**AUTOMATIZACIÓN, ROBÓTICA Y SISTEMAS COMPUTACIONALES**

**Diseño de un controlador PI no lineal con robustez garantizada para el control de admitancia en un Horno Cuchara.**

***Design of a non-linear PI controller with guaranteed robustness for admittance control in a Ladle Furnace.***

**Yeizabet Nápoles Báez 1, Liset Mayo Martí 1, Guillermo González Yero 1**

1- ACINOX Las Tunas, Circunvalante Norte Km 3 ½, Zona Industrial, Las Tunas, Cuba. [yeizabet@acinoxtunas.co.cu](mailto:yeizabet@acinoxtunas.co.cu), [liset@acinoxtunas.co.cu](mailto:liset@acinoxtunas.co.cu), [guillermo@acinoxtunas.co.cu](mailto:guillermo@acinoxtunas.co.cu).

**Resumen:** El problema de controlar eficientemente la fusión de acero en un Horno Cuchara es muy importante en la industria metalúrgica. El objetivo de este trabajo es proponer un sistema de control de admitancia para este tipo de horno. Para ello se utilizó un modelo conocido del proceso de variación de admitancia del arco eléctrico de un Horno Cuchara y se sintonizó un controlador PI no lineal con robustez garantizada. Su sintonía se realizó utilizando el software MatLab® y la herramienta SWONT-RR. Los resultados obtenidos a escala de simulación demostraron que el sistema de control propuesto es superior a controladores tradicionales y a un controlador de orden fraccional utilizado anteriormente. Los índices de desempeño globales demostraron las potencialidades del controlador seleccionado para una optimización de la relación de compromiso entre los requerimientos de rechazo a perturbaciones, robustez y esfuerzo de control.

***Abstract:*** *The problem of efficiently controlling the melting of steel in a Ladle Furnace is very important in the metallurgical industry. The objective of this work is to propose an admittance control system for this type of furnace. For this, a known model of the process of variation of admittance of the electric arc of a Ladle Furnace was used and a non-linear controller with guaranteed robustness was tuned. Their tuning was done using the MatLab® software and the SWONT-RR tool. The results obtained at the simulation scale showed that the proposed control system is superior to traditional controllers and a fractional order controller used previously. The global performance indices demonstrated the potentialities of the selected controller for an optimization of the compromise relationship between the requirements for rejection of disturbances, robustness and control effort.*

**Palabras Clave:** Horno Cuchara; Admitancia; Controlador Proporcional-Integral no Lineal; Optimización Multiobjetivo.

***Keywords:*** *Ladle Furnace; Admittance; Non-Linear Proportional-Integral Controller; Multiobjective Optimization.*

**1. Introducción**

Los Hornos de Arco Eléctrico (HAE) son ampliamente utilizados en la industria siderúrgica y tienen la función de fundir el metal mediante la generación de arcos eléctricos. Se encargan básicamente de transformar la energía eléctrica en calor aplicado a la chatarra o reducido de metal, obteniendo como resultado un acero limpio y de alta calidad.

El funcionamiento de un horno de arco eléctrico se divide en la fase de fusión y en la de afino. La primera fase se lleva a cabo en el horno principal y en ella se obtiene un semiproducto de acero líquido que en una segunda fase es refinado en un horno de menor tamaño y potencia, conocido como Horno Cuchara que está conformado por un transformador de 8 a 25 MVA ([Steeluniversity, 2019](#_ENREF_14)) o de 25 a 45 MVA según ([Nikolaev, Kornilov, & Povelitsa, 2015](#_ENREF_11)), tres electrodos para producir el arco y el cuchara que actúa como el armazón del horno.

Si se tiene en cuenta que los hornos de arco eléctrico para su funcionamiento requieren de una gran cantidad de energía eléctrica, el control de los parámetros eléctricos es un punto crítico a trabajar para alcanzar una operación eficiente ([Chávez & Chávez, 2013](#_ENREF_5)) .

La corriente de alimentación y la impedancia del arco son las variables comúnmente utilizadas en el control de estos sistemas ([Peens, Craig, & Pistorius, 2003](#_ENREF_12)). Estas variables son controladas mediante un sistema de posición del electrodo, el cual mueve al electrodo hacia arriba o hacia abajo para ajustar el valor de corriente o impedancia de acuerdo al valor de referencia requerido ([Billings, Boland, & Nicholson, 1979](#_ENREF_3)).

