

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Existen muy pocos productores de óxidos cerámicos en el mundo; actualmente los productores más grandes y más avanzados fabrican materiales abrasivos, vidrio refractario y fibras cerámicas. El desarrollo de tecnologías y el intercambio de información ha sido limitado a “autorizaciones” restringidas sólo para algunas compañías, las que mantienen la información y el conocimiento para su propia explotación. El número y tamaño de las compañías involucradas con óxidos fundidos no ha sido suficiente para crear la demanda o la fuente financiera para soportar la investigación que podría llevar al proceso desde el arte al campo de la técnica y la tecnología. El problema es grande si se toma en cuenta que cada uno de los sistemas de óxidos fundidos requiere de un proceso individual y obtiene un producto único.

Desde junio de 1992 el Grupo Industrial Peñoles a través de su División Químicos Industriales puso en operación una unidad productora de óxido de magnesio (MgO) fundido (MAGNELEC S.A. de C.V) ubicada en la localidad de Ramos Arizpe, Coah. México. Actualmente tiene una capacidad instalada de 5000 toneladas métricas anuales de Oxido de Magnesio fundido grado refractario. Con la finalidad de incrementar la productividad de la planta, mejorar y mantener altos estándares de calidad de producto, MAGNELEC a través de su departamento de Control de Proceso y Calidad ha

desarrollado un proyecto de mejora del proceso fundamentado en un estudio analítico del mismo, el cual es presentado en este trabajo.

El proceso de fusión de Oxido de Magnesio o Magnesia (MgO) grado refractario es similar al de muchos otros que también utilizan un Horno de Arco Eléctrico (HAE). La disponibilidad de obtener un producto de calidad consistente con una alta eficiencia de operación, se consigue mediante una metodología única que requiere de la visión clara de la naturaleza y el entendimiento de los factores específicos que controlan e influyen en el proceso y el producto.

Este trabajo utiliza un HAE trifásico con una capacidad de 6.25 MVA y una carga máxima de 10 toneladas métricas de Magnesia que opera actualmente en la unidad MAGNELEC de Peñoles. El estudio es realizado bajo la condición de que el proceso está abierto a la atmósfera y los fenómenos ocurridos en él son controlados por las bien conocidas leyes de la física, lo que permite iniciar con la ley de la conservación de la energía:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ENERGIA} \\ \text{SUMINISTRADA} \end{array} \right\} = \{ \text{ENTALPIA} \} + \left\{ \begin{array}{l} \text{ENERGIA} \\ \text{PERDIDA} \end{array} \right\}$$

La relación anterior es la primera ley de la termodinámica en la que, dadas las condiciones de operación del HAE, se han descartado los términos de energía cinética y energía potencial; aquí el término *Entalpia* representa la energía almacenada por el sistema (elevar su temperatura y cambiar la materia del estado sólido al estado líquido); aquí se considera que los cambios volumétricos del sistema son casi nulos por lo que la energía por cambio de volumen del sistema a presión constante ha sido también descartada. El término *Energía perdida* globaliza todas aquellas formas de energía que salen del sistema durante el proceso (conducción, radiación y convección de calor), por lo que no son aprovechadas para fundir la carga de material en el horno.

Por otro lado, el término *Energía suministrada* es la energía eléctrica proporcionada por el transformador del horno y la combustión de los electrodos; por lo que se propone un análisis del circuito eléctrico del HAE, el cual es basado en las características de su transformador, su instalación

y el procedimiento de operación del mismo. Dada la naturaleza del arco eléctrico, su comportamiento es similar a una carga resistiva variable al cambiar de manera aleatoria su longitud, en el trabajo se analizan las curvas del comportamiento eléctrico durante la operación y su efecto sobre los índices de desempeño del proceso.

Basado en la capacidad calorífica de la carga y su calor latente de fusión se obtiene, partiendo desde la temperatura ambiente (298°K) hasta la temperatura de fusión de la Magnesia (3073°K), la energía de fusión teórica de la misma expresada en $kW \times h / kg$. Desde otro punto de vista puede definirse este concepto como “el tiempo necesario en horas (h) que una sustancia debe ser expuesta a una potencia determinada en kilowatts (kW) para fundir un kilogramo (kg) de dicha sustancia”. Basándose en este concepto y en que la operación de fusión del MgO comienza con los electrodos en el fondo de la olla del horno, los que conforme transcurre el tiempo son levantados mientras la carga es alimentada, se analizan las velocidades de levantamiento de electrodos y su efecto sobre los índices de desempeño del proceso. Aquí se considera que la rapidez de suministro de energía al sistema debería ser igual a la rapidez de calentamiento y/o fusión del material más las pérdidas, lo cual en la operación no es posible debido a la dificultad de medir la temperatura del interior del sistema. En suma, para una potencia determinada existe un tiempo específico de residencia del material para lograr su fusión; si los portadores de la energía (arco eléctrico en la punta de los electrodos) son movidos antes del tiempo especificado para una potencia determinada, entonces la energía total promedio es menor y el proceso será menos eficiente.

La problemática general de los HAE es la falta de conocimiento entre el estado térmico de la carga y los parámetros eléctricos de la operación. Con los conceptos anteriores aplicados en el proceso de fusión del MgO por HAE se intenta en este trabajo encontrar una relación que permita evaluar el estado térmico final de la carga con los parámetros de operación, los cuales repercuten directamente en los índices de desempeño del proceso y en la productividad de la planta.

Para la fusión de acero por HAE se han desarrollado varios modelos eléctricos¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾²²⁾, sin embargo estos no toman en cuenta el estado térmico de la carga dentro del horno, sólo determinan la

distribución de los campos eléctricos y magnéticos bajo condiciones de distribución de carga uniforme dentro del baño líquido; realmente los trabajos de Heiss¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾²²⁾ han sido de investigación pura del punto de vista eléctrico en los HAE. Ma y Lavers^{23) 24)} desarrollaron un modelo electrotérmico acoplado en el baño de escoria de un horno de fundición por electroescoria (proceso similar al nuestro), ellos muestran que un modelo axisimétrico bidimensional para la región alrededor de un electrodo simple es adecuado para el propósito de predecir la resistencia del horno, la cual decide las líneas de potencia para el mismo; ellos trabajaron en su análisis con corriente directa para desprestigiar el efecto pelicular que la corriente alterna presenta en los conductores. Bretthauer²⁵⁾ ha sugerido al autor el problema que la real heterogeneidad de la carga de los materiales conductores de la electricidad presentan una distorsión real de los campos eléctricos y magnéticos por lo que se dista mucho de poder realmente predecir mediante un modelo sus distribución dentro del horno, él comenta además que si esto sucede con materiales conductores tales como el acero, se esperaría entonces una mayor heterogeneidad y distribución irregular de los campos creados en un material que cambia sus propiedades eléctricas drásticamente durante su fusión, lo que dificultaría aún más una predicción de ellos.

Desde el punto de vista térmico el problema es bastante complejo considerando que es un proceso en el que existe un cambio de fase en el material. Este problema de cambio de fase es universalmente conocido como el "Problema de Stefan"²⁶⁾. Las dificultades aparecen cuando la frontera sólido-líquido no se mueve simultáneamente con el tiempo, por lo que se desconoce realmente la posición de la frontera en el sistema.

En el tiempo han sido desarrollados varios métodos de solución a este problema de cambio de fase; Neumann²⁷⁾ desarrolló una solución analítica para el problema de Stefan en una dimensión, desafortunadamente a menos que la geometría del problema sea muy simple, la solución analítica no es disponible y por ello, han sido desarrolladas muchas técnicas basadas en esquemas numéricos, usualmente elementos y diferencias finitas. Una de las técnicas más simples con las que se cuenta para el efecto del calor latente es seleccionar una energía presupuesta en cada nodo de una malla y establecer la temperatura nodal anterior a la temperatura de cambio de fase después de cada paso del tiempo hasta que suficiente calor ha sido acumulado para justificar el calor latente asociado con el

calor del nodo²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾. Como este, en la literatura pueden ser encontrados una gran cantidad de trabajos desarrollados por métodos de "Capacidad Aparente"³¹⁾³²⁾³³⁾, "Método Entálpico"³⁴⁾³⁵⁾³⁶⁾³⁷⁾³⁸⁾, "Método de Pham"³⁹⁾, "Método de Tacke"⁴⁰⁾ y "Método de Blanchard y Fremond"⁴¹⁾. Sin embargo todos ellos son métodos muy complejos y han sido probados sólo para materiales con número de Stefan pequeño, el que se define como:

$$St = \frac{C_p \cdot \Delta T}{L_f}$$

dónde ΔT es la diferencia de temperaturas entre la de fusión del material y la inicial de la carga en nuestro caso, C_p es la capacidad calorífica y L_f es el calor latente de fusión. En otras palabras los métodos desarrollados hasta ahora funcionan para materiales con bajo punto de fusión. Por otro lado en nuestro proceso existe una combinación de métodos de transferencia de calor por radiación, conducción y convección, al mismo tiempo calentamiento por efecto Joule en la carga que sería difícil poder desarrollar un método confiable que prediga la distribución de temperaturas dentro de la carga del horno ya que además, normalmente no se puede asegurar que la carga este uniformemente distribuida. R. Scholz⁴²⁾ ha sugerido al autor que un análisis de este tipo sería poco confiable ya que en principio es muy difícil conjugar los tres métodos de transferencia de calor con una fuente de calor interna en un modelo. Por otro lado las temperaturas manejadas y por el tipo de proceso sería muy difícil validar los perfiles de temperatura en el remoto caso de llegar a desarrollar un modelo tan complejo, por ello lo más probable es que con un análisis térmico siguiendo la línea del problema de Stefan no se llegaría al objetivo de darle un valor agregado al proceso en cuestión, es decir sería sólo un análisis teórico.

Conociendo las necesidades del proceso industrial para la obtención de MgO fundido para grado refractario mediante HAE y tomando en cuenta las sugerencias por Bretthauer y Scholz, K.J. Leers⁴³⁾ y T.K. Das⁴⁷⁾ sugirieron un análisis global en el que se puedan relacionar las variables eléctricas con la materia prima, las variables mecánicas y el estado térmico de la carga; como ya se mencionó *dinómicamente* esto último es muy difícil, sin embargo si se mantienen las variables de operación constantes durante cada fusión y se relacionan con la productividad obtenida, se puede decir que se

logra una relación *estática* del modo de operación eléctrico con el estado térmico de la carga el cual es reflejado finalmente en los kilogramos de producto obtenido en cada fusión.

En cualquier análisis de un proceso es necesario señalar las fronteras entre las que se desarrolla el mismo con la finalidad de validar los resultados del estudio con la realidad. Aún cuando los procesos son controlados por las conocidas leyes de las ciencias físicas y químicas, muchas veces por su complejidad o por falta de elementos e indisponibilidad técnica de instrumentos de medición es difícil validar experimentalmente algún estudio. Por ello es importante determinar la estrategia de análisis del proceso más conveniente que permita validarlo con la realidad antes de iniciar alguna ruta de análisis que no llegue a más que un estudio teórico. Esto permitirá que el resultado del estudio proporcione un valor agregado al proceso en cuestión.

Dada la tecnología disponible en los equipos de fusión de Magnesita, es muy difícil medir en forma directa la temperatura de la carga dentro del horno, además de que no existen por el momento instrumentos capaces de medir las altas temperaturas que se manejan en este proceso (3098°K), además de encontrarse la complejidad analítica del conocido “Problema de Stefan” que se presenta en todos los procesos de materiales con cambio de estado (sólido-líquido o líquido-sólido).

Este trabajo considera que la energía disponible proviene del transformador eléctrico del horno y de la combustión de los electrodos; toma en cuenta además que la disponibilidad de fusión del horno depende del modo de operación del mismo y de las características eléctricas del transformador; además se asume que la carga de material tiene una rapidez de fusión que depende principalmente de su capacidad calorífica. El estudio busca determinar las condiciones de operación del HAE de la unidad MAGNELEC del Grupo Peñoles, así como las variables de control del proceso que permitan fijar el peso del producto del MgO grado refractario con costos óptimos, basándose en los conceptos citados arriba y en un análisis de las variables eléctricas y de las variables mecánicas del horno. Un objetivo adicional es que el análisis pueda ser extendido a hornos en procesos similares tomando en cuenta su instalación y sus características geométricas.

mayores son muy costosos; por ello es conectado entre la red de suministro y el transformador del horno otro llamado transformador principal.

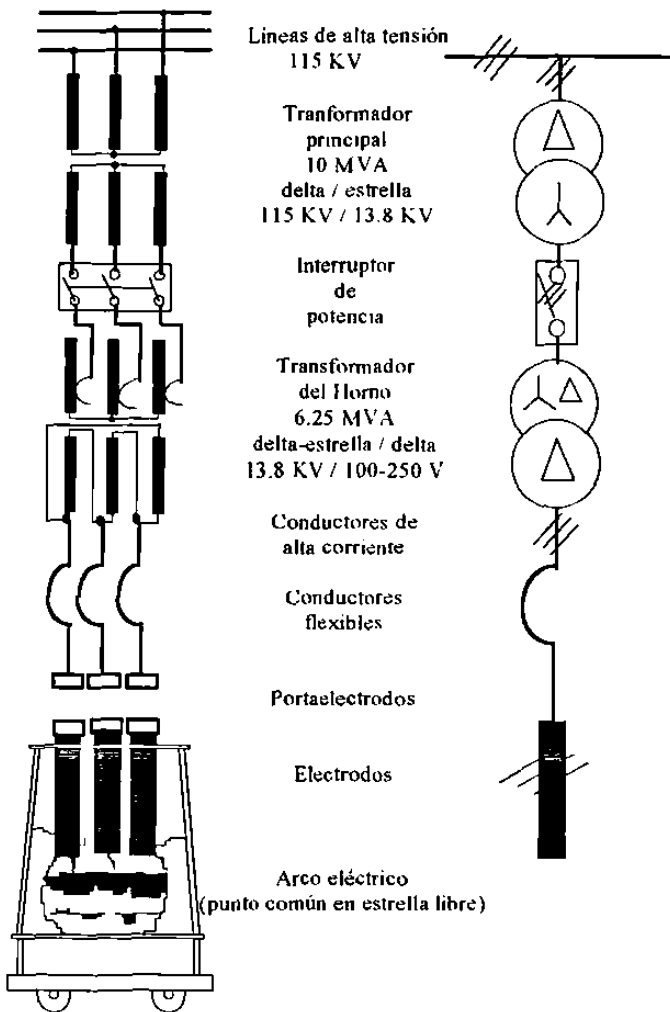


Fig. 1. Diagrama de circuito básico de un HAE para fusión de Magnesita.

En el equipo representado en la Fig. 1. el alto voltaje alimentado de 115 KV es transformado a 13.8 KV y éste es después reducido en el transformador del horno al voltaje secundario, que en este caso es de 100 a 250 V; éstos distintos niveles de voltaje en el lado secundario del transformador del horno son habilitados debido a las necesidades de potencia durante la fusión de la carga de material; el cambio de los niveles de voltaje particulares se realiza en las bobinas del lado primario. Mientras que en el lado primario ambas conexiones delta y estrella son disponibles, en el lado secundario se dispone sólo de la conexión delta ya que con ello se mantiene baja la corriente en las bobinas mismas del lado secundario, es decir que para la conexión delta con carga simétrica la corriente fluyendo en ella es aproximadamente $\sqrt{3}$ veces más pequeña que la corriente en las líneas externas.

2.1.2. Análisis del Circuito del Horno de Arco Eléctrico

2.1.2.1. El Circuito Eléctrico Equivalente (Circuito Fundamental)

Según Kluss¹⁾, Lauster²⁾ y Lünig³⁾, para describir el comportamiento eléctrico del equipo del HAE y además poder dar a conocer los fundamentos de sus condiciones eléctricas, se toma como auxiliar el circuito eléctrico unifilar equivalente.

El uso de las leyes de circuitos trifásicos para cargas simétricas requiere asumir voltajes y corrientes alternas senoidales y carga simétrica en las tres fases. Sólo bajo estas condiciones es válido el siguiente análisis. De esta forma es posible obtener desde el diagrama sinóptico de la Fig. 1.b) el circuito fundamental unifilar simplificado, tal como es mostrado en la Fig. 2., dónde son separadas las resistencias aparentes de cada componente del equipo en cada uno de sus componentes inductivos y óhmicos.

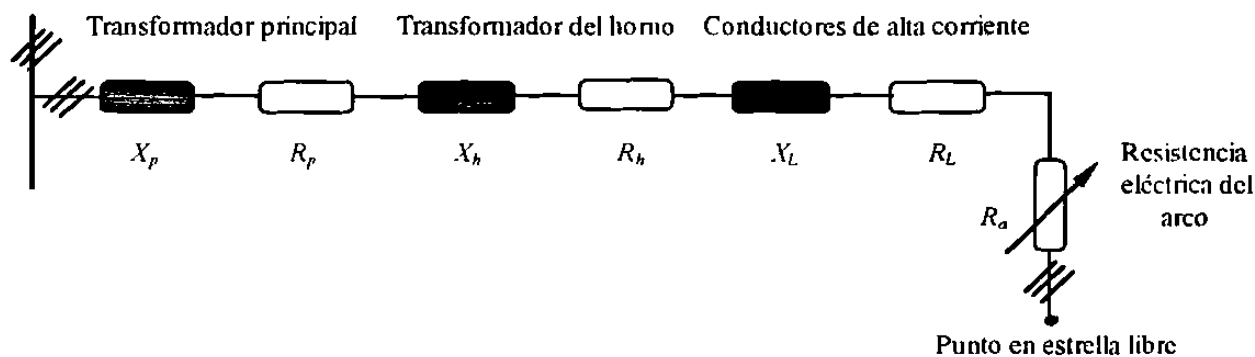


Fig. 2. Diagrama eléctrico equivalente del HAE (circuito fundamental).

Estas simplificaciones son usuales en los análisis de circuitos eléctricos y valen sólo para cargas eléctricas. La resistencia del arco eléctrico es sustituida por una resistencia óhmica pura mientras que la reactancia del mismo es descartada; esto es válido porque las reactancias son causadas por campos magnéticos alternos, los que tienen una influencia insignificante para arcos eléctricos cortos, Lünig⁴⁾.

De la Fig. 2., se puede deducir la reactancia total X_T con la suma de cada una de las reactancias unifilares:

$$X_T = X_p + X_h + X_L \quad (1)$$

dónde X_p , X_h y X_L representan las reactancias del transformador principal, del transformador del horno y de los conductores de alta corriente respectivamente. De igual forma se obtiene la resistencia óhmica total R_T :

$$R_T = R_p + R_h + R_L + R_a \quad (2)$$

dónde R_p , R_h , R_L y R_a representan las resistencias del transformador principal, del transformador del horno, de los conductores de alta corriente y del arco eléctrico respectivamente. Las resistencias óhmicas de los componentes de los equipos se deduce como la resistencia del equipo R_E :

$$R_T = R_E + R_a \quad (3)$$

Todas las resistencias simples del equipo pueden ser tomadas como constantes a excepción de la resistencia del arco R_a , ésta es la única resistencia variable del circuito que puede tomar valores desde cero hasta infinito dependiendo de la posición de los electrodos con la carga. La resistencia del arco eléctrico es infinita cuando la distancia entre la carga fundida y los electrodos es grande, mientras que toma valores de cero cuando los electrodos y la carga fundida están en contacto directo (corto circuito).

La multiplicación de una resistencia óhmica con el cuadrado de la corriente que fluye proporciona la potencia activa disponible para transformarse, por lo que es la resistencia óhmica total R_T la responsable de la potencia activa del circuito; según la ecuación (3) ésta resistencia R_T se compone de dos partes: la resistencia variable del arco eléctrico R_a , la que determina el valor de potencia activa del arco, y la resistencia constante del equipo R_E que de la misma manera proporciona una

potencia activa constante la cual es considerada como potencia perdida. De las ecuaciones (2) y (3) se describe la resistencia del equipo R_E de la forma siguiente:

$$R_E = R_p + R_h + R_L \quad (4)$$

dónde R_L representa la resistencia de los conductores de alta corriente y de los electrodos y su valor es de aproximadamente el 90% de R_E , Ameling⁵⁾. La potencia desarrollada por las resistencias óhmicas de los transformadores, los conductores de alta corriente y la que corresponde a los electrodos es considerada como pérdida permanente. Una parte de la potencia transportada a través de los electrodos es transformada en calor y por ello beneficia la operación. W. E. Schwabe⁶⁾ sugiere para ésta parte valores que van desde 1/3 hasta 1/4 de la potencia considerada como pérdida, es decir que aproximadamente desde 1/3 hasta 1/4 de la resistencia óhmica considerada como pérdida del equipo R_E , es tomada como potencia útil en el horno. Con lo anterior se tiene que la resistencia del equipo R_E se divide en una parte útil R_u y en una parte de pérdida R_v :

$$R_E = R_v + R_u \quad (5)$$

Con ello la ecuación (3) queda de la siguiente forma:

$$R_T = R_v + R_u + R_a = R_v + R_o \quad (6a)$$

dónde

$$R_o = R_u + R_a \quad (6b)$$

Es decir, la resistencia óhmica total se divide en dos partes útiles representada con R_o y una de pérdida R_v .

El circuito fundamental de un HAE debe adaptarse a estas realidades; la Fig. 3. representa el circuito equivalente de operación, dónde se han globalizado todas las resistencias y reactancias del circuito en elementos simples. En la misma figura se presentan las ecuaciones que definen las variables de resistencia que resultan en la simplificación.

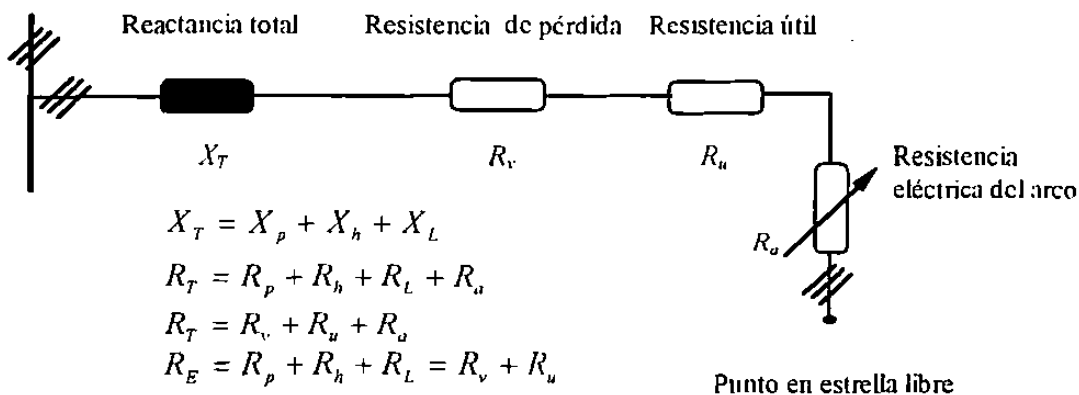


Fig. 3. Circuito equivalente de operación del HAE.

