

## **Análisis de armónicos en sistemas eléctricos de potencia y normas regulatorias: impacto del horno de arco eléctrico de acerías**

*Harmonic analysis in power systems and regulatory standards: impact of electric arc furnaces in steel mills*

Jimmy Cesar Gonzales Arispe<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-2376-0937>

Alvaro Yassif Marca Yucra<sup>2\*</sup>  <https://orcid.org/0009-0009-7978-9940>

Recibido 28 de julio de 2023, aceptado 20 de marzo de 2024

*Received: July 28, 2023 Accepted: March 20, 2024*

### **RESUMEN**

En la operación de sistemas eléctricos de potencia pueden presentarse armónicos de voltaje y corriente originados por cargas como ser plantas siderúrgicas, cementeras o por efecto de la generación eólica y solar. En la industria siderúrgica, los Hornos de Arco Eléctrico (HAEs) se encuentran entre los principales causantes de armónicos y fluctuaciones de voltaje. Estos armónicos de voltaje pueden incrementar significativamente los niveles de armónicos de corriente en la red, produciendo pérdidas de potencia activa y daño a los equipos. Por otro lado, no se dispone de modelos precisos de HAEs para efectuar estudios de armónicos en sistemas de potencia, debido al comportamiento altamente caótico del mismo. Esta investigación propone una metodología de análisis de armónicos, a corto y mediano plazo, basada en el modelo matemático simplificado de Ayrton para la representación del HAE. Dicha metodología es aplicada a un caso de estudio real de una siderúrgica conectada al sistema eléctrico boliviano; donde, se calcularon índices de calidad de energía, tasas de distorsión armónica total e individual, y se verificó el cumplimiento de las consideraciones de la norma IEEE 519-2022.

Los resultados se compararon con mediciones especializadas de armónicos en nodos de alto voltaje del sistema eléctrico boliviano; donde se evidencia el aporte significativo de armónicos en la red, principalmente de armónicos de quinto (3,98%), séptimo (1,68%), undécimo (0,85%) y decimotercer (0,79%) orden. De esta forma se demuestra la importancia de cumplir con las normas regulatorias en materia de calidad de energía para no afectar a los usuarios de la red.

Palabras clave: Distorsión armónica, modelo de Ayrton, arco eléctrico.

### **ABSTRACT**

*In the operation of power systems, voltage and current harmonics can arise due to loads such as steel plants, cement factories, or the effect of wind and solar generation. Electric Arc Furnaces (EAFs) are among the leading causes of voltage harmonics and fluctuations in the steel industry. These voltage harmonics can significantly increase the levels of current harmonics in the network, resulting in active power losses and equipment damage. Conversely, precise models of EAFs are not available for conducting harmonic studies in power systems due to their highly chaotic behavior.*

---

<sup>1</sup> Universidad Mayor de San Simón. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias y Tecnología. Cochabamba, Bolivia. E-mail: cgonzales@cndc.bo

<sup>2</sup> Universidad Nacional de San Juan - CONICET. Instituto de Energía Eléctrica. San Juan, Argentina. E-mail: alvaromarca25@gmail.com

\* Autor de correspondencia: alvaromarca25@gmail.com

*This research proposes a short- and medium-term harmonic analysis methodology based on Ayrton's simplified mathematical model for representing the EAF. This methodology is applied to an actual study case of a steel plant connected to the Bolivian power system. Quality of energy indices, and total and individual harmonic distortion rates were calculated, and compliance with the considerations of the IEEE 519-2022 standard was verified.*

*The results were compared with specialized harmonic measurements at high-voltage nodes of the Bolivian power system, evidenced by the significant contribution of harmonics in the network, mainly the fifth, seventh, eleventh, and thirteenth-order harmonics. Thus, the importance of complying with regulatory standards regarding energy quality to avoid affecting network users is demonstrated.*

*Keywords: Harmonic distortion, Ayrton model, electric arc.*

## INTRODUCCIÓN

En la operación de sistemas eléctricos de potencia puede identificarse la distorsión o deformación de la forma de onda de la tensión por efecto de la inyección de corrientes armónicas a la red. La misma, es ocasionada por la existencia de cargas no lineales conectadas en el sistema, como ser: variadores de frecuencia de motores en cementeras, Hornos de Arco Eléctrico en siderúrgicas, operación de computadoras e iluminación LED en sistemas de distribución [1].

Asimismo, la generación renovable eólica y solar, por ser tecnología basada en electrónica de potencia, también producen distorsión armónica de voltaje en los periodos de operación; este aspecto se ha visto acentuado en los sistemas de potencia durante los últimos años [2].

El incremento de la distorsión armónica de voltaje en la red repercute en la operación de los equipamientos de plantas cementeras o siderúrgicas con Hornos de Arco Eléctrico; es decir, modifican los puntos de operación de máxima eficiencia de equipos basados en electrónica de potencia, así también, pueden producir problemas de resonancia en filtros o bancos de capacitores instalados tal y como lo experimentaron operadores en plantas cementeras y siderúrgicas de Latinoamérica [3].

Por otro lado, es cada vez más común la utilización de Hornos Eléctricos en la industria para la fabricación de acero y sus aleaciones, puesto que, alrededor del 50% del acero producido en América Latina es fabricado por Hornos de Arco Eléctrico [4]. Estos últimos desprenden arcos eléctricos con corrientes muy elevadas, las cuales pueden llegar a superar los 60 kA, tal como se menciona en [5].

La operación de Hornos de Arco Eléctrico en sistemas de potencia afecta significativamente la calidad de energía de la red en términos de: contaminación armónica, fluctuaciones de voltaje y desbalance [6]. La principal causa es la naturaleza no lineal de los arcos eléctricos, lo cual genera armónicos y fluctuaciones de tensión en la red [7].

Asimismo, para la operación de Hornos de Arco Eléctrico en la red, se requiere de equipos especiales para compensar los niveles de armónicos y flicker producidos, como ser equipos STATCOM y Filtros Pasivos, entre otros; sin embargo, su presencia en una red con elevada contaminación armónica en el voltaje podría ocasionar problemas recíprocos en la operación de la planta siderúrgica, y en algunos casos daños en sus equipamientos, debido al incremento de los armónicos de corriente [8].

Debido a la poca disponibilidad de modelos para el análisis de armónicos en siderúrgicas con Hornos de Arco Eléctrico, en este artículo se propone un modelo de simulación basado en el modelo matemático de Ayrton; el cual describe, a través de sus ecuaciones, las principales características eléctricas del Horno de Arco Eléctrico, permitiendo estimar adecuadamente el nivel y el orden de los armónicos que genera. Mediante un análisis de flujo de carga armónica, y considerando la red completa del sistema de potencia, se puede determinar la tasa de distorsión armónica total de voltaje y corriente que resulta en la Siderúrgica y en las subestaciones del área de influencia.

Respecto a la normativa internacional para la limitación de emisión de armónicos, diferentes países en América Latina definen sus procedimientos tomando en cuenta las recomendaciones de las normas

IEC 61000-3-6 y IEEE 519-2022 [10]; para cargas industriales se aplica la norma IEEE 519-2022.

El presente artículo está estructurado en cuatro secciones, mismas que se describen a continuación.

En la primera sección se resumen las definiciones que aplican al cálculo de distorsión armónica individual y total, el modelo de Ayrton y la norma internacional IEEE 519-2022.

La segunda sección hace alusión a la metodología propuesta para efectuar el análisis armónico en sistemas de potencia y su aplicación a un caso particular de estudio. Además, se desarrollan las ecuaciones del modelo matemático estudiado del arco eléctrico y se proponen adecuaciones en las mismas para efectuar el análisis armónico correspondiente.

