

Diagnóstico energético para la recuperación del horno 3 de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa

Energy Diagnosis for the Recovery of Furnace 3 at the Nickel Mechanical Company in Moa

Esdelver Silva Aguilera esilva@moanickel.com.cu ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0000-0002-8099-9445>

René Luciano Guardiola Romero guardiola@ismm.edu.cu ⁽²⁾

<https://orcid.org/0000-0003-2161-7942>

Yordan Guerrero Rojas* yguerrero@ismm.edu.cu ⁽²⁾

<https://orcid.org/0000-0002-9713-5117>

⁽¹⁾ Empresa Moa Nickel S.A., Moa, Cuba ⁽²⁾ Universidad de Moa, Moa, Cuba

* Autor para la correspondencia

Resumen: Se realizó un diagnóstico energético al horno 3 de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa, Cuba, con el objetivo de devolverle la eficiencia como horno de inducción electromagnética resonante a frecuencia industrial. Se realizaron mediciones de tensiones eléctricas, potencia activa, factor de potencia y capacidad de los bancos de condensadores. Se revisó la productividad del equipo en las condiciones actuales y las facturas del consumo de energía eléctrica mensual de dos años. Se analizó su mecanismo para la corrección del factor de potencia y causas de las frecuentes averías, principalmente en sus contactores magnéticos, que provocaban el no funcionamiento en resonancia eléctrica. La medición sistemática del factor de potencia, permitió conocer las causas de la baja eficiencia energética. Se evaluaron seis propuestas de soluciones, la variante que trató la sustitución de contactores magnéticos por dispositivos semiconductores resultó ser la solución tecnológica y económica más viable.

Palabras clave: economía industrial, hornos, inducción electromagnética

Abstract: An energy diagnosis was carried out on Furnace 3 of the Nickel Mechanical Company in Moa, Cuba, with the objective of restoring its efficiency as a resonant electromagnetic induction furnace at industrial frequency. Measurements of electrical voltages, active power, power factor, and capacitor bank capacity were taken. The equipment's productivity under current conditions and the monthly electricity

consumption bills over two years were reviewed. Its mechanism for power factor correction and the causes of frequent breakdowns—mainly in its magnetic contactors, which prevented operation in electrical resonance as designed—were analyzed. Systematic measurement of the power factor made it possible to identify the causes of low energy efficiency. Six solution proposals were evaluated, with the variant involving the replacement of magnetic contactors by semiconductor devices proving to be the most technologically and economically viable solution.

Keywords: industrial economy, ovens, electromagnetic induction

1. Introducción

En el mundo tecnológico del siglo XXI no se fabrican hornos de inducción de baja frecuencia. La adquisición de piezas nuevas obliga a la búsqueda de soluciones innovadoras para su funcionamiento. En Cuba existen entidades que utilizan hornos de inducción, como la Empresa Mecánica del Níquel (EMNI) de Moa, en la provincia Holguín.

Para la fundición de metales y aleaciones se utilizan tres hornos de inducción electromagnética. Los hornos 1 y 2, funcionan a media frecuencia (hasta 1310 Hz) y el horno 3 funciona a frecuencia industrial (60 Hz) (Álvarez *et al.*, 2016).

En los últimos diez años el horno 3 ha experimentado continuas averías que inciden en el cumplimiento de la producción y en consumos de energía elevado, lo que, sumado a la obsolescencia tecnológica, impide su operación a factor de potencia unitario, para lo cual está diseñado, provocando retrasos en la producción e incurriendo en altos consumos de energía eléctrica (Torres *et al.*, 2020). Se comprobó que más del 90 por ciento de las averías mencionadas se deben al alto grado de deterioro de los contactores magnéticos, quemados por el arco eléctrico, debido a las conmutaciones de los bancos de condensadores energizados con 1 kV (Acosta, 2019; Cabello, 2023; López *et al.*, 2023).