2.1.2.2. El Diagrama Vectorial del HAE

Para la determinación del diagrama vectorial se usa el circuito equivalente simplificado mostrado en la Fig. 4.a), Kluss¹⁾. Aquí se asume la resistencia óhmica total como variable con valores que van desde cero hasta infinito; además se desprecia la corriente que fluye en el transformador cuando esta en vacío, es decir cuando el arco aún no es encendido, conocida como corriente en vacío. La resistencia óhmica del equipo R_E permanece constante no así en corto circuito, así mismo la reactancia total se asume constante.

Con las reglas de los circuitos eléctricos de corriente alterna se obtiene para el diagrama equivalente la resistencia aparente total, es decir la impedancia total \bar{Z}_T :

$$\bar{Z}_T = R_T + jX_T \quad (7)$$

En la Fig. 4.b) se explica esta relación. En esta figura el voltaje \vec{U}_o (vector del voltaje de fase) yace al igual que la resistencia óhmica R_T sobre el eje real positivo $+a$; perpendicular a la resistencia óhmica se coloca la reactancia X_T sobre el eje imaginario positivo $+j$ y con estas bases se determina el argumento y el ángulo de fase de \bar{Z}_T .

Desde la ecuación (7) y con las reglas de los números complejos se deduce la ecuación (8):

$$\vec{Z}_T = Z_T \cos \varphi + j Z_T \operatorname{sen} \varphi \quad (8)$$

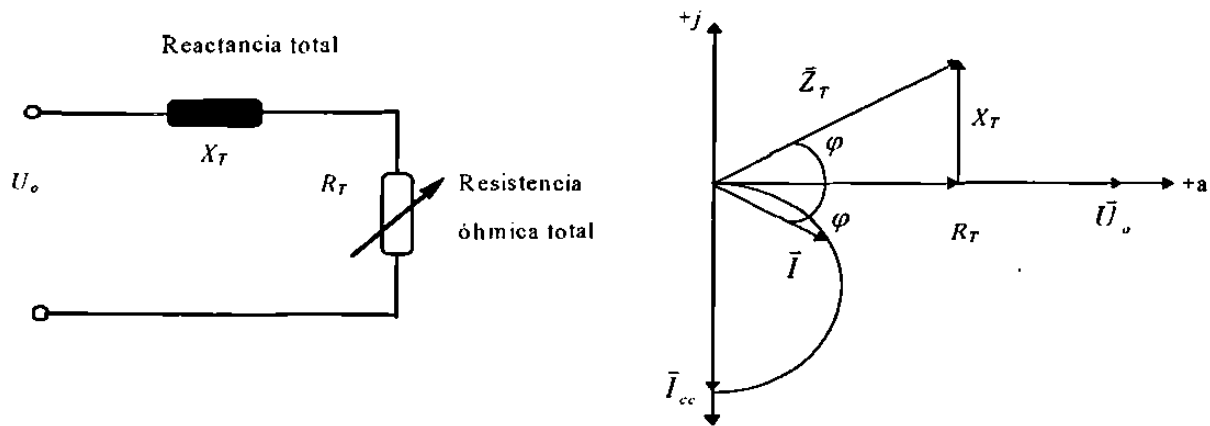


Fig. 4. a) Circuito equivalente simplificado del HAE. b) Gráfica de posición del vector de corriente \vec{I} .

dónde φ es el ángulo de fase. Por trigonometría aplicada en la Fig. 4.b) el valor absoluto de \vec{Z}_T se obtiene mediante la siguiente relación:

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2} \quad (9)$$

Mediante una comparación de las ecuaciones (7) y (8) se obtienen las relaciones siguientes:

$$R_T = Z_T \cos \varphi \quad (10a)$$

$$X_T = Z_T \operatorname{sen} \varphi \quad (10b)$$

de dónde se obtiene combinando la ecuación (9) lo siguiente:

$$\cos \varphi = \frac{R_T}{Z_T} = \frac{R_T}{\sqrt{R_T^2 + X_T^2}} \quad (10c)$$

$$\text{sen } \varphi = \frac{X_T}{Z_T} = \frac{X_T}{\sqrt{R_T^2 + X_T^2}} \quad (10d)$$

Por la ley de Ohm mediante la división del vector de voltaje \vec{U}_o y de la resistencia aparente \vec{Z}_T se obtiene el vector de corriente \vec{I} :

$$\vec{I} = \frac{\vec{U}_o}{\vec{Z}_T} = \frac{U_o}{R_T + jX_T} \quad (11)$$

de dónde se obtiene que el ángulo del vector de corriente es la diferencia entre el ángulo del vector de voltaje (en este caso igual a cero) y el ángulo de fase φ y su argumento se obtiene con la siguiente ecuación:

$$I = \frac{U_o}{Z_T} = \frac{U_o}{\sqrt{R_T^2 + X_T^2}} \quad (12)$$

esta ecuación proporciona la corriente que el voltaje U_o acciona en el circuito. Variando la resistencia óhmica total R_T desde cero a infinito se obtiene las posibles posiciones del vector de corriente \vec{I} como un arco de circunferencia presentado en la Fig. 4.b). Lo anterior es causado por la ecuación (11) que es una forma general de la ecuación de la circunferencia.

Como se aclaró antes, la corriente del transformador en vacío se descarta por lo que cuando $R_T = \infty$ el ángulo de fase $\varphi = 0$ y la corriente $I = 0$, por ello es colocado el medio círculo sobre el origen del sistema coordenado. Cuando $R_T = 0$ se alcanza el segundo valor extremo con la siguiente relación:

$$I = \frac{U_o}{X_T} = I_{oc} \quad (13)$$

dónde I_{cc} es la corriente teórica de corto circuito, la que yace sobre el eje negativo $-j$ y forma el diámetro del arco de circunferencia e inequívocamente es determinado por el voltaje y la reactancia. El desplazamiento en fase de esta corriente teórica de corto circuito I_{cc} contrario al voltaje vale $\pi/2$, I_{cc} es una corriente imaginaria pura en atraso con respecto al voltaje. Ahora, el diámetro del medio círculo formado por I_{cc} forma la abcisa de un sistema coordenado cartesiano, entonces cualquier corriente determinada I tiene la componente activa $I_w = I \cos\varphi$ y la componente imaginaria $I_B = I \sin\varphi$. La componente activa yace sobre la ordenada mientras la imaginaria sobre la abcisa. Con estas bases se obtiene el diagrama vectorial de corrientes presentado en la Fig. 5.a), Kluss¹⁾.

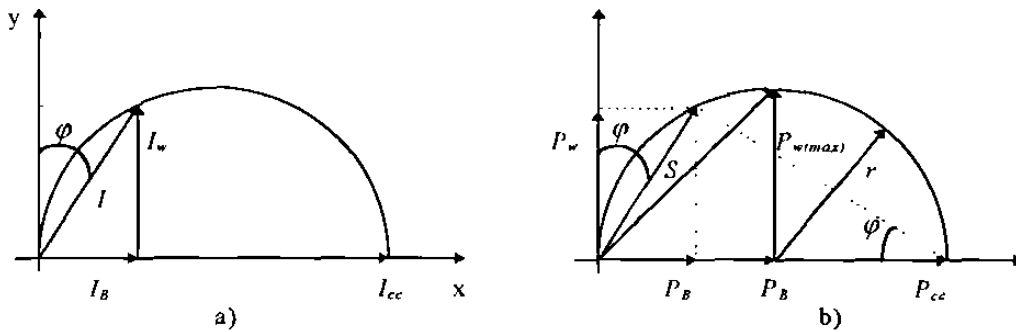


Fig. 5. a) Diagrama vectorial de corrientes y b) Diagrama vectorial de potencias; Kluss¹⁾.

Mediante la multiplicación de las variables de corriente y de voltaje U_o se obtienen la potencia, de esta forma se obtiene la potencia aparente S :

$$S = 3 U_o I = \sqrt{3} U I \quad (14a)$$

y combinando la ecuación (12) se obtiene la potencia aparente en función de la corriente y la impedancia:

$$S = \frac{3 U_o^2}{Z_T} = 3 I^2 Z_T \quad (14b)$$

Mientras que la potencia activa P_w queda de la siguiente forma:

$$P_w = 3 U_o I \cos \varphi = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad (15a)$$

$$P_w = \frac{3 U_o^2}{R_T} = 3 I^2 R_T \quad (15b)$$

Por otro lado la potencia imaginaria o reactiva queda de la siguiente forma:

$$P_B = 3 U_o I \sen \varphi = \sqrt{3} U I \sen \varphi \quad (16a)$$

$$P_B = 3 I^2 X_T \quad (16b)$$

Todo ha sido trazado para el circuito monofásico equivalente por lo que deben hacerse los cálculos para el equipo del HAE conectado a la red trifásica. Este hecho considera el factor $\sqrt{3}$ o bien el voltaje de línea U , es decir el voltaje medido entre dos fases:

$$U = U_o \sqrt{3} \quad (17)$$

Multiplicando la variable de corriente con el voltaje se obtiene el diagrama de potencias vectorial presentado en la Fig. 5.b), con la potencia activa en la ordenada y la potencia imaginaria en la abcisa. Ahora el vector de corriente aparente corresponde al vector de potencia aparente, el de corriente activa al de potencia activa y el de corriente imaginaria al de potencia imaginaria. Sustituyendo la ecuación (12) en la (15b) se obtiene lo siguiente:

$$P_w = 3 I^2 R_T = \frac{3 U_o^2}{R_T^2 + X_T^2} R_T \quad (18)$$

Mediante la derivada de la ecuación (18) con respecto a R_T se obtienen los valores de R_T y X_T para la potencia activa máxima $P_{w(max)}$:

$$\frac{dP_w}{dR_T} = -\frac{2 R_T^2 3 U_o^2}{(R_T^2 + X_T^2)^2} + \frac{3 U_o^2}{R_T^2 + X_T^2} \quad (19a)$$

$$0 = 3 U_o^2 \frac{R_T^2 + X_T^2 - 2R_T^2}{(R_T^2 + X_T^2)^2} \quad (19b)$$

$$0 = R_T^2 + X_T^2 - 2R_T^2 \quad (19c)$$

con esto se obtiene que para la potencia máxima se requiere que el valor de la resistencia óhmica total sea igual al de la reactancia total:

$$R_T = X_T \quad (20)$$

de manera que de la ecuación (18) simplificando se obtiene la ecuación para la potencia activa máxima de la forma siguiente:

$$P_{w(max)} = \frac{3 U_o^2}{2 X_T} = \frac{U^2}{2 X_T} \quad (21)$$

Mientras que el factor de fase $\cos \varphi$ para la potencia activa máxima se obtiene con ayuda de las ecuaciones (19c) y (20):

$$\cos \varphi = \frac{R_T}{\sqrt{R_T^2 + X_T^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.7071 \quad (22)$$

es decir para un ángulo de fase $\varphi = 45^\circ$. La potencia teórica de corto circuito P_{cc} se obtiene según la gráfica de la Fig. 5.b) a un ángulo $\varphi = 90^\circ$ y corresponde a la corriente de corto circuito I_{cc} por lo que P_{cc} se obtiene mediante la siguiente relación:

$$P_{cc} = \frac{3 U_n^2}{X_T} = \frac{U^2}{X_T} \quad (23)$$

La potencia activa máxima $P_{w(max)}$ es la mitad de la potencia teórica de corto circuito que corresponde al diámetro del arco de circunferencia. La ecuación (21) ofrece una posibilidad sencilla para la construcción del diagrama vectorial; para una reactancia y voltaje dados se calcula el radio r del arco de circunferencia con la ayuda de la siguiente relación

$$r = P_{w(max)} = \frac{U^2}{2X_T} \quad (24)$$

Con los diferentes niveles de voltaje con los que se equipan los transformadores pueden ser calculadas y construidas las potencias activas máximas correspondientes a cada nivel de voltaje, Fig. 5.b). La potencia aparente correspondiente a cada punto de un arco de circunferencia se puede obtener mediante una relación trigonométrica sencilla:

$$S = P_{cc} \text{ sen } \varphi \quad (25a)$$

Esta relación se explica por si misma en la Fig. 5.b). Usando la ecuación (23) en la (25a) se obtiene la potencia aparente S en función del voltaje y la reactancia:

$$S = \frac{U^2}{X_T} \text{ sen } \varphi \quad (25b)$$

es además válido obtener la potencia activa mediante la multiplicación de la ecuación (25b) con el $\cos \varphi$:

$$P_w = \frac{U^2}{X_T} \text{sen } \varphi \text{ cos } \varphi \quad (26)$$

Si se analiza la influencia de la resistencia óhmica del equipo R_E , entonces debe aceptarse que en el corto circuito R_T no puede ser igual a cero sino que en todo caso mantiene un valor de resistencia determinada, es decir la resistencia óhmica del equipo R_E . Si se desea determinar la corriente en un circuito correspondiente a un voltaje U_o , entonces la ecuación (12) queda de la siguiente forma:

$$I = \frac{U_o}{\sqrt{(R_E + R_a)^2 + X_T^2}} \quad (27)$$

Como en esta ecuación solamente la resistencia del arco R_a puede valer cero, entonces la corriente de corto circuito activa I_{CC_E} presente en el circuito se calcula mediante la siguiente relación:

$$I_{CC_E} = \frac{U_o}{\sqrt{R_E^2 + X_T^2}} \quad (28)$$

Esta relación se explica por si misma en la Fig. 6. cuyo diagrama ha sido construido bajo los mismos principios de la Fig. 4.b) pero girado 90° . Debido a que aún en corto circuito permanece la resistencia óhmica R_E , la corriente correspondiente de corto circuito I_{CC_E} es más pequeña que la corriente teórica de corto circuito I_{CC_0} la que se retrasa del voltaje un ángulo más pequeño φ_{CC_E} , su vector es manejado en este trabajo como “vector de corto circuito”. En el diagrama vectorial de potencias mostrado en la Fig. 7., al vector de corriente de corto circuito corresponde el vector de potencia de corto circuito P_{CC_E} el cual es más pequeño que la potencia teórica de corto circuito P_{CC_0} . Con el corto circuito es posible dividir cualquier potencia de sistema P_w definida por el medio círculo en sus componentes, es decir en la potencia del arco P_a y la potencia P_E la que se obtiene en las resistencias de la instalación eléctrica. De la misma manera es aclarado el vector de potencia de arco máximo $P_{u(max)}$ mostrado en la Fig. 7., el que se define por el punto de contacto de la tangente en el medio círculo paralela al vector de corto circuito activo P_{CC_E} .

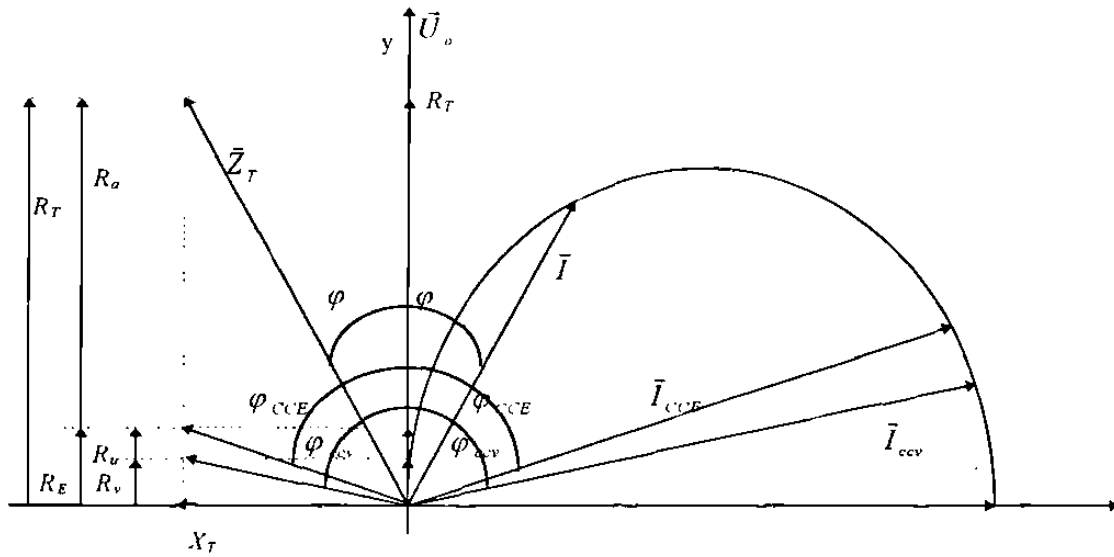


Fig. 6. Diagrama vectorial de corriente completo del HAE; se descarta la corriente en vacío del transformador.

Apoyandose en la ecuación (3) se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_w = P_T + P_a \quad (29)$$

dónde P_E es la potencia que comúnmente se considera como pérdida, sin embargo como ya se menciono la reistencia del sistema R_E es considerada como una parte de pérdida y otra parte útil, por lo que se denominará a P_E la potencia de pérdida teórica. De acuerdo a la ecuación (18) se obtiene para la potencia del arco eléctrico P_a la siguiente relación:

$$P_a = 3 \dot{U}_a I = 3 I^2 R_a = \frac{3 U_o^2}{(R_E + R_o)^2 + X_T^2} R_a \quad (30)$$

Para determinar la potencia de arco máxima se deriva la ecuación (30) con respecto a R_a y la ecuación resultante se iguala a cero:

$$\frac{dP_a}{dR_a} = 3 U_o^2 \frac{(R_E + R_a)^2 + X_T^2 - 2R_a(R_E + R_a)}{[(R_E + R_a)^2 + X_T^2]^2} \quad (31a)$$

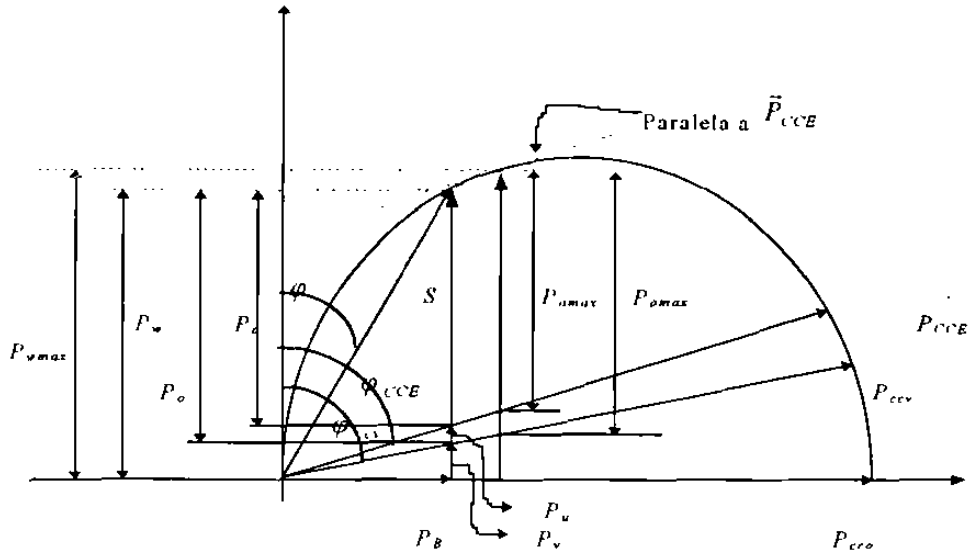


Fig. 7. Diagrama vectorial de potencias completo del HAE, se descarta la corriente en vacío del transformador.

$$0 = R_E^2 + 2R_E R_a + R_a^2 + X_T^2 - 2R_E R_a - 2R_a^2 \quad (31b)$$

$$R_a = \sqrt{R_E^2 + X_T^2} \quad (31c)$$

Sustituyendo la ecuación (31c) en la ecuación (30) se obtiene la potencia del arco máxima:

$$P_{a(max)} = \frac{3 U_o^2}{2} \frac{1}{\sqrt{R_E^2 + X_T^2} + R_E} \quad (32)$$

El $\cos\phi$ para la potencia de arco máxima se obtiene partiendo de la ecuación (10c):

$$\cos\phi = \frac{R_T}{\sqrt{R_T^2 + X_T^2}} \quad (10c)$$

Sustituyendo la ecuación (3):

$$\cos\varphi = \frac{R_l + R_u}{\sqrt{(R_E + R_u)^2 + X_T^2}} \quad (33)$$

entonces para la potencia de arco máxima con sustitución de la ecuación (31c) se obtiene el factor de potencia de la siguiente forma:

$$\cos\varphi_{(I_{amax})} = \frac{R_E + \sqrt{R_E^2 + X_T^2}}{\sqrt{(R_E + \sqrt{R_l^2 + X_T^2})^2 + X_T^2}} \quad (34)$$

simplificando se obtiene lo siguiente:

$$\cos\varphi_{(P_{amax})} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{R_E}{\sqrt{R_E^2 + X_T^2}}} \quad (35)$$

de manera que el factor de potencia $\cos\varphi$ para la potencia de arco máxima es siempre desplazado a valores mayores que el correspondiente a la potencia máxima del sistema, este desplazamiento depende de la siguiente relación:

$$\frac{R_E}{\sqrt{R_E^2 + X_T^2}} = \cos\varphi_{CCF} \quad (36)$$

el cual determina el factor de potencia de corto circuito del sistema. Con esto queda matemáticamente clara la razón por la que la potencia de arco máxima es determinada por el factor de potencia de corto circuito $\cos\varphi_{CCF}$, el cual se presenta cuando la resistencia del arco eléctrico R_u es igual a cero. De acuerdo a Kluss¹⁾, se analiza ahora el significado de la resistencia útil R_u definida en el punto 2.2.1. así como la resistencia de pérdida R_v . Considerando las ecuaciones (6a) y (12) se obtiene que la corriente que fluye en el circuito I_{lv} (Fig. 6.), cuando R_u como R_v son iguales a cero, es dada por la siguiente relación:

$$I_{ccv} = \frac{U_o}{\sqrt{R_v^2 + X_T^2}} \quad (37a)$$

y la potencia que con ésta corriente se genera es la siguiente:

$$P_{ccv} = \frac{3 U_o^2}{\sqrt{R_v^2 + X_T^2}} \quad (37b)$$

la que es señalada como “pérdidas directas” sobre el diagrama vectorial de potencias de la Fig. 7.; su factor de potencia $\cos\varphi_{ccv}$ se obtiene por la siguiente relación:

$$\cos\varphi_{ccv} = \frac{R_v}{\sqrt{R_v^2 + X_T^2}} \quad (37c)$$

Debe recordarse que en el corto circuito sólo R_v puede ser igual a cero, por lo que queda claro que la pérdida directa tiene sólo significado teórico. No obstante que la ayuda de la pérdida directa se pueden determinar desde el diagrama vectorial para cada punto del medio círculo, la potencia útil del horno P_o y la potencia de pérdida correspondiente a P_v de acuerdo a la Fig. 7.:

$$P_w = P_u + P_v \quad (38)$$

$$P_w = P_u + P_u + P_v \quad (39a)$$

$$P_o = P_u + P_u \quad (39b)$$

La diferencia entre el corto circuito directo y la pérdida directa es la potencia transformada en los electrodos P_u . La potencia útil del horno máxima alcanzable $P_{o(max)}$ en el circuito se encuentra en el punto de contacto del medio círculo y de la línea tangente paralela al vector de pérdida directa, como se muestra en la Fig. 7. La comprobación matemática de la potencia útil máxima del horno se obtiene

de igual forma que se obtuvo para la del arco eléctrico; por lo que para esta potencia vale la siguiente ecuación:

$$P_o = 3I^2R_o + 3I^2R_u \quad (40)$$

o usando la ecuación (6b):

$$P_o = 3I^2R_o \quad (41)$$

y de acuerdo a la ecuación (30) puede escribirse de la siguiente forma.

$$P_o = \frac{3U_o^2}{(R_v + R_u)^2 + X_T^2} R_o \quad (42)$$

Para la determinación de la potencia útil del horno máxima y del correspondiente factor $\cos\varphi$ se procede igual que para la determinación de $P_{o(max)}$, sólo que aquí se sustituye R_E por R_v y R_u por R_o y derivar con respecto a R_o . Entonces en el punto máximo de la potencia útil del horno vale la siguiente expresión reducida:

$$R_o = \sqrt{R_v^2 + X_T^2} \quad (43)$$

para $P_{o(max)}$ se tiene lo siguiente:

$$P_{o(max)} = \frac{3U_o^2}{2} \frac{1}{\sqrt{R_v^2 + X_T^2} + R_v} \quad (44)$$

y para $\cos\varphi_{(P_{o(max)})}$ se tiene la siguiente relación:

$$\cos\varphi_{(P_{o(max)})} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{R_v}{\sqrt{R_v^2 + X_T^2}}} \quad (45)$$

El factor de potencia $\cos\varphi_{(P_o(\max))}$ se da para valores máximos que los de la potencia activa del sistema máxima y depende de la siguiente relación:

$$\cos\varphi_{ccv} = \frac{R_v}{\sqrt{R_v^2 + X_T^2}} \quad (46)$$

es decir depende del factor de potencia de pérdidas directas del diagrama vectorial de la Fig. 7. La influencia de las simplificaciones presentadas anteriormente se presentan de la siguiente forma: con el transformador en vacío, es decir cuando el arco no ha sido encendido, fluye una corriente de vacío I_L la que se divide en una componente activa y en una reactiva debido a la resistencia óhmica de las bobinas y de la reactancia respectivamente, provocada por la magnetización del núcleo de hierro del mismo transformador. Para la corriente de vacío corresponde una potencia de vacío del transformador la que desplaza el diagrama vectorial desde el punto cero y paralelo a la abscisa de acuerdo a sus componentes activas y reactivas; Kluss¹⁾, Lauster⁷⁾ y Sommer⁸⁾.