En la tercera sección se presenta el análisis de las mediciones de armónicos de voltaje efectuadas en el sistema eléctrico de Bolivia, tomando a la subestación Las Lomas 230 kV como caso de estudio. Asimismo, se evalúa la influencia de los armónicos de voltaje medidos sobre la operación de la planta siderúrgica conectada en la subestación mencionada.

Finalmente, en la cuarta sección se presentan las conclusiones, aportes y recomendaciones del presente trabajo.

### ARMÓNICOS, MODELO DE AYRTON Y NORMA IEEE 519-2022

De forma conceptual, la distorsión armónica se entiende como un fenómeno eléctrico que produce perturbaciones en la forma de onda de señales eléctricas de la red. Las mismas pueden ser producidas por dispositivos electrónicos no lineales como variadores de frecuencia, inversores o cargas electrónicas, y pueden generar todo tipo de problemas a corto o largo plazo [3]. En la Figura 1 se muestra la forma de la onda fundamental, vista como una onda senoidal, y una onda deformada producto de componentes armónicos de tercer orden.

A continuación, se presentan algunas definiciones típicas utilizadas para el estudio de armónicos:

- El punto de acoplamiento común (PCC): se define como el punto de la red que está más

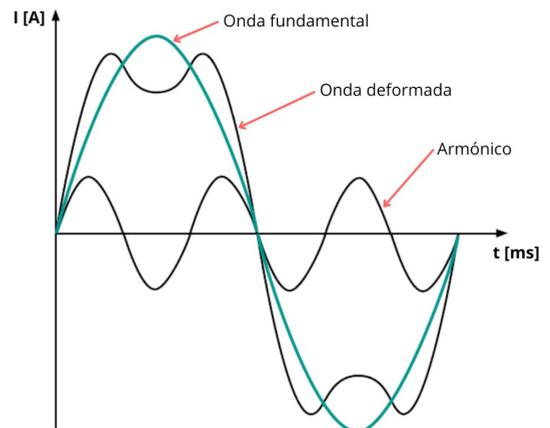


Figura 1. Descomposición de una onda deformada.

próximo al consumidor afectado y en el cual se encuentran, o pueden encontrarse, conectados otros consumidores.

- Tasa de distorsión armónica total (THD):

$$THD_v (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^K * V_i^2}}{V_f} * 100 \quad (1)$$

Donde:

- THD<sub>v</sub>: Tasa de distorsión armónica total de tensión.
- K: Mayor orden armónico de la señal de tensión.
- V<sub>i</sub>: Valor eficaz (RMS) de la tensión armónica “i” (para i=2,3,4, ...k) expresada en Voltios.
- V<sub>f</sub>: Tensión fundamental del punto de medición expresada en Voltios.

- Tasa individual de distorsión armónica (IHDR):

$$IHDR_v = \frac{V_i}{V_f} \quad (2)$$

Donde:

- IHDR<sub>v</sub>: Tasa individual de distorsión armónica de tensión.
- V<sub>i</sub>: Valor eficaz (RMS) de la i-ésima tensión armónica expresada en Voltios.
- V<sub>f</sub>: Tensión fundamental del punto de medición expresada en Voltios.

- Distorsión de demanda total (TDD):

$$TDD_i (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^K * I_i^2}}{I_L} * 100 \quad (3)$$

Donde:

- TDD<sub>i</sub>: Distorsión de demanda total de corriente.
- K: Mayor orden armónico de la señal de corriente.
- I<sub>i</sub>: i-ésima armónica de la señal de corriente.
- I<sub>L</sub>: Corriente promedio de la carga.

A partir de las ecuaciones presentadas anteriormente se puede calcular el nivel de distorsión armónica en diferentes subestaciones y alimentadores de la red. Mediante ello, se puede determinar si la calidad de energía de la red se ve afectada por los armónicos, de manera tal que se incumplen los requerimientos de calidad exigidos por las normativas. La norma internacional IEEE 519-2022 [10], define límites máximos tolerables para las tasas de distorsión armónica de corriente y voltaje, según se describe a continuación.

### NORMA IEEE 519-2022

#### Límites de distorsión de corriente

Los límites de distorsión armónica de corriente, recomendados por la norma, se evalúan en el punto de acoplamiento común (PCC). Estos límites dependen de la relación entre la capacidad de cortocircuito en el PCC y la carga de la industria [10].

Los límites de las componentes armónicas de orden par están limitados al 25% de los valores expuestos en la Tabla 1, donde I<sub>SC</sub> es la máxima corriente de cortocircuito en el PCC y I<sub>L</sub> es la máxima demanda de corriente de la carga.

#### Límites de distorsión de tensión

En la Tabla 2 se indican los valores límite de la tasa de distorsión armónica de tensión en la red, los cuales son determinados en función al nivel de voltaje.

#### Modelo matemático del Arco Eléctrico

Para analizar la afectación de los armónicos de voltaje de la red sobre los equipamientos de una siderúrgica, inicialmente se debe obtener un modelo de Horno de Arco Eléctrico capaz de reproducir el comportamiento no lineal del mismo. Con este objetivo, a continuación, se describe el modelo matemático del arco eléctrico.

Los modelos matemáticos del arco eléctrico pueden clasificarse en: modelos de transferencia de calor, modelos físicos, modelos tipo “caja negra” y modelos basados en la característica tensión - corriente. El modelo arco eléctrico de Ayrton plantea

Tabla 1. Límites de distorsión armónica de corriente.

Valores de I <sub>h</sub> en porcentaje de I <sub>L</sub> *					
I <sub>SC</sub> /I <sub>L</sub>	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	TDD [%]
<b>V<sub>N</sub> ≤ 69 [kV]</b>					
<20*	4	2	1,5	0,60	5
20 – 50	7	3,5	2,5	1	8
50 – 100	10	4,5	4	1,5	12
100 – 1000	12	5,50	5	2	15
> 1000	15	7	6	2,5	20
<b>69 [kV] &lt; V<sub>N</sub> ≤ 161 [kV]</b>					
< 20*	2	1	0,75	0,30	2,5
20 – 50	3,5	1,75	1,25	0,50	4
50 – 100	5	2,25	2	1,25	6
100 – 1000	6	2,75	2,5	1	7,50
> 1000	7,50	3,5	3	1,25	10
<b>V<sub>N</sub> &gt; 161 [kV]</b>					
< 50*	2	1	0,75	0,30	2,5
≥ 50	3	1,5	1,15	0,45	3,75

\* Todos los equipos destinados a la generación de potencia están limitados a estos valores de distorsión de corriente, sin importar su relación de cortocircuito (ISC/IL).

Tabla 2. Límites de distorsión armónica de voltaje.

Tensión Nominal en el PCC (Un)	Distorsión Armónica Individual de la Tensión (%)	Distorsión Armónica Total de Tensión THD (%)
$Un \leq 1kV$	5,0	8,0
$1kV < Un \leq 69kV$	3,0	5,0
$69kV < Un \leq 161kV$	1,5	2,5
$Un > 161kV$	1,0	1,5

una combinación entre estos dos últimos grupos, definiendo la no linealidad de la carga a través de ecuaciones hiperbólicas, reproduciendo la relación característica V - I. A continuación, se expresa la ecuación de Ayrton:

$$V_a(i_a) = V_{at}(I_a) + \frac{c}{D + i_a} \quad (4)$$

$$V_{at}(I_a) = A + B * I_a \quad (5)$$

Donde:

- $V_a$  [V]: Voltaje de arco eléctrico.  
 $i_a$  [A]: Corriente de arco eléctrico.  
 $V_{at}$  [V]: Voltaje umbral de arco eléctrico.  
 $l$  [cm]: Longitud de arco eléctrico.  
 $A$  [V]: Caída de tensión en los electrodos.  
 $B$  [V/cm]: Tensión por unidad de longitud de arco eléctrico.  
 $C$  [W]: Potencia de arco eléctrico.  
 $D$  [A]: Corriente promedio de ignición o extinción de arco eléctrico.