Se impone realizar un diagnóstico energético (Calla & Maldonado, 2021; Martínez & Gassinski, 2022; Ruano, 2023; Hernández *et al.*, 2024; Martínez, 2025) para identificar las causas fundamentales de averías en el horno 3, así como de su alto consumo energético para eliminar el arco eléctrico debido a la conmutación de los bancos de condensadores, de manera que se minimice el número de averías, y poder conmutar mayor cantidad de bancos de condensadores. Al corregir el factor de potencia, es posible

disminuir la alta demanda energética. Para ello se desarrolló una investigación acerca del calentamiento por inducción, partiendo de un análisis del principio de funcionamiento de un horno de inducción de baja frecuencia (Acosta, 2019). Seguidamente se realiza un diagnóstico energético al horno 3, partiendo de la evaluación del estado técnico actual del mismo, la identificación y aplicación de procedimientos técnicos que garantizarán el incremento de la eficiencia energética, unida al desarrollo de un estudio de prefactibilidad con los procedimientos identificados, para ordenar las propuestas según su viabilidad económica y tecnológica.

2. Materiales y métodos

El estudio experimental consistió en la medición de las variables eléctricas: tensiones, potencia activa, factor de potencia de operación, así como del tiempo necesario para alcanzar la temperatura de fusión, teniendo en cuenta el volumen de la carga a fundir y la aleación, la capacidad de cada capacitor en los bancos de condensadores y la posibilidad de alcanzar el factor de potencia unitario con los bancos existentes (Villafaña *et al.*, 2015).

2.1. Datos técnicos del horno 3

El horno modelo H4T-2,5/1-C4 TB4 de 26 toneladas fue fabricado en 1980 en Rusia. Tiene capacidad para fundir hasta 2,5 toneladas de hierro, posee una potencia de 950 kW y opera a frecuencia industrial de 60Hz. Emplea una tensión eléctrica nominal de 1020 V, alimentado por un transformador monofásico de 6300 kVA de potencia aparente, el cual posee 10 kV en el bobinado primario y 1 kV en el bobinado secundario. Su enfriamiento es por agua y cuenta con 1 fase y un rango del factor de potencia 0,5-1 (Pérez *et al.*, 2019).

2.2. Instrumentos de medición utilizados

Se utilizaron instrumentos de medición acorde a las variables eléctricas definidas. Las mediciones se realizaron en dependencia de la aleación de cada colada, con un intervalo de 2 minutos. Se calcularon los valores máximos, mínimos y promedios de las tensiones, potencias y factor de potencia. Se realizó medición del factor de potencia para cada aleación a fundir; medición de las tensiones en la bobina inductora; medición de la potencia activa para cada aleación a fundir; medición del tiempo de fusión de cada carga,

en dependencia de su masa y de su aleación y medición de la capacidad en microfaradios de cada banco de condensadores (Kazlauskas *et al.*, 2023).

3. Resultados

Los resultados de las mediciones se muestran en las tablas 1-4. Los gráficos 1-4 muestran el comportamiento del factor de potencia para una aleación HK-40, X28H2, Ac 35 y Ac 45 respectivamente.

Tabla 1. Resultados de las mediciones para una aleación de acero HK-40 en su primera colada

Datos	cos ϕ	Potencia	Tensión
Lectura inicial 600465	cosϕ máximo 0,391	Pmáx 310kW	Umáx 1020 V
Lectura final 600556	cosϕ mínimo 0,034	Pmin 310kW	Umin 1020 V
Índice de consumo 16,3	cosϕ promedio 0,26	Pprom 310kW	Uprom 1020 V
Consumo en kW/h 483,3			
Duración 6:00 a 8:05			



Figura 1. Comportamiento del factor de potencia para una aleación de acero HK-40.

Tabla 2. Resultados de las mediciones para una aleación de X28H2 (acero de alto carbono) en su primera colada

Datos	cos ϕ	Potencia	Tensión
Lectura inicial 601373	cosϕ máximo 0,665	Pmáx 320kW	Umáx 1020 V
Lectura final 601522	cosϕ mínimo 0,043	Pmin 120kW	Umin 510 V
Índice de consumo 16,3	cosϕ promedio 0,423	Pprom 231kW	Uprom 874 V



Figura 2. Gráfica comportamiento del factor de potencia para una aleación X28H2.