En la Fig. 8. se presenta nuevamente el diagrama vectorial de potencia, el cual es aplicado en este trabajo como medio de ayuda para la descripción de las ecuaciones eléctricas del HAE. Los parámetros de factor de potencia y potencia aparente son sugeridos por Ottmar⁹⁾ como complemento del diagrama vectorial. Para el factor de potencia $\cos\varphi = 1$ (desplazamiento de fase = 0) la potencia aparente S es igual a la potencia activa P_w y la potencia reactiva $P_B = 0$. Cuando aumenta el desplazamiento de fase disminuye la potencia activa, la potencia aparente permanece constante y la potencia reactiva P_B aumenta hasta un ángulo de fase $\pi/2$ (desplazamiento de fase = 90°) y es igual a la potencia aparente, mientras que la potencia activa es igual a cero. Por consecuencia se tienen las siguientes relaciones:

$$P_w = S \cos\varphi \quad \text{y} \quad P_B = S \operatorname{sen}\varphi \quad (47a)$$

$$S = \sqrt{P_w^2 + P_B^2} \quad (47b)$$

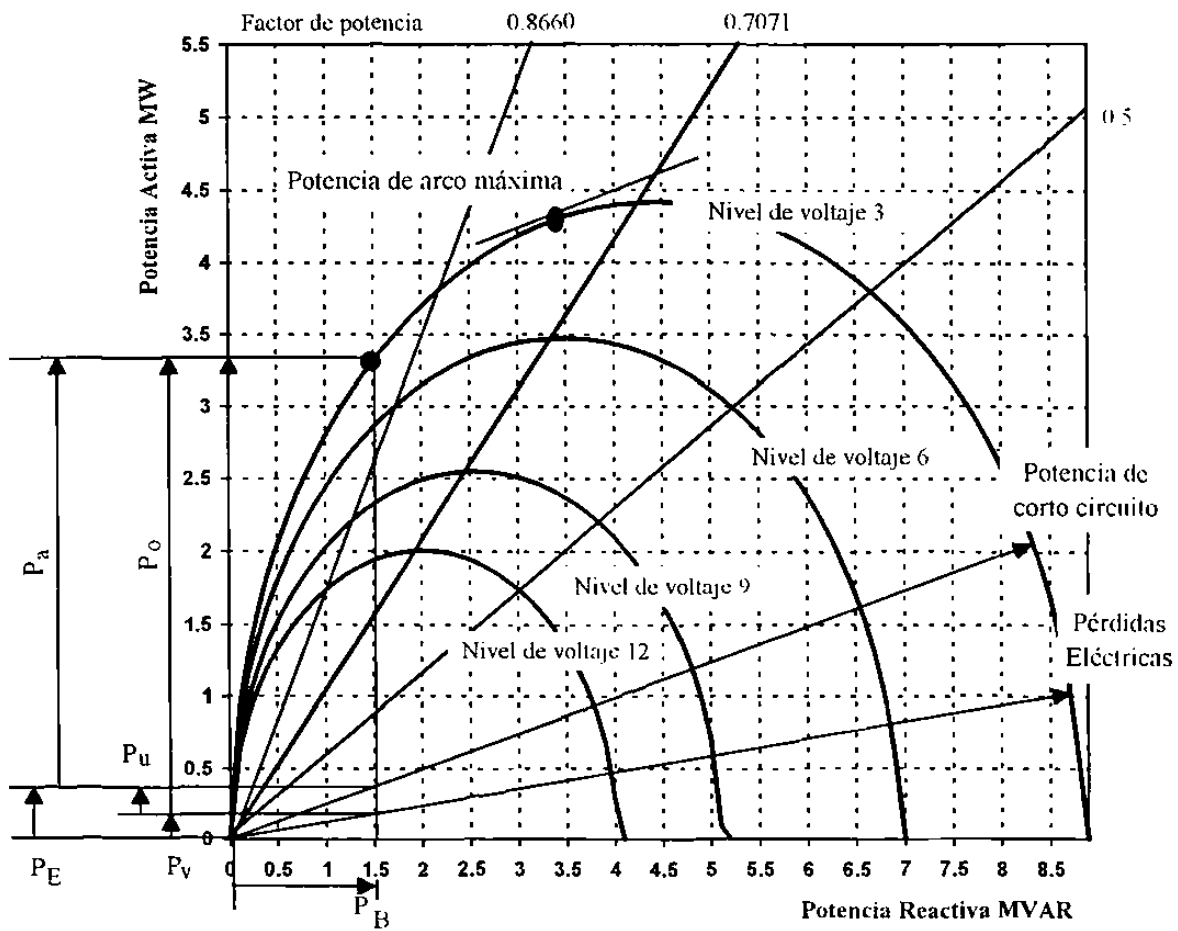


Fig. 8. Diagrama de potencias de un Horno de Arco Eléctrico con líneas de factor de potencia.

El factor de potencia corresponde al ángulo pequeño formado en la parte del ángulo recto entre la potencia activa como ordenada y la potencia reactiva como abscisa. Este tipo de presentación tiene la ventaja de que con tan sólo conociendo una de las variables que caracterize el punto de trabajo del sistema instalado de un HAE, puede ser encontrado inmediatamente ese punto de trabajo en el diagrama. Por lo anterior puede definirse el “punto de trabajo” como todos los puntos encontrados sobre el medio círculo. El factor de potencia puede describir claramente este concepto mediante la relación de la potencia activa y la aparente:

$$\cos\varphi = \frac{P_w}{S} = \frac{P_w}{\sqrt{P_w^2 + P_B^2}} \quad (47c)$$

2.1.2.3. Potencias Relativas del HAE

La representación de las ecuaciones eléctricas mediante el diagrama vectorial como medio de ayuda simplificado para el hornero tiene la ventaja de la facilidad para la rápida determinación asociada al punto de trabajo. Una comparación de las distintas potencias, como potencia del sistema, potencia del arco, potencia del horno y potencia perdida, referentes al punto de trabajo y a los distintos niveles de voltaje puede mejorarse mediante otro tipo de gráficas aplicadas en este punto. Al graficarse las diferentes potencias dadas desde el diagrama vectorial contra la corriente del horno se obtienen las conocidas curvas características del HAE, Sommer¹⁰. Lünig no utiliza para este tipo de gráficas la corriente real del horno sino que él grafica contra la corriente real del horno dividida por la corriente trifásica teórica de corto circuito I_{cco} . Esta corriente trazada sobre la corriente teórica de corto circuito es llamada corriente relativa I_{rel} :

$$I_{rel} = \frac{I}{I_{cco}} \quad (48)$$

Sobre la ordenada son colocadas la potencia aparente relativa, la potencia activa relativa y la potencia reactiva relativa; la potencia aparente relativa es tomada con un valor de "1" y todas las otras potencias son trazadas en relación a ésta. El máximo de la potencia activa P_w es dado para un factor de potencia $\cos\varphi = 0.7071$ cuando la potencia aparente correspondiente es igual a "1", lo anterior calculado para la potencia activa relativa máxima $P_{wrel(max)}$ por la ecuación (47a):

$$P_w = S \cos\varphi \quad (47a)$$

y para $P_{wrel(max)}$ se tiene lo siguiente:

$$P_{wrel(max)} = (1) \cdot (0.7071) = 0.7071 \quad (49a)$$

En el punto máximo de la potencia del sistema es esto igual a la potencia reactiva:

$$P_{Brel(max)} = S \operatorname{sen}\varphi = (1) \cdot (0.7071) = 0.7071 = \cos\varphi \quad (49b)$$

Apoyandose en la ecuación (25) es válida para la potencia aparente en relación a la potencia de corto circuito teórico la siguiente relación:

$$S = P_{cc} \text{sen}\varphi \quad (25)$$

con lo que la potencia relativa teórica de corto circuito P_{ccrel} es dado por la siguiente ecuación:

$$P_{ccrel} = \frac{S_{rel}}{\text{sen}\varphi} = \frac{1}{0.7071} = 1.4142 \quad (49c)$$

Ahora se pueden obtener las curvas características particulares de un HAE de manera muy sencilla con las siguientes relaciones simplificadas que pueden ser deducidas fácilmente:

$$I_{rel} = \text{sen}\varphi \quad (50)$$

la cual resulta de la siguiente consideración: la potencia teórica de corto circuito P_{cco} correspondiente a la corriente teórica de corto circuito I_{cco} se calcula por la siguiente relación:

$$P_{cco} = 3U_o I_{cco} \quad (51)$$

La potencia teórica de corto circuito se había determinado según la ecuación (25) de la siguiente manera:

$$P_{cco} = \frac{S}{\text{sen}\varphi} = \frac{3U_o I}{\text{sen}\varphi} \quad (52)$$

mediante la sustitución de la ecuación (51) en la ecuación (52) se obtiene lo siguiente:

$$I_{cco} = \frac{I}{\text{sen}\varphi} \quad (53)$$

$$\frac{I}{I_{cco}} = \text{sen}\varphi = I_{rel} \quad (50)$$

La presentación de la corriente relativa del horno sobre la abscisa corresponde también a la presentación del $\text{sen}\varphi$, el cual es relacionado con el factor de potencia $\text{cos}\varphi$, de acuerdo a la trigonometría y sus identidades, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{sen}\varphi = \sqrt{1 - \text{cos}^2\varphi} \quad (54)$$

de manera que el punto de trabajo puede ser determinado mediante las curvas características de potencias. Para la determinación de las curvas de potencias relativas valen las siguientes relaciones:

- Para la potencia aparente relativa S_{rel} :

$$S_{rel} = P_{ccorel} \text{sen}\varphi \quad (55)$$

la que proyecta por el $\text{sen}\varphi$ una recta que esta matemáticamente definida por $I/I_{cco} = \text{sen}\varphi = 0.7071$ para $S_{rel} = 1$ y alcanza una potencia teórica de corto circuito relativa de $P_{ccorel} = 1.4142$.

Para la potencia activa relativa P_{wrel} :

$$P_{wrel} = S_{rel} \text{cos}\varphi \quad (56a)$$

$$P_{wrel} = P_{ccorel} \text{sen}\varphi \text{cos}\varphi \quad (56b)$$

$$P_{wrel} = P_{ccorel} \text{sen}\varphi \sqrt{1 - \text{sen}^2\varphi} \quad (56c)$$

Esta curva corresponde al diagrama vectorial del medio círculo y vale cero para $\text{sen}\varphi = 0$, aumenta al máximo para $\text{sen}\varphi = 0.7071 = \text{cos}\varphi$ mientras que para $\text{sen}\varphi = 1$ vale nuevamente cero; la curva

es trazada desde $P_w = P_{CC'E}$ hasta $P_w = P_{cco}$, como aclaración esta última parte de la curva tiene sólo significado teórico.

Para la potencia reactiva relativa P_{Brel} :

$$P_{Brel} = S_{cc'} \cdot \text{sen} \varphi \quad (57a)$$

$$P_{Brel} = P_{ccorel} \cdot \text{sen}^2 \varphi \quad (57b)$$

Con esta ecuación se obtiene una parábola que inicia en el origen coordenado; para $\text{sen} \varphi = 0.7071$ es igual a la potencia activa y para $\text{sen} \varphi = 1$ será igual a la potencia teórica de corto circuito.

- La potencia de pérdida teórica P_E esta definida por la siguiente relación:

$$P_E = 3I^2 R_E \quad (58)$$

dónde la resistencia R_E es determinada por la siguiente ecuación:

$$R_E = Z_{cc} \cos \varphi_{cc} \quad (59a)$$

mientras que Z_{cc} es dado por la siguiente relación:

$$Z_{cc} = \frac{X_T}{\text{sen} \varphi_{cc}} \quad (59b)$$

dónde Z_{cc} es la impedancia de corto circuito y $\cos \varphi_{cc}$ así como $\text{sen} \varphi_{cc}$ son los factores del ángulo de fase de corto circuito del diagrama vectorial. Con lo anterior se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_E = \frac{\cos \varphi_{cc}}{\text{sen} \varphi_{cc}} X_T \quad (60a)$$

Con ayuda de la siguiente relación (16b):

$$P_B = 3I^2 X_T$$

y $X_T = P_B / 3I^2$ se puede escribir la ecuación (60a) de la siguiente forma:

$$R_E = \frac{\cos \varphi_{cc}}{\operatorname{sen} \varphi_{cc}} \cdot \frac{P_B}{3I^2} \quad (60b)$$

sustituyendo en la ecuación (58) se obtiene lo siguiente:

$$P_E = \frac{\cos \varphi_{cc}}{\operatorname{sen} \varphi_{cc}} P_B \quad (61)$$

Para obtener la pérdida teórica relativa P_{Erel} se sustituye la potencia reactiva por la potencia reactiva relativa P_{Brel} de la ecuación (57b), con lo que se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_{Erel} = \frac{\cos \varphi_{cc}}{\operatorname{sen} \varphi_{cc}} P_{Brel} \operatorname{sen}^2 \varphi \quad (62)$$

obteniéndose con la ecuación anterior una curva de forma parabólica, esperada ya por la ecuación (58). Para el cálculo de esta curva es tomada en cuenta la relación del ángulo de fase de corto circuito $\cos \varphi_{cc} / \operatorname{sen} \varphi_{cc}$ de la siguiente forma:

$$\frac{\cos \varphi_{cc}}{\operatorname{sen} \varphi_{cc}} = \frac{R_E}{X_T}$$

- Para la potencia del arco relativa P_{arel} vale la siguiente deducción: la potencia del arco P_a se puede escribir desde la ecuación (29) de la siguiente forma:

$$P_a = P_w - P_E \quad (63)$$

Refiriendo lo anterior a la potencia del arco relativa queda de la siguiente forma:

$$P_{arel} = P_{wrel} - P_{Erel} \quad (64)$$

La curva resultante es menor a la potencia del sistema debido a la potencia de pérdida teórica P_E . El máximo se obtiene antes que para el de la potencia del sistema, es decir para un $\cos\phi$ más grande. Este punto y su posición son dados en la Fig. 9.

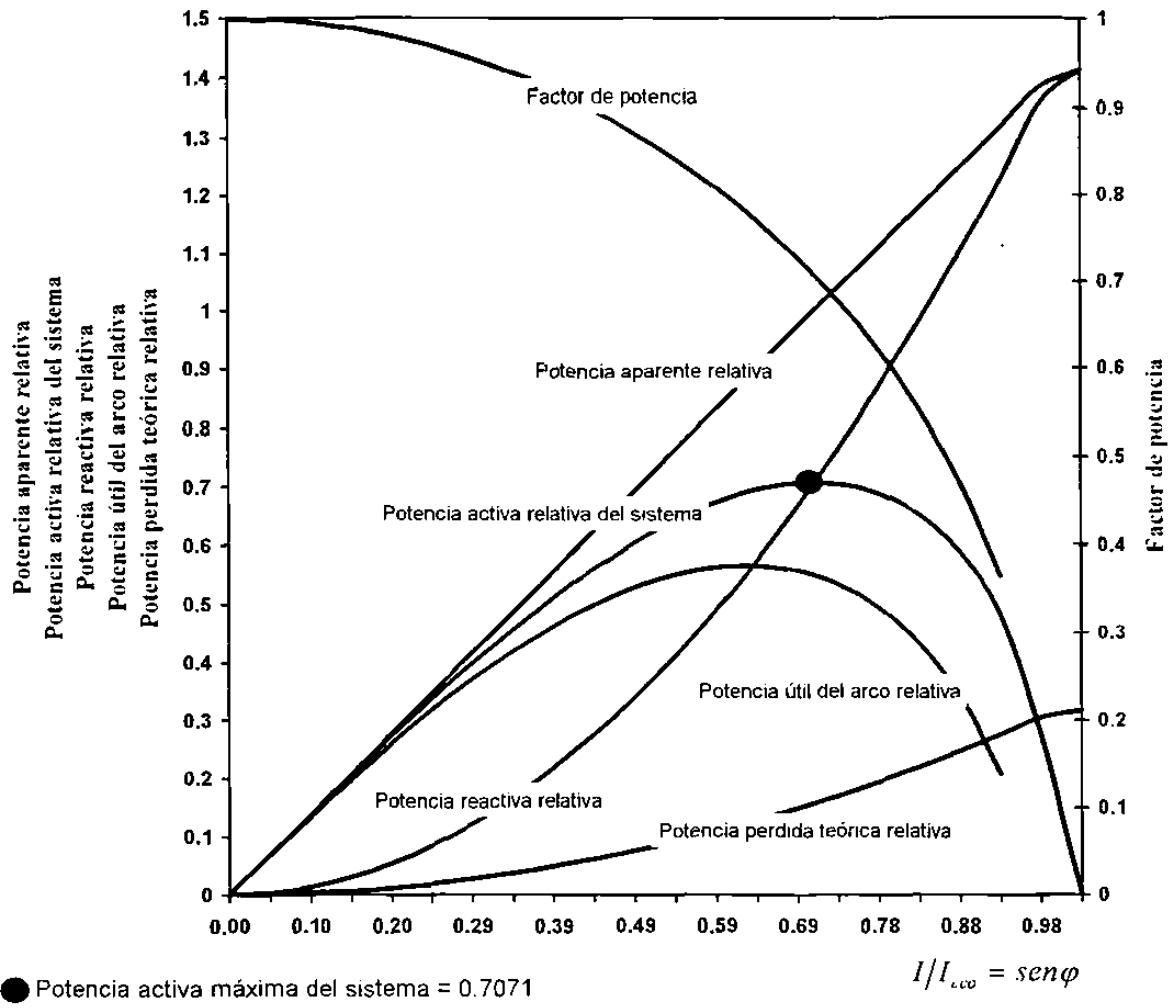


Fig. 9. Diagrama de curvas características de potencias relativas de un HAE.

Con la ayuda de las ecuaciones anteriores puede ser calculado y trazado el diagrama de potencias con las curvas características de potencias relativas presentado por Lünig³⁾. La Fig. 9. muestra este diagrama de potencias. Las curvas características son trazadas contra la corriente relativa de cortocircuito $I/I_{cco} = \text{sen}\phi$; además para complemento es proporcionada la curva de factor de potencia $f_p = \text{cos}\phi$ para permitir una rápida determinación del punto de trabajo por medio de este diagrama; esto mismo es aplicado en los subsecuentes diagramas.

Los siguientes puntos no encontrados en la literatura complementan el diagrama de potencias presentado en la Fig. 10:

- Para la potencia relativa real se da una relación parecida a la de potencia de pérdida relativa teórica:

$$P_v = 3 I^2 R_v \quad (65)$$

Apoyándose en la ecuación (61) puede ser sustituida la relación $\cos\varphi_v/\text{sen}\varphi_v$, la que se presenta para el factor de potencia cuando aún en corto circuito la resistencia pura de pérdida R_v existiera en el circuito de corriente. La ecuación (65) queda de la siguiente forma:

$$P_v = \frac{\cos\varphi_v}{\text{sen}\varphi_v} P_B \quad (66)$$

y para valores relativos se sustituye P_B por la ecuación (47a) y ésta por la (57b):

$$P_{vrel} = \frac{\cos\varphi_v}{\text{sen}\varphi_v} P_{cc(orel)} \text{sen}^2\varphi \quad (67)$$

Esta relación arroja nuevamente una parábola. Para el cálculo de esta curva es tomada la relación del ángulo de fase $\cos\varphi_v/\text{sen}\varphi_v$ de la siguiente forma:

$$\frac{\cos\varphi_v}{\text{sen}\varphi_v} = \frac{R_v}{X_T}$$

- Para la potencia útil relativa P_{orel} se puede usar una relación parecida a la de la potencia del arco eléctrico relativa P_{arel} , de manera que de la ecuación (38) se obtiene lo siguiente:

$$P_{orel} = P_{wrel} - P_{vrel} \quad (68)$$

Con esta relación se obtiene una curva de potencia útil relativa inferior a la de la potencia del sistema debido al valor de la potencia de pérdida relativa. Bajo este concepto se puede determinar el máximo de la potencia útil y su posición con respecto al punto de trabajo u operación; en este punto es la potencia útil del horno máxima posible alcanzada. La potencia útil del horno cae tan pronto este punto es sobrepasado y para $\text{sen}\varphi_v$ es igual a cero.