En ([Åström & Hägglund, 2009](#_ENREF_1)) se plantea que para controlar un sistema es necesario conocer la dinámica del proceso. Por tal motivo resulta fundamental, a la hora de obtener el controlador adecuado para la regulación de los electrodos en los hornos de arco eléctrico, poseer un modelo adecuado.

En algunos HAE tipo cuchara en lugar de un sistema de control de impedancia se tiene implementado un control de admitancia pues en este proceso se obtienen valores de impedancia pequeños y la admitancia es inversamente proporcional a la impedancia.

En ([Martínez, Perez, Batlle, & García, 2011](#_ENREF_10)) se presenta la función de transferencia que representa la dinámica del proceso de variación de la admitancia del arco eléctrico del horno cuchara de la empresa Antillana de Aceros; y se compara el desempeño de un controlador proporcional y de un controlador integral de orden fraccional.

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 ([Kuo, 1996](#_ENREF_8)).

Los requisitos para un control de alto rendimiento, que no es más que la respuesta a las perturbaciones, con cambios en las condiciones de funcionamiento están a menudo más allá de las capacidades de los controladores PID simples pues son conocidas las limitaciones de estos en el compromiso entre el rechazo a las perturbaciones y la atenuación del ruido, y ante los cambios en el proceso. Esta dificultad puede ser tratada mediante el uso de controladores PID no lineales (NPID).

En la literatura se puede acceder a ejemplos concretos de controladores NPID entre los que se encuentran: un controlador de ganancia integral variable ([Hunnekens, Wouw, Heertjes, & Nijimeijer, 2015](#_ENREF_7)), la optimización multiobjetivo ([Tavakoli, Griffin, & Teming, 2007](#_ENREF_15)), un controlador cuya ganancia se regula de acuerdo al estado de la magnitud ([Sháhruz & Schwarts, 1997](#_ENREF_13)), y un PI no lineal en región de robustez (NPI-RR) ([Yero, 2017](#_ENREF_16)).

En ([Báez, 2017](#_ENREF_2)) se demostró, mediante la utilización de un conjunto de ensayo representativo de la industria de procesos la generalidad del método presentado en ([Yero, 2017](#_ENREF_16)) por lo que este trabajo propone un controlador NPI\_RR para el modelo presentado en ([Martínez et al., 2011](#_ENREF_10)), con el objetivo de demostrar que en este tipo de procesos el controlador PI no lineal presenta rendimientos superiores a la hora de obtener una buena relación de compromiso entre los requerimientos de rechazo a perturbaciones, robustez y esfuerzo de control.

**2. Metodología**

Un modelo de admitancia de un horno cuchara es el desarrollado en ([Martínez et al., 2011](#_ENREF_10)). Para la obtención del modelo matemático que representa el comportamiento dinámico de la variación de admitancia del arco eléctrico, se realizó una identificación con una señal de prueba tipo pulso y se consideró que la válvula de control tiene un comportamiento lineal para el intervalo en que trabaja el proceso (±2V).

Considerando la función de transferencia del sistema de posición de electrodos ([Hauksdottir, Soderstrom, Thorfinnson, & Gestsson, 1995](#_ENREF_6)) y la dinámica del arco eléctrico ([Boulet, Lalli, & Ajersch, 2003](#_ENREF_4)), la dinámica del proceso de variación de admitancia queda representada mediante la siguiente función de transferencia:

(2.1)

Un controlador PI no lineal puede ser cualquier estructura de control con la forma:

(2.2)

Donde son las ganancias del controlador variantes en el tiempo, u(t) es la entrada del sistema, y e(t) el error del mismo.

Según ([Yero, 2017](#_ENREF_16)) un PI no lineal con robustez garantizada (NPI\_RR) corresponde a todo controlador C(s) cuya ley de control se basa en un PI no lineal, pero solo si los valores de sus ganancias describen una trayectoria continua y están contenidas en una región dada por restricciones de robustez.

El NPI\_RR presentado en ([Yero, Mendoza, & Albertos, 2018](#_ENREF_17)) logra balancear la relación de compromiso entre robustez y rendimiento. Para logarlo, se presenta un primer procedimiento que resuelve la ley de control asociada dada en (2.2), se determina su espacio de decisión a partir de controladores PI robustos que minimizan IAE y se satisfacen condiciones limites dadas por el rechazo a perturbaciones más bajo permisible y la mínima robustez requerida. A continuación, se lleva a cabo un segundo procedimiento para optimizar la sintonía de la función no lineal inherente al NPI\_RR utilizando una técnica multiobjetivo con criterios de desempeño globales.

