalón			Perturbación			Ruido		
	M_p [%]	t_s [s]	e_{ss} [mΩ]	M_p	t_s	e_{ss}	M_p	t_s	e_{ss}
P	33	12.7	0.33	12	12.7	0.23	33	12.7	0.33
PI	8	7.1	0.01	12	7.2	0.03	8	7.1	0.01

2.7. ANÁLISIS VALORATIVO DE LOS ASPECTOS ECONÓMICOS Y MEDIOAMBIENTALES.

La empresa de ACINOX Las Tunas, es un pilar importante para economía del país. Para la producción de palanquillas y barras corrugadas para la exportación y venta nacional de estos productos es necesario una producción eficiente y continua de acero líquido. El HAE representa el inicio de todo el proceso para la obtención de los materiales de venta antes mencionados, de aquí la importancia de lograr una mayor eficiencia de este proceso de fundición en el horno. Lograr un control de impedancia para un menor tiempo en una colada es equivalente un menor consumo de energía para el país, además se garantiza una mejor protección de los valiosos electrodos del HAE.

Este trabajo también se valora económicamente por el tiempo utilizado para la realización de esta investigación. La contratación de una entidad extranjera o el tiempo de trabajo de un empleado propio de la empresa representa el dinero ahorrado por la empresa para la realización de esta importante investigación.

CONCLUSIONES

En el presente capítulo se obtuvieron los modelos de los subsistemas hidráulico y eléctrico que en conjunto conforman el sistema de posición de los electrodos y a partir de ellos se realizó el ajuste y evaluación del controlador según los requerimientos propuestos.

Debido a las características variantes en el tiempo y el comportamiento asimétrico de la traslación que posee el subsistema hidráulico el modelo obtenido se obtuvo con un ajuste del 73% por lo que puede ser evaluado como un buen resultado. En el caso del subsistema eléctrico el porcentaje de ajuste fue menor condicionado sobre todo por la alta presencia de ruido en la medición.

CONCLUSIONES

Este trabajo se encarga de la obtención de un modelo del sistema de posición de los electrodos de un HAE a través de la identificación experimental y el diseño de un controlador que logre una buena relación de compromiso entre robustez, esfuerzo de control y rechazo a perturbaciones.

Para la identificación del modelo se realizaron un conjunto de experimentos a lazo cerrado utilizando como señal excitadora una SBPA previo diseño de la misma y con la planta en funcionamiento. Al identificar el subsistema hidráulico se logró un ajuste del 83%, teniendo en cuenta el comportamiento asimétrico y variante en el tiempo de este. El ajuste del subsistema eléctrico fue menor, en el orden del 60%, pues en el mismo hay una gran dispersión de los datos producto a la alta presencia de ruido, pero a pesar de ello los resultados se pueden tomar como satisfactorios. Los modelos de ambos subsistemas se unieron para conformar el modelo del sistema el cual resultó en un modelo de cuarto orden con integrador y retardo.

Partiendo de la presencia de un integrador y del ruido, el controlador diseñado fue del tipo proporcional integral, y el ajuste del mismo fue realizado utilizando el toolbox de Matlab PIDtuner.

El resultado obtenido demuestra la hipótesis planteada y cumple con el objetivo de la investigación, demuestra que el controlador existente en el SPE de la empresa ACINOX Las Tunas se encuentra desajustado.

El controlador PI obtenido se puede implementar en el SIMELT actualmente presente en la planta, en el caso de que se autorice la modificación del equipamiento. Brinda un error a estado estacionario próximo a cero con tiempos de establecimientos menores, traduciéndose en un mejor control de la impedancia, y con ello, una disminución del consumo energético, todo ello con un esfuerzo de control aceptable.

RECOMENDACIONES

Como continuidad a los resultados alcanzados se recomienda:

Realizar un estudio en otros puntos de operación del HAE que permitan identificar los parámetros de control en toda la gama de funcionamiento de esta planta, utilizando este conocimiento para el diseño de controladores más complejos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Jenkins, B. and P. Mullinger, *Industrial and process furnaces: principles, design and operation*. 2011: Elsevier.
2. Association, W.S., *Steel Statistical Yearbook 2018*. 2019, Economics Committee: Brussels, Belgium. p. 21-24.
3. Association, W.S., *Steel Statistical Yearbook 2021*, Economics Committee: Brussels, Belgium. 2021.
4. Shi-Qi, L., Y. Jian, and L. Jing-She, *Development of electric arc furnace steelmaking technology*. China Metallurgy, 2010.
5. Madías, J., *El impacto de las recientes innovaciones en los hornos eléctricos de arco*. Metallon, Argentina, 2013: p. 29-32.
6. Sallom, M.Y. and R.N. Khaleel, *Stabilizing gap of pole electric arc furnace using Smart Hydraulic System*. Al-Khwarizmi Engineering Journal, 2015: p. 11-18.
7. Vicente, A., et al., *Magnetic field-based arc stability sensor for electric arc furnaces*. Measurement, 2019: p. 107-134.
8. Piazza, M., et al. *EAF process optimization through a modular automation system and an adaptive control strategy*. in *11th European electric steelmaking conference and expo*. 2016. Venice, Italy.
9. Alzetta, F.P., A and E. Ruscio, *Steelmaking-Revolutionary new high-tech electric arc furnace-The FastArc™ EAF is a new technology developed by DANIELI*. MPT-Metallurgical Plant and Technology, 2006: p. 48-55.
10. Dorndorf, M., et al., *Simetal EAF Quantum-The Future Approach for Efficient Scrap Melting*. SEASI Quarterly (South East Asia Iron and Steel Institute), 2011: p. 33-38.
11. SiemensVAI. *SIMETAL EAF: Solutions for electric arc furnaces*. © 2011 Metals Technologies GmbH. 2011; Available from: <http://www.siemens-vai.com/>.
12. SiemensVAI. *SIMETAL Arcos: Efficient melting performance by intelligent electrode control system of electric arc and ladle furnaces*. © 2012 Metals Technologies GmbH 2012; Available from: <http://www.siemens-vai.com/>.
13. SMSgroup. *Success in electric Steelmaking*. © 2012 SMS Siemag AG. 2012; Available from: <https://www.sms-group.com/>.
14. Degel, R., et al. *Innovative electric smelter solutions of the SMS group for the silicon industry*. in *14th International Ferro-Alloys Congress*. 2015. Kyiv, Ukraine.
15. Ansoldi, M., et al. *Latest results in EAF optimization of scrap-based melting process developed by DANIELI: Q-MELT in 48° Seminário de Aciaria*. 2017. Sao Paulo, Brazil.
16. Feliu-Batlle, V. and R. Rivas-Perez, *Robust fractional-order controller for an EAF electrode position system*. Control Engineering Practice, 2016. **56**: p. 159-173.
17. Ballard, N., *Electrode length measurement in electric arc furnaces*, in *Electrical Engineering*. 1995, University of Cape Town: South African.

18. Cano-Plata, E., A. Ustariz-Farfán, and J. Estrada. *Optimal process in electric arc furnaces*. in *IEEE Industry Applications Society*. 2017. Cincinnati, OH, United States
19. Billings, S. and H. Nicholson, *Modelling a three-phase electric arc furnace: a comparative study of control strategies*. Applied Mathematical Modelling, 1977: p. 355-361.
20. Nikolaev, A., et al. *Research and development of automatic control system for electric arc furnace electrode positioning*. in *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Trans Tech Publ.
21. Roffel, B. and B. Betlem, *Process dynamics and control: modeling for control and prediction*. 2007: John Wiley & Sons.
22. Ljung, L. and T. Glad, *Modeling of dynamic systems*. 1994.
23. Goodwin, G., Graebr, SF. Salgado, *ME Control System Design*. 2001, Prentice Hall.
24. Acha, E., A. Semlyen, and N. Rajakovic, *A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arcs*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990. **5**(3): p. 1390-1397.
25. Varadan, S., E.B. Makram, and A.A. Girgis, *A new time domain voltage source model for an arc furnace using EMTP*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996. **11**(3): p. 1685-1691.
26. Mayordomo, J., et al., *A new frequency domain arc furnace model for iterative harmonic analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997. **12**(4): p. 1771-1778.
27. Collantes-Bellido, R. and T. Gomez, *Identification and modelling of a three phase arc furnace for voltage disturbance simulation*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997. **12**(4): p. 1812-1817.
28. Sadeghian, A. and J. Lavers. *Application of radial basis function networks to model electric arc furnaces*. in *IJCNN'99. International Joint Conference on Neural Networks. Proceedings (Cat. No. 99CH36339)*. 1999. IEEE.
29. Liu, Y.-J., G.W. Chang, and R.-C. Hong, *Curve-fitting-based method for modeling voltage-current characteristic of an ac electric arc furnace*. Electric Power Systems Research, 2010. **80**(5): p. 572-581.
30. Sjöberg, J., et al., *Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview*. Automatica, 1995. **31**(12): p. 1691-1724.
31. Janabi-Sharifi, F., G. Jorjani, and I. Hassanzadeh. *Using adaptive neuro fuzzy inference system in developing an electrical arc furnace simulator*. in *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2005. IEEE.
32. Wang, F., et al. *Application of extended Kalman filter to the modeling of electric arc furnace for power quality issues*. in *2005 International Conference on Neural Networks and Brain*. 2005. IEEE.
33. Sadeghian, A. and J. Lavers, *Dynamic reconstruction of nonlinear v-i characteristic in electric arc furnaces using adaptive neuro-fuzzy rule-based networks*. Applied Soft Computing, 2011. **11**(1): p. 1448-1456.
34. Nikolaev, A., P. Tulupov, and G. Astashova. *The comparative analysis of electrode control systems of electric arc furnaces and ladle furnaces*. in *2nd*