- La eficiencia eléctrica de un HAE es definida como el cociente de la potencia útil, la que en verdad es transformada en calor, y la potencia del equipo instalado, es decir la potencia eléctrica alimentada:

$$\eta_e = \frac{P_u}{P_w} = \frac{P_{u\text{rel}}}{P_{w\text{rel}}} \quad (69)$$

La curva que describe esta ecuación se muestra en la Fig. 10., ésta cae ligeramente hasta alcanzar el punto máximo de la potencia útil del horno; pero para $\text{sen}\varphi_v$ es igual a cero, dónde la potencia activa total alimentada es transformada como potencia perdida. Para complementar la Fig. 10. se muestran también las curvas de la potencia activa relativa del equipo $P_{w\text{rel}}$ y de la potencia de pérdida real relativa $P_{v\text{rel}}$. Con ello la Fig. 10. presenta el diagrama de potencias completo describiendo las ecuaciones eléctricas. Si se considera la corriente en vacío del transformador así como su potencia en vacío, la curva no iniciaría en el punto cero del sistema coordinado, sino que sería desplazado a la derecha del mismo. Los cálculos de estas curvas son presentados en la Tabla 1. Es importante recalcar que los valores relativos para la potencia de pérdida, potencia de arco y potencia útil valen naturalmente sólo para las relaciones de ángulo de fase $\cos\varphi_{cc}/\text{sen}\varphi_{cc}$ así como $\cos\varphi_v/\text{sen}\varphi_v$, como fue ya demostrado. Con esto queda descrito en principio el comportamiento eléctrico de los Hornos de Arco Eléctrico Trifásicos.

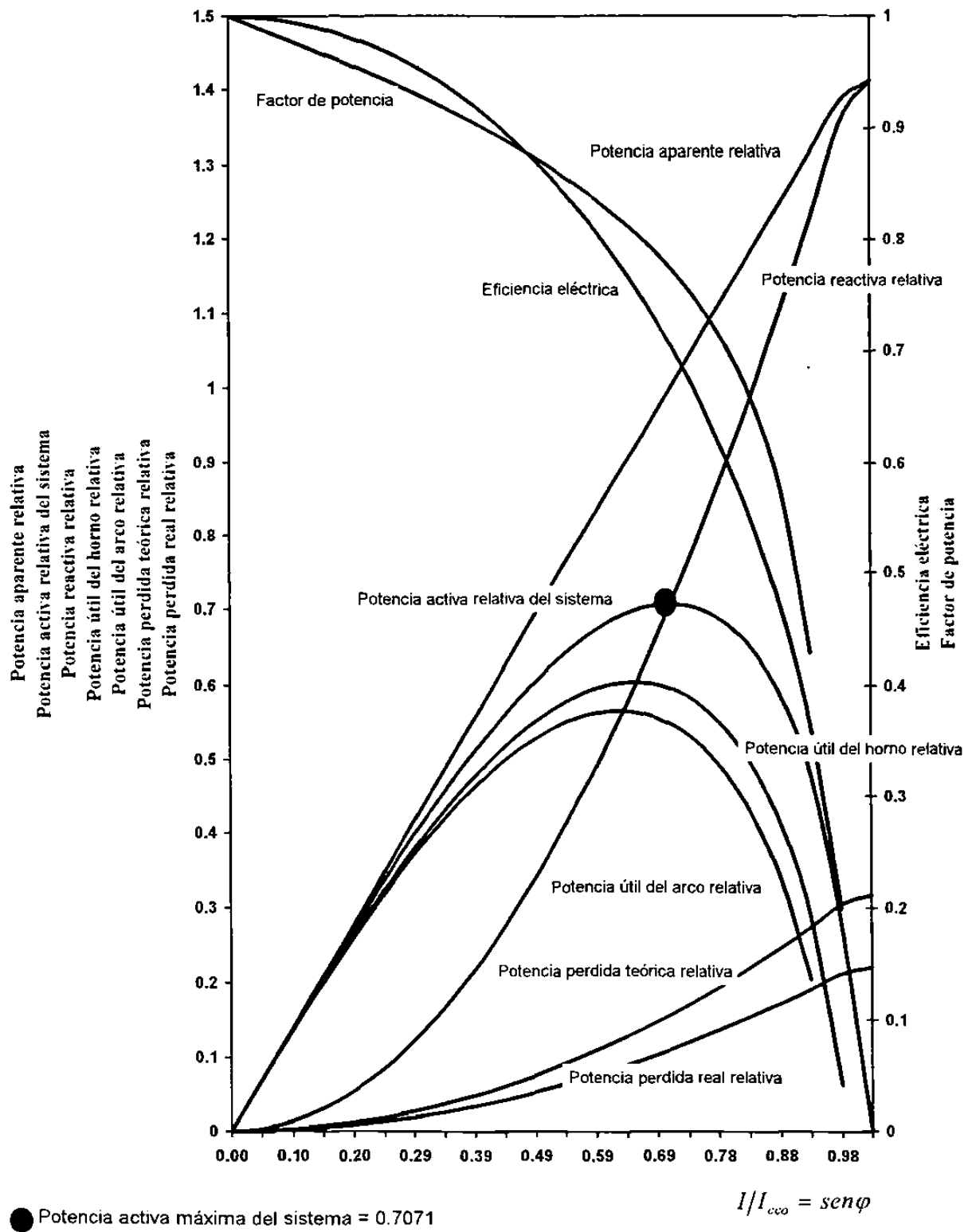


Fig. 10. Diagrama de Potencias completo con las curvas de potencias relativas útil del horno y pérdida real.

Tabla 1. Cálculos del diagrama de potencias relativas con eficiencia eléctrica y factor de potencia de la Fig. 10.

$I_{m\%}$	Potencia aparente relativa	Potencia activa del sistema relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia	Potencia de pérdida real relativa	Potencia útil del horno relativa
0.00049	0.000693	0.000693	3.40E-07	7.61E-08	0.000692	0.999890	0.99999	5.33E-08	0.000692
0.04900	0.069300	0.069216	0.00339	0.000761102	0.068455	0.989004	0.998798	0.000532	0.068684
0.09800	0.138600	0.137932	0.01358	0.003044407	0.134888	0.97792	0.995185	0.002131	0.135801
0.14700	0.207900	0.205641	0.03056	0.006849915	0.198791	0.966690	0.989135	0.004794	0.200846
0.19601	0.277200	0.271823	0.054334	0.012177627	0.259645	0.955200	0.980601	0.008524	0.263298
0.24501	0.346500	0.335938	0.084897	0.019027543	0.316911	0.943360	0.969519	0.013319	0.322619
0.29401	0.415800	0.397422	0.122251	0.027399662	0.370022	0.931056	0.955800	0.019179	0.378242
0.34301	0.485100	0.455668	0.166398	0.037293984	0.418374	0.918155	0.939328	0.026105	0.429563
0.39202	0.554400	0.510024	0.217336	0.04871051	0.461313	0.904493	0.919956	0.034097	0.475927
0.44102	0.623700	0.559768	0.275066	0.061649239	0.49811	0.889866	0.897495	0.043154	0.516614
0.49002	0.693000	0.604094	0.339588	0.076110172	0.527984	0.874009	0.871708	0.053277	0.550817
0.53902	0.762300	0.642076	0.410901	0.092093308	0.549983	0.856569	0.842287	0.064465	0.577611
0.58803	0.831600	0.672630	0.489006	0.109598647	0.563032	0.837059	0.808838	0.076719	0.595911
0.63703	0.900900	0.694447	0.573903	0.12862619	0.565821	0.814779	0.770836	0.090038	0.604408
0.68603	0.970200	0.705887	0.665592	0.149175936	0.556711	0.788668	0.727567	0.104423	0.601463
0.73503	1.039501	0.704808	0.764073	0.171247886	0.533560	0.757029	0.678025	0.11987	0.584934
0.78404	1.108801	0.688243	0.86934	0.194842039	0.493401	0.716899	0.620709	0.136389	0.551853
0.8330	1.178101	0.651734	0.981409	0.219958396	0.431776	0.662503	0.553207	0.153970	0.497763
0.8820	1.247401	0.587729	1.100265	0.246596956	0.341133	0.580424	0.471163	0.172617	0.415112
0.9310	1.316701	0.480458	1.225912	0.274757719	0.205700	0.428134	0.364895	0.192330	0.288128
0.9800	1.386001	0.275462	1.358352	0.304440686			0.198746	0.213108	0.062354
0.9999	1.414213	0.000578	1.414213	0.316960604				0.22187	

2.2. Fundamentos Termodinámicos

2.2.1. Conceptos Generales⁴⁵⁾⁴⁶⁾

La termodinámica es una parte de la ciencia que involucra los principios de transferencia de la energía en sistemas macroscópicos. Las restricciones generales que mediante la experiencia han mostrado ser aplicables en todos los tipos de transformaciones son conocidas como leyes de la termodinámica. Estas leyes son primitivas y no pueden ser derivadas desde nada más básico. La primera ley de la termodinámica establece que la energía se transforma, que puede ser alterada en su forma y transferida desde un lugar a otro y que la cantidad total permanece constante. Entonces la

primera ley de la termodinámica depende del concepto de la energía, pero inversamente la energía es una función termodinámica esencial porque mediante ésta es formulada la primera ley. Este acoplamiento es característico de los conceptos primitivos de la termodinámica.

Las palabras *sistema* y *medio ambiente* son similarmente acoplados. Un *sistema* es tomado como cualquier objeto, cualquier cantidad de materia, cualquier región, etc.; el cual se selecciona para estudio y se separa (mentalmente) de cualquier otra cosa, la que es llamada *medio ambiente*. La envoltura imaginaria que encierra al *sistema* y lo separa de su *medio ambiente* es llamada *frontera del sistema*. Esta frontera puede ser imaginada a tener propiedades especiales las que pueden servir como: 1) aislar al *sistema* de su *medio ambiente* ó 2) proporcionar caminos específicos de interacción entre *sistema* y *medio ambiente*. Un *sistema aislado* no puede intercambiar ni materia ni energía con su medio ambiente; si un *sistema* no está aislado, su frontera puede ser imaginada tal que permita cambio de materia y/o energía con el medio que lo rodea. Si el intercambio de materia es permitido, se dice que el *sistema está abierto*; si únicamente la energía y no la materia puede ser intercambiada, se dice que el *sistema está cerrado* (pero no aislado) y su masa es constante.

Cuando un *sistema* está aislado no puede ser afectado por su *medio ambiente*; sin embargo pueden ocurrir cambios en el *sistema* que son detectados con instrumentos de medición tales como termómetros, medidores de presión, etc. Además tales cambios no pueden continuar indefinidamente y el *sistema* debe alcanzar eventualmente una condición estática final de *equilibrio* interno.

El concepto *equilibrio* es un tema central en termodinámica, asociado a éste está el concepto de *estado*. **Un sistema tiene un estado reproducible e identificable cuando todas sus propiedades son determinadas.** Los conceptos de *estado* y *propiedad* son igualmente acoplados. Se puede igualmente bien decir que las *propiedades* de un *sistema* son determinadas por su *estado*. Ciertas *propiedades* son determinadas por instrumentos de medición tales como termómetros y medidores de presión. La existencia de otras *propiedades*, tal como la *energía interna*, son determinadas indirectamente. El número de *propiedades* que se deben agrupar en valores dados para determinar el estado de un *sistema* dependen del *sistema* mismo y deben ser determinadas mediante la experimentación.

Cuando un *sistema* es desplazado desde un *estado de equilibrio*, se corre un *proceso* durante el cual sus *propiedades* cambian hasta que un nuevo *estado de equilibrio* es alcanzado. Durante un *proceso* el *sistema* puede ser encausado para interactuar con su *medio ambiente* tal como intercambiar energía en forma de **trabajo y calor**, de esta manera producir en el *sistema* o *medio ambiente* cambios considerados deseables por una razón u otra.

2.2.2. Energía Interna, Trabajo y Calor

El postulado número 1 de la termodinámica afirma lo siguiente: *Existe una forma de energía conocida como energía interna U , la cual para sistemas en equilibrio es una propiedad intrínseca, funcionalmente relacionada a las coordenadas medibles que caracterizan al sistema.* El postulado número 2 establece que: *La energía total de cualquier sistema y el medio que lo rodea es conservada (primera ley de la termodinámica).* La energía interna es distinta de las energías cinéticas y potenciales, las cuales son formas externas de energía. En aplicaciones de la primera ley de la termodinámica todas las formas de energía deben ser consideradas incluyendo la energía interna, por lo que es claro que el postulado 2 depende del postulado 1. Para un sistema aislado la primera ley requiere que su energía sea constante; Para un sistema cerrado pero no aislado la primera ley requiere el cambio de energía del sistema sea exactamente compensado por el cambio de energía en el medio que lo rodea. Para tales sistemas la energía es intercambiada en dos formas: trabajo y calor.

Calor es energía atravesando la frontera del sistema bajo la influencia de una diferencia o un gradiente de temperatura. Una cantidad de calor Q representa una cantidad de energía en tránsito entre un sistema y el medio que lo rodea y no es una propiedad del sistema. La convención usual con respecto a los signos requiere que valores numéricos de Q sean positivos cuando éste es añadido al sistema y como negativo cuando el calor sale del sistema. **Trabajo** es también energía en tránsito entre un sistema y el medio que lo rodea pero proveniente del desplazamiento de una fuerza externa actuando sobre el sistema, al igual que el calor éste no es una propiedad del sistema. La convención de signos requiere que valores numéricos de trabajo W sean positivos cuando el trabajo es

proporcionado por el sistema y como negativo cuando el trabajo es proporcionado al sistema; por lo que W tiene el sentido opuesto de Q .

Aplicando a sistemas cerrados (masa constante) en los que la única forma de energía que cambia es la energía interna, la primera ley de la termodinámica es expresada de la siguiente manera:

$$dU = dQ - dW \quad (70)$$

integrando la relación anterior:

$$\Delta U = Q - W \quad (71)$$

dónde Δ significa la diferencia entre los valores inicial y final de U . En nuestro caso el término W es descartado puesto que no existe ninguna forma de trabajo por desplazamientos, por lo que la expresión (71) se reduce y se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta U = Q_e - Q_s \quad (72)$$

dónde Q_e y Q_s representan los calores de entrada y salida del sistema respectivamente los que serán definidos en la sección 4.2.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL HAE PARA FUSIÓN DE MAGNESIA GRADO REFRACTARIO DEL GRUPO PEÑOLES

3.1. El Horno de Fusión

La unidad de fusión de óxidos de Peñoles cuenta con 37 ollas disponibles para fusión de MgO, las cuales son removibles del cuarto del horno. Una olla de fusión consta de dos partes: el carro de fusión y la coraza; el carro de fusión sirve para contener y transportar el lingote obtenido después de la fusión; la coraza sirve para contener el material alimentado para fundir así como el que rodea al lingote una vez terminada la fusión. Las geometrías de la coraza y del carro del horno son mostradas en las Figs. 11 y 12., y sus dimensiones guardan las proporciones dadas también en las mismas figuras. Los electrodos son de grafito con una longitud de 1860 mm y diámetro de 304.8 mm, son enfriados con una solución líquida a través de las mordazas que los sujetan al igual que los cables flexibles.

3.2. El Transformador Eléctrico

Para poder hacer un buen análisis de optimización de un equipo o proceso industrial es necesario en primer lugar conocer el alcance de ellos, es decir conocer su capacidad de trabajo disponible. Para

esto es necesario caracterizarlo de acuerdo a los datos de diseño del mismo y con esta información trazar las curvas de trabajo disponible.

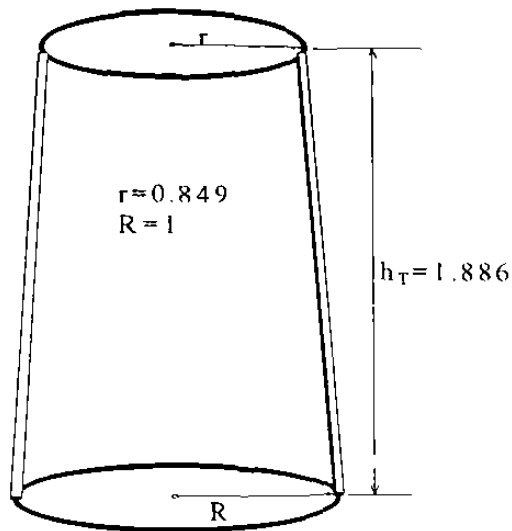


Fig. 11. Geometría de la coraza con dimensiones relativas al radio inferior.

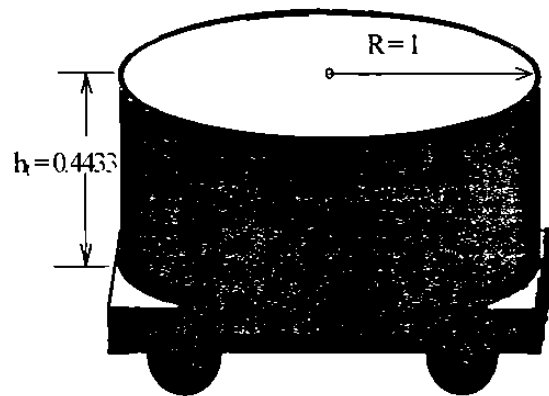


Fig. 12. Geometría del carro del horno con dimensiones relativas al radio.

La instalación de fusión de MgO de SIPSA de C.V. (Servicios Industriales Peñoles S.A. de C.V.) esta conectado a una red trifásica de 115 KV y consta básicamente de dos transformadores: el transformador principal con una capacidad nominal de 10 MVA y una relación de transformación de 115 KV/13.8 KV, y el transformador del horno cuyas características son dadas en la Tabla 2. El diagrama de conexión eléctrica fue ya mostrado en la Fig. 1. de la sección 3.1.

Tabla 2. Características principales del transformador del HAE de SIPSA.

Característica	Valor
Capacidad nominal	6.25 MVA
Relación de transformación	13.8 KV / 100 - 250 V
Frecuencia	60 Hertz
Número de taps	4
Niveles de voltaje secundario en cada tap	3
Total de niveles de voltaje secundario	12

El transformador del horno posee 12 niveles de voltaje los que pueden ser obtenidos mediante tres conexiones distintas del reactor, resultando 4 taps cada uno con un nivel de voltaje en operación disponible y 2 más opcionales al cambiar la conexión del reactor. Los taps del transformador son intercambiables en el lado primario dónde también se realiza el cambio de conexión delta-estrella. El lado secundario esta siempre conectado en delta.

3.2.1. Consideraciones y Simplificaciones

Para obtener la capacidad de trabajo disponible del horno durante la fusión, es necesario tomar ciertas consideraciones que permitan simplificar el análisis para una mejor y más rápida comprensión del comportamiento eléctrico del mismo; estas consideraciones son listadas a continuación:

- Debido a la distribución heterogénea de la carga en el horno generalmente las curvas de potencia en cada fase eléctrica del transformador no son iguales y se dice que se tiene un *sistema de cargas eléctricas asimétricas*. Por lo contrario cuando la distribución del material dentro del horno es homogénea entonces los flujos de corrientes de arco en cada fase eléctrica son iguales y se dice que se tiene un *sistema de cargas eléctricas simétricas*. Para obtener una fusión de material uniforme el operario del horno tiene la tarea de mantener los flujos de corrientes de arco en cada fase eléctrica iguales, es decir debe mantener la fusión bajo la condición del *sistema de cargas eléctricas simétricas*. Bajo los principios citados arriba se considera en este análisis que el equipo opera en condiciones de *cargas eléctricas simétricas*.
- Cuando el arco eléctrico aún no es encendido existe en el transformador una corriente llamada *corriente de vacío del transformador*, la que a su vez ocasiona una *potencia de vacío del mismo*. Este efecto ocasiona un desplazamiento pequeño a la derecha de las curvas de potencia cuando son trazadas contra la corriente de operación del arco; de acuerdo a la literatura este efecto es muy pequeño comparado con los niveles de potencia que se manejan por lo que en este trabajo es descartado.

- Se considera además que los valores de resistencia óhmica de cada fase son iguales así como los valores de reactancia.
- De acuerdo a Lünig⁴⁾ la reactancia en el arco eléctrico es descartada ya que ésta es causada por campos magnéticos alternos y su influencia es insignificante para las longitudes de arco manejadas en el proceso.
- Considerando que las caídas de tensión primaria en los transformadores eléctricos a plena carga son pequeñas comparadas con la tensión original, se descartan estas fluctuaciones y sus efectos que por lo mismo se consideran insignificantes.

En vista que paralelo al transformador eléctrico del horno se encuentra conectado un banco de capacitores y como aquí se pretende analizar solamente el comportamiento del horno, se toma en cuenta el circuito fundamental mostrado en la Fig. 2. de la sección 2.2.1 pero descartando la resistencia y la reactancia del transformador principal. Mediante los datos de diseño del transformador han sido determinados los valores de reactancia inductiva total X_T que aquí son usados para el análisis, estos valores son proporcionados en % en la Tabla 3.

Tabla 3. Porcentaje de reactancias del transformador del horno para los distintos niveles de voltaje.

Nivel de Voltaje	Reactancia Total Calculada con Datos de Diseño del Horno y la Instalación X_T (%)	Reactancia Total Calculada Durante la Operación del Horno X_{Tf} (%)
1	100	100
2	88.91	
3	77.90	78.78
4	70.82	
5	66.22	
6	61.26	60.56
7	57.94	
8	51.45	
9	44.97	45.03
10	40.71	
11	38.24	
12	35.41	

Debido a que los valores entre los medidos y los calculados son muy próximos se decidió trabajar aquí con los que se calcularon de acuerdo al diseño del transformador del horno y de la

instalación eléctrica; en el apéndice A se presentan las tablas de las lecturas tomadas para obtener los datos medidos de la tercer columna en la Tabla 3. Por otro lado, se sabe que la resistencia de un conductor eléctrico depende de su longitud l_L , de su área transversal A_L y del valor de su resistividad eléctrica ρ_L (definida como resistencia que un conductor de 1 m de longitud y sección transversal de 1 mm² expone al paso de la corriente); las longitudes fueron medidas físicamente y mediante su calibre se determinó su sección transversal, mientras que considerando que los conductores son de cobre, de la literatura¹¹⁾ se obtuvo el valor de su resistividad eléctrica, $\rho_{LCu} = 0.0175 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$; con estos datos y la relación $R_L = \rho_L l_L / A_L$ fue factible calcular el valor de la resistencia óhmica de los conductores flexibles del horno cuyo valor arrojado y considerado en este trabajo es de $R_L = 0.17268 \text{ m} \Omega$.

De la misma forma ha sido calculada la resistencia eléctrica de los electrodos usada en este trabajo, lo que ha sido basado en un valor de resistividad eléctrica de electrodos de grafito de $\rho_{LG} = 22.875 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ ¹²⁾ resultando un valor de resistencia óhmica de electrodos de $R_e = 1.254 \times 10^{-3} \Omega$. De acuerdo a Ameling⁵⁾ y como se discutió ya en la sección 2.1.2.1., aquí también se considera que la resistencia de los conductores de alta corriente R_L más la de los electrodos R_e representan el 90% de la resistencia total del circuito instalado R_E , cuyo valor es de $R_E = 1.58521 \times 10^{-3}$.