En la Figura 1 se muestra el diagrama en bloques del sistema de control conformado por el modelo del proceso de variación de admitancia G(s) dado en (2.1) y el controlador PI no lineal C(s).

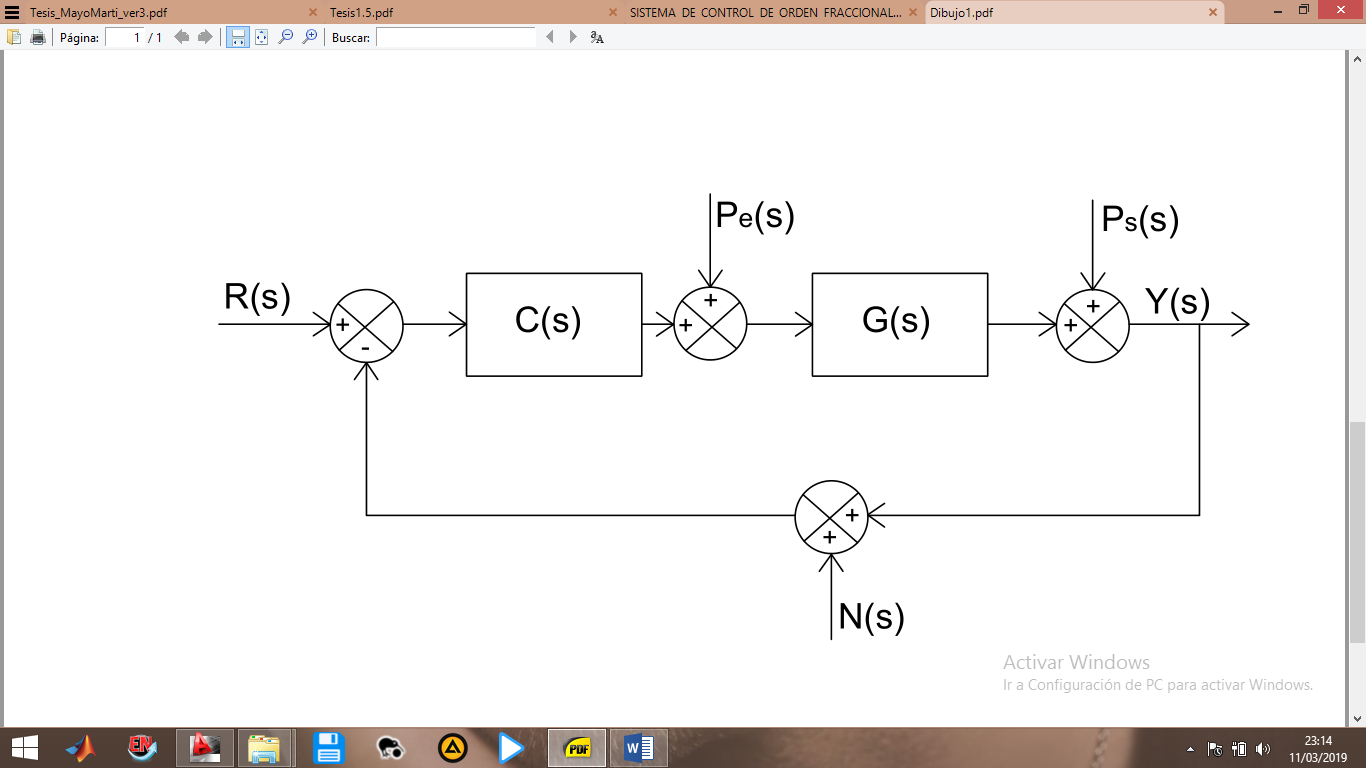


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de control

Al lazo se le introducen dos perturbaciones diferentes; una a la salida del proceso producida por el rompimiento de burbujas en el baño de acero, y otra a la entrada del proceso que puede estar dada por la no utilización de un control de posición del brazo porta-electrodo a pesar de la variación del peso del electrodo y el efecto de la fuerza de gravedad, que no deben ser ignoradas, a la hora de obtener el controlador. De igual forma se tiene en cuenta la presencia de un ruido N(s), el cual está presente en la generalidad de los procesos y debe ser tomado en cuenta durante el diseño.