Tabla 3. Resultado de mediciones del factor de potencia para una aleación de Ac 35

Datos	$\cos \phi$	Potencia	Tensión
Lectura inicial 602443	$\cos \phi$ máximo 0,987	Pmáx 290 kW	Umáx 1020 V
Lectura final 602537	$\cos \phi$ mínimo 0,421	Pmin 125 kW	Umin 692 V
Índice de consumo 16,3	$\cos \phi$ promedio 0,848	Pprom 236 kW	Uprom 948 V



Figura 3. Gráfica del comportamiento del factor de potencia para una aleación de Ac 35.

Tabla 4. Resultado de las mediciones para una aleación de Ac 45 en su primera colada

Datos	$\cos \phi$	Potencia	Tensión
Lectura inicial 602927	$\cos \phi$ máximo 0,983	Pmáx 285 kW	Umáx 1020 V
Lectura final 603093	$\cos \phi$ mínimo 0,006	Pmin 145 kW	Umin 692 V
Índice de consumo 16,3	$\cos \phi$ promedio 0,664	Pprom 239 kW	Uprom 968,4 V

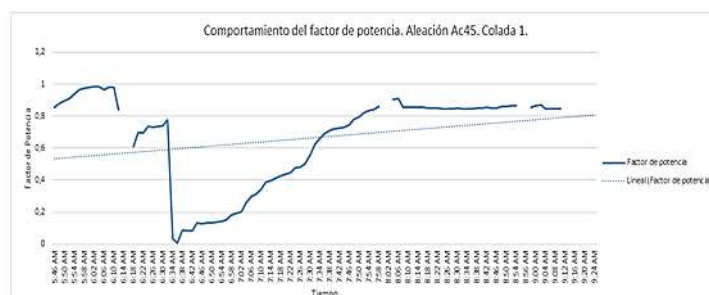


Figura 4. Gráfica comportamiento del factor de potencia para una aleación de Ac 45.

Las tablas 1-4 presentan los resultados de las mediciones eléctricas en el circuito del horno 3, las que demuestran una ineficiencia energética acentuada, al no poder operar en resonancia eléctrica, ni a potencia máxima, en este caso de 950 kW y operando a tensión máxima 1020 Volt. Esta instalación está diseñada para fundir 2,5 toneladas de hierro en 48 minutos. Las tablas exponen el exceso de tiempo consumido, reflejándose en altos gastos energéticos (Grupo Elecond, 2015).

Las figuras de la 1 a la 4, muestran que el horno 3 no alcanza la resonancia eléctrica en ninguna fundición, motivado por varias causas: fundición de aleaciones con bajos contenidos de hierro, bancos de condensadores incompletos y otros cortocircuitados y

contactores magnéticos quemados al realizar la conmutación de los bancos energizados con 1 kV. Las caídas bruscas de los valores del factor de potencia indican la conmutación de los bancos de condensadores sin visualizar el comportamiento del factor de potencia por la carencia de un cofímetro (Risoul, 2021). Los espacios en blanco en la línea del factor de potencia señalan que, en ese instante de tiempo, el horno 3 fue apagado, razones que influyen negativamente en la productividad y la eficiencia de este equipo. Las líneas de tendencia, que en la mayoría de los casos es ascendente, indica que a medida que transcurre el tiempo, el horno tiende a aumentar el factor de potencia. Al fundirse el metal se forma un cuerpo que, aunque es líquido, se comporta como macizo, lo cual es beneficioso para el proceso electromagnético, ya que al aumentar la masa (sin espacios internos) del cuerpo, las corrientes de Foucault aumentan su valor, e igualmente lo hacen las pérdidas por efecto Joule, lo que permite un mejor aprovechamiento de la energía consumida en forma de trabajo, que en el caso de los hornos de inducción, es generar calor en el seno de la pieza a fundir (González *et al.*, 2013).

4. Discusión

Como resultado del diagnóstico se hizo notable una ineficiencia energética acentuada durante la operación del horno 3, fenómeno atribuido a la obsolescencia tecnológica y a las averías, principalmente en los contactores magnéticos y bancos de condensadores. Como causa adicional a esta situación, se une la fundición de aleaciones con bajo contenido de hierro, como la aleación HK-40 y X28H2, cuando el horno 3 está diseñado para aleaciones de alto contenido de hierro.