- Según Schwabe⁶⁾ y como se discutió ya en la sección 2.1.2.1., se considera aquí que el 30% de la potencia considerada como pérdida a través de la resistencia R_L es convertida en calor y aprovechada por la carga de material en el horno y el 70% se pierde.

Con lo anterior, los valores de resistencia útil R_u y de pérdida R_p obtenidos y usados aquí son $4.755 \times 10^{-4} \Omega$ y $1.1096 \times 10^{-3} \Omega$ respectivamente. Adoptando estas realidades se muestra en la Fig. 13. el circuito eléctrico fundamental para el HAE analizado en este trabajo.

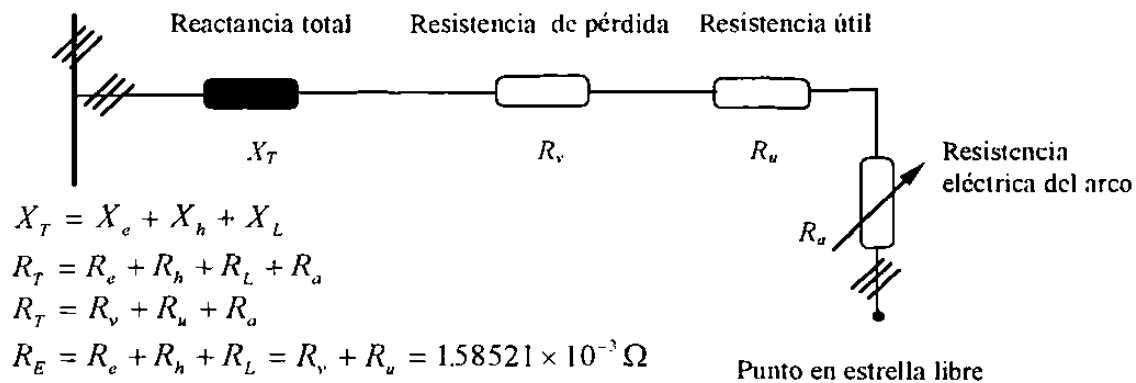


Fig. 13. Circuito equivalente fundamental del HAE usado en este trabajo.

3.2.2. El Diagrama Vectorial

Utilizando las ecuaciones (7) hasta la (47c) derivadas en la sección 2.1.2.2 y usando los datos de resistencia y reactancia dados en la sección anterior aplicados en el circuito equivalente de la Fig. 13., se obtiene el diagrama de potencias mostrado en la Fig. 14.

Aquí se ejemplifican solamente los cuatro niveles de voltaje que actualmente están disponibles en el horno de la planta; se muestran en el mismo diagrama los vectores de potencia perdida y de corto circuito para el nivel de voltaje 3, además se trazan las líneas de factor de potencia atravesando las cuatro curvas de potencia indicando con ello los puntos máximos disponibles en el sistema para un factor de 0.7071.

Este tipo de diagramas es de gran utilidad para el operario del horno ya que puede determinar de manera directa y rápida el punto de trabajo eléctrico deseado para cualquier nivel de voltaje, detectando la potencia activa suministrada, la potencia reactiva y el factor de potencia de operación de manera que pueda realizar en el momento correcciones de operación eléctrica.

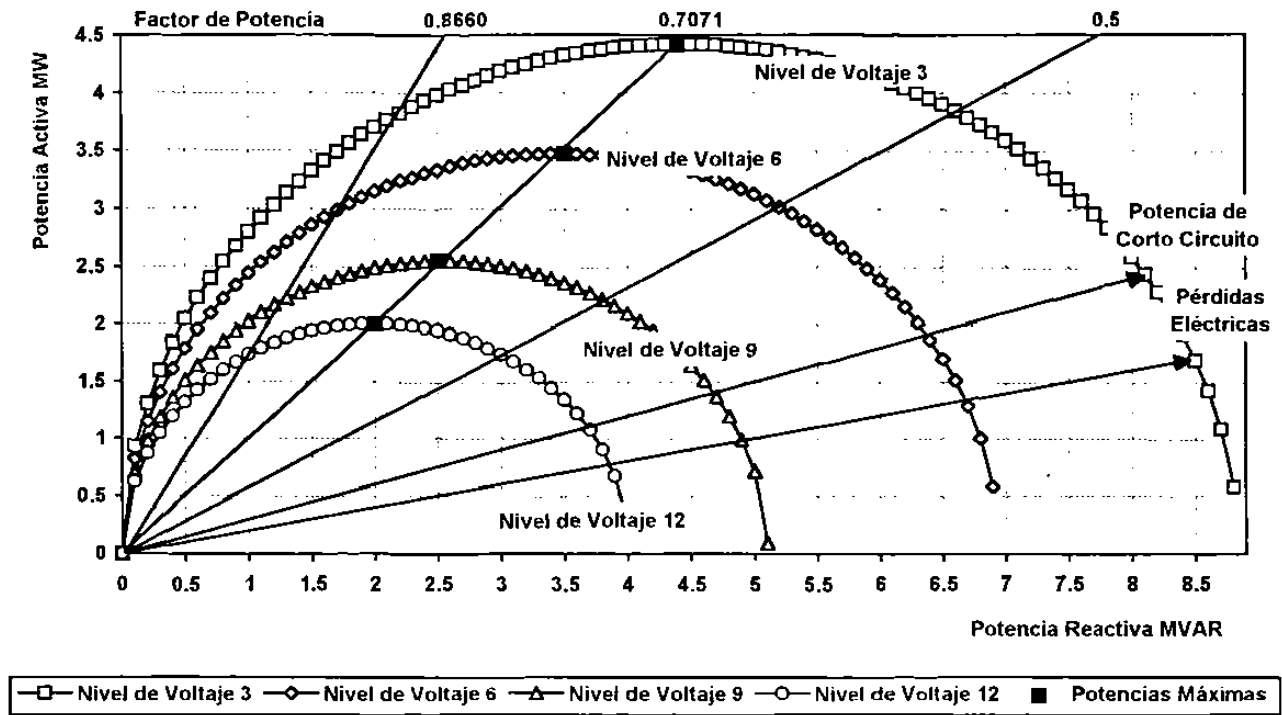


Fig. 14. Diagrama de potencias para cuatro niveles de voltaje del horno de arco eléctrico para fusión de magnesita del Grupo Peñoles.

3.2.3. Las Curvas Características de Potencia

Usando las ecuaciones definidas en la sección 2.1.2.3 son obtenidos los datos para construir las curvas características de potencia presentadas en las Figs. 15. a 26., mientras que en las Tablas 4. a 15. se proporcionan los datos. Tal como fue obtenido en la ecuación (49c) el valor de potencia relativa de corto circuito P_{ccorel} , es igual a $1.4142 (\sqrt{2})$.

Por otro lado, tal como se demostró con la ecuación (50) la corriente de arco relativa es igual al cociente de la corriente de arco entre la corriente de corto circuito y a su vez es igual a $\text{sen } \phi$, donde ϕ es el ángulo de defasamiento entre el voltaje y la corriente. Con estos conceptos y la ecuación (55):

$$S_{rel} = P_{ccorel} \cdot \text{sen} \varphi$$

se calculan los datos y se construye la curva de potencia aparente relativa S_{rel} . En suma las ecuaciones usadas para construir las curvas características de potencia del horno de arco de Peñoles se dan a continuación:

$$P_{wrel} = P_{ccorel} \cdot \text{sen} \varphi \sqrt{1 - \text{sen}^2 \varphi} \quad (56c)$$

$$P_{Brel} = P_{ccorel} \cdot \text{sen}^2 \varphi \quad (57b)$$

$$P_{Erel} = \frac{\text{cos} \varphi_{cc}}{\text{sen} \varphi_{ca}} P_{ccorel} \cdot \text{sen}^2 \varphi \quad (62)$$

$$P_{arel} = P_{wrel} - P_{Erel} \quad (64)$$

$$P_{vrel} = \frac{\text{cos} \varphi_v}{\text{sen} \varphi_v} P_{ccorel} \cdot \text{sen}^2 \varphi \quad (67)$$

$$P_{orel} = P_{wrel} - P_{rel} \quad (68)$$

$$\eta_e = \frac{P_o}{P_w} = \frac{P_{orel}}{P_{wrel}} \quad (69)$$

Todas las curvas son trazadas contra la corriente relativa de operación del arco eléctrico y en cada gráfica se presenta además la curva de factor de potencia en función de la misma corriente. Las consideraciones eléctricas citadas en la sección anterior han sido consideradas para la construcción de estos diagramas.

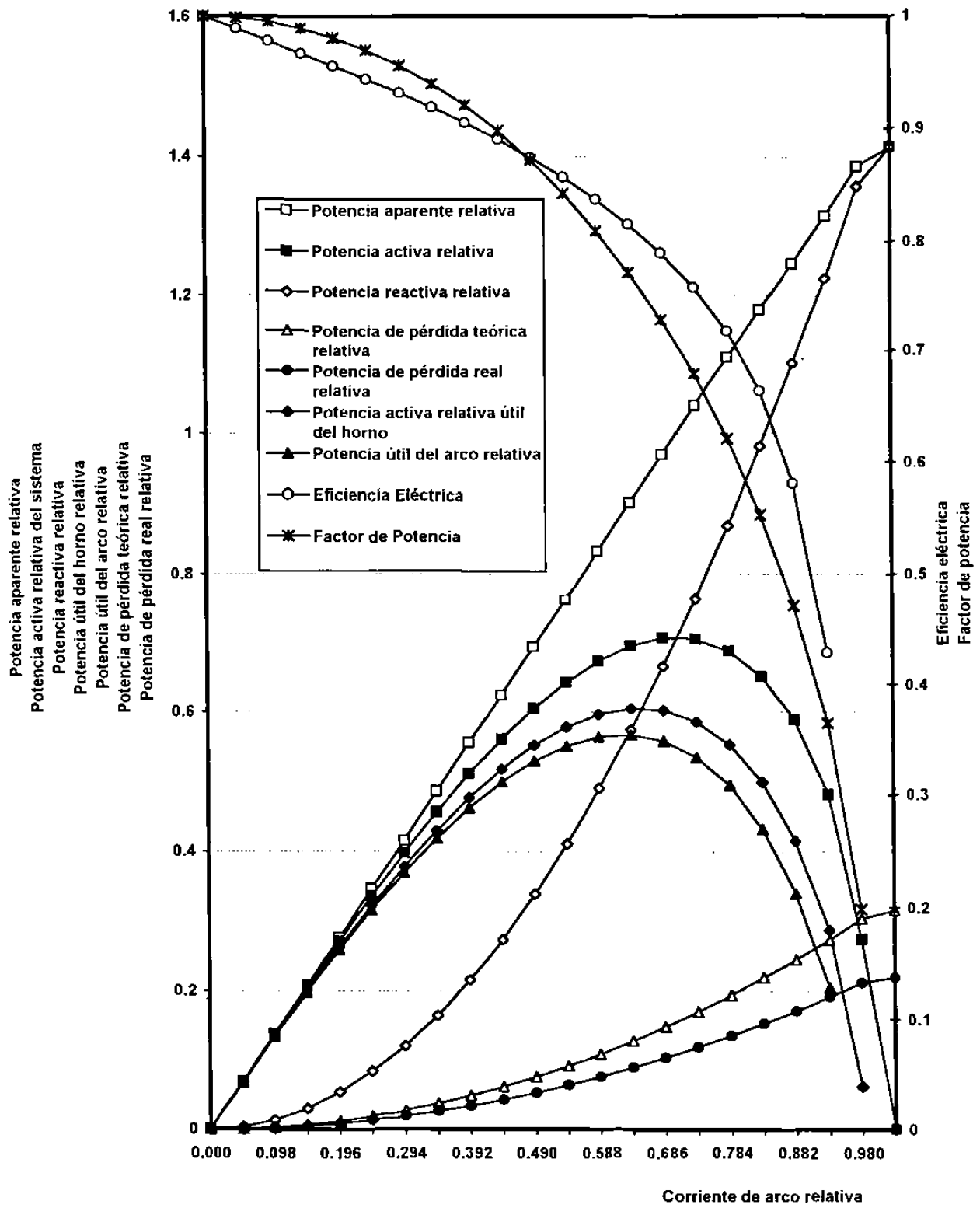


Fig. 15. Diagrama de potencias completo para el voltaje del nivel 1 del Horno de Arco Eléctrico para fusión de Magnesita del Grupo Industrial Peñoles.

1020119962

Tabla 4. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 1 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi = I/I_{cc}$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000490025	0.0006930	0.0006930	3.40E-07	7.61E-08	5.33E-08	0.0006929	0.000692924	0.999890173	0.9999998
0.049002549	0.0693000	0.0692168	0.0033958	0.0007611	0.0005327	0.0686840	0.068455714	0.989004092	0.9987986
0.098005098	0.1386001	0.1379329	0.0135835	0.0030444	0.0021310	0.1358018	0.134888499	0.97792835	0.9951859
0.147007647	0.2079002	0.2056414	0.0305629	0.0068499	0.0047949	0.2008465	0.198791531	0.966690005	0.9891353
0.196010196	0.2772002	0.2718231	0.0543340	0.0121776	0.0085243	0.2632987	0.259645479	0.955200176	0.9806018
0.245012745	0.3465003	0.3359389	0.0848970	0.0190275	0.0133192	0.3226196	0.316911424	0.94336012	0.9695198
0.294015294	0.4158004	0.3974223	0.1222516	0.0273996	0.0191797	0.3782425	0.370022673	0.931056563	0.9558007
0.343017843	0.4851004	0.4556688	0.1663981	0.0372939	0.0261057	0.4295631	0.418374915	0.91815552	0.9393288
0.392020391	0.5544005	0.5100244	0.2173363	0.0487105	0.0340973	0.4759270	0.461313899	0.904493767	0.9199565
0.44102294	0.6237006	0.5597687	0.2750662	0.0616492	0.0431544	0.5166142	0.49811947	0.889866586	0.8974958
0.490025489	0.6930006	0.6040943	0.3395880	0.0761101	0.0532771	0.5508172	0.527984149	0.874009457	0.8717081
0.539028038	0.7623007	0.6420766	0.4109014	0.0920933	0.0644653	0.5776113	0.549983341	0.856569604	0.8422878
0.588030587	0.8316008	0.6726309	0.4890067	0.1095986	0.0767190	0.5959118	0.563032281	0.837059757	0.8088386
0.637033136	0.9009009	0.6944472	0.5739037	0.1286261	0.0900383	0.6044088	0.565821033	0.814779028	0.7708364
0.686035685	0.9702009	0.7058870	0.6655924	0.1491759	0.1044231	0.6014639	0.556711139	0.788668837	0.7275678
0.735038234	1.0395010	0.7048083	0.7640730	0.1712478	0.1198735	0.5849348	0.533560491	0.757029156	0.6780256
0.784040783	1.1088011	0.6882431	0.8693452	0.1948420	0.1363894	0.5518537	0.493401135	0.716899424	0.6207093

Tabla 5. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 2 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi = I/I_{cc}$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000460656	0.0006514	0.0006514	3.00E-07	6.73E-08	4.71E-08	0.0006514	0.000651398	0.999896755	0.9999998
0.046065588	0.0651465	0.0650774	0.0030010	0.0006726	0.0004708	0.0646065	0.064404819	0.989664577	0.998798653
0.092131177	0.1302931	0.1297390	0.0120040	0.0026904	0.0018832	0.1278557	0.127048596	0.9792629	0.995185913
0.138196765	0.1954397	0.1935644	0.0270091	0.0060534	0.0042373	0.1893270	0.18751103	0.968726571	0.989135356
0.184262353	0.2605863	0.2561243	0.0480162	0.0107616	0.0075331	0.2485911	0.245362681	0.957982737	0.980601858
0.230327942	0.3257328	0.3169749	0.0750253	0.0168150	0.0117705	0.3052043	0.300159873	0.94695143	0.969519858
0.27639353	0.3908794	0.3756525	0.1080365	0.0242136	0.0169495	0.3587030	0.351438894	0.935542313	0.955800715
0.322459118	0.4560260	0.4316666	0.1470497	0.0329575	0.0230702	0.4085964	0.398709161	0.923650509	0.939328888
0.368524707	0.5211726	0.4844914	0.1920649	0.0430465	0.0301326	0.4543588	0.441444869	0.911151016	0.919956528
0.414590295	0.5863192	0.5335552	0.2430822	0.0544808	0.0381365	0.4954187	0.479074466	0.897890959	0.897495831
0.460655883	0.6514657	0.5782272	0.3001015	0.0672602	0.0470821	0.5311450	0.510966973	0.883678484	0.871708105
0.506721472	0.7166123	0.6177985	0.3631228	0.0813849	0.0569694	0.5608291	0.536413645	0.868266244	0.842287821
0.55278706	0.7817589	0.6514573	0.4321462	0.0968547	0.0677983	0.5836590	0.554602577	0.851325976	0.808838691
0.598852649	0.8469055	0.6782521	0.5071716	0.1136698	0.0795688	0.5986832	0.564582261	0.832407665	0.770836418
0.644918237	0.9120521	0.6970372	0.5881990	0.1318301	0.0922810	0.6047561	0.565207137	0.81087076	0.727567893
0.690983825	0.9771986	0.7063878	0.6752284	0.1513356	0.1059349	0.6004529	0.555052229	0.785761307	0.678025659
0.737049414	1.0423452	0.7044574	0.7682599	0.1721862	0.1205304	0.5839270	0.532271151	0.755576022	0.620709312

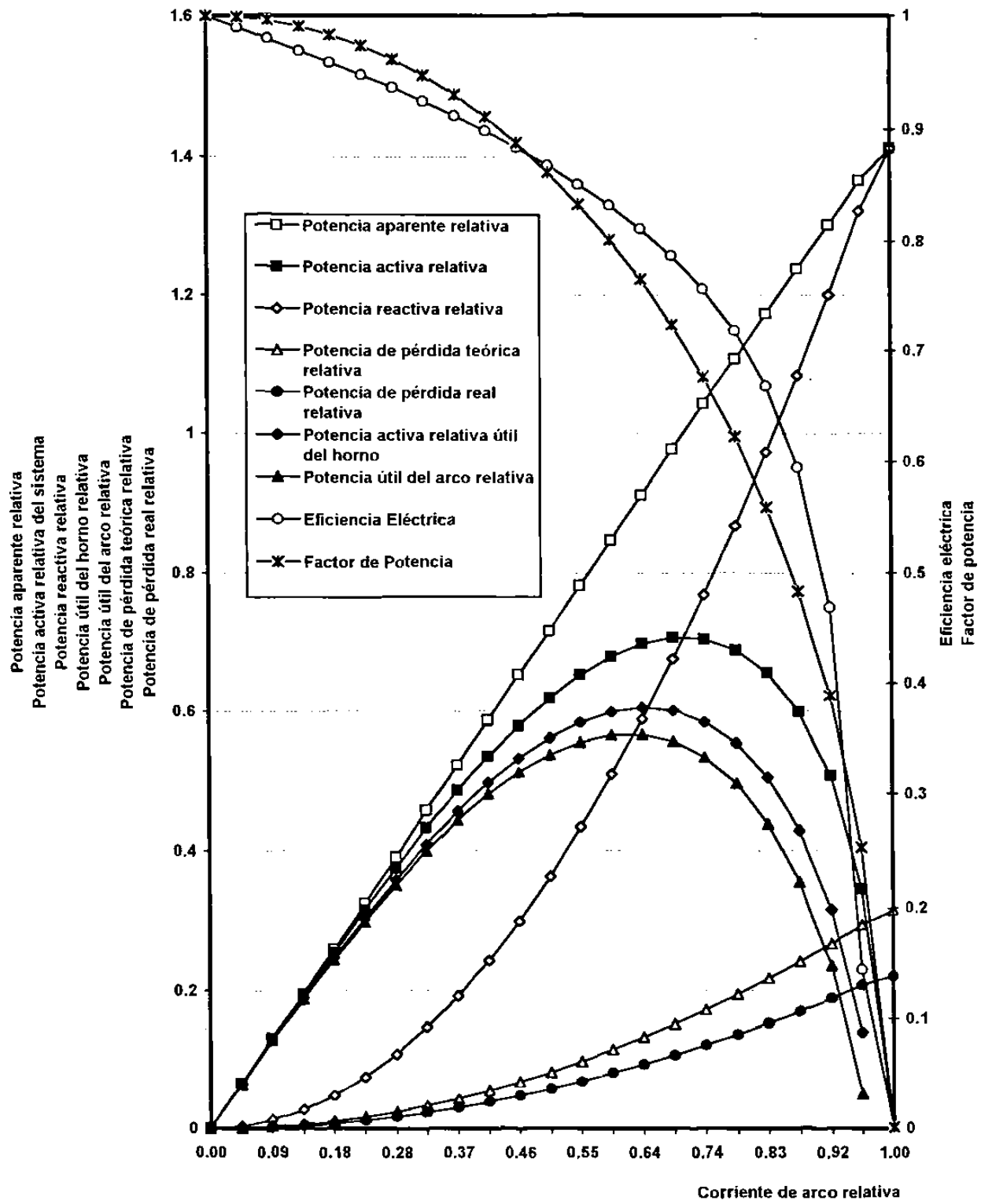


Fig. 16. Diagrama de potencias completo para el voltaje del nivel 2 del Horno de Arco Eléctrico para fusión de Magnesita del Grupo Industrial Peñoles.

