

Characterization and simulation of dynamic phenomena related to the operation of an electric arc furnace connected to the electric power system of Ecuador

Caracterización y simulación de fenómenos dinámicos relacionados con la actuación de un horno de arco eléctrico conectado al sistema eléctrico de potencia de Ecuador

J.C. Cepeda¹C.A. Del Hierro¹

¹Operador Nacional de Electricidad - CENACE, Quito, Ecuador
E-mail: cepedajaime@ieee.org, cdhierro@cenace.org.ec

Abstract

The operation of electric arc furnaces (EAF) causes variations in the electrical variables, such as: active and reactive power, voltage and frequency. These variations are related to the proper operation of the EAF that produces a highly intermittent consumption, which makes it a special load. This work presents a methodology for the analysis and interpretation of the data recorded by the SCADA/EMS system and the wide area monitoring system WAMS, during the operation of an EAF connected to the electric power system (EPS) of Ecuador. The purpose of this analysis is to characterize the disturbances through the electrical variables frequency, voltage, active and reactive power, measured in the most sensitive substation to the EAF operation. To this aim, a multivariate data analysis is performed based on Empirical Orthogonal Functions EOF, together with intelligent classifiers. In addition, an EAF model is proposed for electromechanical transient simulation, which is based on a pulse-width modulation PWM train, affected by a noise signal with a parameterizable frequency.

Both the proposed methodology for characterizing the performance of the EAF through records, and the proposed model show promising results regarding the post-operative evaluation and operational planning of the impact of an EAF operation in the EPS.

Index terms— Electric Power System, Special Load, SCADA/EMS, WAMS, PMU, EOF, electric arc furnace EAF, Classifiers, PWM, PowerFactory

Resumen

La operación de los hornos de arco eléctrico (EAF) causa variaciones en las variables eléctricas, como son: potencia activa, reactiva, voltaje y frecuencia. Estas variaciones se deben al funcionamiento propio del EAF que produce un consumo altamente intermitente, lo que lo hace una carga especial. Este trabajo presenta una metodología para el análisis e interpretación de los datos registrados por el sistema SCADA/EMS y el sistema de monitoreo de área extendida WAMS, durante la operación de un EAF conectado al sistema eléctrico de potencia (SEP) de Ecuador. El propósito de este análisis es caracterizar las perturbaciones a través de las variables eléctricas frecuencia, voltaje, potencia activa y reactiva, medidas en la Subestación más sensible a la operación del EAF. Para esto, se realiza un análisis de datos multivariantes basado en Funciones Empíricas Ortogonales EOF, junto con clasificadores inteligentes. Adicionalmente, se propone un modelo de EAF para simulación de transitorios electromecánicos, el cual se basa en un tren de pulsos de ancho modulado (Pulse-width modulation PWM), afectado por una señal de ruido de frecuencia parametrizable.

Tanto la propuesta metodología para caracterización de la actuación del horno de arco eléctrico (EAF) a través de registros, como el modelo propuesto muestran prometedores resultados respecto de la evaluación post-operativa y de planeamiento en la operación de un EAF en el SEP.

Palabras clave— Sistema eléctrico de potencia, Carga especial, SCADA/EMS, WAMS, PMU, EOF, horno de arco (EAF), Clasificadores, PWM, PowerFactory

Recibido: 07-11-2020, Aprobado tras revisión: 11-01-2021

Forma sugerida de citación: Cepeda, J.; Del Hierro, C. (2021). "Caracterización y simulación de fenómenos dinámicos relacionados con la actuación de un horno de arco eléctrico conectado al sistema eléctrico de potencia de Ecuador". Revista Técnica "energía". No. 17, Issue II, Pp. 8-17

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2021 Operador Nacional de Electricidad, CENACE

1. INTRODUCCIÓN

Una de las fuentes de perturbaciones más complejas de controlar y que impactan la operación del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) son los hornos de arco eléctrico (EAF por sus siglas en inglés - electric arc furnace), que por su naturaleza demandan, de forma escalonada e instantánea, una gran cantidad de potencia durante su conexión, en cambio que, durante su desconexión, esta demanda de potencia cae de forma abrupta [1],[2]. Un EAF cambia la energía eléctrica en energía térmica a través del arco eléctrico para fundir materia prima en el horno [3].

La actuación de esta carga causa variaciones en las variables eléctricas, como son: potencia activa, reactiva, voltaje y frecuencia. Éstas deben ser estudiadas de forma apropiada y monitoreadas constantemente de modo tal de garantizar que la actuación de esta carga dinámica no afecte de forma directa a la calidad y seguridad del suministro de energía eléctrica y, por ende, a todos los actores del SEP [2],[4],[5].

Durante la operación del horno de arco, el comportamiento aleatorio del proceso de fundición del arco y su sistema de control contribuyen a la dinámica eléctrica y térmica, lo que produce serios problemas al sistema de suministro. El funcionamiento de un horno de arco puede causar problemas de desbalance, armónicos, interarmónicos y parpadeo de voltaje. Los componentes armónicos pueden además cambiar con diferentes etapas de fundición [6]. Asimismo, la ocurrencia de fenómenos transitorios de sobrevoltaje es presentada en [7] mientras que una “característica caótica” se reporta en [8] debido a la dinámica del funcionamiento del horno de arco. Adicionalmente, en [9] se reporta el efecto negativo de los hornos de arco en la estabilidad de frecuencia debido a su comportamiento intermitente, ante lo cual se debe definir algún mecanismo de compensación de potencia activa.

En el caso ecuatoriano, cuando el Sistema Nacional Interconectado SNI opera interconectado con el sistema colombiano (operación normal), la operación de los hornos de arco (particularmente de uno ubicado en la zona suroccidental del país) suele causar oscilaciones de potencia sostenidas entre Ecuador y Colombia (modo inter-área). En el mes de mayo de 2019, se produjo un escenario de operación atípico en el Sistema Nacional Interconectado SNI, relacionado con la operación del sin la interconexión con Colombia. Durante esta condición operativa se registraron, de forma directa mediciones de potencia activa, reactiva, voltaje y frecuencia en la bahía de interconexión al S.N.I mediante el sistema SCADA/EMS [10] y de forma indirecta a través de varios PMU's instalados a nivel nacional y que transmiten información al sistema WAMS [11], donde se observaron las perturbaciones originadas por el EAF ubicado en la zona suroccidental del país, las cuales se evidenciaron con mayor predominancia que cuando el SNI se encuentra interconectado. Dichas

perturbaciones se relacionaron con variaciones en la frecuencia del sistema. Estos comportamientos dinámicos requieren ser monitoreados y analizados apropiadamente, para lo cual sería deseable disponer de adecuados equipos de monitoreo dinámico como un PMU o un registrador de perturbaciones ubicado directamente en la bahía de conexión del horno EAF al SNI.

