

# IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE CONTROL EN SISTEMAS ALTAMENTE NO-LINEALES

***M. A. Gómez Martínez***

Universidad de Guanajuato.

*gomezma@ugto.mx*

***A. Pizano Martínez***

Universidad de Guanajuato.

*gomezma@ugto.mx*

***E. A. Zamora Cardenas,***

Universidad de Guanajuato.

*gomezma@ugto.mx*

***J. M. Lozano García***

Universidad de Guanajuato.

*gomezma@ugto.mx*

***H. Rostro Gonzalez***

Universidad de Guanajuato.

*gomezma@ugto.mx*

## **Resumen**

En el presente trabajo se muestra un estudio del comportamiento dinámico del horno de arco eléctrico conectado a un sistema de potencia, con el fin de determinar las diferentes zonas de control que se presentan en su operación, utilizando la teoría de bifurcaciones. En el estudio en estado estacionario, la obtención de los valores característicos del sistema, el comportamiento de los diagramas de bifurcación y la estabilidad de los puntos de equilibrio se obtienen por medio de la utilización del programa de simulación XPPAUT 5.0 (X-Windows Phase Plane Plus Auto por sus siglas en ingles).

**Palabra(s) Clave(s):** Diagrama de bifurcación, puntos de equilibrio, zonas de operación.

## **1. Introducción**

La estabilidad de los sistemas de potencia ha sido un área de estudio desde los primeros días de la generación y transmisión de potencia eléctrica. Esta se convirtió en un área de mayor interés en la medida en que los sistemas de potencia sobre grandes áreas geográficas comenzaron a ser interconectados. Como el problema creció, equipo sofisticado de control y esquemas de protección han sido agregados al sistema para ayudar a la estabilidad, como resultado, el análisis del problema de estabilidad se ha hecho más difícil.

Muchos países alrededor del mundo están enfrentando importantes cambios en el suministro eléctrico para permitir un desarrollo económico futuro. En México la capacidad instalada hasta hace algunos años le permitió un crecimiento moderado en su economía y tenía la suficiente infraestructura eléctrica para atraer inversión extranjera. Sin embargo actualmente este margen de respaldo poco a poco comienza a reducirse, lo que se verá reflejado en la sobrecarga de líneas de transmisión pudiendo llegar a un colapso de voltaje en el sistema. El problema de estabilidad del sistema tuvo su comienzo cuando dos máquinas síncronas fueron accionadas por primera vez en paralelo o en sincronismo [1]. Muy pronto se observó que la cantidad de potencia que puede ser transferida de una máquina síncrona a otra es limitada. A esta cantidad de carga se le considero como el límite de estabilidad [2]. A medida que los sistemas se desarrollaron, se encontró que con ciertas máquinas, particularmente con ciertos sistemas conectados a través de líneas de transmisión de gran reactancia, era difícil mantener el sincronismo bajo condiciones normales y el sistema tuvo que ser aislado cuando ocurrían fallas o presentaba pérdida de excitación. Varias condiciones de emergencia hicieron necesario operar máquinas y líneas a la máxima capacidad práctica de carga; bajo estas condiciones, límites de estabilidad fueron encontrados por experiencia. Subsecuentemente, fue aparente que varias de las interrupciones del servicio fueron el resultado de disturbios que causaron pérdida de sincronismo entre varias

máquinas y que, mediante la modificación de diseño, distribución u operación del sistema, era posible proveer un mejor servicio estándar. Los primeros trabajos analíticos en estabilidad de sistemas de potencia fueron dirigidos a la determinación de límites de potencia de máquinas síncronas bajo dos condiciones: salida de un motor síncrono o generador de un bus infinito; y segundo, la salida o límite de estabilidad para dos máquinas idénticas, una actuando como generador y la otra actuando como motor. Sin embargo el desarrollo principal en estabilidad de sistemas de potencia no se debió a la extensión de la teoría de las máquinas síncronas, sino del resultado del estudio de sistemas de transmisión de gran distancia.