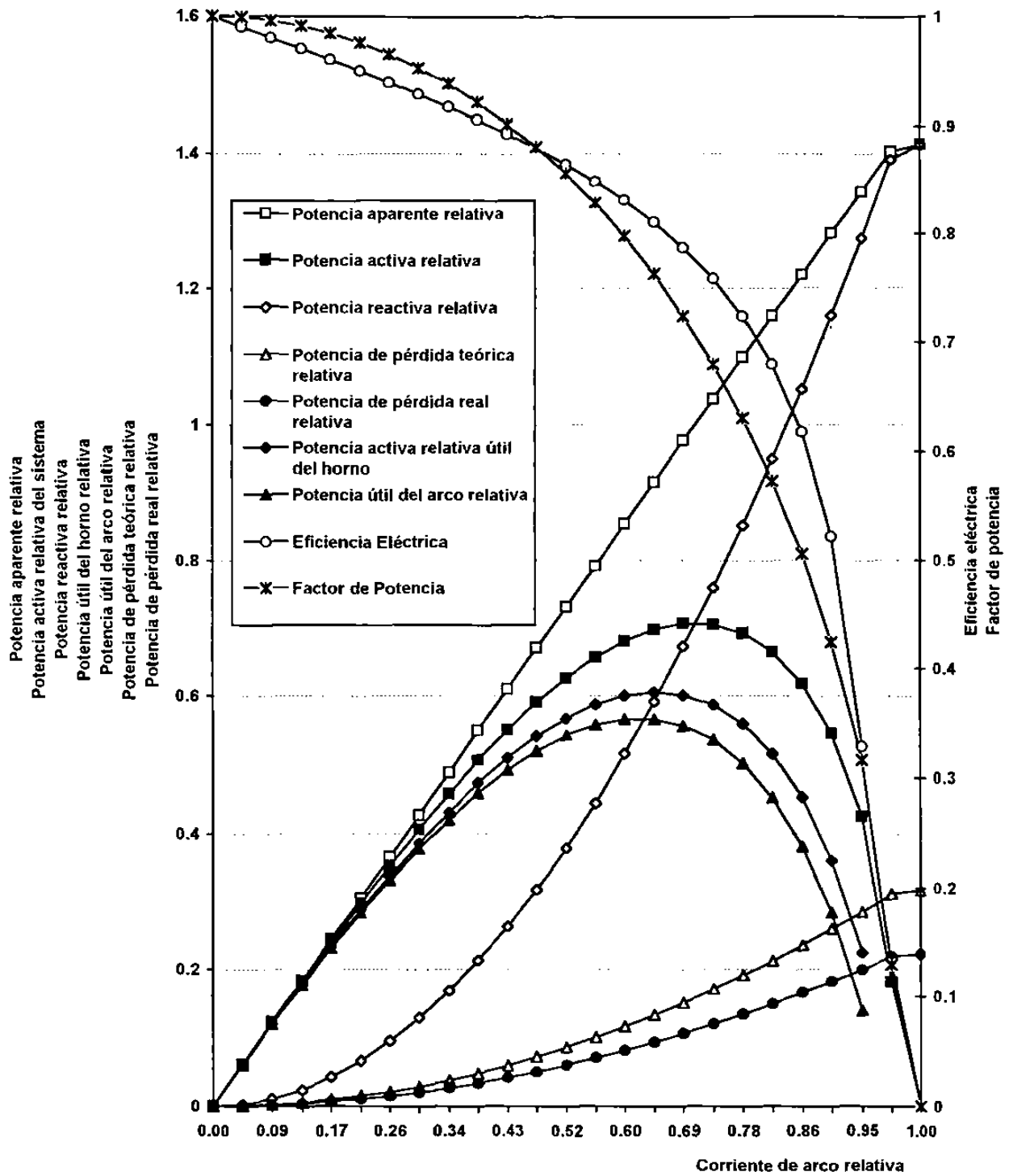


Fig. 17. Diagrama de potencias completo para el voltaje del nivel 3 del Horno de Arco Eléctrico para fusión de Magnesia del Grupo Industrial Peñoles

Tabla 6. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 3 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi=I/tcc$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000431163	0.0006097	0.0006097	2.63E-07	5.89E-08	4.12E-08	0.0006097	0.000609697	0.999903366	0.99999988
0.043116267	0.0609756	0.0609189	0.0026290	0.0005892	0.0004124	0.0605064	0.060329672	0.990327571	0.998798653
0.086232534	0.1219512	0.1214969	0.0105161	0.0023569	0.0016498	0.1198471	0.11914002	0.98060087	0.995185913
0.129348801	0.1829268	0.1813900	0.0236613	0.0053031	0.0037121	0.1776779	0.176086985	0.97076409	0.989135356
0.172465069	0.2439024	0.2402477	0.0420646	0.0094277	0.0065994	0.2336482	0.230819975	0.960758249	0.980601858
0.215581336	0.3048780	0.2977091	0.0657260	0.0147308	0.0103115	0.2873975	0.282978266	0.950519333	0.969519858
0.258697603	0.3658536	0.3533993	0.0946454	0.0212124	0.0148486	0.3385507	0.332186982	0.939976079	0.955800715
0.30181387	0.4268292	0.4069248	0.1288229	0.0288724	0.0202107	0.3867141	0.378052426	0.929047206	0.939328888
0.344930137	0.4878048	0.4578674	0.1682586	0.0377109	0.0263976	0.4314698	0.420156529	0.917637821	0.919956528
0.388046404	0.5487804	0.5057779	0.2129522	0.0477279	0.0334095	0.4723684	0.458050019	0.9056346	0.897495831
0.431162671	0.6097560	0.5501672	0.2629040	0.0589233	0.0412463	0.5089208	0.491243819	0.892899137	0.871708105
0.474278939	0.6707317	0.5904951	0.3181139	0.0712972	0.0499081	0.5405870	0.519197886	0.879258468	0.842287821
0.517395206	0.7317073	0.6261560	0.3785818	0.0848496	0.0593947	0.5667612	0.54130636	0.864491171	0.808838691
0.560511473	0.7926829	0.6564577	0.4443078	0.0995805	0.0697063	0.5867513	0.556877202	0.848306276	0.770836418
0.60362774	0.8536585	0.6805931	0.5152919	0.1154898	0.0808428	0.5997503	0.565103353	0.830310041	0.727567893
0.646744007	0.9146341	0.6975979	0.5915341	0.1325776	0.0928043	0.6047936	0.565020389	0.809951275	0.678025659
0.689860274	0.9756097	0.7062854	0.6730344	0.1508438	0.1055907	0.6006947	0.555441547	0.786426483	0.620709312

Tabla 7. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 4 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi=I/tcc$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000431163	0.0006097	0.0006097	2.63E-07	5.89E-08	4.12E-08	0.0006097	0.0006097	0.99990337	0.99999988
0.043116267	0.0609756	0.0609189	0.0026290	0.0005892	0.0004124	0.0605064	0.06032967	0.99032757	0.99879865
0.086232534	0.1219512	0.1214969	0.0105161	0.0023569	0.0016498	0.1198471	0.11914002	0.98060087	0.99518591
0.129348801	0.1829268	0.1813900	0.0236613	0.0053031	0.0037121	0.1776779	0.17608699	0.97076409	0.98913536
0.172465069	0.2439024	0.2402477	0.0420646	0.0094277	0.0065994	0.2336482	0.23081997	0.96075825	0.98060186
0.215581336	0.3048780	0.2977091	0.0657260	0.0147308	0.0103115	0.2873975	0.28297827	0.95051933	0.96951986
0.258697603	0.3658536	0.3533993	0.0946454	0.0212124	0.0148486	0.3385507	0.33218698	0.93997608	0.95580072
0.30181387	0.4268292	0.4069248	0.1288229	0.0288724	0.0202107	0.3867141	0.37805243	0.92904721	0.93932889
0.344930137	0.4878048	0.4578674	0.1682586	0.0377109	0.0263976	0.4314698	0.42015653	0.91763782	0.91995653
0.388046404	0.5487804	0.5057779	0.2129522	0.0477279	0.0334095	0.4723684	0.45805002	0.9056346	0.89749583
0.431162671	0.6097560	0.5501672	0.2629040	0.0589233	0.0412463	0.5089208	0.49124382	0.89289914	0.8717081
0.474278939	0.6707317	0.5904951	0.3181139	0.0712972	0.0499081	0.5405870	0.51919789	0.87925847	0.84228782
0.517395206	0.7317073	0.6261560	0.3785818	0.0848496	0.0593947	0.5667612	0.54130636	0.86449117	0.80883869
0.560511473	0.7926829	0.6564577	0.4443078	0.0995805	0.0697063	0.5867513	0.5568772	0.84830628	0.77083642
0.60362774	0.8536585	0.6805931	0.5152919	0.1154898	0.0808428	0.5997503	0.56510335	0.83031004	0.72756789
0.646744007	0.9146341	0.6975979	0.5915341	0.1325776	0.0928043	0.6047936	0.56502039	0.80995128	0.67802566
0.689860274	0.9756097	0.7062854	0.6730344	0.1508438	0.1055907	0.6006947	0.55544155	0.78642648	0.62070931

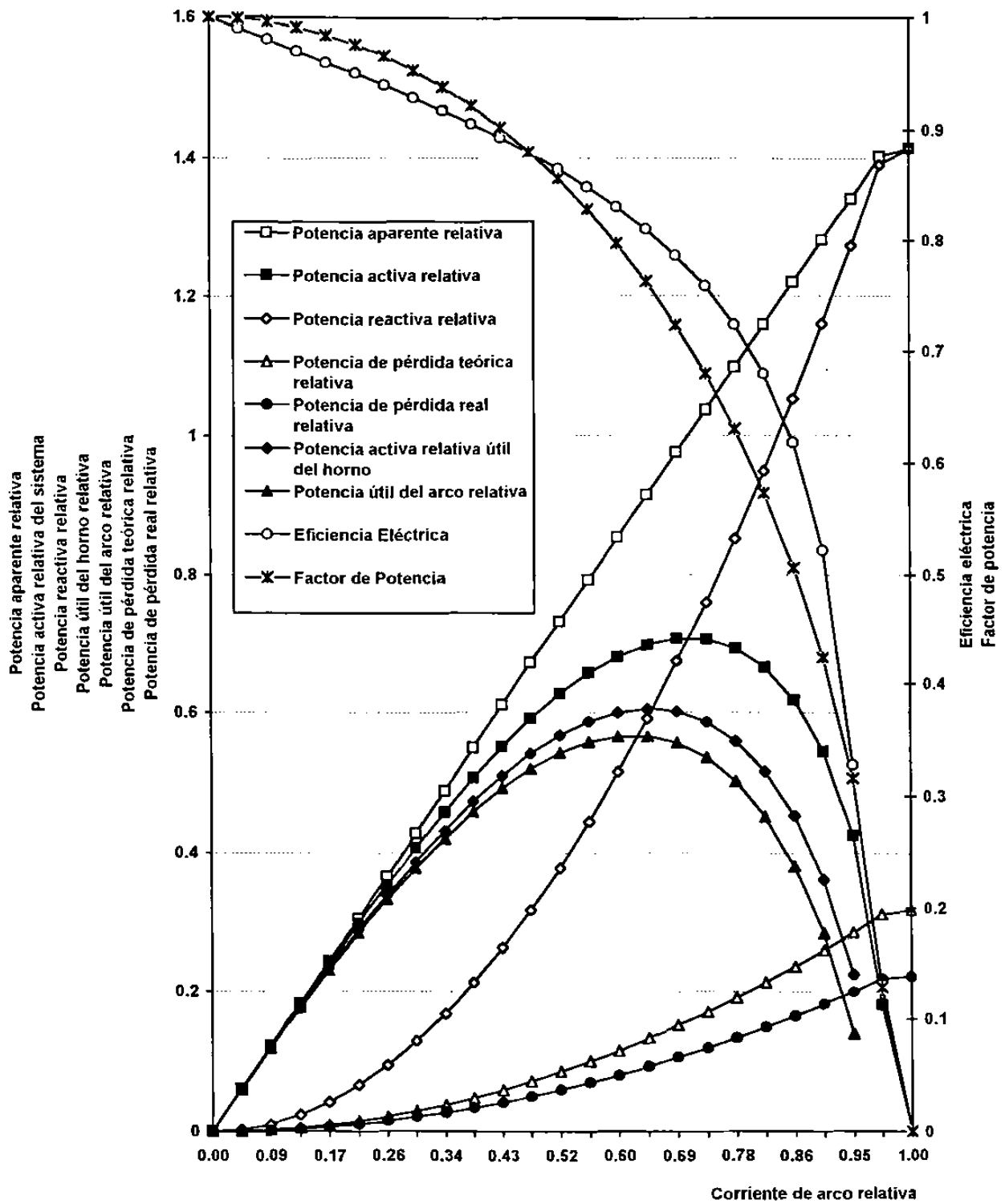


Fig. 18. Diagrama de potencias completo para el voltaje del nivel 4 del Horno de Arco Eléctrico para fusión de Magnesia del Grupo Industrial Peñoles.

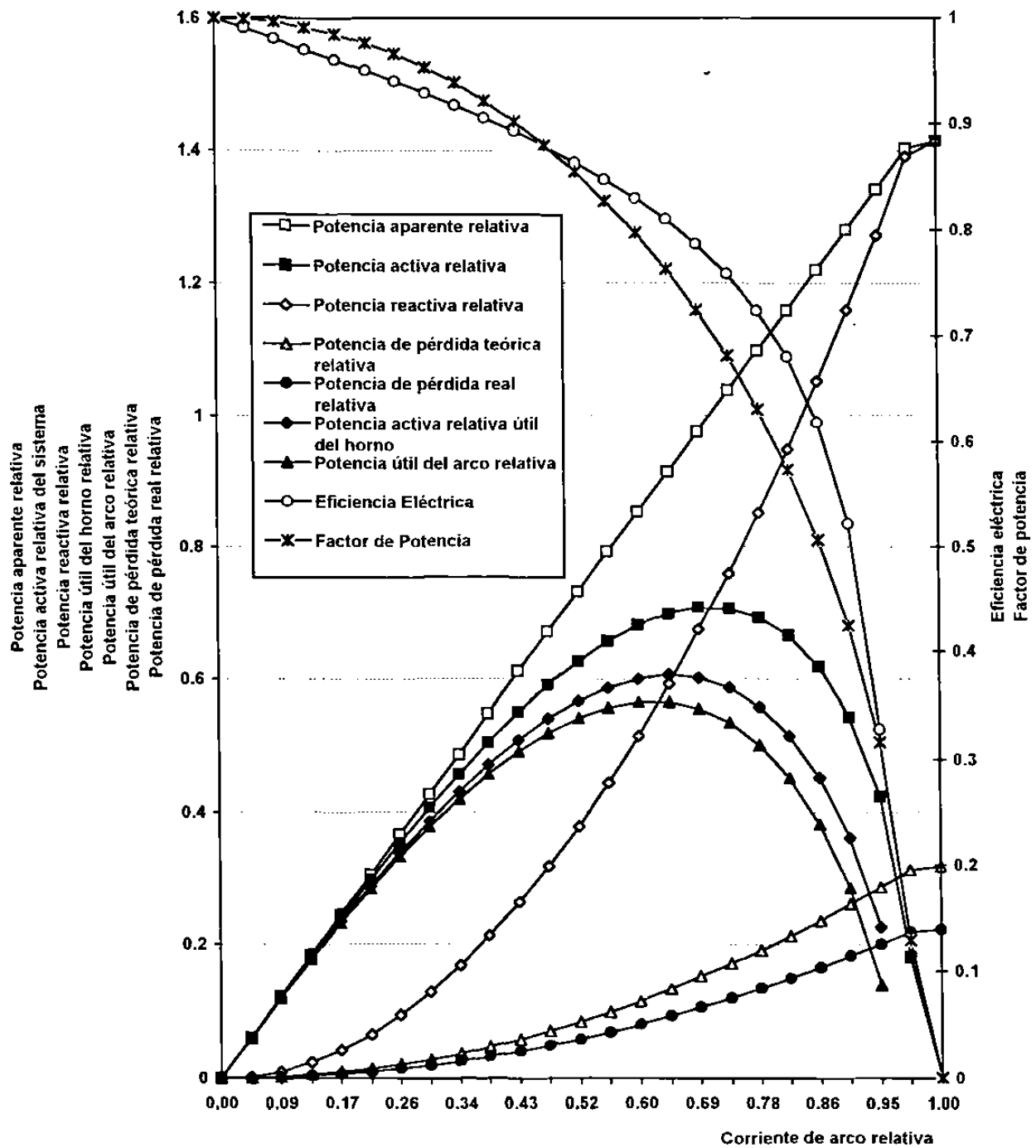


Fig. 19. Diagrama de potencias completo para el voltaje del nivel 5 del Horno de Arco Eléctrico para fusión de Magnesita del Grupo Industrial Peñoles.

Tabla 8. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 5 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi = I_{cc}$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000431163	0.0006097	0.0006097	2.63E-07	5.89E-08	4.12E-08	0.0006097	0.0006097	0.99990337	0.99999991
0.043116267	0.0609756	0.0609189	0.0026290	0.0005892	0.0004124	0.0605064	0.06032967	0.99032757	0.99907006
0.086232534	0.1219512	0.1214969	0.0105161	0.0023569	0.0016498	0.1198471	0.11914002	0.98060087	0.99627504
0.129348801	0.1829268	0.1813900	0.0236613	0.0053031	0.0037121	0.1776779	0.17608699	0.97076409	0.99159916
0.172465069	0.2439024	0.2402477	0.0420646	0.0094277	0.0065994	0.2336482	0.23081997	0.96075825	0.98501563
0.215581336	0.3048780	0.2977091	0.0657260	0.0147308	0.0103115	0.2873975	0.28297827	0.95051933	0.97648589
0.258697603	0.3658536	0.3533993	0.0946454	0.0212124	0.0148486	0.3385507	0.33218698	0.93997608	0.96595836
0.30181387	0.4268292	0.4069248	0.1288229	0.0288724	0.0202107	0.3867141	0.37805243	0.92904721	0.95336687
0.344930137	0.4878048	0.4578674	0.1682586	0.0377109	0.0263976	0.4314698	0.42015653	0.91763782	0.93862836
0.388046404	0.5487804	0.5057779	0.2129522	0.0477279	0.0334095	0.4723684	0.45805002	0.9056346	0.92163984
0.431162671	0.6097560	0.5501672	0.2629040	0.0589233	0.0412463	0.5089208	0.49124382	0.89289914	0.90227421
0.474278939	0.6707317	0.5904951	0.3181139	0.0712972	0.0499081	0.5405870	0.51919789	0.87925847	0.88037463
0.517395206	0.7317073	0.6261560	0.3785818	0.0848496	0.0593947	0.5667612	0.54130636	0.86449117	0.85574658
0.560511473	0.7926829	0.6564577	0.4443078	0.0995805	0.0697063	0.5867513	0.5568772	0.84830628	0.82814666
0.60362774	0.8536585	0.6805931	0.5152919	0.1154898	0.0808428	0.5997503	0.56510335	0.83031004	0.7972663
0.646744007	0.9146341	0.6975979	0.5915341	0.1325776	0.0928043	0.6047936	0.56502039	0.80995128	0.76270715
0.689860274	0.9756097	0.7062854	0.6730344	0.1508438	0.1055907	0.6006947	0.55544155	0.78642648	0.72394254

Tabla 9. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 6 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi = I_{cc}$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000431163	0.0006097	0.0006097	2.63E-07	5.89E-08	4.12E-08	0.0006097	0.0006097	0.99990337	0.99999991
0.043116267	0.0609756	0.0609189	0.0026290	0.0005892	0.0004124	0.0605064	0.06032967	0.99032757	0.99907006
0.086232534	0.1219512	0.1214969	0.0105161	0.0023569	0.0016498	0.1198471	0.11914002	0.98060087	0.99627504
0.129348801	0.1829268	0.1813900	0.0236613	0.0053031	0.0037121	0.1776779	0.17608699	0.97076409	0.99159916
0.172465069	0.2439024	0.2402477	0.0420646	0.0094277	0.0065994	0.2336482	0.23081997	0.96075825	0.98501563
0.215581336	0.3048780	0.2977091	0.0657260	0.0147308	0.0103115	0.2873975	0.28297827	0.95051933	0.97648589
0.258697603	0.3658536	0.3533993	0.0946454	0.0212124	0.0148486	0.3385507	0.33218698	0.93997608	0.96595836
0.30181387	0.4268292	0.4069248	0.1288229	0.0288724	0.0202107	0.3867141	0.37805243	0.92904721	0.95336687
0.344930137	0.4878048	0.4578674	0.1682586	0.0377109	0.0263976	0.4314698	0.42015653	0.91763782	0.93862836
0.388046404	0.5487804	0.5057779	0.2129522	0.0477279	0.0334095	0.4723684	0.45805002	0.9056346	0.92163984
0.431162671	0.6097560	0.5501672	0.2629040	0.0589233	0.0412463	0.5089208	0.49124382	0.89289914	0.90227421
0.474278939	0.6707317	0.5904951	0.3181139	0.0712972	0.0499081	0.5405870	0.51919789	0.87925847	0.88037463
0.517395206	0.7317073	0.6261560	0.3785818	0.0848496	0.0593947	0.5667612	0.54130636	0.86449117	0.85574658
0.560511473	0.7926829	0.6564577	0.4443078	0.0995805	0.0697063	0.5867513	0.5568772	0.84830628	0.82814666
0.60362774	0.8536585	0.6805931	0.5152919	0.1154898	0.0808428	0.5997503	0.56510335	0.83031004	0.7972663
0.646744007	0.9146341	0.6975979	0.5915341	0.1325776	0.0928043	0.6047936	0.56502039	0.80995128	0.76270715
0.689860274	0.9756097	0.7062854	0.6730344	0.1508438	0.1055907	0.6006947	0.55544155	0.78642648	0.72394254

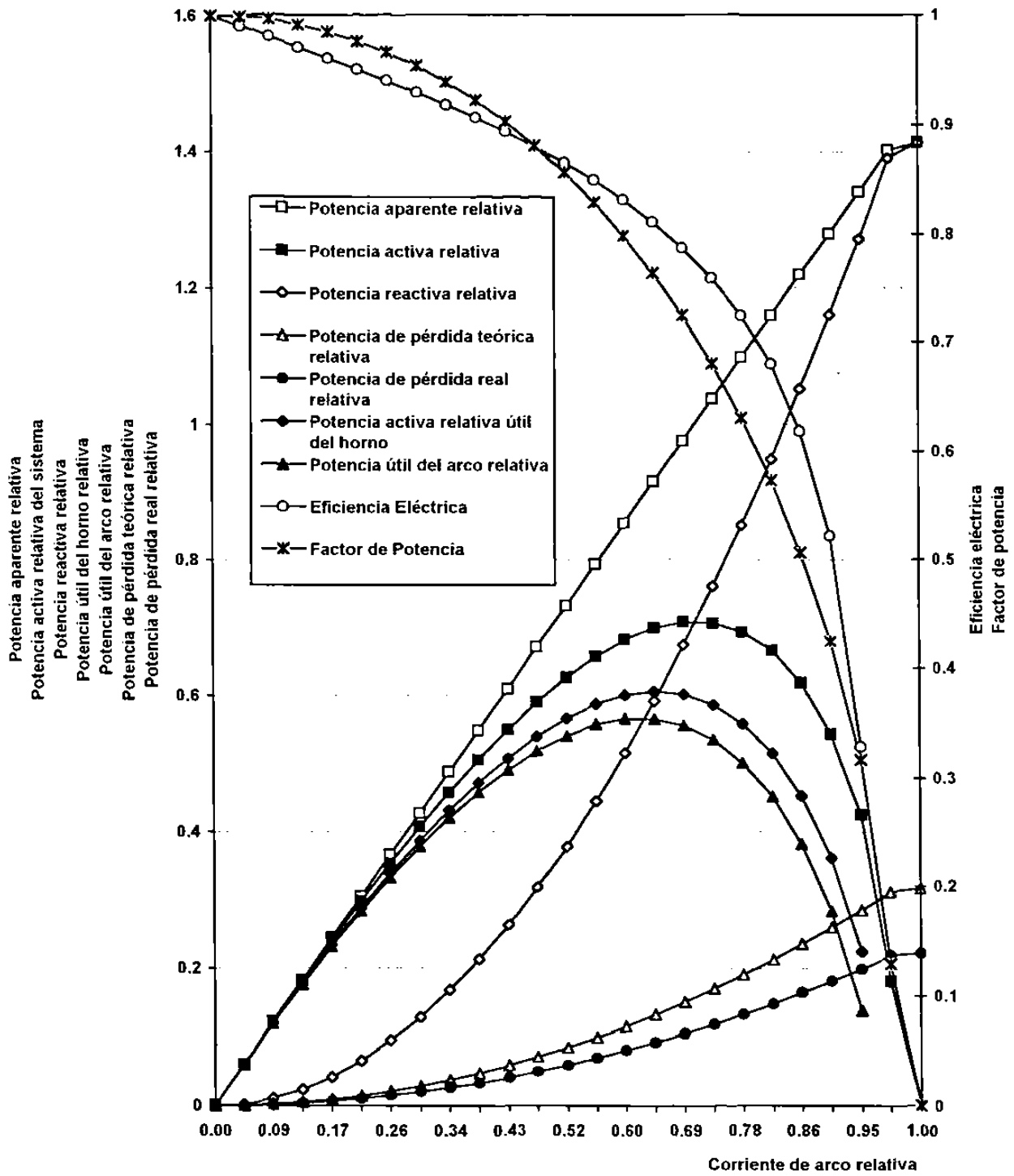


Fig. 20. Diagrama de potencias completo para el voltaje del nivel 6 del Horno de Arco Eléctrico para fusión de Magnesita del Grupo Industrial Peñoles.