Sin embargo, dado que en la bahía de interconexión del EAF ubicado en la zona suroccidental de Ecuador (EAF de Adelca, al que en adelante se le llamará EAF_ad) no existe una unidad de medición fasorial (PMU) [12] para poder observar la perturbación en estado dinámico, surge la necesidad de implementar alguna metodología que permita una interpretación indirecta de este fenómeno, a través de la aplicación de técnicas de análisis de datos multivariantes, con el propósito de caracterizar la dinámica del sistema dentro de los análisis post-operativos.

Adicionalmente, con el propósito de evaluar el impacto de estas cargas en la planificación operativa, es necesario disponer de un modelo apropiado para simulación de transitorios electromecánicos. En este contexto, existen en la literatura varios modelos de horno de arco, siendo la mayoría orientados al análisis de flicker y armónicos. En general, los modelos de EAF se pueden clasificar en: a) simulación en el dominio del tiempo (como el método de la característica V-I o el método del circuito no lineal equivalente); y, b) simulación en el dominio de la frecuencia (como el modelo de fuente de armónicos de voltaje o la solución de ecuaciones diferenciales no lineales en el dominio armónico)[6]. Este tipo de modelos pueden incluso considerar conceptos de teoría del caos como se lo propone en [13],[14]. No obstante, estos modelos han sido estructurados para representar el comportamiento dinámico del horno de arco en un proceso de simulación en valores instantáneos o a través de la representación del voltaje y la corriente en sus componentes armónicas y no presentan una compatibilidad directa con modelos para simulación RMS de transitorios electromecánicos.

Para el caso del EAF_ad, en [15] se presenta un modelo matemático desarrollado en el software EMTP-ATPDraw mediante programación TACS (Transient Analysis of Control Systems), usando una resistencia no lineal que reproduce su comportamiento, basándose en las ecuaciones del modelo de Cassie. Posteriormente, los resultados de consumo de potencia activa (P) y potencia reactiva (Q) de la simulación en ATP son inyectadas en PowerFactory a través de un *ElmFile*. De esta forma, se logra un modelo para transitorios electromecánicos basado en registros (al que se le denominará “Modelo de Inyección”). Sin embargo, esta propuesta no permite independencia en las simulaciones puesto que depende de archivos externos y del modelo en ATP en sí. Por otro lado, en [3] se enfatiza que, debido a que el proceso de fundición del arco es un

proceso estocástico dinámico, resulta difícil estructurar un modelo determinista preciso para representar la carga de un horno de arco eléctrico (EAF). En este sentido, se presenta un modelo práctico de EAF para estudiar el problema de flicker de voltaje causado por esta carga especial, el cual es implementado en PSS/E. Este modelo de EAF se basa en una resistencia y un reactor en un modo de funcionamiento aleatorio para representar sus características dinámicas del y es concebido para simulación RMS. Este modelo presenta un consumo de potencia activa (P) y potencia reactiva (Q) semejante a un tren de pulsos con cierta frecuencia; no obstante, la forma de onda resultante muestra un comportamiento bastante homogéneo, lo que no corresponde a la aleatoriedad natural del horno a causa de los procesos de fundición.

Sobre la base de lo mencionado, el presente trabajo propone una metodología para análisis post-operativo y un modelo de simulación para análisis de planificación operativa, enfocándose en las siguientes contribuciones:

- i. Identificar la subestación donde se tiene instalado el PMU que tiene la mejor observabilidad de la perturbación originada por los cambios de potencia a causa del encendido y apagado del horno de arco dentro del SEP.
- ii. Comparar los niveles de afectación en distintos puntos del SNI en los escenarios de operación aislada e interconectado con el SEP de Colombia lo cual se muestra en el punto 3.1 de este artículo.
- iii. Identificar cuál de las variables eléctricas, ya sean potencia activa, reactiva, voltaje o frecuencia, medidas por el PMU indicado en el punto 1, es la más representativa para interpretar los estados de encendido y apagado del EAF, utilizando dos técnicas de inteligencia artificial, a decir: árbol de decisión C4.5 y Red Neuronal Multilayer Perceptron.
- iv. Proponer un modelo de horno de arco simplificado para simulación de transitorios electromecánicos (RMS), a ser implementado en PowerFactory, basado en un tren de pulsos pero que considere la aleatoriedad natural del proceso de fundición.

Para la implementación de las diferentes propuestas se emplea la herramienta de análisis de datos R [16], la herramienta de Machine Learning WEKA [17], [18] y el software PowerFactory de DlgSILENT.

Para la identificación de patrones que caracterizan el comportamiento dinámico del EAF, se aplican Funciones Empíricas Ortogonales EOF [19], y el entrenamiento de clasificadores basados en Machine Learning. Por otro lado, el modelo matemático simplificado del EAF, que se propone en este artículo para la simulación de fenómenos dinámicos electromecánicos, es implementado en PowerFactory.