Se manifestaron malas prácticas identificadas durante la etapa de diagnóstico como el pre calentamiento (o encendido) del horno sin carga. Esta práctica se hace como procedimiento errado para facilitar la fusión de los metales. Para ello sería favorable cargar el horno con piezas de mayor volumen en su primera colada.

Es necesario asegurar el funcionamiento con la tapa superior de seguridad que proporcionan los manuales del fabricante. El agua de enfriamiento que se emplee, debe ser destilada para evitar la corrosión interna de la bobina inductora.

La instalación debe utilizarse para fundir metales que poseen buenas características ferro magnéticas. Evitar la entrada de piezas húmedas o contaminadas con de combustible o pinturas dentro del horno 3.

Es necesario asegurar el funcionamiento del sistema de protección contra filtraciones. La tapa del horno debe mantenerse cerrada. De no tener la tapa instalada, se recomienda realizar los trabajos pertinentes para la instalación segura de la tapa del horno. Es aconsejable estudiar la posibilidad de la instalación de bancos de condensadores para corregir el factor de potencia utilizando las redes neuronales artificiales (GUASCH S.A., 2021).

4.1. Propuestas para la recuperación del horno 3 de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa

Para lograr la eficiencia energética del horno, aumentar la productividad y disminuir los gastos energéticos, se realizan seis propuestas de solución, con sus respectivas ventajas y desventajas, así como su valoración económica (Monar, 2023; Ramos *et al.*, 2024).

4.1.1. Propuesta 1. Reconstrucción (rellenar) de los contactos eléctricos de los contactores magnéticos, con electrodos de aleación de plata mayor al 5 %

Ventajas de la propuesta 1

- Ofrece una solución inmediata a las averías de los contactores magnéticos del horno 3.
- Operaciones de rellenado, fresado y lijado relativamente rápido (de 8 a 10 contactos en una jornada laboral).
- Personal competente para operaciones de rellenado y fresado de los contactos.
- No se modifica el circuito eléctrico, ni el principio de funcionamiento del horno.

Desventajas

- Carencia (o difícil adquisición) de electrodos de aleación de plata de mayor concentración al 5 %.
- Persistencia del arco eléctrico
- Necesidad de ciclos de mantenimientos y reparaciones más cortos.
- Interrupciones de la producción más frecuentes.
- Ineficiencia energética al operar el horno a baja frecuencia (60 Hz), y al no operar en resonancia eléctrica.
- Estimación de 30 días para rellenar los contactos eléctricos del horno.

Valoración económica: Para el desarrollo de esta propuesta, constata la existencia de las varillas (electrodos) de plata. Se consultaron a especialistas del grupo de compras de la empresa y se buscó información de los posibles proveedores de este producto, y de otros

productos con mayor concentración de plata, así como se estudiaron los precios actuales. Se necesitan 192,53 pesos en USD y 1200,16 pesos en CUP para esta solución de manera mensual. Al año se necesitan 2 310.36 pesos en USD y 14 401.92 pesos en CUP. De usar las varillas de 15 % de aleación de plata, se necesita realizar un gasto financiero de 2 948.92 CUP y 279.11 USD. Al año se necesitan 35 387.04 CUP y 3 349.32 USD.

4.1.2. Propuesta 2. Sustitución de los contactos eléctricos averiados por contactos con recubrimiento de platino, utilizando el método de soldadura por contacto

Ventajas de la propuesta 2

- Tiempo de duración del contacto de platino superior al contacto de plata (de 2 a 5 años).
- Dilatación de los ciclos de mantenimiento.
- Disminución de las averías de los contactores magnéticos.
- Ciclos productivos más largos en el horno 3.
- No se modifica el contactor magnético, ni el circuito eléctrico del horno 3.
- No se modifica el principio de funcionamiento del horno 3.

Desventajas

- Persiste una de las causas de las averías, el arco eléctrico.
- Requiere un tiempo prudencial para llevar a cabo las reparaciones.
- Dificultades de adquisición de los contactos de platinos, dependiendo de los proveedores y sus precios, así como los mecanismos de adquisición de estos productos.
- Requiere la construcción de una máquina de soldadura por contacto, o la adquisición de ésta en el mercado.