Tabla 10. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 7 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi = I/lcc$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000490025	0.0006930	0.0006930	3.40E-07	7.61E-08	5.33E-08	0.0006929	0.00069292	0.99989017	0.99999988
0.049002549	0.0693000	0.0692168	0.0033958	0.0007611	0.0005327	0.0686840	0.06845571	0.98900409	0.99879865
0.098005098	0.1386001	0.1379329	0.0135835	0.0030444	0.0021310	0.1358018	0.1348885	0.97792835	0.99518591
0.147007647	0.2079002	0.2056414	0.0305629	0.0068499	0.0047949	0.2008465	0.19879153	0.96669001	0.98913536
0.196010196	0.2772002	0.2718231	0.0543340	0.0121776	0.0085243	0.2632987	0.25964548	0.95520018	0.98060186
0.245012745	0.3465003	0.3359389	0.0848970	0.0190275	0.0133192	0.3226196	0.31691142	0.94336012	0.96951986
0.294015294	0.4158004	0.3974223	0.1222516	0.0273996	0.0191797	0.3782425	0.37002267	0.93105656	0.95580072
0.343017843	0.4851004	0.4556688	0.1663981	0.0372939	0.0261057	0.4295631	0.41837492	0.91815552	0.93932889
0.392020391	0.5544005	0.5100244	0.2173363	0.0487105	0.0340973	0.4759270	0.4613139	0.90449377	0.91995653
0.44102294	0.6237006	0.5597687	0.2750662	0.0616492	0.0431544	0.5166142	0.49811947	0.88986659	0.89749583
0.490025489	0.6930006	0.6040943	0.3395880	0.0761101	0.0532771	0.5508172	0.52798415	0.87400946	0.8717081
0.539028038	0.7623007	0.6420766	0.4109014	0.0920933	0.0644653	0.5776113	0.54998334	0.8565696	0.84228782
0.588030587	0.8316008	0.6726309	0.4890067	0.1095986	0.0767190	0.5959118	0.56303228	0.83705976	0.80883869
0.637033136	0.9009009	0.6944472	0.5739037	0.1286261	0.0900383	0.6044088	0.56582103	0.81477903	0.77083642
0.686035685	0.9702009	0.7058870	0.6655924	0.1491759	0.1044231	0.6014639	0.55671114	0.78866884	0.72756789
0.735038234	1.0395010	0.7048083	0.7640730	0.1712478	0.1198735	0.5849348	0.53356049	0.75702916	0.67802566
0.784040783	1.1088011	0.6882431	0.8693452	0.1948420	0.1363894	0.5518537	0.49340113	0.71689942	0.62070931

Tabla 11. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 8 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi = I/lcc$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000460656	0.0006514	0.0006514	3.00E-07	6.73E-08	4.71E-08	0.0006514	0.0006514	0.99989676	0.99999989
0.046065588	0.0651465	0.0650774	0.0030010	0.0006726	0.0004708	0.0646065	0.06440482	0.98966458	0.99893842
0.092131177	0.1302931	0.1297390	0.0120040	0.0026904	0.0018832	0.1278557	0.1270486	0.9792629	0.99574688
0.138196765	0.1954397	0.1935644	0.0270091	0.0060534	0.0042373	0.1893270	0.18751103	0.96872657	0.99040479
0.184262353	0.2605863	0.2561243	0.0480162	0.0107616	0.0075331	0.2485911	0.24536268	0.95798274	0.9828771
0.230327942	0.3257328	0.3169749	0.0750253	0.0168150	0.0117705	0.3052043	0.30015987	0.94695143	0.97311307
0.27639353	0.3908794	0.3756525	0.1080365	0.0242136	0.0169495	0.3587030	0.35143889	0.93554231	0.96104454
0.322459118	0.4560260	0.4316666	0.1470497	0.0329575	0.0230702	0.4085964	0.39870916	0.92365051	0.94658339
0.368524707	0.5211726	0.4844914	0.1920649	0.0430465	0.0301326	0.4543588	0.44144487	0.91115102	0.92961795
0.414590295	0.5863192	0.5335552	0.2430822	0.0544808	0.0381365	0.4954187	0.47907447	0.89789096	0.91000818
0.460655884	0.6514657	0.5782272	0.3001015	0.0672602	0.0470821	0.5311450	0.51096697	0.88367848	0.88757882
0.506721472	0.7166123	0.6177985	0.3631228	0.0813849	0.0569694	0.5608291	0.53641365	0.86826624	0.86210982
0.55278706	0.7817589	0.6514573	0.4321462	0.0968547	0.0677983	0.5836590	0.55460258	0.85132598	0.83332255
0.598852649	0.8469055	0.6782521	0.5071716	0.1136698	0.0795688	0.5986832	0.56458226	0.83240767	0.80085923
0.644918237	0.9120521	0.6970372	0.5881990	0.1318301	0.0922810	0.6047561	0.56520714	0.81087076	0.76425157
0.690983825	0.9771986	0.7063878	0.6752284	0.1513356	0.1059349	0.6004529	0.55505223	0.78576131	0.72287022
0.737049414	1.0423452	0.7044574	0.7682599	0.172186	0.1205304	0.5839270	0.53227115	0.75557602	0.67583886

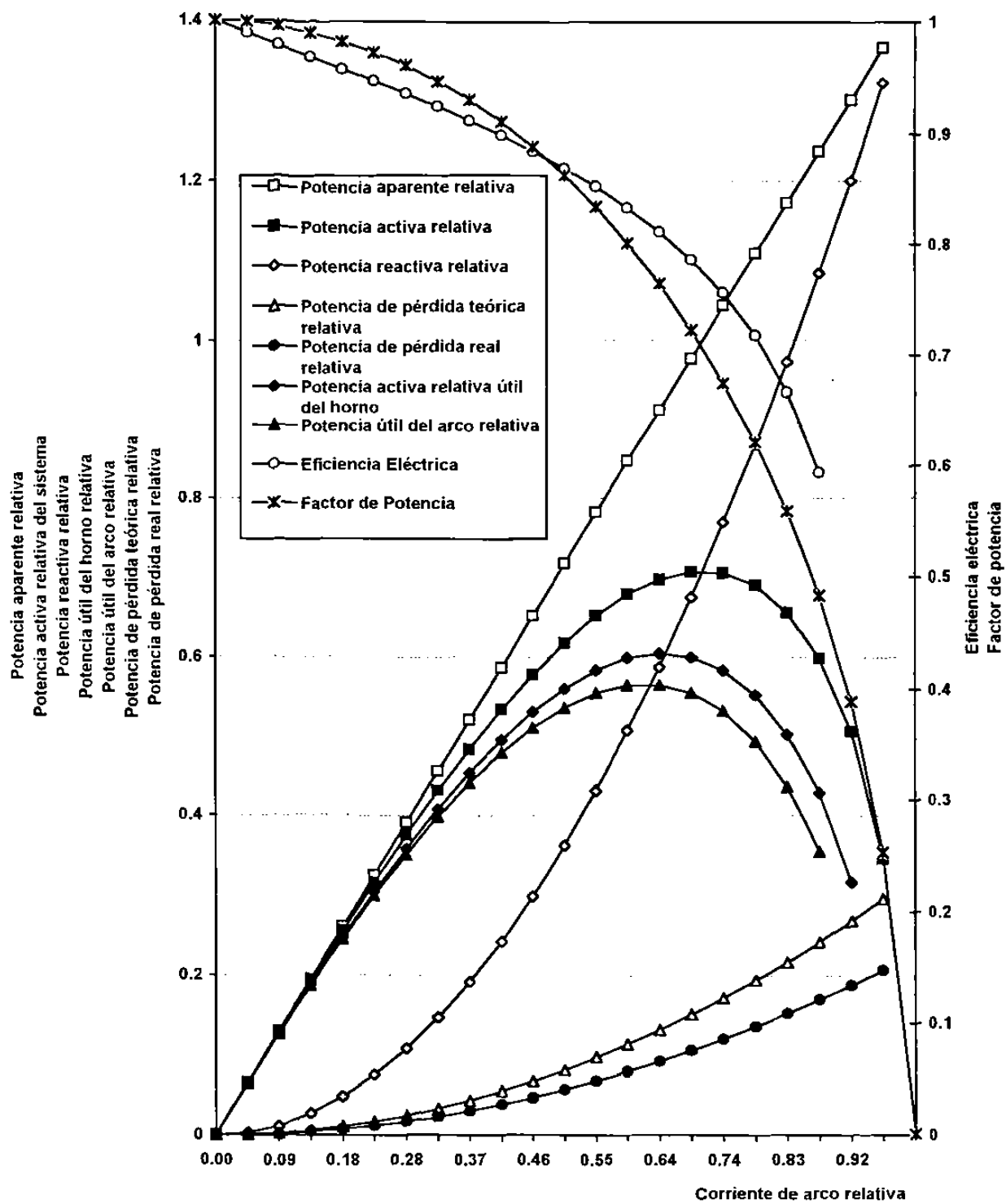


Fig. 22. Diagrama de potencias completo para el voltaje del nivel 8 del Horno de Arco Eléctrico para fusión de Magnesita del Grupo Industrial Peñoles.

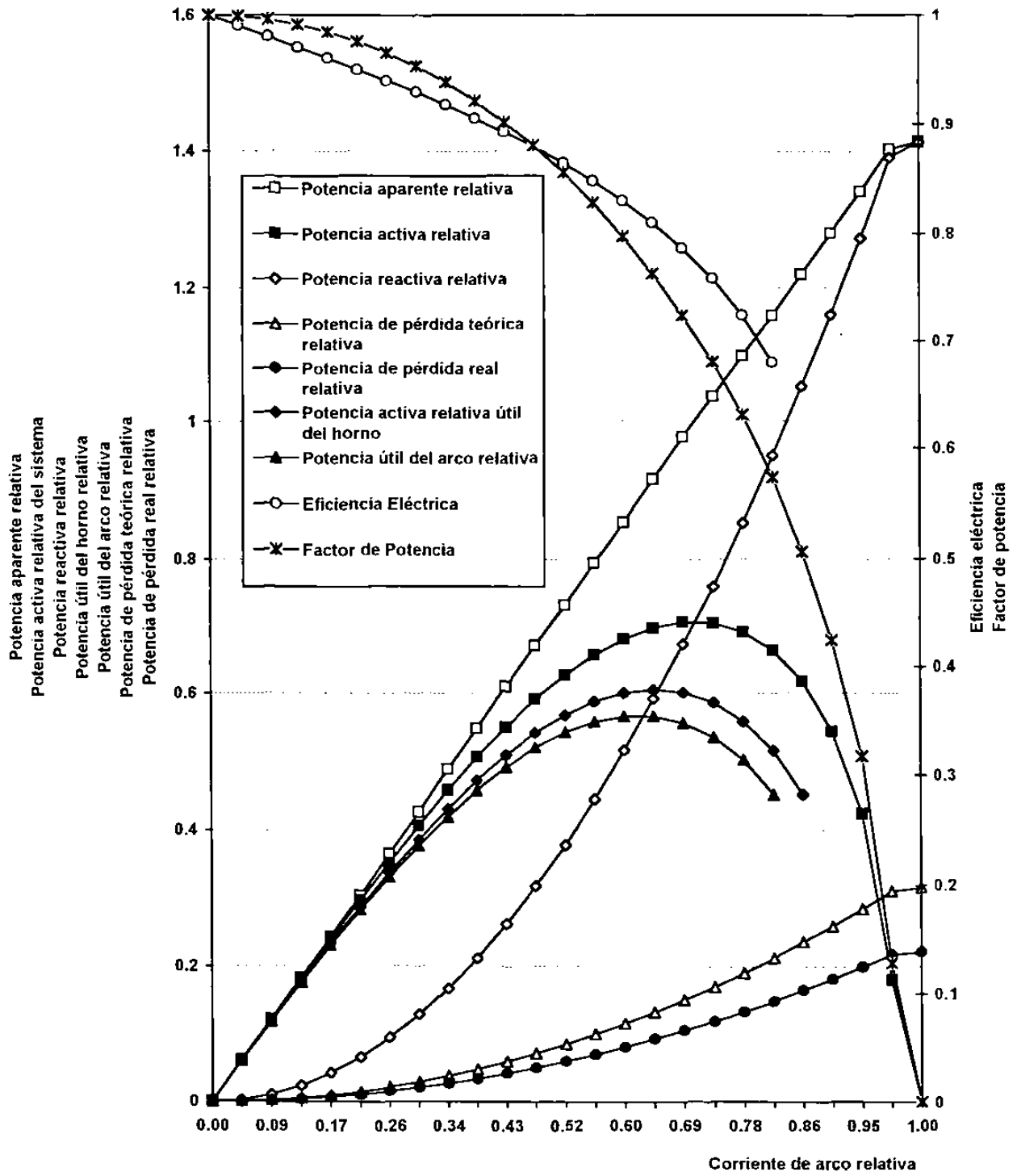


Fig. 23. Diagrama de potencias completo para el voltaje del nivel 9 del Horno de Arco Eléctrico para fusión de Magnesita del Grupo Industrial Peñoles.

Tabla 12. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 9 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi=1/\cos$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000431163	0.0006097	0.0006097	2.63E-07	5.89E-08	4.12E-08	0.0006097	0.0006097	0.99990337	0.99999991
0.043116267	0.0609756	0.0609189	0.0026290	0.0005892	0.0004124	0.0605064	0.06032967	0.99032757	0.99907006
0.086232534	0.1219512	0.1214969	0.0105161	0.0023569	0.0016498	0.1198471	0.11914002	0.98060087	0.99627504
0.129348801	0.1829268	0.1813900	0.0236613	0.0053031	0.0037121	0.1776779	0.17608699	0.97076409	0.99159916
0.172465069	0.2439024	0.2402477	0.0420646	0.0094277	0.0065994	0.2336482	0.23081997	0.96075825	0.98501563
0.215581336	0.3048780	0.2977091	0.0657260	0.0147308	0.0103115	0.2873975	0.28297827	0.95051933	0.97648589
0.258697603	0.3658536	0.3533993	0.0946454	0.0212124	0.0148486	0.3385507	0.33218698	0.93997608	0.96595836
0.30181387	0.4268292	0.4069248	0.1288229	0.0288724	0.0202107	0.3867141	0.37805243	0.92904721	0.95336687
0.344930137	0.4878048	0.4578674	0.1682586	0.0377109	0.0263976	0.4314698	0.42015653	0.91763782	0.93862836
0.388046404	0.5487804	0.5057779	0.2129522	0.0477279	0.0334095	0.4723684	0.45805002	0.9056346	0.92163984
0.431162671	0.6097560	0.5501672	0.2629040	0.0589233	0.0412463	0.5089208	0.49124382	0.89289914	0.90227421
0.474278939	0.6707317	0.5904951	0.3181139	0.0712972	0.0499081	0.5405870	0.51919789	0.87925847	0.88037463
0.517395206	0.7317073	0.6261560	0.3785818	0.0848496	0.0593947	0.5667612	0.54130636	0.86449117	0.85574658
0.560511473	0.7926829	0.6564577	0.4443078	0.0995805	0.0697063	0.5867513	0.5568772	0.84830628	0.82814666
0.60362774	0.8536585	0.6805931	0.5152919	0.1154898	0.0808428	0.5997503	0.56510335	0.83031004	0.7972663
0.646744007	0.9146341	0.6975979	0.5915341	0.1325776	0.0928043	0.6047936	0.56502039	0.80995128	0.76270715
0.689860274	0.9756097	0.7062854	0.6730344	0.1508438	0.1055907	0.6006947	0.55544155	0.78642648	0.72394254

Tabla 13. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 10 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi=1/\cos$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000431163	0.0006097	0.0006097	2.63E-07	5.89E-08	4.12E-08	0.0006097	0.0006097	0.99990337	0.99999991
0.043116267	0.0609756	0.0609189	0.0026290	0.0005892	0.0004124	0.0605064	0.06032967	0.99032757	0.99907006
0.086232534	0.1219512	0.1214969	0.0105161	0.0023569	0.0016498	0.1198471	0.11914002	0.98060087	0.99627504
0.129348801	0.1829268	0.1813900	0.0236613	0.0053031	0.0037121	0.1776779	0.17608699	0.97076409	0.99159916
0.172465069	0.2439024	0.2402477	0.0420646	0.0094277	0.0065994	0.2336482	0.23081997	0.96075825	0.98501563
0.215581336	0.3048780	0.2977091	0.0657260	0.0147308	0.0103115	0.2873975	0.28297827	0.95051933	0.97648589
0.258697603	0.3658536	0.3533993	0.0946454	0.0212124	0.0148486	0.3385507	0.33218698	0.93997608	0.96595836
0.30181387	0.4268292	0.4069248	0.1288229	0.0288724	0.0202107	0.3867141	0.37805243	0.92904721	0.95336687
0.344930137	0.4878048	0.4578674	0.1682586	0.0377109	0.0263976	0.4314698	0.42015653	0.91763782	0.93862836
0.388046404	0.5487804	0.5057779	0.2129522	0.0477279	0.0334095	0.4723684	0.45805002	0.9056346	0.92163984
0.431162671	0.6097560	0.5501672	0.2629040	0.0589233	0.0412463	0.5089208	0.49124382	0.89289914	0.90227421
0.474278939	0.6707317	0.5904951	0.3181139	0.0712972	0.0499081	0.5405870	0.51919789	0.87925847	0.88037463
0.517395206	0.7317073	0.6261560	0.3785818	0.0848496	0.0593947	0.5667612	0.54130636	0.86449117	0.85574658
0.560511473	0.7926829	0.6564577	0.4443078	0.0995805	0.0697063	0.5867513	0.5568772	0.84830628	0.82814666
0.60362774	0.8536585	0.6805931	0.5152919	0.1154898	0.0808428	0.5997503	0.56510335	0.83031004	0.7972663
0.646744007	0.9146341	0.6975979	0.5915341	0.1325776	0.0928043	0.6047936	0.56502039	0.80995128	0.76270715
0.689860274	0.9756097	0.7062854	0.6730344	0.1508438	0.1055907	0.6006947	0.55544155	0.78642648	0.72394254

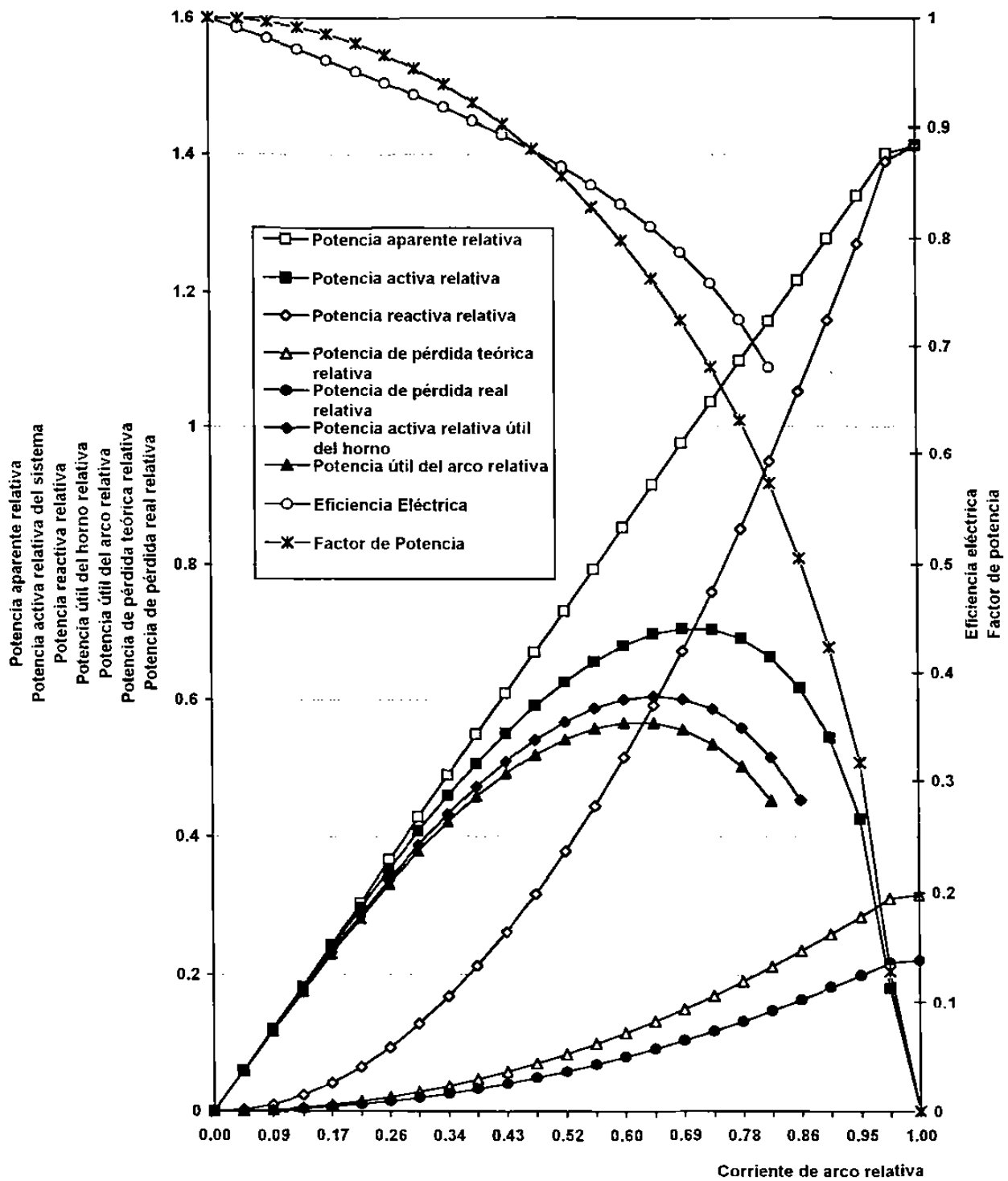


Fig. 24. Diagrama de potencias completo para el voltaje del nivel 10 del Horno de Arco Eléctrico para fusión de Magnesia del Grupo Industrial Peñoles.