Los resultados de este estudio contribuyen en el análisis post-operativo y de planificación operativa de sistemas eléctricos de potencia al brindar información valiosa sobre el impacto de los EAF en la operación de SEP.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera. En primer lugar, se analiza el comportamiento intermitente de la demanda del EAF. Seguidamente, se presenta la metodología para el análisis e interpretación de los datos registrados por los sistemas SCADA/EMS y WAMS para caracterizar la ocurrencia de los fenómenos dinámicos. Posteriormente, se presenta el modelo propuesto de EAF para simulación de transitorios electromecánicos. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

2. COMPORTAMIENTO INTERMITENTE DEL CONSUMO DEL EAF

Un horno de arco eléctrico EAF es un horno que genera calor por medio de un arco eléctrico. El arco eléctrico es un tipo de descarga continua que genera energía lumínica y calórica intensa, se forma entre dos electrodos en un ambiente gaseoso a baja presión o al aire libre y se caracteriza por una alta corriente y un bajo voltaje [4]. El ciclo de trabajo del EAF consta de dos etapas: fundición y refinado, las cuales se relacionan con el tiempo transcurrido desde el inicio de operación. En el período de fundición, los conjuntos de acero casi crean un cortocircuito en el lado secundario del transformador del horno, al tener contacto con los electrodos, lo que crea grandes fluctuaciones de corriente a factores de potencia bajos. Estas fluctuaciones de corriente provocan variaciones en la potencia activa y en la potencia reactiva, que provocan una caída de voltaje momentánea o un parpadeo, tanto en la barra de alimentación como en los nodos cercanos en el sistema interconectado. Las corrientes de arco son más uniformes durante el período de refinado, por lo que impactan menos en la calidad de la energía del sistema [4],[8].

Las variaciones de potencia activa y reactiva son de carácter intermitente, puesto que el horno opera de forma tal que fácilmente se puede pasar de una condición de cortocircuito a una de circuito abierto, lo que incluso provoca la necesidad de reiniciar varias veces el arco [4].

La Fig. 1 presenta un esquema típico de la estructura de un horno de arco, donde se aprecia: un sistema equivalente en la barra S de la subestación, un transformador de la subestación T_s , el tendido del cable al horno D1, el equipo de corrección del factor de potencia C, el transformador del arco de horno T_a , cables flexibles D2, conductores de barra B, electrodos de grafito G y recipiente de fundición M [8].



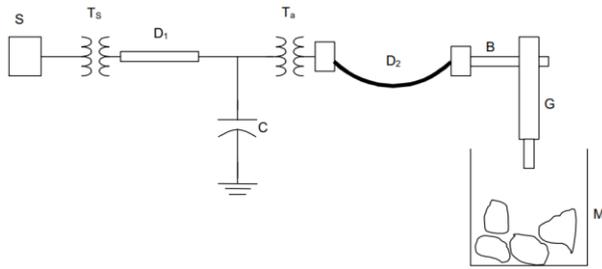


Figura 1: Estructura de un EAF típico [8]

Como se ha mencionado, el principio de funcionamiento del EAF provoca un comportamiento intermitente en el consumo de potencia activa y reactiva, la cual requiere de una modelación especial, con características estocásticas e incluso “caóticas” [8], aspecto que limita una modelación simplificada para transitorios electromecánicos. La Fig. 2 presenta los resultados de una simulación realizada en PowerFactory usando el “Modelo de Inyección” propuesto en [15], donde se puede observar la alta intermitencia del consumo del EAF_ad.

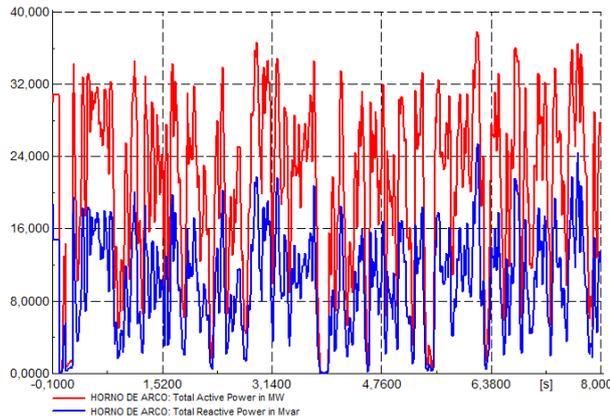


Figura 2: Consumo P y Q EAF_ad - “Modelo de Inyección” [15]

Adicionalmente, la Fig. 3 muestra un histograma del consumo de potencia activa del EAF_ad obtenido de realizar un análisis estadístico de los datos del SCADA/EMS registrados del 30 de junio al 1 de julio de 2020, cada 6 segundos, en los periodos en que el horno estuvo encendido.

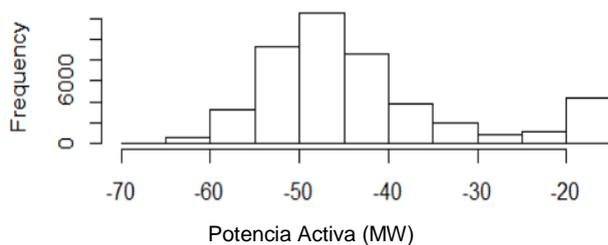


Figura 3: Histograma del consumo de P del EAF_ad

Lastimosamente, como se mencionó antes, no existe una PMU instalada en el punto de conexión del EAF_ad, por lo que no es factible confirmar, mediante mediciones, el comportamiento presentado en la Fig. 2. En este sentido, se define la necesidad de plantear una

metodología que, mediante el análisis de datos del sistema SCADA/EMS y los datos de las PMUs disponibles en el SNI, permita caracterizar el comportamiento del EAF_ad de forma dinámica (hasta que se gestione la instalación de una PMU en el punto de conexión). Asimismo, considerando la limitación del “Modelo de Inyección” propuesto en [15], se plantea la necesidad de proponer un modelo simplificado que sea independiente de ATP y cuya respuesta sea similar a la presentada en la Fig. 2.

3. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DEL SISTEMA DE TIEMPO REAL

Para realizar un correcto análisis e interpretación de los datos, a continuación, se muestran los pasos a seguir de manera general:

- Recolección de datos
- Preprocesamiento
- Transformación a información
- Visualización
- Generación de conocimiento.

En forma particular, la metodología propuesta tiene dos partes, la primera utiliza los datos provenientes del SCADA/EMS para identificar la subestación más sensible a las perturbaciones del EAF, mientras que la segunda permite observar el comportamiento dinámico de la perturbación.

3.1. Metodología para identificar la ubicación de PMU con mayor observabilidad de la perturbación originada por el EAF

Para identificar la ubicación de la PMU que tiene la mejor observabilidad de la perturbación originada por los cambios de potencia por el encendido y apagado del horno de arco dentro del SEP, se realiza el cálculo del coeficiente de correlación con los datos SCADA/EMS de la variación de potencia del EAF y las variaciones de frecuencia en 17 distintas subestaciones que tienen conexión directa con el EAF, a través de líneas de transmisión del SEP. Esta recolección de datos se realiza en los escenarios cuando Ecuador se encuentra interconectado con Colombia y operando en forma aislada.