Utilizando la herramienta de software SWONT\_RR (SoftWare-based Optimal Non linear Tuning in Robust Region) ([Martí, 2019](#_ENREF_9)), se procedió a obtener un controlador NPI\_RR, cuya ley de control está dada por:

(2.4)

donde la función no lineal tiene la siguiente expresión:

(2.5)

**3. Resultados y discusión**

La efectividad del controlador no lineal con respecto al controlador lineal convencional del tipo proporcional ([Martínez et al., 2011](#_ENREF_10))

(2.6)

y al controlador integral de orden fraccional ([Martínez et al., 2011](#_ENREF_10))

(2.7)

se analiza frente a perturbaciones a la salida y a la entrada del proceso.

Para realizar el análisis de la respuesta del sistema ante los tres controladores (proporcional, fraccional y no lineal) se aplicaron señales tipo escalón para simular las perturbaciones al proceso. En la Figura 2 se observan las respuestas del sistema ante perturbaciones a la salida del proceso, y en la Figura 3 la respuesta ante perturbaciones en la entrada del proceso.

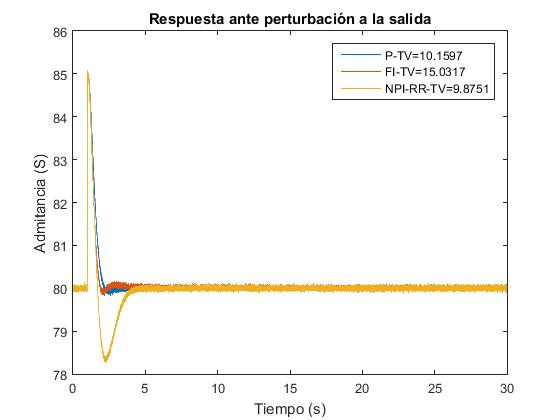


Figura 2. Respuestas del sistema ante perturbaciones a la salida del proceso y el esfuerzo de control realizado (TV).

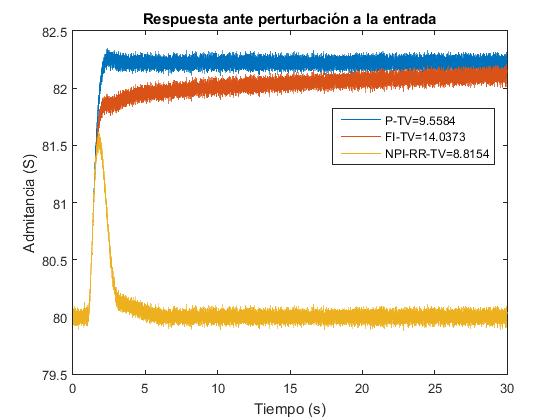


Figura 3. Respuestas del sistema ante perturbaciones a la entrada del proceso y el esfuerzo de control realizado (TV).

En la Tabla 1 se presentan las respuestas temporales máximo sobrepaso () y tiempo de establecimiento () en una banda del ±5% del valor final, y el valor de una función multiobjetivo ( cuyo valor se alcanza utilizando el método de sumas ponderadas y sintetiza la habilidad del controlador para lograr una buena relación de compromiso entre esfuerzo de control y el rechazo a perturbaciones, siendo el controlador más efectivo el de menor valor en su función multiobjetivo.

Tabla 1. Respuestas temporales y multiobjetivo del sistema de control ante los tres controladores analizados.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | (%) | (s) |  |
| Perturbaciones a la salida | P | 6.3565 | 0.2660 | 8.9052 |
| FI | 6.3559 | 0.2270 | 12.4384 |
| NPI\_RR | 6.3568 | 0.2420 | **8.7279** |
| Perturbaciones a la entrada | P | 0.1424 | - | 27.2474 |
| FI | 0.1423 | - | 27.8942 |
| NPI\_RR | 0.1474 | 0.8380 | **7.1358** |

En la Figura 2, y con el apoyo de los valores presentes en la Tabla 1, se observa como el controlador NPI\_RR ante perturbaciones a la salida del proceso logra establecerse en un tiempo intermedio entre el controlador P y el FI pero con el menor valor de TV. Además, el hecho de que la función multiobjetivo logra un menor valor con el controlador no lineal, indica que el NPI-RR aporta la mejor relación de compromiso entre rechazo a perturbaciones y el esfuerzo de control.

En la Figura 3, así como en la Tabla 1, se puede observar el comportamiento superior del NPI\_RR ante perturbaciones a la entrada; es el que alcanza el valor deseado después de que se produce la perturbación con los valores más bajos de esfuerzo de control y de la función multiobjetivo.

La capacidad de responder tanto a perturbaciones a la entrada como a la salida del sistema con un esfuerzo de control menor, es la mayor ventaja que proporciona el controlador PI no lineal, logrando obtener respuestas temporales satisfactorias y a la vez un menor desgaste del equipamiento.