Los estudios de estabilidad que evalúan el impacto de disturbios en el comportamiento dinámico electromecánico de los sistemas de potencia son de dos tipos: “estabilidad transitoria y estabilidad de estado estable”. Comúnmente los estudios de estabilidad transitoria los realizan los departamentos de planeación de las compañías eléctricas que son responsables de asegurar el comportamiento dinámico apropiado del sistema [3]. Los modelos del sistema usados en tales estudios son extensivos porque en la actualidad los sistemas de potencia son vastos, altamente interconectados y con cientos de máquinas que pueden interactuar a través de las redes de extra alto voltaje (300 a 800 kV) y ultra alto voltaje (arriba de 800 kV). La estabilidad transitoria es un concepto usado exclusivamente para condiciones transitorias del sistema de potencia estudiado; su investigación se enfoca en tratar de encontrar: que tipos de perturbaciones no resultan en la ruptura de sincronismo de alguna máquina del sistema. En general el comportamiento dinámico de los sistemas de potencia es descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales, las cuales describen principalmente el comportamiento dinámico de los generadores síncronos en el sistema. El estudio de la estabilidad se lleva a cabo por medio de la evaluación de la estabilidad de los puntos de equilibrio del conjunto de ecuaciones. Los resultados obtenidos son válidos solamente para un escenario particularmente analizado, cualquier cambio en los datos, en la condición de operación inicial, o en el escenario de estabilidad, requerirá de una nueva evaluación tomando en cuenta los cambios en las

ecuaciones [4,12]. De igual manera tenemos que bajos ciertas condiciones de operación del sistema pequeñas variaciones en los valores de los parámetros del mismo producen cambios cualitativos significativos en las propiedades del sistema, es decir, se producen cambios en la estabilidad original del sistema, bajo este contexto existe una opinión creciente con respecto a que la investigación de estos cambios en la estabilidad del sistema se debe de realizar por medio de la teoría de la dinámica de sistemas [5]. Diversas teorías de análisis matemático y herramientas computacionales han sido utilizadas para propósitos de estudio de estabilidad transitoria y de estado estable en sistemas de potencia, los primeros métodos usan la integración mediante fuerza bruta por medio de la linealización de un conjunto de ecuaciones dinámicas, y entonces las condiciones de estabilidad son encontradas por medio de la inspección de los valores característicos de la matriz Jacobiana [6]. El método directo de Lyapunov es una herramienta muy práctica para estudios de estabilidad transitoria, debido a su alta eficiencia tiene importantes aplicaciones en operación y diseño de sistemas de potencia [7]. El cálculo de los exponentes de Lyapunov sirve para confirmar comportamientos caóticos en un simple sistema de potencia [8], mientras que Naoto Yorino [9] utiliza un esquema pre editor-corrector para obtener puntos limite Q para estudios de flujos de potencia. La técnica de continuación de flujo de potencia se ha usado dentro del análisis de estabilidad de estado estable para encontrar la ruta de soluciones continuas de flujos de potencia comenzando en alguna carga base y guiando al límite de la estabilidad el voltaje en estado estable [10]. El método del punto de colapso (PoC) y el método de continuación fueron implementados computacionalmente por Cañizares y Alvarado [11] para estudios de grandes sistemas de potencia AC/DC.

## **2. Modelado y Caso de estudio**

Con el fin de comprobar lo anterior se diseñó un experimento, el cual se planteó de acuerdo al modelo del horno de arco eléctrico descrito en [10], el cual se modela mediante la ecuación 1 y se acopla a un sistema eléctrico; la figura 1 ilustra dicho sistema.

$$K_1 r^n + K_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{K_3}{r^{m+2}} i^2 \quad (1)$$

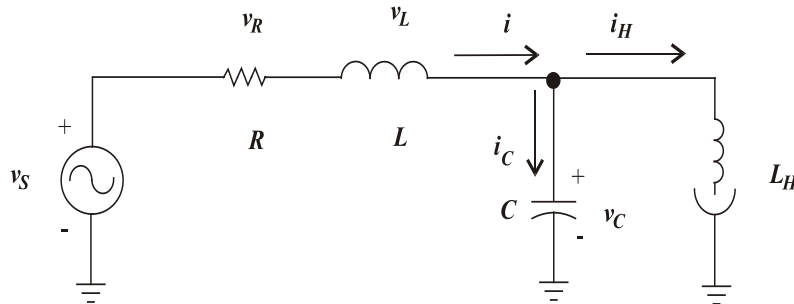


Figura 1 Sistema de estudio.