Para la recolección de datos se utilizan las herramientas disponibles en Excel, vinculadas con el historiador PI de Osisoft, parte del sistema SCADA/EMS del Operador Nacional de Electricidad de Ecuador CENACE. En este historiador se tiene disponible la medición tanto de la potencia del horno como mediciones de frecuencia en las barras de otras subestaciones y centrales del SEP que tienen interconexión directa o indirecta con la subestación donde se encuentra la alimentación para el EAF.

El pre procesamiento estará enfocado a eliminar el ruido por malas mediciones generadas por los sistemas de adquisición de datos locales, cálculo de las variaciones de frecuencia y potencia en los distintos puntos de medición, filtrado a priori de las subestaciones más sensibles en variaciones de frecuencia a las variaciones de potencia y la eliminación de datos no disponibles y normalización de los datos limpios obtenidos.

Para la transformación a información se realiza el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. Las Figs. 4 y 5 muestran los valores calculados a través de R del coeficiente de correlación (operación interconectada y aislada), lo que permite identificar cuál es la ubicación donde la variación de potencia eléctrica producida por la operación del EAF tiene mayor correlación con las variaciones de frecuencia en las barras de las 17 subestaciones utilizadas para el estudio, las cuales se reducen a 7, que se escogieron por tener un número de registros de variaciones de frecuencia mayor a 3000 y la existencia de un PMU en dicha ubicación, luego del pre procesamiento indicado.

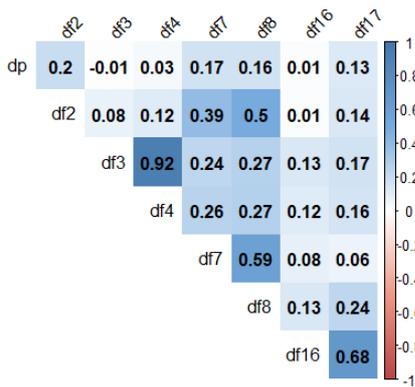


Figura 4: Coeficientes de Correlación de Pearson - Operación del EAF en el escenario interconectado

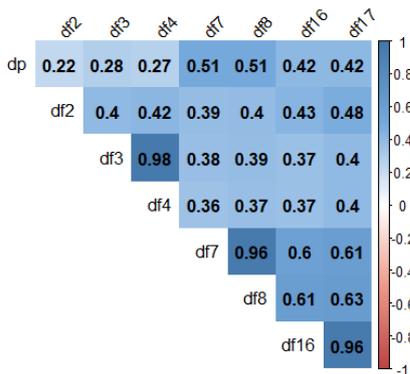


Figura 5: Coeficientes de Correlación de Pearson Operación del EAF en el escenario sin interconexión

Por otro lado, en las Figs. 6 y 7 se presenta la comparación de dichos índices de correlación en los escenarios con y sin interconexión con Colombia. De esta forma, se logra evaluar el impacto de la variación

de frecuencia en las subestaciones elegidas para el estudio, en ambos escenarios. Asimismo, se determina la relación de dichos coeficientes con el objetivo de obtener una métrica que permita evaluar cuántas veces se incrementa la variación de frecuencia cuando Ecuador está desconectado de Colombia durante la operación del EAF.

A partir de la metodología planteada, se logra determinar que la PMU de mayor sensibilidad es la que se encuentra en la ubicación denominada df2 cuando Ecuador está interconectado con Colombia, mientras que cuando Ecuador opera de forma aislada las PMUs más sensibles se encuentran en las ubicaciones df7 y df8.

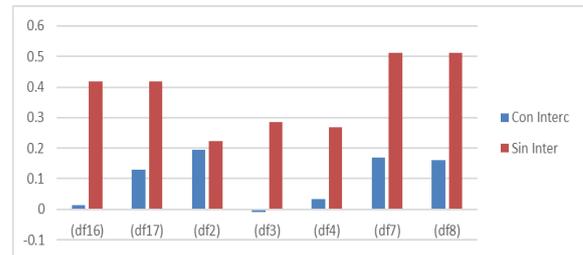


Figura 6: Coeficientes de Correlación calculados en el escenario de SEP interconectado y SEP sin interconexión con otro SEP

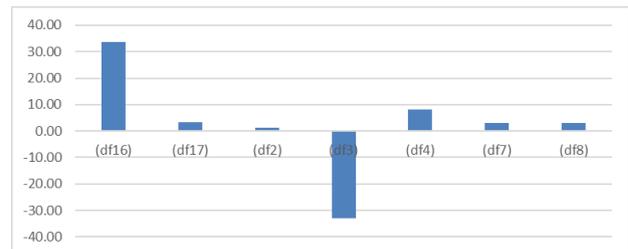


Figura 7: Relación entre los coeficientes de correlación escenario sin interconexión vs con interconexión

3.2. Metodología para evaluación de la perturbación a través de los datos WAMS en estado dinámico

Con el conocimiento generado con la metodología anterior, en donde se determina la subestación más sensible en variaciones de frecuencia por la variación de potencia del EAF, se realiza ahora la evaluación del impacto dinámico. Para esto, primeramente, se aclara que los datos del SCADA/EMS se actualizan cada 6 segundos, por lo que resulta importante indicar que con este periodo de muestreo es imposible observar la perturbación en estado dinámico (resolución en milisegundos) por lo que se utilizan los datos del sistema WAMS, el cual registra la información de la subestación más sensible a las variaciones de potencia durante el encendido y apagado del EAF. Todas estas mediciones están sincronizadas por GPS con un periodo de adquisición de datos de 60 muestras por segundo.



Para la captura de los datos dinámicos se dispone de las herramientas de Excel propias de WAProtector (sistema WAMS de CENACE). Primero se cambian los datos de mediciones en el tiempo a series temporales, las cuales son leídas por una aplicación en R en donde se realiza el preprocesamiento para eliminar los datos no disponibles, realizar filtros de agrupación, ejecutar la normalización de las series de datos temporales depurada y finalmente realizar el cálculo de la matriz de correlación.