Cabe mencionar que se considera a la longitud de arco eléctrico como uno de los parámetros de mayor influencia en el análisis de distorsión armónica como se observa en la ecuación (4) y ecuación (5).

Debido a que el modelo de arco eléctrico, basado en las ecuaciones de Ayrton, puede representar la no linealidad de la carga, es posible obtener los espectros de frecuencias armónicas que son producidas [3]. Por tanto, el modelo de Ayrton permite calcular la tasa individual de distorsión armónica (IHDR) y por ende la tasa de distorsión armónica total (THD).

### METODOLOGÍA PROPUESTA PARA CÁLCULO DE ARMÓNICOS

Como resultado de las diferentes etapas de estudio encaradas en esta investigación, se propone una

metodología de análisis de armónicos; cuyo esquema se observa en la Figura 2. Esta metodología se compone principalmente de una etapa de modelamiento y otra de mediciones de armónicos en el PCC.

Finalmente, se realiza el análisis de resultados obtenidos mediante la metodología y se verifica el cumplimiento de la Norma Internacional IEEE 519-2022, y en su caso, también se analiza la necesidad de instalación de filtros de armónicos en la planta.

En las siguientes secciones se analiza la formulación del algoritmo y la aplicación de esta metodología.

### Obtención del modelo de simulación del horno de arco eléctrico

Para la aplicación del modelo de Ayrton, los autores de este trabajo tomaron en cuenta las siguientes consideraciones en el proceso de modelación del horno para análisis de distorsión armónica:

- Se considera que la forma de onda de la corriente de arco eléctrico, producida durante la operación del horno, inicialmente se aproxima a una onda sinusoidal.
- Se define una función para el parámetro C, donde se integran dos nuevas constantes:  $C_{ign}$  (constante de ignición) y  $C_{ext}$  (constante de extinción).
- Integrar un algoritmo para reproducir la onda de voltaje de arco en el semiciclo positivo y negativo de la corriente de arco de forma desacoplada.

Tomando en cuenta estas consideraciones, se podrá definir la operación del horno en un área de trabajo determinado por los estados de ignición y extinción del arco eléctrico. De esta forma, el parámetro C pasa de un estado de ignición a un estado de extinción cada medio ciclo de la corriente de arco,

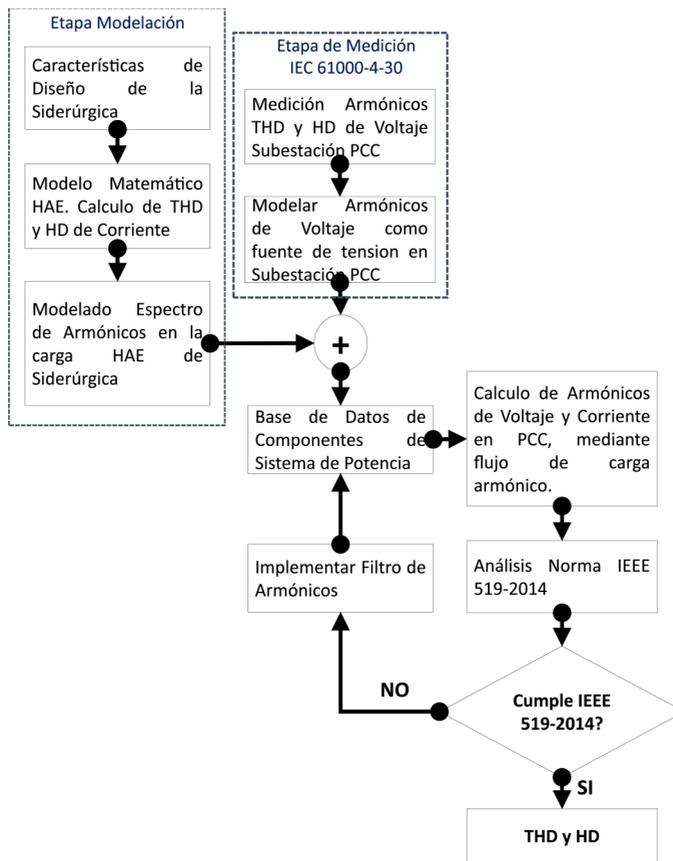


Figura 2. Metodología de análisis de armónicos.

lo cual se debe al encendido y apagado periódico del arco eléctrico.

Para reproducir una variación continua del parámetro C, entre los estados mencionados anteriormente (ignición y extinción), se considera adecuada la aplicación de la ecuación (6).

$$C_v(t) = \frac{1}{2} * (C_{ign} - C_{ext}) * \text{sign}(i_a(t)) * \cos(\omega t) + C_{ext} \quad (6)$$

Donde:

- $C_v$ : Parámetro C variable en función del tiempo.
- $i_a$ : Corriente de arco eléctrico en función del tiempo.
- $C_{ign}$ : Valor promedio de potencia de ignición de arco eléctrico.
- $C_{ext}$ : Valor promedio de potencia de extinción del arco eléctrico.

Por otro lado, para que el modelo pueda reproducir la característica no lineal de la carga tanto para valores positivos como negativos, se toma en cuenta la ecuación (7) para representar el voltaje de arco eléctrico en el semieje positivo; mientras que en el semieje negativo se toma en cuenta la ecuación (8). Ambas expresiones están basadas en las ecuaciones de Ayrton.

$$V_{a1}(t) = V_{at}(l_a) + \frac{C_v(t)}{D + |i_a(t)|} \quad (7)$$

$$V_{a2}(t) = -V_{at}(l_a) - \frac{C_v(t)}{D + |i_a(t)|} \quad (8)$$

Donde:

- $V_{a1}$ : Voltaje de arco eléctrico en el semieje positivo.
- $V_{a2}$ : Voltaje de arco eléctrico en el semieje negativo.
- $V_{at}$ : Voltaje umbral de arco eléctrico.
- $l_a$ : Longitud de arco eléctrico.
- $C_v$ : Parámetro C variable en función del tiempo.

D: Corriente promedio de ignición y extinción de arco eléctrico.

$i_a$ : Corriente de arco eléctrico en función del tiempo.

Por lo tanto, el algoritmo propuesto para la obtención del modelo, basado en las ecuaciones de Ayrton, considera los aspectos vistos anteriormente y representa las características necesarias del arco eléctrico para realizar estudios de armónicos. En la Tabla 3 se observa el resumen del algoritmo planteado.

Aplicando las ecuaciones de Ayrton mediante el algoritmo propuesto, tomando en cuenta las consideraciones analizadas anteriormente, se obtiene el modelo de simulación del Horno de Arco Eléctrico, el cual reproduce las características eléctricas necesarias que originan los armónicos. En la Figura 3, se observa la relación entre las curvas de corriente y voltaje de arco obtenido por el modelo, donde se verifica la no linealidad de la carga.

### Validación del modelo de simulación del horno de arco eléctrico

La verificación del modelo de simulación obtenido fue dividida en tres etapas: configuración del modelo

y la red; procesamiento de datos y análisis de armónicos; y por último comparación de resultados con caso de estudio real. El caso de estudio real corresponde al caso de una acería en Bolivia que tiene instalado un Horno de Arco Eléctrico, sobre el cual se obtuvieron los datos necesarios para realizar el modelado.

### Etapa 1: Configuración del modelo y la red

El año 2021, en el área Oriental del Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Bolivia, se establece la conexión de la red del proyecto siderúrgico a la subestación "Arboleda", perteneciente al SIN, mediante una línea en 230 kV de 13 km de longitud.