Al analizar algebraicamente el sistema de la figura 1 y aplicar las leyes de corrientes y voltajes de Kirchhoff's y el analisis nodal, se obtuvo un conjunto de ecuaciones diferenciales que representan el comportamiento dinámico de dicho sistema, las cuales se pueden expresar mediante la ecuación 2 en espacio de estado.

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{v}_c \\ \dot{i}_H \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_H} & -\frac{K_3 r^{-(m+2)}}{L_H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_3 r^{-(m+3)} i_H^2}{K_2} - \frac{K_1 r^{(n-1)}}{K_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v_c \\ i_H \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_S \quad (2)$$

### 3. Resultados

El modelo representado por (3) se integró a un archivo ODE, el cual sirve como inicio para utilizar el programa XPPAUTO50. Los valores que se utilizaron para realizar este experimento se muestran tabla 1. Con estos valores el sistema inicialmente presenta un estado transitorio, llegando eventualmente al estado estacionario, en el cual se mantiene asintoticamente estable, según se muestra en la figura 2, que describe el comportamiento del sistema en el tiempo.

Tabla 1 Parámetros en  $\mu$ . Para el caso estable.

Parámetros	Condiciones iniciales
$C$	0.1
$L$	0.1
$R_1$	0.1
$L_h$	0.1
$v_s$	1
$M$	2
$N$	2
$K_1$	0.08
$K_2$	0.005
$K_3$	3

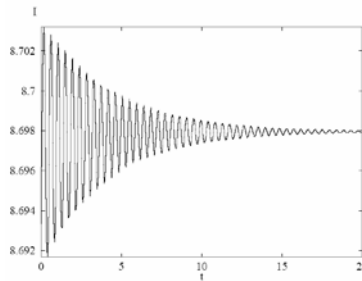


Figura 2 Respuesta en el tiempo del caso de estudio.

El sistema alcanza el estado estacionario en  $t=20$  s, con un valor de corriente  $i=8.697 \mu$ . El diagrama de bifurcación obtenido se muestra en la figura 3, el cual se logró al variar la inductancia. La línea sólida y punteada representa la trayectoria estacionaria estable e inestable, respectivamente. De la misma manera los círculos vacíos y los círculos rellenos representan orbitas periódicas inestables y estables respectivamente.

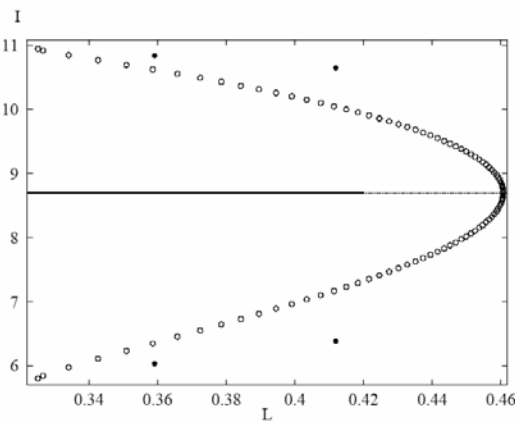


Figura 3 Diagrama de Bifurcación.

Obsérvese de la figura 3 que la inductancia es un parámetro de bifurcación, debido a que al variar este parámetro, se presenta una bifurcación tipo Hopf en el valor de  $L=0.4607 pu$ . La cual produce que el sistema tenga 2 zonas de operación; la zona 1 es una región de inestabilidad, dentro de esta zona cualquier punto de operación tiende a volver inestable el sistema y la zona 2 es una región estable, en donde cualquier punto de operación en esta región tiende a volver estable el sistema. La bifurcación Hopf se caracteriza por la aparición de orbitas periódicas de pequeña amplitud a partir de un punto de equilibrio, esto debido a la variación de un parámetro del sistema. Una bifurcación Hopf Inestable/subcritica (UHB por sus siglas en ingles) y una bifurcación Hopf Estable/supercrítica se detectaron con pequeñas variaciones del orden de  $L=0.3253pu$  y  $L=0.3252pu$ , respectivamente tal y como se muestra en la figura 4, los valores utilizados para este estudio se muestran en tabla 2.