Valoración económica: Para la construcción de una máquina de soldadura por contacto, la compra del contacto de platino y el electrodo de pata en forma de lámina se deben consultar varios proveedores.

4.1.3. Propuesta 3. Adquisición de contactores magnéticos nuevos

Ventajas de la propuesta 3

- Reducción de los paros de horno 3.
- Se alargan los ciclos de mantenimiento.
- Se cuenta con contactores magnéticos con tecnología moderna, que poseen sistemas de reducción del arco eléctrico.

- Mayor eficiencia energética del horno, al conmutar más bancos de condensadores.
- Mayor productividad en esta instalación.

Desventajas

- Alto costo de la inversión.
- Difícil adquisición de los contactores magnéticos.
- Necesidad de adaptación de los nuevos contactores al circuito eléctrico existente en el horno 3 (Incompatibilidad tecnológica).
- No se elimina la causa fundamental de las averías: el arco eléctrico.

Valoración económica: El horno 3 necesita 12 contactores magnéticos para su funcionamiento. El costo de los contactores magnético de 700 A 30 075.84 euros. Adquirir 12 contactores de 1000 A requiere la inversión de 64 725 euros.

4.1.4. Propuesta 4. Sustitución de los contactores magnéticos por dispositivos semiconductores (SCR o IGBT)

Ventajas de la propuesta 4

- Eliminación del arco eléctrico, causa fundamental de averías.
- Sustitución del control electromecánico por control electrónico.
- Control manual y automático (exacto) del factor de potencia.
- Ciclos de mantenimiento más largos.
- No se necesitan contactores magnéticos.
- Mayor rango de control de la potencia.
- Los dispositivos se pueden encontrar en el mercado nacional (otras empresas).
- Presencia de personal calificado para la construcción del circuito de control, y para la instalación de los dispositivos semiconductores.
- Mejor ajuste del factor de potencia.
- Menor tamaño, permitiendo elementos más compactos y automatizables.
- Menor tensión de trabajo, se activan desde 1,5 V.
- Funcionamiento totalmente silencioso.
- Los SCR operan a mayor velocidad en comparación con un contactor magnético.
- Vida útil más larga, incluso si se activa muchas veces, ya que no hay partes mecánicas que se desgasten o contactos que se deterioren a altas corrientes.
- Limpieza de conexión, no hay rebote en la conmutación de los contactos.

- Menos sensible al almacenaje y ambiente operativo, como golpes, vibraciones, humedad y campos magnéticos externos.
- No producen ondas electromagnéticas que produzcan interferencias en otros equipos.
- Permite la operación del horno 3 con la mejor eficiencia energética posible.
- Control automático y exacto del factor de potencia (excluye el factor humano).
- Operación del horno en resonancia eléctrica.
- Se requiere la adquisición de un solo relé controlador.
- Permite reutilizar los bancos condensadores ya existentes en el horno 3.
- Solo se necesita la adquisición de condensadores para completar el faltante de estos en cada banco, de acuerdo al valor del factor de potencia impuesto por la aleación a fundir.

Desventajas

- Se requiere de un tiempo prudencial para la construcción del circuito de control, los circuitos activadores de las compuertas de los SCR y para la instalación de los dispositivos semiconductores en la etapa de potencia.
- Generación de frecuencias armónicas.
- Dificultad de adquisición inmediata de los dispositivos semiconductores SCR de potencia, así como del relé controlador del factor de potencia (relé varimétrico).
- Ineficiencia energética al operar a baja frecuencia (60 Hz), comparado con los hornos de media y alta frecuencia.

Valoración económica: El horno utiliza 12 contactores magnéticos de dos polos. Cada uno se debe sustituir por 4 tiristores. Para la sustitución se necesitan 48 tiristores a precio que oscilan entre 49.60 y 470 por unidad. El total asciende entre 2380.80 y 22 560 USD. Se requiere de un relé para controlar el factor de potencia del horno (Gallardo, 2017; Flores, 2019). El gasto financiero para su adquisición oscila entre 16.50 y 35 USD.