Se utilizan técnicas de minería de datos para transformación de series temporales a funciones empíricas ortogonales EOF con el objetivo de que 30 individuos (correspondientes a los registros de eventos dinámicos), cada una con 7200 datos que se generan en una ventana de 2 minutos (un minuto en donde el horno está apagado, un minuto donde el horno esté encendido), puedan ser representados mediante la amplitud y los vectores empíricos ortogonales. Utilizando la metodología planteada en [19] se transforma la cantidad original de datos a información en espacios vectoriales ortogonales, que representan al fenómeno con una menor cantidad de datos. Con esta reducción, se realiza una identificación de patrones que representan si el horno está encendido o el horno está apagado, mediante la proyección de los datos originales en las direcciones de los vectores empíricos ortogonales.

Por otra parte, para definir el número de EOF que permita representar la variabilidad del proceso se escoge la Regla de North [20], como se muestra en (1).

$$\Delta\alpha\beta = |\lambda\alpha - \lambda\beta| \leq \delta\lambda\alpha \quad (1)$$

Esta ecuación indica que, si la diferencia de dos auto valores consecutivos es menor que el valor de la estimación del error, los auto vectores correspondientes a estos auto valores aportan para la representación de la variabilidad del proceso.

La estimación del error es función de su valor propio y del número muestras del fenómeno observado como se indica en (2).

$$\delta\lambda\alpha \stackrel{\text{def}}{=} \lambda\alpha \left(\frac{2}{N}\right)^{1/2} \quad (2)$$

Esta metodología se aplica a las variables calculadas por el PMU: potencia activa, potencia reactiva, frecuencia y voltaje con la finalidad de identificar cuál es la variable que permite representar de mejor manera la variabilidad de la perturbación originada por el EAF con el mínimo número de vectores empíricos ortogonales.

En la Tabla 1 se presenta un resumen del análisis realizado, que permite identificar los parámetros indicados en el párrafo anterior

Tabla 1: Resumen de datos que representan la variabilidad del encendido y apagado del EAF a través de las EOF

Variable	Datos Original	# EOF	Datos por EOF	%Variabilidad observada SVD
Hz	216060	7	420	92.37%
V	216060	5	300	99.36%
MW	216060	3	180	99.94%
MVAR	216060	3	180	99.29%

Los datos transformados en información a través de las EOF se ingresan a la herramienta de inteligencia artificial WEKA para la construcción del clasificador que permitirá identificar si el horno EAF está encendido o apagado.

De igual forma, para verificar qué técnica de clasificación es más adecuada para este proceso, se realizó la comparación del clasificador árbol de decisión C4.5 y una red neuronal Multilayer Perceptron (MLP). Para esto, aunque a priori ya se determinó que la potencia activa es la variable que representa de mejor manera la variabilidad de la perturbación, se realizó la construcción de los dos modelos de inteligencia artificial para corroborar esta afirmación.

Para identificar cuál de los dos modelos de clasificación permite una mejor identificación del estado de operación del EAF(encendido/apagado), se utilizaron los resultados de la Matriz de Confusión que se obtiene por el método de validación cruzada de 10 interacciones.

Este método de validación divide los datos en 10 subgrupos. Uno de los subgrupos se utiliza como datos de prueba y el resto como datos de entrenamiento. El proceso de validación cruzada se realiza en 10 iteraciones, con cada uno de los posibles subgrupos de datos de prueba. Finalmente, se determina la media aritmética de los resultados de cada iteración para obtener un único resultado [21][22].

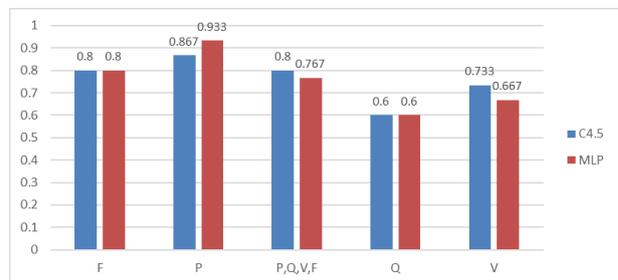


Figura 8: Verdaderos positivos para el estado encendido por tipo de clasificador



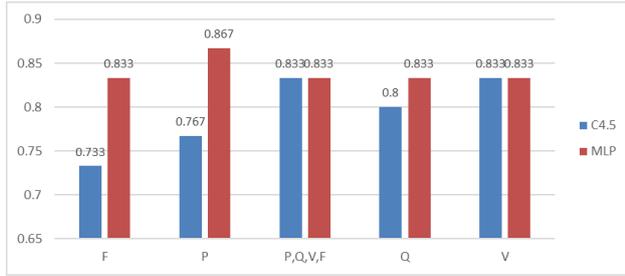


Figura 9: Verdaderos positivos para el estado apagado por tipo de clasificador

En las Figs. 8 y 9 se muestra la comparación de precisión de los clasificadores árbol de decisión C4.5 y Multilayer Perceptron para predecir los estados apagado o encendido, a través del parámetro verdaderos positivos (TP) por cada una de las variables eléctricas: frecuencia, voltaje, potencia activa y reactiva, por separados y en conjunto, cuya entrada son los vectores empíricos ortogonales calculados por el método SVD (singular value decomposition).

4. MODELO SIMPLIFICADO DE HORNO DE ARCO PARA SIMULACIÓN RMS

La respuesta dinámica del modelo de EAF presentado en [3], y que se aprecia en la Fig. 10, muestra un consumo de P y Q semejante a un tren de pulsos con cierta frecuencia definida. Sin embargo, este comportamiento resulta bastante homogéneo, lo que no corresponde a la aleatoriedad natural del horno a causa de los procesos de fundición. En este sentido, el presente trabajo propone un modelo de horno de arco que se basa en un tren de pulsos de ancho modulado (Pulse-width modulation PWM), afectado por una señal de ruido de frecuencia parametrizable, el cual se describe a continuación.