- International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2016. Chelyabinsk, Russian Federation.
35. Ping, G., L. Ji-Chao, and L. Xiao-He. *Direct adaptive fuzzy sliding mode control of arc furnace electrode regulator system*. in *21th Chinese Control and Decision Conference*. 2009. Guilin, China
36. Garpinger, O., *Analysis and design of software-based optimal PID controllers*, in *Automatic Control*. 2015, Lund University: Suecia.
37. Nikolaev, A., P. Tulupov, and G. Astashova. *The comparative analysis of electrode control systems of electric arc furnaces and ladle furnaces*. in *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2016. IEEE.
38. Nikolaev, A. and P. Tulupov. *Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace*. in *2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS)/17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*. 2016. IEEE.
39. DE ANTILLANA, H.D.A.E. and D. ACERO, *SISTEMA DE CONTROL DE ORDEN FRACCIONAL DE UN*.
40. Arango Paternina, H.J., *Análisis de la resistividad eléctrica de la escoria y su efecto en la operación de un horno de arco eléctrico*. Ingeniería de Minas y Metalurgia.
41. Balan, R., et al. *Modeling and control of an electric arc furnace*. in *15th Mediterranean Conference on Control & Automation*. 2007. Athens, Greece.
42. Shyamal, S., *Dynamic optimization, state estimation and control of electric arc furnace operation*, in *Chemical Engineering*. 2018, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada.
43. Estrada Villa, G.R., *Evaluación del modelo de Arco Eléctrico para estimar Niveles de Flicker*. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, 2014.
44. Castaño, C.G., *Modelo de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker y su solución con métodos de compensación*. 2013, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías Eléctrica
45. Sepúlveda Durán, E.F. and F. Martínez Santa, *Detección de descargas parciales a través de radiación ultravioleta en redes de media y alta tensión en Colombia*. Tecnura, 2021. **25**(68): p. 63-78.
46. Marulanda Durango, J.J., *desarrollo de una metodología para reducir el efecto flicker generado por un horno de arco eléctrico*. 2013.
47. Logar, V., D. Dovžan, and I. Škrjanc, *Mathematical modeling and experimental validation of an electric arc furnace*. ISIJ international, 2011. **51**(3): p. 382-391.
48. Qu, S., et al. *Formulation, Design and Experimental Verification of an Open Circuit Electro-Hydraulic Actuator*. in *Proceedings of the 2020 IEEE Global Fluid Power Society PhD Symposium (GFPS), Online*. 2020.
49. Odenthal, H.J., et al., *Review on modeling and simulation of the electric arc furnace (EAF)*. steel research international, 2018. **89**(1): p. 1700098.
50. Boulet, B., G. Lalli, and M. Ajersch. *Modeling and control of an electric arc furnace*. in *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003*. 2003. IEEE.