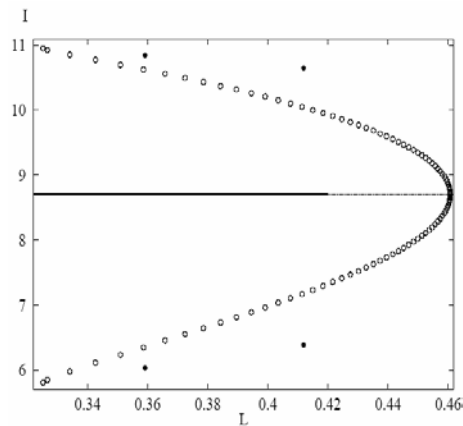


Figura 4 Bifurcación Hopf Estable e Inestable.

Tabla 2 Parámetros en  $pu$ . Para el sistema modificado.

Parámetros	Condiciones iniciales.
$C$	0.1
$L$	0.3251900570
$R_1$	0.1
$L_h$	0.1
$v_s$	1
$M$	2
$N$	2
$K_1$	0.08
$K_2$	0.005
$K_3$	3

La bifurcación Hopf presenta un comportamiento oscilatorio característico debido a la presencia de orbitas periódicas de pequeña amplitud para el punto de equilibrio, tal y como se muestra en la figura 5.

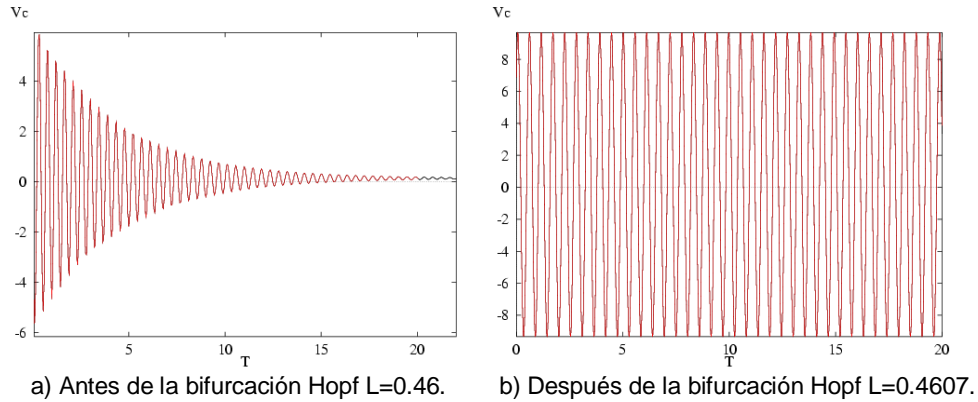


Figura 5 Magnitud de voltaje.

Para el caso de que los parámetros del sistema cambien de valor, aunque sea por una muy pequeña variación, el sistema presenta comportamientos de bifurcaciones Hopf Subcrítica ó Supercrítica, lo anterior se representa en la figura 6.

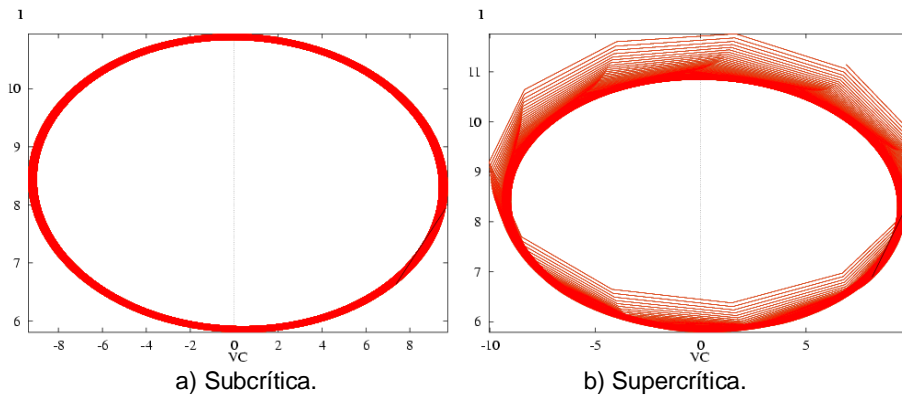


Figura 6 Comportamiento del sistema en la Bifurcación Hopf

#### 4. Conclusiones

En esta contribución se ha analizado la estabilidad de un sistema altamente no-lineal por medio de la teoría de bifurcaciones, el cual incluye un horno de arco eléctrico. El horno de arco se ha representado mediante un modelo basado en el balance de potencias. Se observó el comportamiento en el tiempo del sistema