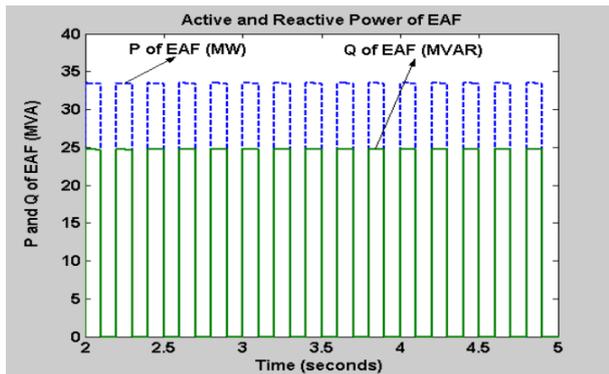


Figura 10: Variación de P y Q del modelo de EAF de [3]

Usando el lenguaje DIgSILENT Simulation Language DSL se implementa el modelo del EAF basado en un tren de pulsos de ancho modulado, afectado por una señal de ruido de frecuencia parametrizable. La Fig. 11 presenta el *Composite Frame* implementado en PowerFactory.

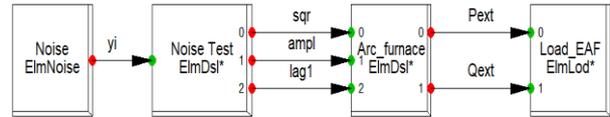


Figura 11: Composite Frame del modelo de EAF propuesto

Con el propósito de brindar versatilidad al generador de ruido, se incluye la opción de que pueda ser: cuadrático (sqr), de amplitud definida (ampl) o con un retardo (lag1).

La Fig. 12 presenta el *Common Model* del bloque *Arc furnace*, donde el bloque principal (Pulse train) es el generador del tren de pulsos de ancho modulado, siendo el ancho del pulso (PW) y el periodo (T) parametrizables.

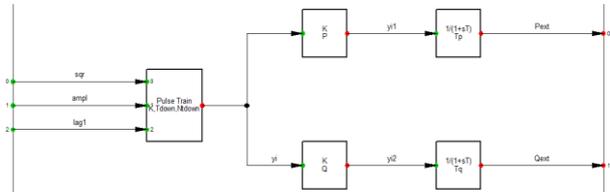


Figura 12: Common Model Arc furnace

La Fig. 13 muestra una simulación del tren de pulsos (antes de ser afectado por el generador de ruido) para un $T = 0.9$ s y un $PW = 0.75$ s (siendo este el PWM seleccionado para las simulaciones).

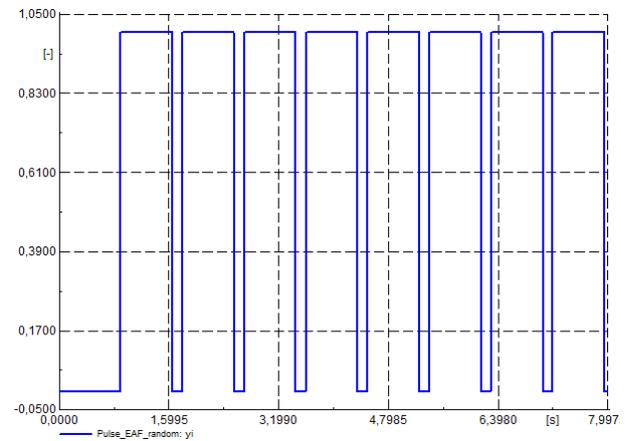


Figura 13: Tren de pulsos de ancho modulado

Finalmente, los valores de P y Q son determinados siguiendo al tren de pulsos afectados por el ruido de amplitud definida y por bloques de retardo. La Fig. 14 presenta las señales de P y Q que representan el modelo del consumo del EAF del modelo propuesto. De los resultados, es posible apreciar la gran similitud con la Fig. 2, que corresponde al consumo obtenido del modelo de ATP cuyos resultados son posteriormente inyectados en PowerFactory (Modelo de Inyección).

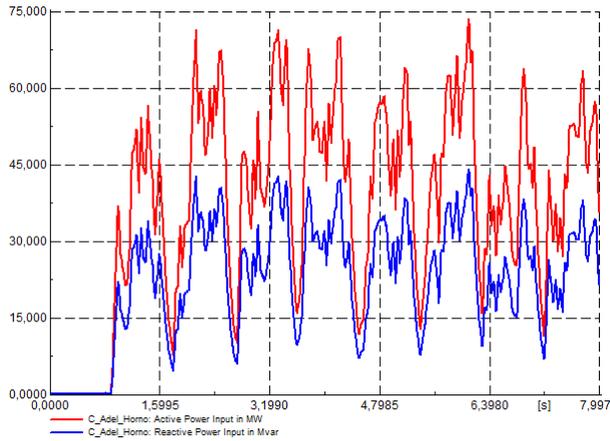


Figura 14: Consumo de P y Q EAF_ad - Modelo propuesto

5. RESULTADOS DE SIMULACIONES

En esta sección se presentan unos resultados de simulaciones realizadas en PowerFactory, usando un modelo simplificado del SNI, en un escenario medio de demanda en el que Ecuador está vendiendo 400 MW a Colombia. La perturbación simulada es la conexión del horno de arco EAF_ad usando el modelo propuesto y el periodo de simulación es de 30 s.

La Fig. 15 presenta los resultados de P, Q que consume el horno y el voltaje en terminales. Es posible apreciar cómo el consumo altamente intermitente provoca el parpadeo del voltaje (flicker).

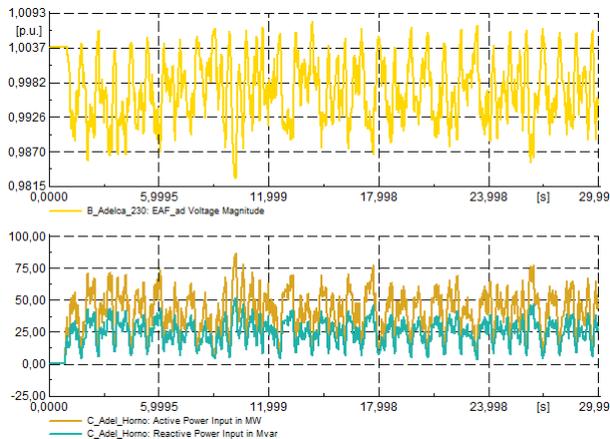


Figura 15: P, Q y V del EAF_ad

La Fig.16 presenta el flujo de potencia por uno de los circuitos de la L/T Pomasqui - Jamondino. En ésta se observa la presencia permanente de la oscilación inter-área (aproximadamente 0.37 Hz), con amplitudes de hasta unos 10 MW, lo cual efectivamente ocurre en el SNI cuando el EAF_ad está encendido, de acuerdo a lo registrado por el sistema WAMS, como se ejemplifica en la Fig. 17, que presenta un registro real del sistema WAMS del 24 de noviembre de 2020 a las 15:23. En este sentido, se ha podido validar que el modelo propuesto logra reproducir el comportamiento

oscilatorio que ocurre en el sistema real.