La instalación del proyecto siderúrgico consiste en: un horno de arco eléctrico, un horno cuchara y procesos afines. La capacidad instalada total de la planta es de 32 MW; esta potencia es una carga considerable para el sistema eléctrico boliviano, que tiene una demanda máxima aproximada de 1650 MW. En la Figura 4 se observa un esquema que representa la conexión del Horno de Arco con el sistema eléctrico de potencia.

Tabla 3. Desarrollo del modelo del horno de arco eléctrico.

Nº	Pasos	Ecuaciones
1	Configuración de los parámetros iniciales del modelo del Horno de Arco.	$A, B, C_{ing}, C_{ext}$ y $D$
2	Tomar la señal de corriente en bornes del transformador como una variable de entrada.	$i_a(t) \approx i_a^{m\acute{a}x} * sen(wt)$
3	Obtención de la variable C en base a los valores de voltaje de ignición y extinción del arco eléctrico.	$C_v(t) = \frac{1}{2} * (C_{ign} - C_{ext}) * si\ gn(i_a(t)) * cos(wt) + C_{ext}$
4	Cálculo del voltaje umbral del arco eléctrico a partir de la ecuación de Ayrton.	$V_{at}(I_a) = A + B * I_a$
5	Determinación de la señal de salida de tensión de arco eléctrico en los semiejes positivo y negativo.	$si : (i_a(t) > 0)$ $\left\{ V_{a1}(t) = V_{at}(I_a) + \frac{C_v(t)}{D +  i_a(t) } \right\}$ $sino : \left\{ V_{a2}(t) = V_{at}(I_a) - \frac{C_v(t)}{D +  i_a(t) } \right\}$

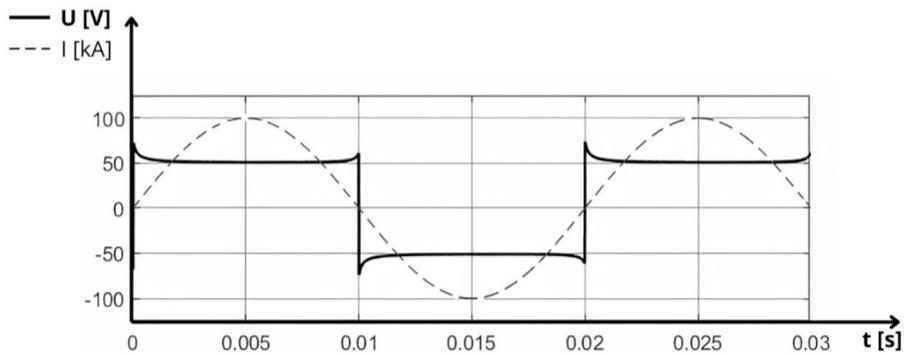


Figura 3. Señales de tensión (U) y corriente (I) de arco eléctrico en función del tiempo.

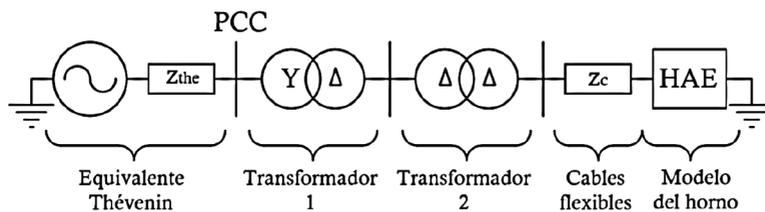


Figura 4. Red eléctrica de la instalaciones de la acería estudiada.

La acería estudiada cuenta con un Horno de Arco Eléctrico trifásico de una capacidad de 19 MW. Los parámetros de Ayrton, requeridos por el modelo, se ajustaron de acuerdo con las dimensiones que presenta el horno; donde:  $A = 40 \text{ V}$ ,  $B = 10 \text{ V/cm}$ ,  $C_{\text{ign}} = 190 \text{ kW}$ ,  $C_{\text{ext}} = 39 \text{ kW}$  y  $D = 5 \text{ kA}$ .

Además, se consideraron otros factores relevantes en la zona de baja tensión como ser la longitud de los cables flexibles de potencia que conectan el horno y el transformador, lo cual repercute directamente en la impedancia de esta. Entonces, de acuerdo a datos proporcionados por operadores de la planta siderúrgica estudiada, la impedancia de los cables flexibles de potencia es representado por una resistencia de  $0,25 \text{ m}\Omega$  y una inductancia de  $9,93 \text{ uH}$ . De igual forma se obtuvieron datos reales de los transformadores instalados en la planta.

Por otro lado, también se obtuvieron datos del Punto de Conexión Común (PCC) entre la red de la acería y el Sistema Interconectado Nacional (SIN), proporcionados por el Comité Nacional de Despacho de Carga de Bolivia.

### ***Etapa 2: Procesamiento de datos y análisis de armónicos***

Una vez configurado el modelo y la red eléctrica de la acería en un entorno de simulación, por ejemplo, la extensión de MATLAB 9.13 (versión R2022b): Simulink; requerimos la lectura de curvas de corriente y voltaje que resultan en cada zona de la red simulada sobre la cual deseamos efectuar el análisis. Para el caso de estudio, el análisis se enfoca en el Punto de Conexión Común (PCC) de la acería, también mostrado en la Figura 4, debido a que se deben cumplir los requerimientos establecidos por la norma eléctrica boliviana en dicho punto. En las Figura 5 y Figura 6 se presentan las señales de voltaje y corriente obtenidas en el PCC mediante el modelo desarrollado.

Comparando ambas señales, a simple vista se advierte que la señal de corriente posee una mayor distorsión que la señal de voltaje. Para verificar el nivel de armónicos de las señales registradas aplicamos la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a cada una de ellas. Mediante la FFT calculamos la Transformada de Fourier Discreta (DFT) de una forma rápida y eficiente, lo cual nos permite obtener el espectro de

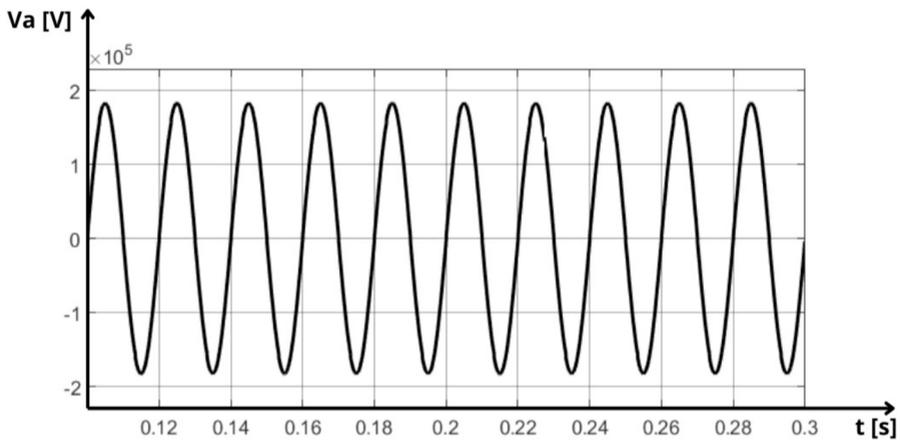


Figura 5. Curva de tensión en función del tiempo obtenida en el PCC.