cuando inicia su operación, posteriormente fueron variados los parámetros del sistema intencionalmente con el fin de observar su evolución y la robustez del sistema, para este caso en particular se encontró que la inductancia del SEP es un parámetro crítico del mismo, a tal grado que se pudo observar que el parámetro de bifurcación es la inductancia, la cual produce una bifurcación Hopf, que resulta en dos zonas de operación una subcrítica y otra supercrítica. Tradicionalmente se requería un gran esfuerzo computacional para encontrar estas bifurcaciones, utilizando los métodos convencionales de fuerza bruta. Sin embargo la aplicación de la teoría de bifurcaciones reduce significativamente este esfuerzo. Se ha demostrado que el sistema es sensible a cualquier variación en el parámetro de bifurcación, inclusive del orden de milésimas, lo cual puede llevar al sistema de tener una órbita oscilatoria estable, a estar en un estado asintóticamente inestable o asintóticamente estable, esto es una condición no deseable del sistema dado que produce daños en el mismo, los cuales pueden ser de consecuencias severas. El estudio da la oportunidad de identificar zonas de operación del sistema y de esta manera poder determinar valores críticos del mismo para los cuales se pierde la estabilidad bajo ciertas condiciones iniciales.

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] CIGRE Working Group 36-05, "Harmonics, characteristic parameters. Methods of Study, Estimates of existing values in the Network". *Electra*. No. 77. 1981. Pp.35-54.
- [2] E. Acha, A. Semlyen, N. Rajakovick, "A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its Applications to Electric Arcs". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 5. No. 3. Julio 1990. Pp. 1390-1397.
- [3] Douglas, M. T. Bishop, J. F. Witte, "Harmonic Measurement, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility". *IEEE Transaction on Power Delivery*. Vol. IA-32. No. 3. Mayo/junio. 1996. Pp. 617-624.

- [4] R. C. Dungan, "Simulation of Arc Furnace Power Systems ". IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. IA-16. No. 6. Noviembre/Diciembre 1980. P.p. 813-818.
- [5] M. D. Cox, A. Mirbod "A New Static VAR Compensator for an Arc Furnace". IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. PWRS-1. No. 3. Agosto 1986. Pp. 110-120.
- [6] E. O'Neill Carrillo, G. T. Heydt, E. J. Kostelich, S. S. Venkata, A. Sundaram, "Nonlinear Deterministic Modeling of Highly Varying Loads", IEEE PES 98 SM 174.
- [7] S. Varadan, E. B. Makram, A. A. Girgis, "A New Time Domain Voltage Source Model For an Arc Furnace Using EMTP". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 11. No. 3. Julio 1996. P.p. 1685-1690.
- [8] J. G. Mayordomo, L. F. Beites, R. Asensi, M. Izzeddine, L. Zabala, J. Amantegui, "A New Frequency Domain Arc Furnace Model fro iterative Harmonic Analysis". IEEE Transaction on Power Delivery. Vol 12. No. 4. Octubre 1997. P.p. 1771-1778.
- [9] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, D. Zaninelli "Arc Furnace Model For the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks". IEEE transaction on Power Delivery. Vol 9. No. 4. Octubre 1994. P.p. 2026-2036.
- [10] Medina, N. Garcia. "Newton Methods for the Fast Computation Of the Periodics Steady State Solutions Of Systems with Nonlinear and Time-varying Components". Conference Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting, Edmonton, Alberta, CANADA. Vol 2. Julio 18-22 1999. Pp. 664-669.
- [11] H. S. Strogatz, "Nonlinear dynamics and chaos", Cambridge Massachusetts. perseus publishing 2000.
- [12] Samet, H. Farjah, E. Sharifi Z. "A dynamic, nonlinear and time-varying model for electric arc furnace". International Transaction on Electrical Energy Systems. Vol 3. No. 5. Agosto 2015. Pp. 895-903.