4.1.5. Propuesta 5. Adquisición e instalación de bancos de condensadores automáticos

Ventajas de la propuesta 5

- Control exacto del factor de potencia.
- Operación del horno 3 de forma automática (se excluye el factor humano).
- Operación del horno 3 en resonancia eléctrica.
- Eliminación del arco eléctrico.

- Ciclos de mantenimientos más largos.
- La Empresa Mecánica cuenta con personal calificado para la instalación de los bancos de condensadores automáticos.

Desventajas

- Se requiere un tiempo prudencial para la desinstalación de los bancos fijos y conmutables e instalación de los bancos de condensadores automáticos.
- Difícil adquisición de los bancos de condensadores automáticos.
- Obliga a desmontar una tecnología que aún puede ser aprovechable.

Valoración económica: La adquisición de bancos de condensadores automáticos depende de importaciones de productos. Son necesarios 20 bancos para alcanzar los 6 000 kVAR del horno. El precio asciende a 942 622.95 USD.

4.1.6. Propuesta 6. Adquisición de un horno de inducción nuevo, de frecuencia media (1 a 5 kHz) y de 3 t de capacidad

Ventajas de la propuesta 6

- Solución definitiva a los problemas que genera la obsolescencia tecnológica del horno.
- Ajuste automático del factor de potencia.
- Energéticamente es más eficiente que los hornos de baja frecuencia.
- Poseen sistemas de control adecuados a las necesidades del control de la fundición.
- Poseen sistemas de protecciones modernos, que detienen la operación del horno al detectar parámetros incorrectos de operación.
- Control electrónico moderno (Morfin-Garduño, 2021).

Desventajas

- Carencia o difícil adquisición de un horno industrial de inducción.
- Se necesita un tiempo prudencial para desinstalar el horno antiguo e instalar el nuevo.
- La bobina inductora no posee un aprovechamiento tecnológico en Cuba.

Valoración económica: Tomando como referencia el estudio de factibilidad realizado por el Centro de Proyectos de la Industria del Níquel para la compra de un horno de inducción de tres toneladas, el precio asciende a 1 644 070,50 pesos en ambas monedas, de ellos 1 462 301,70 USD y 181 768,80 en CUP.

4.2. Estudio de pre factibilidad

Se realizó un estudio de pre factibilidad para determinar las posibilidades económicas y tecnológicas de cada propuesta (Burneo *et al.*, 2016; Fernández *et al.*, 2022). Se propone un orden lógico considerando las situaciones técnicas productivas y las necesidades de producción actuales de la Empresa Mecánica del Níquel.

Tabla 5. Orden propuesto a partir de la viabilidad económica y tecnológica resultante del estudio de pre factibilidad

No.	Propuesta	Viabilidad económica	Viabilidad tecnológica	Inmediatez de la solución
1	Rellenado de los contactos eléctricos de los contactores magnéticos, con electrodos de aleación de plata mayor al 5%	1	6	1
2	Sustitución (injerto) de los contactos eléctricos averiados por contactos eléctricos con recubrimiento de platino, utilizando método de soldadura por contacto	2	5	2
3	Adquisición de contactores magnéticos nuevos	3	4	3
4	Sustitución de los contactores magnéticos por dispositivos semiconductores (SCR o IGBT)	4	3	4
5	Adquisición e instalación de bancos de condensadores automáticos	5	2	5
6	Adquisición de un nuevo horno de inducción, preferiblemente de media frecuencia y de tres toneladas de capacidad	6	1	6

4.3. Cálculo del VAN y TIR de cada propuesta de solución

El cálculo del valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR) correspondiente a cada propuesta de solución se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados del VAN y TIR de cada propuesta

	VAN	TIR	PR (años)
Propuesta 1	2.298.114,06	51,1%	1,00
Propuesta 2	No hay oferta comercial		
Propuesta 3	2.401.260,79	62,4%	1,00
Propuesta 4	2.505.447,74	116,7%	1,00
Propuesta 5	1.694.153,87	30,2%	2,00
Propuesta 6	1.084.199,48	22,4%	3,00

5. Conclusiones

Se realizó un diagnóstico energético al horno 3 basado en la medición del factor de potencia, lo que permitió conocer las causas de la baja eficiencia energética de este equipo. Se detectaron errores, tecnológicos y humanos, en las operaciones con altos consumos y pérdida de vida útil de esta instalación.