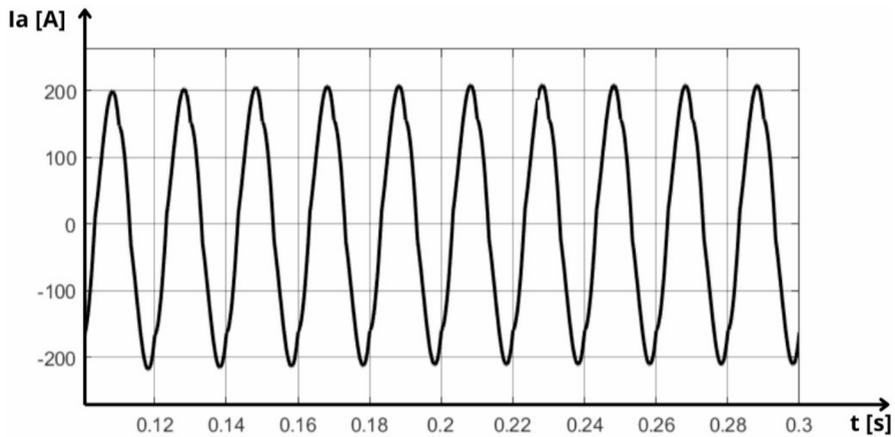


Figura 6. Curva de corriente en función del tiempo obtenida en el PCC.

frecuencias armónicas de las señales analizadas. En la Tabla 4 se observan algunas de las componentes armónicas individuales obtenidas de la corriente del horno de arco eléctrico para el caso de estudio.

Se observa que los valores máximos de las tasas individuales de distorsión armónica (IHDR) del horno de arco eléctrico corresponden a las corrientes armónicas de quinto, séptimo, undécimo y decimotercer orden. Se verifica que estos componentes armónicos son los más significativos dentro del espectro de corriente armónica en hornos de arco [5], [7], [9].

Los espectros de frecuencias armónicas obtenidos en el PCC del caso de estudio, para la señal de corriente y voltaje, se observan en la Figura 7 y Figura 8.

El espectro de frecuencias armónicas de cada señal nos proporciona las magnitudes de las tasas de distorsión armónica individual. Obteniendo dichas magnitudes podemos utilizar las ecuaciones (1)-(3) para realizar el cálculo de la tasa de distorsión armónica total (THD), tanto para la señal de corriente y tensión. En la Tabla 5 se observan las tasas de distorsión armónica total, calculadas mediante la ecuación (1), de la señal de voltaje y corriente en el PCC, la zona de media tensión y la zona de baja tensión de la red de la acería.

Se puede denotar que existe un cambio significativo en los niveles de THD de tensión en cada zona de la planta, de baja tensión con 26,84%, a media tensión con 4,33% y alta tensión con 0,88%; mientras que los niveles de THD de corriente casi se mantienen

Tabla 4. Tasas individuales de distorsión armónica de corriente del horno de arco.

Orden de armónico	Frecuencia (Hz)	IHDR (%)
1	50	100,00
2	100	0,03
3	150	0,01
4	200	0,02
5	250	3,66
6	300	0,02
7	350	1,87
8	400	0,01
9	450	0,01
10	500	0,01
11	550	0,78
12	600	0,04
13	650	0,55
14	700	0,01
15	750	0,01
16	800	0,03
17	850	0,36
18	900	0,03
19	950	0,25
20	1000	0,01

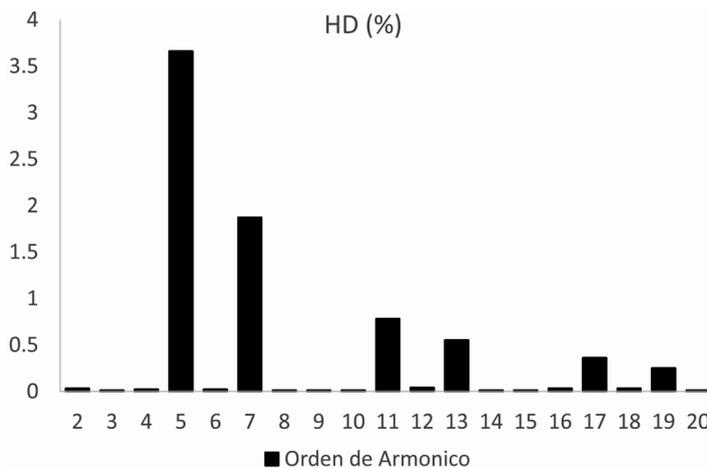


Figura 7. Espectro de frecuencias armónicas de corriente en el PCC.

iguales en las tres zonas, manteniéndose en un orden de 4,27% aproximadamente.

**Etapa 3: Comparación de resultados con datos de estudio en campo**

Se obtuvieron registros de los espectros de armónicos de corriente del Horno de Arco Eléctrico en la

bahía de la subestación Las Lomas 230 kV (PCC), proporcionados por la empresa siderúrgica. Los mismos se muestran en la Tabla 6.

En la Figura 9 se observa una gráfica comparativa entre el espectro armónico de corriente en el PCC calculado con el modelo de Ayrton y los datos reales proporcionados por la empresa siderúrgica. Se

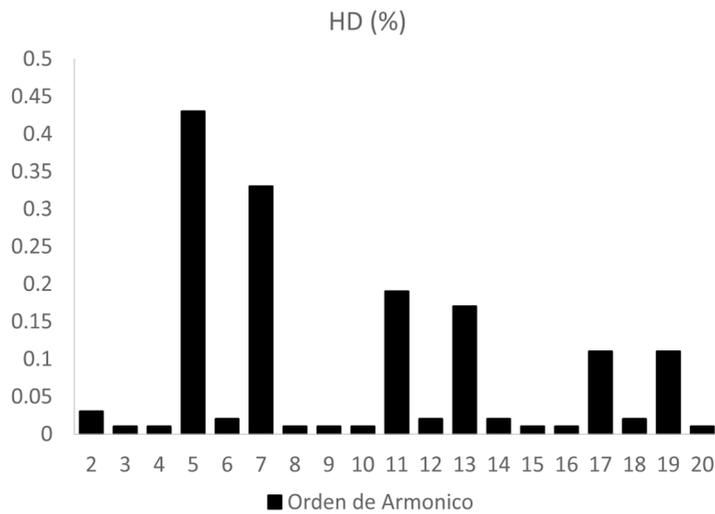


Figura 8. Espectro de frecuencias armónicas de voltaje en el PCC.

Tabla 5. Tasas de distorsión armónica total calculadas en la red de la acería.

Zona de cálculo	THD de tensión (%)	THD de corriente (%)
Red de baja tensión	26,84	4,27
Red de media tensión	4,33	4,27
Red de alta tensión	0,88	4,26

observa que el modelo propuesto posee una buena aproximación en el cálculo del quinto, séptimo, undécimo, decimotercer armónico; y no así en los armónicos de cuarto, noveno y décimo quinto orden. Sin embargo, los armónicos de quinto, séptimo y undécimo orden son los más importantes para el cálculo de la tasa de distorsión armónica total y determinar el grado de impacto y afectación al sistema eléctrico.

Tabla 6. Registro de espectros de armónicos de corriente de la acería.

Orden de armónico	Frecuencia (Hz)	IHDR (%)
1	50	100,00
2	100	0,048
3	150	0,026
4	200	0,170
5	250	3,981
6	300	0,012
7	350	1,680
8	400	0,007
9	450	0,908
10	500	0,008
11	550	0,852
12	600	0,009
13	650	0,787
14	700	0,007
15	750	0,412
16	800	0,006
17	850	0,152
18	900	0,006
19	950	0,258
20	1000	0,007

### MEDICIONES Y ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

Es importante que, previa conexión de equipamientos en la siderúrgica, se realicen mediciones de armónicos de voltaje en la subestación Las Lomas 230 kV con el fin de observar el estado y la condición en la que se encuentra el sistema. Para el caso estudiado, las mediciones de armónicos fueron realizadas bajo la norma internacional IEC 61000-4-30 por siete días consecutivos. En la Figura 10, se muestran los resultados dentro de un intervalo de veinticuatro horas correspondiente al primer día de medición, en fecha 3 de noviembre de 2020; resultados similares se obtuvieron para el resto de los días.