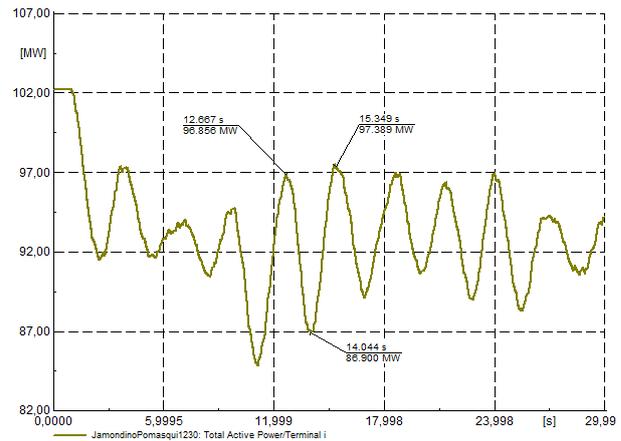


Figura 16: Flujo de potencia L/T Pomasqui – Jamondino con EAF propuesto (carga especial)



Figura 17: Flujo de potencia L/T Pomasqui – Jamondino real registrado en el sistema WAMS del 24/11/2020, 15:23

Con el propósito de verificar el efecto del modelo de EAF propuesto en el comportamiento oscilatorio del SNI, se realiza una simulación de conexión del horno, pero asumiendo que fuese una carga convencional (impedancia constante). La Fig. 18 muestra el flujo de potencia por uno de los circuitos de la L/T Pomasqui - Jamondino bajo esta premisa. En este caso, la oscilación se amortigua con una tasa de alrededor del 3.3% tal como se espera en esta condición operativa.

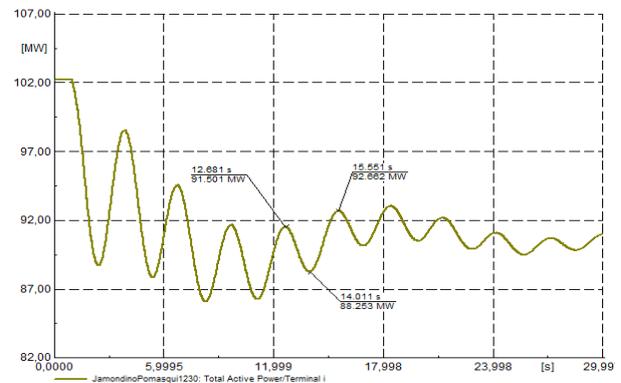


Figura 18: Flujo de potencia L/T Pomasqui – Jamondino con EAF de impedancia constante (carga convencional)



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este artículo se ha desarrollado una metodología para caracterización del funcionamiento del horno de arco EAF para determinar si el mismo se encuentra en estado apagado o encendido, a través del análisis de mediciones indirectas de frecuencia, voltaje, potencia activa y reactiva; capturadas por el sistema WAMS del PMU ubicado en la subestación más sensible causada por la actuación del EAF_{ad}.

Se ha determinado que, aplicando el concepto geométrico de las EOF y de acuerdo con los resultados de los modelos de clasificación construidos es posible obtener una mejor identificación de la variabilidad producida por la perturbación producida por EAF a través de la potencia activa, ya que, con ésta en promedio, se obtiene un 90% de instancias correctamente clasificadas, de acuerdo con el resultado obtenido por el método de prueba "Cross Validation".

Además, de acuerdo con los resultados obtenidos en la matriz de confusión presentada por los distintos clasificadores, se concluye que se tiene una mejor observabilidad de la perturbación producida por el cambio de estado de encendido y apagado del EAF solo a través de la medición fasorial indirecta de potencia y su transformación a funciones empíricas ortogonales. En este caso, la medición de las otras variables eléctricas, frecuencia, voltaje, potencia reactiva no aportan a obtener un mejor modelo de clasificación.

El cálculo del coeficiente de correlación entre la variación de potencia activa medida en el EAF y variaciones de frecuencia medidas en distintos puntos del SEP con el sistema SCADA/EMS permite determinar la subestación más sensible a la operación del EAF y darle una cuantificación, en los dos escenarios de i) SEP interconectado con otro SEP; y, ii) SEP operando de forma aislada.

Adicionalmente, este artículo propone un modelo simplificado de EAF para simulación de transitorios electromecánicos, el cual se basa en un tren de pulsos de ancho modulado (Pulse-width modulation PWM), afectado por una señal de ruido de frecuencia parametrizable. Este modelo ha sido implementado en PowerFactory usando la programación DSL. Los resultados de las simulaciones muestran un muy buen desempeño del modelo propuesto, tanto al compararlo con el "Modelo de Inyección" como al verificar que efectivamente permite reproducir el comportamiento oscilatorio del modo inter-área que se produce en el SNI.

Como recomendaciones se propone investigar los siguientes aspectos:

- Calcular el número de observaciones necesarias para el cálculo óptimo de EOF para cumplir con la teoría de la distribución del muestreo. En este trabajo se utilizó el principio en el cual el

número de muestras debe ser mayor o igual que 30.