Se evaluaron seis propuestas para asegurar la eficiencia energética del horno 3. Tres variantes de solución eliminan la causa fundamental de las averías: el arco eléctrico. Estas variantes poseen capacidad para la explotación técnica y factibilidad económica en la recuperación de la eficiencia energética del horno.

La variante 4, que aborda la sustitución de contactores magnéticos por dispositivos semiconductores, resultó ser la solución tecnológica y económica más viable.

Con la variante propuesta el horno 3 puede realizar tres fundiciones en la mañana y tres fundiciones en el resto de una jornada, disminuir el consumo energético de la instalación, entre 30 y 50 %, operar bajo el fenómeno de resonancia eléctrica para lo cual está diseñado, eliminar el arco eléctrico, causa fundamental de las averías, y duplicar la productividad del horno de manera diaria.

Referencias bibliográficas

- Acosta, G. (2019). Inversor resonante para ahorro de energía en un calentador de agua mediante inducción magnética. *Revista Científica UISRAEL*, 6(1), 23-42. <https://doi.org/10.35290/rcui.v6n1.2019.68>
- Álvarez, G., Becerra, E., & Castro, J. (2016). Diseño, validación y construcción de una bobina de hornos de inducción. *IEEE Latin America Transactions*, 14(2). <https://dokumen.tips/documents/design-validation-and-construction-of-an-induction-furnace-de-puesta-en-servicio.html>
- Burneo, S., Delgado Vítore, R., & Vérez, M.A. (2016). Estudio de factibilidad en el sistema de dirección por proyectos de inversión. *Ingeniería industrial*, 37(3), 305-312. https://www.redalyc.org/pdf/3604/Resumenes/Abstract_360448031009_2.pdf

- Cabello, J. (2023). *Prevención frente al fenómeno del arco eléctrico (Arc flash) en el mantenimiento industrial*. Asociación española de Mantenimiento. <https://revista.aem.es/noticia/prevencion.frente-al-fenomeno-del-arco-electrico-arc-flash-en-el-mantenimiento-industrial>
- Calla, M.A., & Maldonado, R.A. (2021). Diagnóstico energético como elemento de gestión energética: caso de estudio Empresa Industrial Tapia SAC. *Ñawparisun*, 4(3), 67-75. <https://doi.org/10.47190/nric.v4i3.261>
- Fernández-Leiva, R., Serrano-Castillo, J., Ley-Chong, N., González-Suárez, E., & Guevara-Orozco, L. (2022). Evaluar la factibilidad económica de una planta multipropósito para la producción de sulfatos. *Tecnología Química*, 42(3), 474-486. <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5274>
- Flores López, E.A., Bahena Landa, M.Y., & Alanís Navarro, J.A. (2015). Análisis del factor de potencia eléctrico. *Theorema*, 2, 76-80. <https://53cbf482-2029-4fc7-b7c4-e043d725d976.filesusr.com/ugd/38df>
- Gallardo, C., Herrera, R., & García, J. (23-27 de octubre de 2017). *Propuesta para el mejoramiento del factor de potencia en la Universidad Central Martha Abreu de Las Villas* [Ponencia]. Convención Científica Internacional Ciencia, Tecnología y Sociedad. Perspectivas y Retos. Universidad Central de Las Villas, Cuba. <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/handle/123456789/9610>
- González, W., Aller, J.M., Lászlo, S.B., & Horvart, J.W. (2013). Diseño y construcción de bobinas de calentamiento para hornos de inducción electromagnética. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 17(66). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212013000100004&script=sci_arttext
- Grupo Elecond. (2015). Conveniencia de instalar bancos automáticos de capacitores en cada transformador de distribución urbano en baja tensión. *Revista Ingeniería Eléctrica*, 297. 28-32. https://www.editores.com.ar/revistas/ie/297/elecond_conveniencia_de_instalar_bancos_automaticos_de_capacitores
- Hernández, F.E., Ruiz, M.L., Hernández, D.R., García, D.A., Casanova, S., & Sepúlveda, J.C. (2024). Propuesta de Sistema portable de monitoreo y Diagnóstico industrial. *Infomin*, 16. <https://cu-id.com/2144/v16e06>