La THD de voltaje registrada es del orden de 2% y supera el límite recomendado por la norma IEEE 519-2022, que establece un valor máximo de 1,5% para un nivel de tensión de 230 kV. Asimismo, las tasas individuales de distorsión armónica se muestran en la Figura 11; donde se observa una presencia

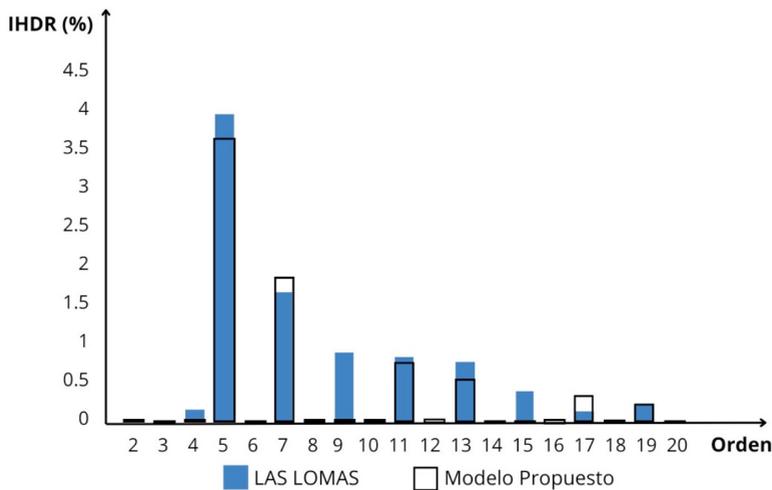


Figura 9. Armónicos del modelo basado en las ecuaciones de Ayrton versus espectro suministrado por la acería en Las Lomas 230 kV.

Fuente: Comité Nacional de Despacho de Carga (CNDC).

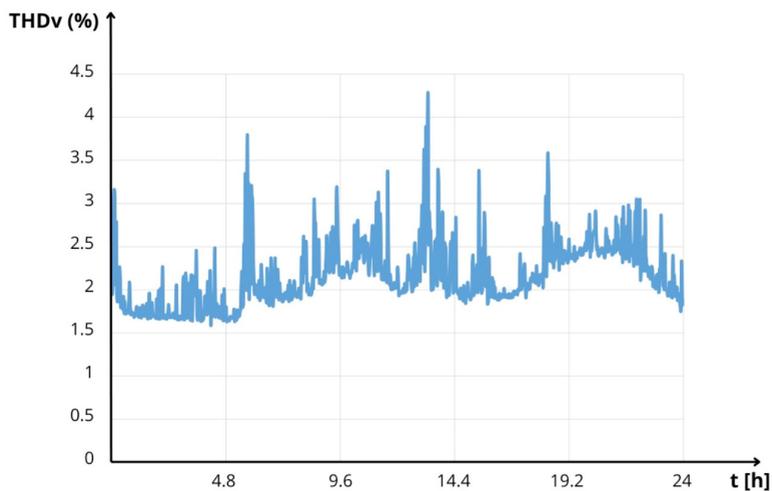


Figura 10. Distorsión armónica total de tensión de la fase A de la acería.

importante de armónicos de quinto, séptimo y undécimo orden, cuyas tasas superan el 1%.

A partir de estos registros de medición, se obtuvieron las tasas individuales de distorsión armónica de voltaje mostradas en la Tabla 7, las mismas corresponden al PCC de la industria siderúrgica estudiada.

Posteriormente se realizaron estudios y simulaciones, utilizando la base de datos del sistema eléctrico boliviano, para analizar el impacto de los armónicos existentes en la red. Los armónicos fueron introducidos

en la red mediante modelos de fuentes de tensión en la subestación Las Lomas 230 kV. En la siguiente sección se analizan los diferentes casos.

### Influencia de armónicos de voltaje en la planta siderúrgica

Se evaluó la influencia de armónicos de voltaje, medidos en la subestación Las Lomas 230 kV, sobre las instalaciones de la planta siderúrgica utilizando el software DIGSILENT Power Factory versión 2022, herramienta disponible para operadores en América Latina

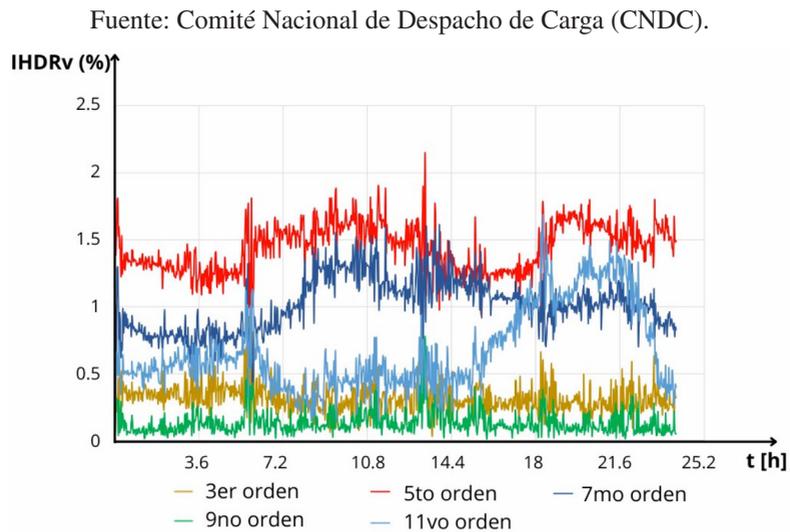


Figura 11. Distorsión armónica individual de tensión según el orden de frecuencia armónica.

Tabla 7. Tasas de armónicos de voltaje en el PCC de la acería.

Orden de armónico	Frecuencia (Hz)	IHDR (%)
2	100	0,1914
3	150	0,3136
4	200	0,1313
5	250	1,3519
6	300	0,1248
7	350	1,1118
8	400	0,1124
9	450	0,1561
10	500	0,1283
11	550	0,6976
12	600	0,1210
13	650	0,5035
14	700	0,1454
15	750	0,1259
16	800	0,1287
17	850	0,1400
18	900	0,1155
19	950	0,1093
20	1000	0,1058

con una base de datos de componentes completa. Para este análisis se verificaron las siguientes presunciones:

1. Análisis caso 1: *No se considera la influencia de armónicos de la red.* Mediante simulación,

utilizando el espectro de armónicos obtenido de la corriente del Horno de Arco Eléctrico estudiado, se determinan las tasas de distorsión armónica de voltaje como resultado de la interacción de los armónicos de corriente con la impedancia de la red. También, se evalúa la necesidad de implementación de filtros de armónicos en la red de la acería.

- Análisis caso 2: *Análisis considerando armónicos de voltaje de la red.* Inicialmente se realizan mediciones de armónicos de voltaje, en la subestación Las Lomas 230 kV, antes de la conexión de la planta siderúrgica, según se describió anteriormente. Con los registros de las mediciones previamente realizadas se introducen los armónicos en la red simulada, concretamente en la barra donde se realizó la medición, mediante un modelo de fuente de tensión y se verifica la influencia de estos sobre los componentes de la acería: filtros de armónicos, compensadores de reactivo, STATCOM, etc. En este escenario se determina la necesidad de implementar filtros de armónicos adicionales o modificar las características de los filtros instalados.

### Resultados caso 1

Conforme al análisis explicado anteriormente, se obtuvo el espectro de frecuencias armónicas de la señal de voltaje en el PCC de la red, el cual se presenta en la Figura 12.