**4. Conclusiones**

Con base a los resultados obtenidos, se puede concluir que el controlador PI no lineal con robustez garantizada presenta rendimientos superiores a la hora de obtener una buena relación de compromiso entre los requerimientos de rechazo a perturbaciones, robustez y esfuerzo de control que los controladores proporcional y fraccional integral en el control del proceso estudiado.

Una segunda ventaja del controlador obtenido es su capacidad, al contrario de sus contrapartes, de seguir la referencia no solo cuando se produce una perturbación a la salida del proceso, sino también una perturbación a la entrada del mismo.

Este trabajo constituye el primer estudio referente a la aplicación de este tipo controlador no lineal en el control de admitancia de un horno cuchara, siendo posible utilizar este procedimiento de diseño en cualquier proceso similar. Para la obtención de mejores resultados se propone continuar trabajando en el tema, sobre todo en la búsqueda de los valores de máxima sensibilidad y máxima sensibilidad complementaria adecuados para el proceso tratado en este trabajo.

**Agradecimientos**

Este material forma parte del Proyecto P211LH021-023 “Automatización Avanzada para la Elaboración y Afino del Acero” del Programa Nacional de Desarrollo: AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS TECNOLÓGICOS.

**5. Referencias bibliográficas**

Åström, K. J., & Hägglund, T. (2009). *Control PID avanzado* (M. Martín-Romo Ed.). Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN S. A.

Báez, Y. N. (2017). *Evaluación de la eficiencia de un método de control PI no lineal.* (Tesis de Grado), Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

Billings, S. A., Boland, F. M., & Nicholson, H. (1979). Electric Arc Furnace Modeling and Control. *Automática, 15*, 137-148.

Boulet, B., Lalli, G., & Ajersch, M. (2003). *Modeling and Control of an Electric Arc Furnace*. Paper presented at the Proceedings of the American Control Conference Denver, Colorado

Chávez, F. M., & Chávez, I. Y. S. (2013). Estrategias de Control de Potencia para Incrementar la Eficiencia Energética en Hornos de Arco Eléctrico de Corriente Alterna.

Hauksdottir, A. S., Soderstrom, T., Thorfinnson, Y. P., & Gestsson, A. (1995). System identification of a three phase submerged arc furnace. *Transaction on Control System Technology, 3*(4), 377-387.

Hunnekens, B., Wouw, N. V. d., Heertjes, M., & Nijimeijer, H. (2015). Synthesis of variable gain integral controllers or linear motion systems. *Transactions on Control Systems Tecnology, 23*(1), 139-149.

Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático*. Naucalpan de Juárez: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.

Martí, L. M. (2019). *Sintonía y Optimización de los controladores PI no lineales con robustez garantizada mediante software.* (Master en Automática), Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

Martínez, C. A. R., Perez, R. R., Batlle, V. F., & García, F. C. (2011). *SISTEMA DE CONTROL DE ORDEN FRACCIONAL DE UN HORNO DE ARCO ELECTRICO DE ANTILLANA DE ACERO*.

Nikolaev, A., Kornilov, G., & Povelitsa, E. (2015). Developing and Testing of Improved Control System of Electric Arc Furnace Electrical Regimes. *Applied Mechanics and Materials, 792*, 488-494. doi: 10.4028/[www.scientific.net/AMM.792.488](http://www.scientific.net/AMM.792.488)

Peens, M., Craig, I. K., & Pistorius, P. C. (2003). MODELLING AND CONTROL OF A THREE-PHASE ELECTRIC ARC FURNACE.

Sháhruz, S. M., & Schwarts, A. L. (1997). Nonlinear PI compensators that achieve high performance. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 119*, 105-110.

Steeluniversity. (2019). Horno Cuchara. Retrieved https://steeluniversity.org/product/horno-cuchara7?lang=es, 1-02-2019

Tavakoli, S., Griffin, S., & Teming, P. J. (2007). *Multi-Objective Optimization Approachto the PI Tuning Problem*. Paper presented at the Congress on Evalutionary Computing.

Yero, G. G. (2017). *Modelado y control de nivel en un molde de vaciado continuo.* (Dr. C.), Editorial Universitaria. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.

Yero, G. G., Mendoza, M. R., & Albertos, P. (2018). Robust nonlinear adaptive mould level control for steel continuous casting. *IFAC-PapersOnLine, 51*(25), 164-170.