51. Peens, M., *Modelling and control of an electrode system for a three-phase Electric Arc Furnace*. 2007, University of Pretoria.
52. Panoiu, M., C. Panoiu, and L. Ghiormez, *Modeling of the electric arc behavior of the electric arc furnace*, in *Soft computing applications*. 2013, Springer. p. 261-271.
53. Manchur, G. and C.C. Erven, *Development of a model for predicting flicker from electric arc furnaces*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992. **7**(1): p. 416-426.
54. Billings, S.A., F.M. Boland, and H. Nicholson, *Electric arc furnace modelling and control*. Automatica, 1979. **15**(2): p. 137-148.
55. Malagón Maldonado, J.A., *Diseño e implementación de un sistema de supervisión basado en control difuso para planta de temperatura T5553 ubicada en el laboratorio de control en la Facultad Tecnológica*.
56. Åström, K.J. and T. Hägglund, *Control PID avanzado*. 2009: Pearson, Madrid.
57. Yero, G.G., M.R. Mendoza, and L.M. Martí, *Un nuevo método de control PI no lineal robusto*. Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones ISSN: 1815-5928, 2017. **38**(1): p. 16-16.
58. Garpinger, O., *Analysis and design of software-based optimal PID controllers*. 2015: Lund University.
59. Golestani, S. and H. Samet, *Generalised Cassie–Mayr electric arc furnace models*. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016. **10**(13): p. 3364-3373.
60. Paiva, R.P.P., *Modelling and control of an electric arc furnace*. MSc Theses, 1996.
61. Fathi, A., et al., *Comprehensive Electric Arc Furnace Model for Simulation Purposes and Model-Based Control*. steel research international, 2017. **88**(3): p. 1600083.
62. Antona Castañares, A., *Identificación, modelado y control de un cuadricóptero de bajo coste*. 2018.
63. Ljung, L., *System identification*, in *Signal analysis and prediction*. 1998, Springer. p. 163-173.
64. Ljung, L. and T. Glad, *Modeling of dynamic systems*. 1994: Prentice-Hall, Inc.
65. Behar, A.A. and M.M. Iranzo, *Identificación y Control Adaptativo. Robótica y Automática*. 2002, Pearson Educación.
66. Peens, M., I. Craig, and P. Pistorius, *Modelling and control of a three-phase electric arc furnace*. Electronic resource]-<http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/afcon03/Papers/066.pdf>, 2003.
67. Hauksdóttir, A.S., et al., *System identification of a three-phase submerged-arc ferrosilicon furnace*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1995. **3**(4): p. 377-387.
68. Borrebach, E.J., *Control system providing supply circuit impedance balance control for electric arc furnaces*, W.E. Corporation, Editor. 1969, Google Patents: United States.
69. Billings, S. and H. Nicholson, *Temperature weighting adaptive controller for electric arc furnaces*. Ironmaking Steelmaking, 1977. **4**(4): p. 216-221.

70. Xing-Yuan, G., B. Yu-An, and L. Zhi-Qiang. *Self-tuning control of the electrode position system for electric arc furnaces*. in *26th Conference on Decision and Control*. 1987. Los Angeles, California, United States.
71. Podlubny, I., *Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications*. Vol. 198. 1998: Elsevier.
72. Monje, C.A., et al., *Tuning and auto-tuning of fractional order controllers for industry applications*. *Control engineering practice*, 2008. **16**(7): p. 798-812.
73. Isfer, L.A.D., et al., *Fractional control of an industrial furnace*. *Acta Scientiarum. Technology*, 2010. **32**(3): p. 279-285.
74. Rodríguez Martínez, C.A., et al., *Fractional order control system of EAF of Antillana de Acero*. Researchgate, 2011.
75. Feliu-Batlle, V., et al., *A robust fractional order controller for an EAF electrode position system*. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014. **47**(3): p. 10670-10675.
76. Zhizhong, M. and L. Jian, *Adaptive controller of an electric arc furnace with feedforward*. *Journal of Northeastern University*, 1996. **1**.
77. Xiao-He, L., et al. *Simulation on adaptive control of electrode regulator systems of arc furnace*. in *5th International Conference on Electrical Machines and Systems 2001*. Shenyang, China.
78. Xiao-He, L., Y. Jie, and Z. Qi-Zhi, *Adaptive control of a class of nonlinear system using piecewise linearization based on Lyapunov's law*. *Control Theory & Applications(China)*, 2005. **22**(5): p. 829-833.
79. Parsapoor, A., M. Ataei, and A. Kiyoumars. *Adaptive control of the electric arc furnace electrodes using Lyapunov design*. in *International Conference on Control, Automation and Systems*. 2007. Seoul, Korea.
80. Shi-Feng, Z. and Z. Shao-De, *Design and application of an arc furnace electrode control system based on Dual-mode control*. Chongqing University, 2008. **1**.
81. Lei, L. and M. Zhi-Zhong, *A novel robust adaptive controller for EAF electrode regulator system based on approximate model method*. *Central South University*, 2012. **19**(8): p. 2158-2166.
82. Nikolaev, A., G. Kornilov, and E. Povelitsa. *Developing and testing of improved control system of electric arc furnace electrical regimes*. in *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Trans Tech Publ.
83. Nikolaev, A., P. Tulupov, and D. Savinov. *Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs*. in *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2017. IEEE.
84. Nadira, R. and P.B. Usoro. *Self-adjusting model algorithmic control of a three-phase electric arc furnace*. in *7th American Control Conference*. 1988. Atlanta, GA, United States.
85. Harper, T., *Optimization of electric arc furnace performance through Closed-Loop control of electrical power*. *Iron Steel Eng.*, 1990. **67**(4): p. 40-44.
86. Jie, Y., L. Xiao-He, and Z. Hai-Bao, *The fuzzy control of electrode regulator system of arc furnace based on the genetic algorithm* *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2004. **3**.