- Desarrollar una herramienta de captura de datos de observaciones, cuyos periodos de tiempo de encendido y apagado sean simétricos al inicio de la perturbación de forma automática para obtener la cantidad de escenarios óptimos para la transformación a EOF.
- A partir de los coeficientes de las EOF sería posible estructurar una metodología de identificación de patrones que no solamente permita determinar si el horno está prendido o apagado, sino que permita valorar el grado de impacto en la estabilidad del sistema (por ejemplo, en la estabilidad oscilatoria) en función de la cuantificación energética de la oscilación. Una investigación futura se está estructurando en este sentido.
- El modelo de EAF propuesto requiere ser parametrizado, para lo cual es necesario que se gestione la instalación de una PMU en el punto de conexión del EAF_{ad} y se realice un procedimiento de identificación de parámetros basado en registros dinámicos.
- Usando el modelo de EAF propuesto se podrán realizar estudios del impacto de esta carga dinámica en el SNI, los cuales permitirían definir acciones de control tales como la implementación de compensadores dinámicos como por ejemplo STATCOMs.

AGRADECIMIENTOS

Al Operador Nacional de Electricidad CENACE, por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

A los compañeros de trabajo y amigos de la Gerencia Nacional de Desarrollo Técnico, por su apoyo y generosidad al compartir sus conocimientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Kundur, "[Prabha Kundur] Power System Stability And Control.pdf." p. 1661, 1993.
- [2] H. Hernández, "Análisis de las perturbaciones provocadas por el horno de arco eléctrico y sus métodos para atenuarlas," 2014.
- [3] L. Zhang, Y. Liu, M. Ingram, D. T. Bradshaw, S. Eckroad, and M. L. Crow, "EAF voltage flicker mitigation by FACTS/ESS," in Power System Conference & Exposition, 2004, vol. 1, pp. 372–378 vol.1.
- [4] R. Villafuerte, "Modelación, Simulación Y Determinación De Índices De Distorsión Armónica Y Efecto Flicker, en el Sistema Nacional De Transmisión, Causados Por La Conexión De Hornos De Arco, Aplicado Al Caso De Novacero S.A.," 2008.



- [5] J. J. Marulanda-Durango, C. D. Sepúlveda-Londoño, and M. A. Alvarez-López, "Estimación de los Parámetros de un Modelo de un Horno de Arco Eléctrico Usando Máxima Verosimilitud Parameter Estimation for an Electric Arc Furnace Model Using Maximum Likelihood."
- [6] L. Zhang and et al., "An adaptive arc furnace model," in Power System Conference & Exposition, 2000, vol. 15, pp. 931–939.
- [7] S. R. Mendis and D. A. Gonzalez, "Harmonic and transient overvoltage analysis in arc furnace power systems," IEEE Trans. Ind. Appl. (Institute Electr. Electron. Eng. (United States)), vol. 228, pp. 336–342, 1992.
- [8] G. Jang, W. Wang, G. T. Heydt, S. S. Venkata, and B. Lee, "Development of enhanced electric arc furnace models for transient analysis," Electr. Power Components Syst., vol. 29, no. 11, pp. 1060–1074, 2001.
- [9] M. A. Chawdhury, "An Endeavor of Frequency Regulation by Free Governor Mode of Operation in Bangladesh Power System," IOSR J. Electr. Electron. Eng., vol. 12, no. 4, pp. 75–87, 2017.
- [10] "Network Manager EMS - Network Management | ABB." [Online]. Available: <https://new.abb.com/network-management/network-management/network-manager-ems>. [Accessed: 01-Oct-2019].
- [11] A. De La Torre, J. Cepeda, and J. C. Herrera, "Implementación de un sistema de monitoreo de área extendida WAMS en el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador SNI," Ingenius, no. 10, 2013.
- [12] A. De La Torre, "Análisis técnico para la implementación de un sistema de monitoreo de área extendida (WAMS) en el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador," 2013.
- [13] G. Jang, W. Wang, G. T. Heydt, S. S. Venkata, and B. Lee, "Development of enhanced electric arc furnace models for transient analysis," Electr. Power Components Syst., vol. 29, no. 11, pp. 1061–1074, 2001.
- [14] B. L. JANG, WEIGUO WANG, GT HEYDT, SS VENKATA, "Development of enhanced electric arc furnace models for transient analysis. Electric Power Components and Systems," vol. 29, pp. 1060–1073, 2001.
- [15] IRONCLAD, "Modelo de Horno de Arco Eléctrico," Rep. Técnico, p. 14.
- [16] F. Carmona, "Un análisis con R Datos multivariantes," 2018.
- [17] B. Caicedo and J. Lopez, "Redes Neuronales Artificiales," Charlas Fis., p. 276, 2010.
- [18] I. Corso and C. Lorena, "Aplicación de algoritmos de clasificación supervisada usando Weka."
- [19] J. C. Cepeda, Real Time Vulnerability Assessment of Electric Power Systems Using Synchronized Phasor Measurement Technology. 2013.
- [20] S. Alburqueque, "Funciones ortogonales empíricas y su aplicación a datos de temperatura superficial del mar," 2019.
- [21] "Wayback Machine." [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20110905044421/http://www.public.asu.edu/~ltang9/papers/ency-cross-validation.pdf>. [Accessed: 26-Jun-2020].
- [22] "ProClassify User's Guide - Cross-Validation Explained." [Online]. Available: <http://genome.tugraz.at/proclassify/help/pages/XV.html>. [Accessed: 26-Jun-2020].



Jaime Cristóbal Cepeda

Campaña.- Nació en Latacunga en 1981. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2005 y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan en 2013. Entre 2005 y

2009 trabajó en Schlumberger y en el CONELEC. Colaboró como investigador en el Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina y en el Instituto de Sistemas Eléctricos de Potencia, Universidad Duisburg-Essen, Alemania entre 2009 y 2013. Actualmente, se desempeña como Gerente Nacional de Desarrollo Técnico del CENACE y como profesor de programas de Maestría y Doctorado. Sus áreas de interés incluyen los sistemas de medición fasorial, la evaluación de vulnerabilidad en tiempo real y el desarrollo de Smart Grids.



Carlos Arturo Del Hierro

Cadena.- Nació en Quito en 1978. Recibió su título de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el año 2002 en la ESPE y en marzo de 2020, finalizó sus estudios en Máster Universitario en Análisis y Visualización de Datos

Masivos / Visual Analytics and Big Data en la UNIR. Desde el año 2009 hasta la presente fecha se desempeña en el cargo de Ingeniero de Sistema Remoto de CENACE