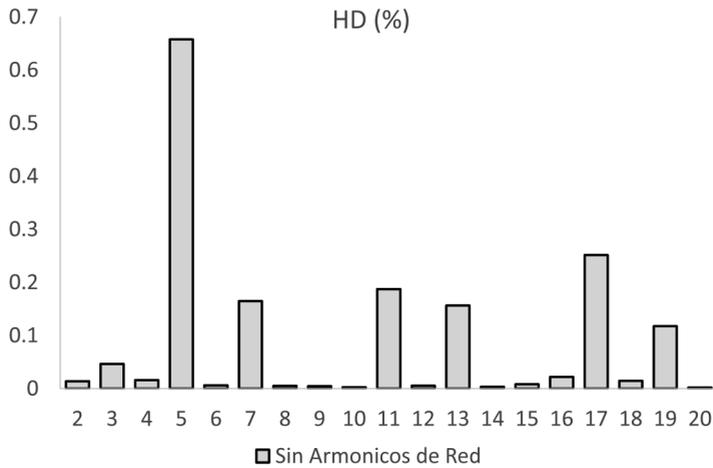


Figura 12. Espectro de frecuencias armónicas de voltaje en el PCC.

De acuerdo con los resultados, la tasa individual de distorsión armónica más elevada corresponde al armónico de quinto orden, con un valor de 0,66%. Por otro lado, las tasas individuales de distorsión armónica de corriente obtenidas corresponden a los valores de la Tabla 4, mostrada anteriormente. Por lo tanto, se requiere filtros de armónicos de quinto y séptimo orden para reducir los niveles de distorsión calculados.

**Resultados caso 2**

Se evalúa dos instancias: con y sin operación de filtros de armónicos en la planta siderúrgica. En primera instancia, no se consideraron filtros para armónicos

de quinto y séptimo orden, los cuales poseen mayor magnitud durante la operación del horno. Para el estudio se ejecutaron flujos de potencia armónicos en la red; en las Figuras 13 y Figura 14 se muestran los espectros armónicos resultantes considerando y no considerando armónicos de la red.

Los resultados señalan una incidencia importante de los armónicos de voltaje sobre el armónico de corriente de séptimo orden, que se incrementa hasta en un 80%; por otro lado, el armónico de quinto orden se reduce sustancialmente.

Respecto a los armónicos de voltaje, una amplia mayoría incrementa su magnitud de forma sustancial;

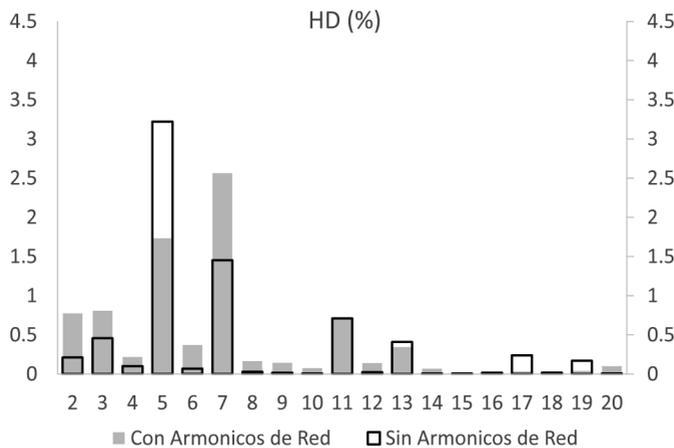


Figura 13. Comparación de espectros de frecuencias armónicas de corriente en el PCC.

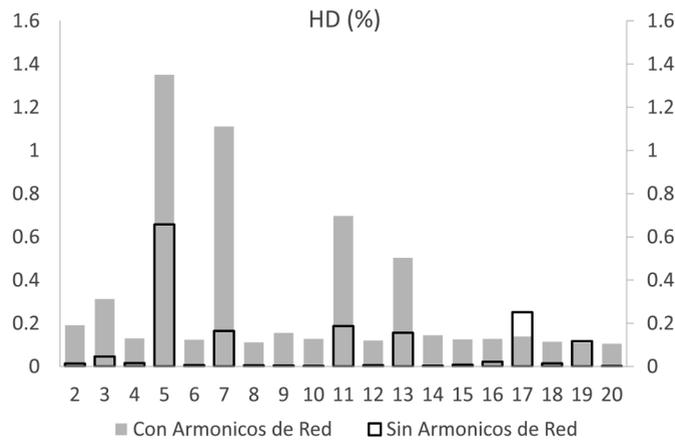


Figura 14. Comparación de espectros de frecuencias armónicas de tensión en el PCC.

los incrementos más pronunciados corresponden a armónicos de quinto y séptimo orden.

undécimo y décimo tercer orden incrementan significativamente.

En segunda instancia, se considera la instalación de filtros de armónicos de quinto y séptimo orden en la planta siderúrgica. En la Figura 15 y Figura 16 se presentan los espectros de frecuencias armónicas obtenidos en el PCC.

Estos resultados muestran que los armónicos de voltaje presentes en el sistema pueden afectar en gran medida los niveles de armónicos de corriente y voltaje en instalaciones de la planta siderúrgica; donde, el impacto más importante se refleja en el incremento de la THD de voltaje.

Conforme a los resultados encontrados, se determina que la presencia de armónicos de voltaje en la subestación Las Lomas 230 kV ocasiona un incremento sustancial del armónico de corriente de séptimo orden. Asimismo, se observa que los armónicos de voltaje de quinto, séptimo,

Al respecto, en este caso específico, la industria siderúrgica analizada deberá evaluar el dimensionamiento de filtros de armónicos de séptimo orden, tomando en cuenta que el sistema eléctrico presenta niveles elevados de este orden de armónicos

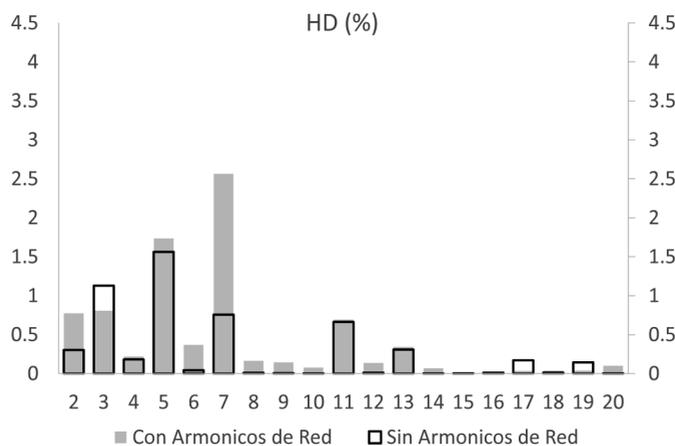


Figura 15. Espectros de frecuencias armónicas de armónicas de corriente en el PCC considerando filtros.

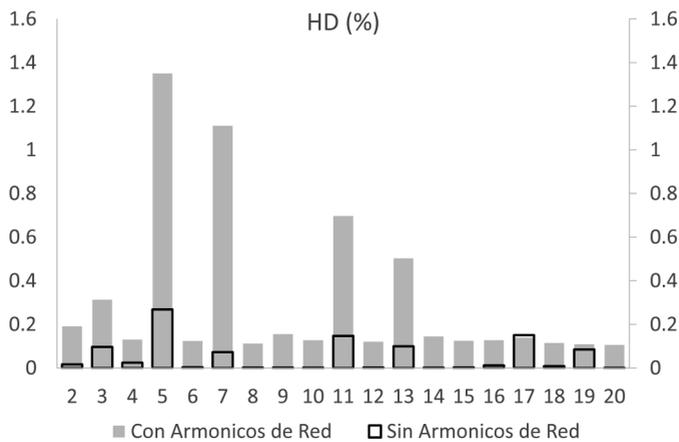


Figura 16. Espectros de frecuencias armónicas de armónicas de voltaje en el PCC considerando filtros.

de voltaje, tal como se verificó en los resultados de este estudio.