87. Kuai, R. and L. Xiao-He, *Research on fuzzy-PID control for electric arc furnace*. Machine Tool & Hydraulics, 2008. **7**.
88. Ji-Chao, L., G. Ping, and L. Xiao-He, *Application of indirect adaptive fuzzy sliding mode control in arc furnace*. Journal of System Simulation, 2009. **21**(2): p. 542-546.
89. Yuhua, W. *The Fuzzy control of electrode regulator system*. in *2009 International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*. 2009. IEEE.
90. Ping, G., et al. *Direct adaptive fuzzy robust control of arc furnace*. in *IEEE ICCA 2010*. 2010. IEEE.
91. Taslimian, M., et al. *Fuzzy type-2 electrode position controls for an electric arc furnace*. in *2012 IEEE 13th International Conference on Information Reuse & Integration (IRI)*. 2012. IEEE.
92. Ghiormez, L. and O. Prostean. *Electric arc current control for an electric arc furnace based on fuzzy logic*. in *2015 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*. 2015. IEEE.
93. Ghiormez, L., et al. *Fuzzy logic control strategy for a three-phase electric arc furnace*. in *International Workshop Soft Computing Applications*. 2016. Springer.
94. Ghiormez, L., et al. *Fuzzy logic and PD control strategies of a three-phase electric arc furnace*. in *International Conference on Computational Collective Intelligence*. 2016. Springer.
95. Hong, H. and Z. Mao. *Controller design for electrode regulating system of electric arc furnace*. in *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*. 2015. IEEE.
96. Staib, W.E. and R.B. Staib. *The intelligent arc furnace controller: a neural network electrode position optimization system for the electric arc furnace*. in *[Proceedings 1992] IJCNN International Joint Conference on Neural Networks*. 1992. IEEE.
97. Zheng, W. and L. Lei, *Realizing of electric arc furnace electrode control system based on ANN*. Control and Instruments In Chemical Industry, 2006. **1**.
98. Chang, G.W., C.-I. Chen, and Y.-J. Liu, *A neural-network-based method of modeling electric arc furnace load for power engineering study*. IEEE Transactions on Power Systems, 2009. **25**(1): p. 138-146.
99. Zheng, T. and E.B. Makram, *An adaptive arc furnace model*. IEEE transactions on power delivery, 2000. **15**(3): p. 931-939.
100. Ic, I. and V. Ph, *Electric Arc Furnace Modeling and Validation*.
101. Dehkordi, B., M. Moallem, and A. Parsapour, *Predicting foaming slag quality in electric arc furnace using power quality indices and fuzzy method*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011. **60**(12): p. 3845-3852.

ANEXOS

Anexo 1 SPE SIMETAL^{CIS}SIMELT



Figura A1.1 Foto del sistema de regulación SIMELT.

- 1: Tarjetas analógicas de control en el electrodo 1.
- 2: Tarjetas analógicas de control en el electrodo 2.
- 3: Tarjetas analógicas de control en el electrodo 3.
- 4: TAP del transformador.
- 5: Curva del arco eléctrico.
- 6: Valor de referencia para cada uno de los electrodos.