Kazlauskas, G., Verucchi, C., & Leal, G. (1-3 de noviembre de 2023). *Uso de múltiples filtros pasivos para mejorar el factor de potencia y armónicos: Caso de Estudio*. [Conferencia]. XX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPIC 2023), Argentina.

https://www.researchgate.net/images/symbols/publication/publication_pdf_icon.png

López, R., Jiménez, J. & Catalá, J. (2023). Desarrollo y validación de un nuevo método de evaluación de riesgos eléctricos para la prevención y mitigación de daños a personas e instalaciones. *Revista Chilena de Ingeniería*, 31. <https://ingeniare.uta.cl/index.php/inge/article/view/555>

Martínez, F. & Gassinski, L. (2022). La eficiencia energética y el papel del mantenimiento en la misma. *Ingeniería Energética*, 43(2), 10-18. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9333087>

Martínez, F. (2025). Metodología para disminuir el consumo energético en empresas y activos industriales. *Revista Cubana de Educación Superior*, 44(2), 258-276. <https://revistas.uh.cu/rces/article/view/11248>

Monar, M., & Freire, B. (2023). Análisis de factibilidad económica, para la implementación de un laboratorio de fabricación digital. *Cuaderno del Centro de Estudio de diseño y comunicación*, 12(180) 109-123. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8897261>

Morfin-Garduño, O.A, Zavala-Rubio, L.A, Ornelas, F., & Ramírez-Betancourt, R. (2021). Compensación de potencia reactiva mediante el control robusto de un STATCOM en un sistema de potencia. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 22(3). <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.3.020>

Pérez, A., Téllez, J., Hortelano, J.G., & Barraza, J.I. (2019). Dimensionamiento de un horno de fundición por inducción electromagnética y cálculo de los parámetros eléctricos. *Revista de Ingeniería Eléctrica*, 3(8) 1-4. <http://doi.org/10.35429/JEE.2019.8.3.1.15>

- Ramos Guardarrama, J., Pérez Martínez, M., González Del Castillo, B.A., & Silvério Freire, R.C. (2024). Aplicación para el estudio de la compensación de potencia reactiva. *Ingeniería Energética*, 45(1), 1-14. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012024000100001&script=sci_arttext
- Risoul. (2021). *Compensación de la energía reactiva y su papel en el incremento del factor de potencia*. <https://www.risoul.com.mx>
- Ruano, C.M. (2023). Metodología para el diagnostico y la gestión de mantenimiento en las subestaciones eléctrica de los grupos de generación distribuida. *C&T Riqchary Revista de Investigación en Ciencia y Tecnología*, 5(1), <http://doi.org/10.57166/riqchary/v5.n1.2023.110>
- Tastan, M., Gokozan, H., Çadvar, P.S., & Çadva, U. (2019). Análisis del envejecimiento artificial en horno de inducción y los costos de energía de los materiales 6082 Al y 7075 Al. *Revista de Metalurgia*, 55(1), 137. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.137>
- Torres, O., Espinosa, J., Revuelta, C., & Rodríguez, A.L. (2020). Una solución integral para los problemas de suministro eléctrico de Antillana de Acero. *Ingeniería Energética*, 41(2). <https://www.redalyc.org/journal/3291/329164306008/html/>
- Villafaña, J., Gutiérrez, J., López, C., & Chucuya, R. (2015). Corrección del factor de potencia con banco de condensadores para optimizar el sistema eléctrico en baja tensión, SENATI Chimbote 2015. *INGnosis*, 1(1), 274-286. https://www.academia.edu/download/92608147/Villafana_JEGA_2015_1_1_pdf

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autoría según taxonomía CRediT

Esdelver Silva Aguilera: Conceptualización/Metodología/Investigación/Redacción–borrador original/Redacción–revisión y edición

René L. Guardiola Romero: Conceptualización/Análisis formal de los datos/Supervisión/Redacción – revisión y edición

Yordan Guerrero Rojas: Análisis formal de los datos /Metodología /Redacción – revisión y edición