### Cumplimiento de la norma internacional IEEE 519-2022

Las tasas de distorsión armónica total e individual determinadas en el PCC, producto de la aplicación de la metodología propuesta, deben cumplir los requerimientos de la norma internacional IEEE 519-2022. En la Tabla 8 se presentan los valores calculados y los límites máximos tolerables, indicados por la norma IEEE 519-2022, de distorsión armónica total (THD) de voltaje.

De igual forma, se verifica el cumplimiento de la norma en cuanto a niveles de distorsión armónica de corriente; es decir, se evalúa la tasa de distorsión de demanda total (TDD) obtenida en el PCC. Para ello, inicialmente se calcula la relación entre la corriente de cortocircuito en el PCC y la corriente de carga ( $I_{SC}/I_L$ ), donde  $I_{SC} = 3948$  [A] y  $I_L = 84$  [A].

Tabla 8. Comparación de resultados de distorsión armónica de voltaje (THD%) con la norma.

Sin considerar armónicos en subestación Las Lomas 230 kV (%)	Considerando armónicos en subestación Las Lomas 230 kV (%)	Límite norma IEEE 519-2022 (%)
0,77	2,10	1,50

En la Tabla 9 se observa la comparación del límite máximo recomendado por la norma IEEE con el resultado de TDD determinado con la relación  $I_{SC}/I_L$  calculada anteriormente.

Los datos presentados en la Tabla 8 y Tabla 9 muestran que los niveles de armónicos, de voltaje y corriente en el PCC, superan los límites establecidos por la norma IEEE Std 519-2022. Respecto a los armónicos de voltaje en el PCC, se observa que existen niveles elevados de distorsión, incluso antes de la conexión de la Siderúrgica; y con la operación del Horno de Arco Eléctrico de la planta, estos niveles se incrementan en mayor medida.

Este análisis muestra la importancia de realizar mediciones de armónicos de voltaje previa conexión de instalaciones industriales; puesto que esto nos permite identificar posibles incrementos de armónicos de voltaje o corriente al interior de

Tabla 9. Comparación de resultados de armónicos de corriente con la norma.

Sin considerar armónicos en subestación Las Lomas 230 kV (%)	Considerando armónicos en subestación Las Lomas 230 kV (%)	Límite norma IEEE 519-2022 (%)
3,77	3,66**	2,50

\*\*El valor calculado corresponde a la Tasa de Distorsión de Demanda Total (TDD%).

la industria, así como evaluar sus consecuencias, es decir, la metodología propuesta permite a los operadores tomar previsiones y analizar posibles daños en los equipamientos producidos por estos fenómenos.

## CONCLUSIONES

Se comprobó que, mediante la metodología establecida para el cálculo de distorsión armónica producida por plantas siderúrgicas con Hornos de Arco Eléctrico, puede determinarse de forma sencilla una aproximación de los espectros de frecuencias armónicas de la corriente que inyectan las mismas al sistema de potencia. La aproximación en el cálculo de armónicos se debe principalmente a la naturaleza caótica y estocástica del arco eléctrico, lo cual influye en la determinación y reproducción a cabalidad del fenómeno de distorsión armónica que se produce en la red.

Se estudió y aplicó la metodología en una acería conectada al sistema eléctrico boliviano, donde se determinaron tasas de distorsión armónica total (THD) en el punto de acoplamiento común (PCC) y se contrastaron con datos de mediciones reales. Entre los resultados principales se comprobó que las tasas de distorsión armónica de voltaje en el PCC superan los límites admisibles por la norma IEEE 519-2022. Además, estos niveles de armónicos poseen un impacto significativo en los armónicos de corriente producidos por la planta siderúrgica, incrementando así sustancialmente los armónicos de quinto (3,66%), séptimo (1,87%), undécimo (0,78%) y decimotercer orden (0,55%). También, se verificó que estos valores incrementan su magnitud en mayor medida si el voltaje de la red tiene un elevado contenido de armónicos, incluso con la instalación de filtros de armónicos.

Entonces, el modelo simplificado de Ayrton permite reproducir la característica eléctrica no lineal de la carga del Horno de Arco Eléctrico; esto permite realizar un cálculo estimado de armónicos de corriente y voltaje en una red eléctrica, lo cual pudo comprobarse en el caso de estudio anterior.

Por medio de las simulaciones obtenidas con el modelo del horno, se advirtió que los armónicos predominantes durante la operación del Horno de Arco Eléctrico poseen ordenes armónicos impares

y no múltiplos de tres (quinto, séptimo, undécimo y decimotercer orden); siendo que, los armónicos de orden par y múltiplos de tres, resultados de la simulación, poseen magnitudes pequeñas (inferiores a 0,03%) por lo que no ocasionan un impacto significativo en el cálculo de la THD. Sin embargo, de acuerdo con las mediciones, se comprueba la presencia de componentes armónicos múltiplos de tres que pueden afectar considerablemente el cálculo de la THD; esto se debe principalmente a las componentes armónicas aportadas por el sistema de potencia.

Por lo tanto, esta metodología permitirá cuantificar el nivel de armónicos de instalaciones siderúrgicas proyectadas a conectarse en el sistema, en el corto y mediano plazo. Además, se recomienda realizar un análisis más profundo respecto a la instalación de filtros activos en la planta siderúrgica para cada caso específico, de esta forma se podría reducir de una manera óptima los niveles de armónicos que se inyectan al sistema.

Finalmente, los autores expresan los más sinceros agradecimientos al Comité Nacional de Despacho de Carga (CNDC), operador nacional de la energía de Bolivia, por el apoyo técnico y la información suministrada para la realización del presente trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] J. Madías, “El impacto de las recientes innovaciones en los Hornos Eléctricos de Arco”, *Acero Latinoamericano*, pp. 28-43, 2013.
- [2] J. Marulanda, C. Sepúlveda y M. Alvarez, “Estimación de los parámetros de un modelo de un Horno de Arco Eléctrico usando máxima verosimilitud”, *Tecno Lógicas*, no. 29, pp. 69-89, 2012, doi: 10.22430/22565337.62.
- [3] C. González, A. Alzate y J. Marulanda, “Modelos de Horno de Arco Eléctrico para estudios de Efecto Flicker”, *Tecnura*, vol. 20, pp. 15-28, 2016, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a01.
- [4] J. Enríquez, E. Tremps, S. Elío y D. Fernández, “Acería Eléctrica”, *Archivo Digital Universidad Politécnica de Madrid*, 2009. [En línea]. Disponible: <https://oa.upm.es/1929/>
- [5] C. Gonzalez, “Modelo de Horno de Arco Eléctrico para estudios de Efecto Flicker y

- su solución con Métodos de Compensación”, Repositorio *Universidad Tecnológica de Colombia*, 2013. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/11059/3809>
- [6] C. Ríos, M. Aristizabal y A. Escobar, “Modelado de Sistemas Eléctricos en presencia de Armónicos”, *Scientia et Technica*, vol. 2, pp. 21-26, 2003. [En línea]. Disponible: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7401>
- [7] F. Issouribehere, “Medición, caracterización y compensación de Flicker en Hornos de Arco Eléctrico,” *Repositorio Institucional Universidad Nacional de La Plata*, 2006. [En línea]. Disponible: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/34683>
- [8] O. Torres, J. Espinosa, C. Capablanca y A. Rodríguez, “Una solución integral para los problemas de suministro eléctrico de Antillana de Acero”, *Ingeniería Energética*, vol. 41, pp. 1-11, 2020. [En línea]. Disponible: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1815-59012020000200007](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1815-59012020000200007)
- [9] Z. Hu, Y. Han, S. Zalhaf, S. Zhou, E. Zhao, and P. Yang, “Harmonic Sources Modeling and Characterization in Modern Power Systems: A Comprehensive Overview,” *Electric Power Systems Research*, vol. 218, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109234.
- [10] IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems, *IEEE Standard 519-2022*, doi: 10.1109/IEEESTD.2022.9848440.