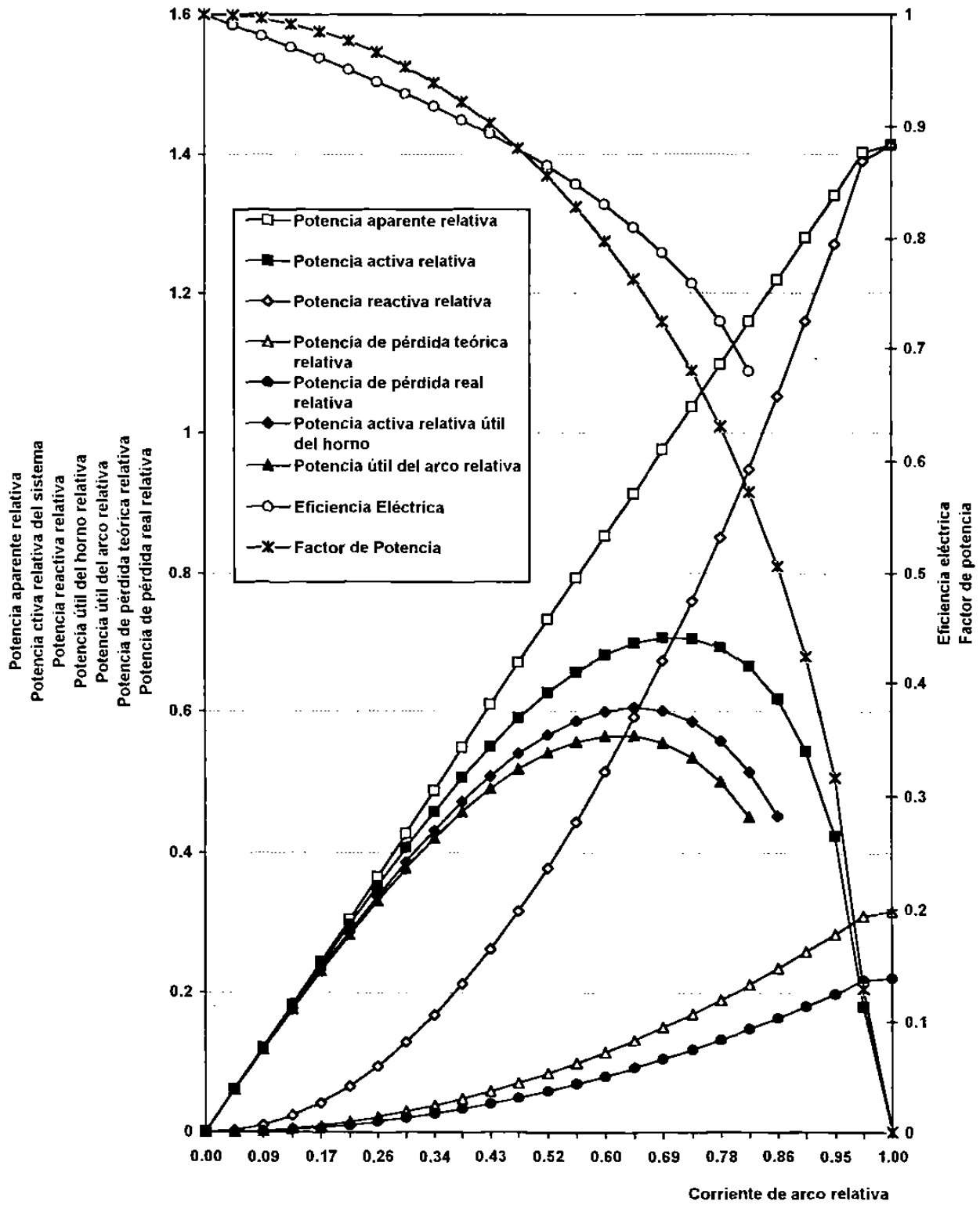


Fig. 25. Diagrama de potencias completo para el voltaje del nivel 11 del Horno de Arco Eléctrico para fusión de Magnesia del Grupo Industrial Peñoles.

Tabla 14. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 11 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi=1/\cos$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000431163	0.0006097	0.0006097	2.63E-07	5.89E-08	4.12E-08	0.0006097	0.0006097	0.99990337	0.99999991
0.043116267	0.0609756	0.0609189	0.0026290	0.0005892	0.0004124	0.0605064	0.06032967	0.99032757	0.99907006
0.086232534	0.1219512	0.1214969	0.0105161	0.0023569	0.0016498	0.1198471	0.11914002	0.98060087	0.99627504
0.129348801	0.1829268	0.1813900	0.0236613	0.0053031	0.0037121	0.1776779	0.17608699	0.97076409	0.99159916
0.172465069	0.2439024	0.2402477	0.0420646	0.0094277	0.0065994	0.2336482	0.23081997	0.96075825	0.98501563
0.215581336	0.3048780	0.2977091	0.0657260	0.0147308	0.0103115	0.2873975	0.28297827	0.95051933	0.97648589
0.258697603	0.3658536	0.3533993	0.0946454	0.0212124	0.0148486	0.3385507	0.33218698	0.93997608	0.96595836
0.30181387	0.4268292	0.4069248	0.1288229	0.0288724	0.0202107	0.3867141	0.37805243	0.92904721	0.95336687
0.344930137	0.4878048	0.4578674	0.1682586	0.0377109	0.0263976	0.4314698	0.42015653	0.91763782	0.93862836
0.388046404	0.5487804	0.5057779	0.2129522	0.0477279	0.0334095	0.4723684	0.45805002	0.9056346	0.92163984
0.431162671	0.6097560	0.5501672	0.2629040	0.0589233	0.0412463	0.5089208	0.49124382	0.89289914	0.90227421
0.474278939	0.6707317	0.5904951	0.3181139	0.0712972	0.0499081	0.5405870	0.51919789	0.87925847	0.88037463
0.517395206	0.7317073	0.6261560	0.3785818	0.0848496	0.0593947	0.5667612	0.54130636	0.86449117	0.85574658
0.560511473	0.7926829	0.6564577	0.4443078	0.0995805	0.0697063	0.5867513	0.5568772	0.84830628	0.82814666
0.60362774	0.8536585	0.6805931	0.5152919	0.1154898	0.0808428	0.5997503	0.56510335	0.83031004	0.7972663
0.646744007	0.9146341	0.6975979	0.5915341	0.1325776	0.0928043	0.6047936	0.56502039	0.80995128	0.76270715
0.689860274	0.9756097	0.7062854	0.6730344	0.1508438	0.1055907	0.6006947	0.55544155	0.78642648	0.72394254

Tabla 15. Datos del diagrama de potencias para el voltaje del nivel 12 del HAE para fusión de Peñoles.

Seno $\phi=1/\cos$	Potencia aparente relativa	Potencia activa relativa	Potencia reactiva relativa	Potencia de pérdida teórica relativa	Potencia de pérdida real relativa	Potencia activa relativa útil del horno	Potencia útil del arco relativa	Eficiencia Eléctrica	Factor de Potencia
0.000431163	0.0006097	0.0006097	2.63E-07	5.89E-08	4.12E-08	0.0006097	0.0006097	0.99990337	0.99999991
0.043116267	0.0609756	0.0609189	0.0026290	0.0005892	0.0004124	0.0605064	0.06032967	0.99032757	0.99907006
0.086232534	0.1219512	0.1214969	0.0105161	0.0023569	0.0016498	0.1198471	0.11914002	0.98060087	0.99627504
0.129348801	0.1829268	0.1813900	0.0236613	0.0053031	0.0037121	0.1776779	0.17608699	0.97076409	0.99159916
0.172465069	0.2439024	0.2402477	0.0420646	0.0094277	0.0065994	0.2336482	0.23081997	0.96075825	0.98501563
0.215581336	0.3048780	0.2977091	0.0657260	0.0147308	0.0103115	0.2873975	0.28297827	0.95051933	0.97648589
0.258697603	0.3658536	0.3533993	0.0946454	0.0212124	0.0148486	0.3385507	0.33218698	0.93997608	0.96595836
0.30181387	0.4268292	0.4069248	0.1288229	0.0288724	0.0202107	0.3867141	0.37805243	0.92904721	0.95336687
0.344930137	0.4878048	0.4578674	0.1682586	0.0377109	0.0263976	0.4314698	0.42015653	0.91763782	0.93862836
0.388046404	0.5487804	0.5057779	0.2129522	0.0477279	0.0334095	0.4723684	0.45805002	0.9056346	0.92163984
0.431162671	0.6097560	0.5501672	0.2629040	0.0589233	0.0412463	0.5089208	0.49124382	0.89289914	0.90227421
0.474278939	0.6707317	0.5904951	0.3181139	0.0712972	0.0499081	0.5405870	0.51919789	0.87925847	0.88037463
0.517395206	0.7317073	0.6261560	0.3785818	0.0848496	0.0593947	0.5667612	0.54130636	0.86449117	0.85574658
0.560511473	0.7926829	0.6564577	0.4443078	0.0995805	0.0697063	0.5867513	0.5568772	0.84830628	0.82814666
0.60362774	0.8536585	0.6805931	0.5152919	0.1154898	0.0808428	0.5997503	0.56510335	0.83031004	0.7972663
0.646744007	0.9146341	0.6975979	0.5915341	0.1325776	0.0928043	0.6047936	0.56502039	0.80995128	0.76270715
0.689860274	0.9756097	0.7062854	0.6730344	0.1508438	0.1055907	0.6006947	0.55544155	0.78642648	0.72394254

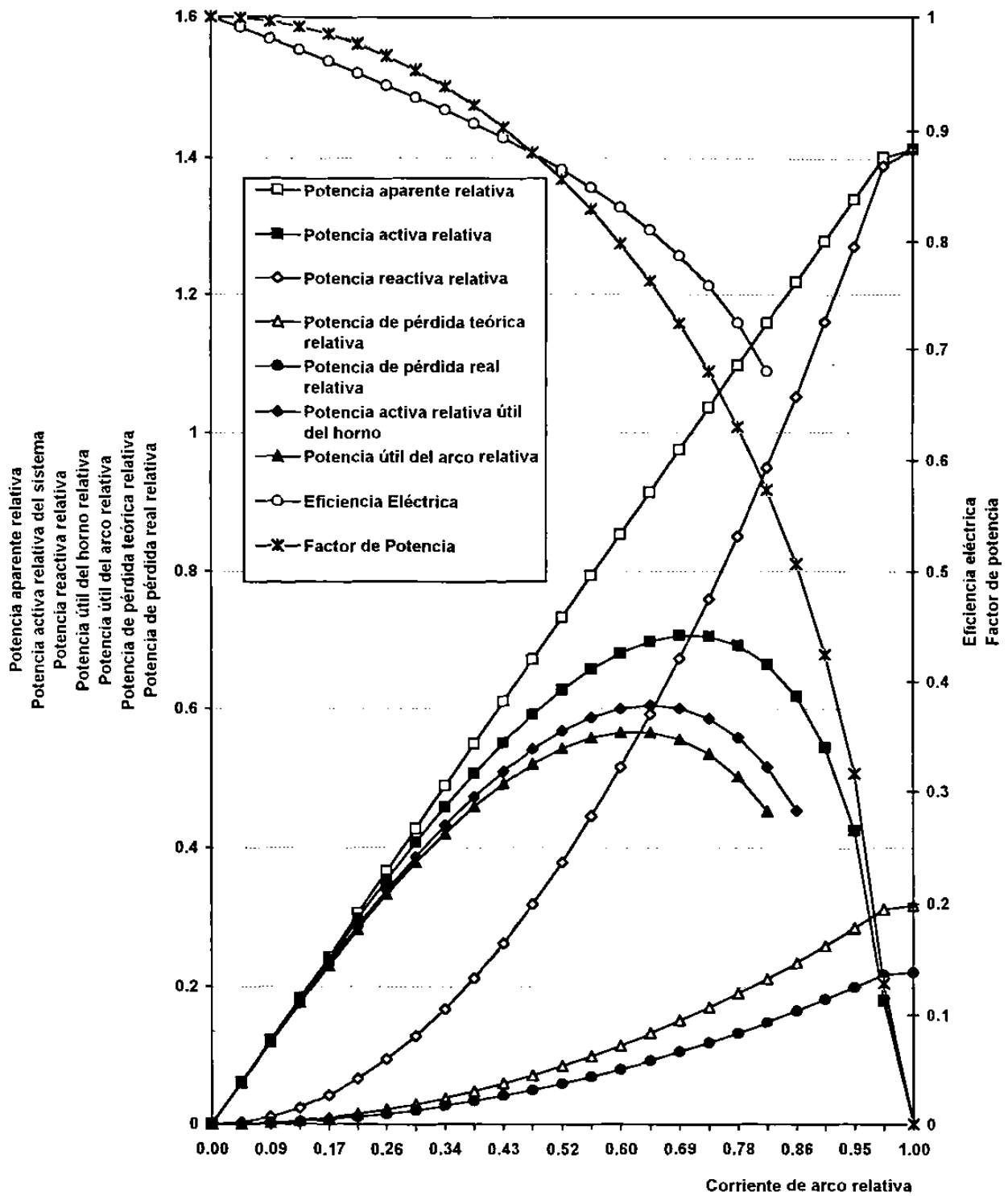


Fig. 26. Diagrama de potencias completo para el voltaje del nivel 12 del Horno de Arco Eléctrico para fusión de Magnesia del Grupo Industrial Peñoles.

3.3. El Proceso Industrial de Fusión de Magnesia Grado Refractario por HAE del Grupo Peñoles

En la Fig. 27. se presenta el diagrama del proceso de obtención de magnesia fundida por HAE. Básicamente la materia prima es briqueta de magnesia sinterizada con 99% de pureza obtenida desde salmueras naturales, ésta es transportada a la planta de fusión de óxidos cerámicos dónde es almacenada para después ser alimentada al horno de arco eléctrico para su fusión.

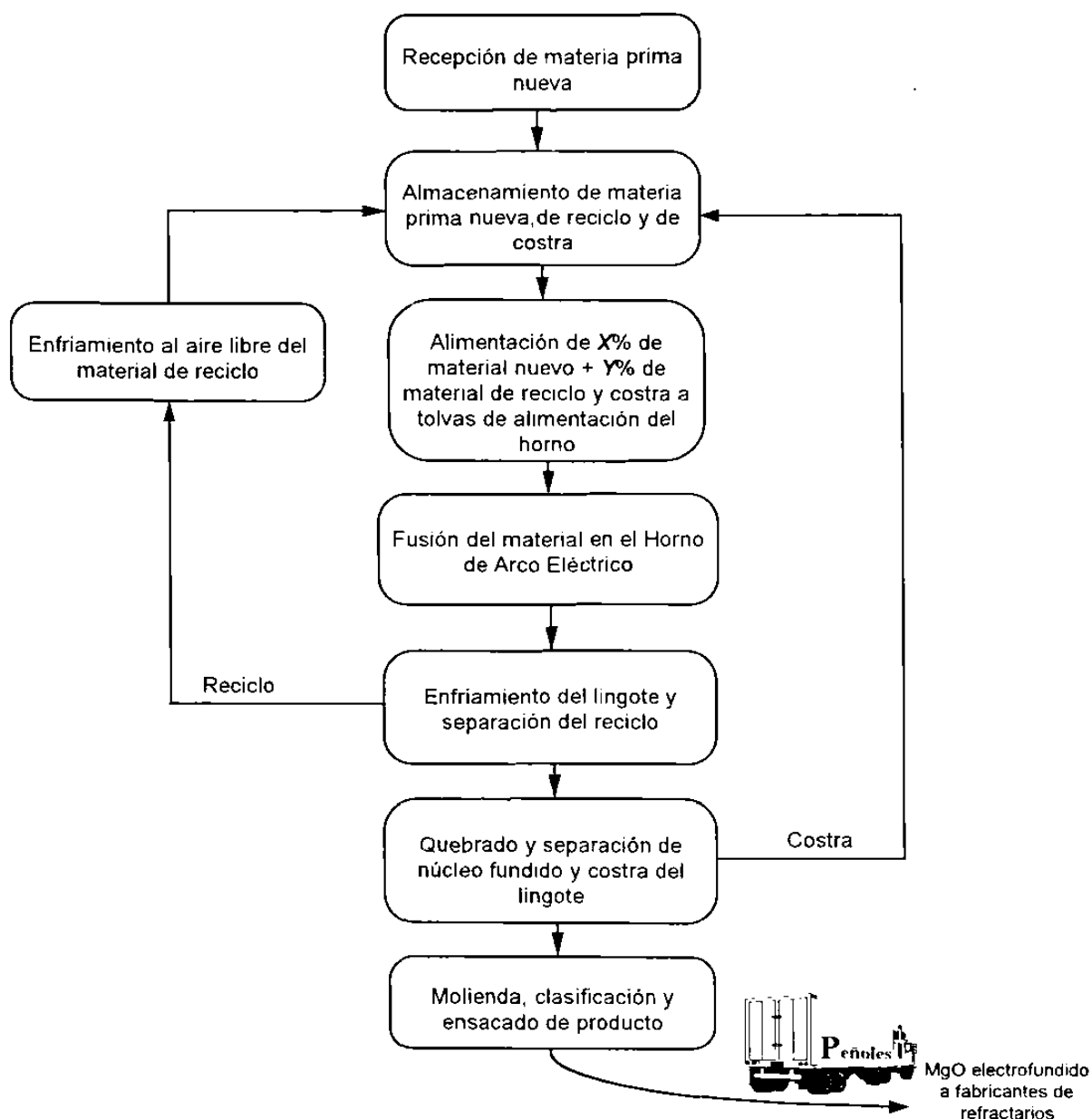


Fig. 27. Diagrama de flujo representativo del proceso de obtención de Magnesia Electrofundida

Dentro del proceso una cantidad del material es reciclado y éste es mezclado con la materia prima nueva, una mezcla bien proporcionada es transportada a las tolvas de alimentación de donde es alimentada al horno de arco eléctrico en un flujo bien controlado. Para el arranque de una fusión se enciende el arco en el fondo de la olla del horno sin carga de material, inmediatamente se alimenta materia prima para sumergir el arco dentro del material; una vez que se estabiliza la corriente al valor deseado se encienden los alimentadores de material a un flujo que dependerá de la rapidez de levantamiento de los electrodos. El procedimiento de levantamiento de electrodos y alimentación de material con un valor de corriente de arco constante a un valor de voltaje de tap fijo, es continuo hasta que la olla del horno se llena con material y los electrodos terminan su carrera ascendente; en este momento el proceso de fusión se da por terminado, se desconecta el horno y se lleva al área de enfriamiento. El enfriamiento se realiza de manera natural durante 4 días aproximadamente, posteriormente en el área de descorace es separado el material de reciclaje y el lingote de MgO fundido ya en estado sólido; el lingote continúa enfriándose todavía 4 días más y posteriormente es llevado a la mesa de quebrado. En la mesa de quebrado se rompe el lingote con un martillo hidráulico y es separado de la costra que rodea al producto fundido (núcleo); el núcleo es posteriormente molido y clasificado en distintos tamaños de acuerdo a las necesidades de los clientes. Una vez clasificado en los diferentes tamaños se empaqueta producto en sacos de 1 tonelada.

El diagrama de flujo es realmente muy sencillo y la clave en obtener una calidad de producto deseada y una alta productividad del proceso es influencia básica del modo de operación del HAE y los criterios de selección de núcleo en la mesa de quebrado. La publicación de información al respecto es muy limitada y básicamente se publica sólo información de mercados y calidades de productos disponibles en el mundo^{12), 13)}. Tras el descubrimiento de la obtención de cristales abrasivos duros de alúmina mediante la fusión de bauxita en horno de arco eléctrico por Jacobs, Ch. B. en 1897¹²⁾, la Compañía Norton impulsó su desarrollo y la aplicación desde 1901; sin embargo la idea original era muy costosa y no fue hasta 1904 cuando Higgins, A., quien revolucionó y mejoró la idea de Jacobs y a su vez se inmortalizó con el desarrollo del horno tipo Higgins, logró mejorar la idea y hacerla rentable. No obstante el tiempo, la divulgación del proceso en el tiempo es limitada solo para su explotación propia y por lo mismo su desarrollo tecnológico se ha visto limitado.

CAPÍTULO 4

EL MODELO

4.1. Selección de Variables

Para poder hacer un buen análisis es necesario antes seleccionar todas aquellas variables que se considere que afecten al proceso y al producto; iniciaremos por seleccionar las variables eléctricas y posteriormente las variables de operación mecánicas y térmicas.

Tal como lo sugiere Schwabe¹⁴⁾ no puede ser evaluada la capacidad de fusión de la carga en el horno de arco eléctrico con tan sólo considerar niveles de temperatura; la carga es calentada y fundida de acuerdo a las bien conocidas leyes de la física por los Btu suministrados por KWh de energía eléctrica. Como fue visto en el **Capítulo 2** la potencia eléctrica suministrada a la carga del horno es una función directa de la corriente del arco y del nivel de voltaje del transformador que se seleccione; dado que la potencia eléctrica es una rapidez de suministro de energía (KW = KWh/h) es factible entonces determinar la energía eléctrica suministrada durante la fusión obteniendo el producto de la potencia de suministro por el tiempo que dure la fusión. Entonces la energía eléctrica total suministrada E_w se puede obtener mediante una combinación de las ecuaciones (9), (10c), (15a) y por el tiempo t_f que dure la fusión obteniéndose la siguiente expresión:

$$E_w = 3 t_f I_a^2 \sqrt{\left(\frac{U}{\sqrt{3} I_a}\right)^2 - X_T^2} \quad (73)$$

sin embargo como se demostró también en el Capítulo 2. existe una pérdida eléctrica por lo que la energía de pérdida eléctrica E_v , puede ser obtenida con el producto de la ecuación (65) y el tiempo de la fusión de la siguiente forma:

$$E_v = 3 I_a^2 R_v t_f \quad (74)$$

Combinando (73) y (74) se obtiene una expresión de energía neta entrando a la carga del horno E_o :

$$E_o = 3 t_f I_a^2 \left[\sqrt{\left(\frac{U}{\sqrt{3} I_a}\right)^2 - X_r^2} - R_v \right] \quad (75)$$

Considerando que en el proceso de fusión de MgO por HAE se hace una selección única de nivel de voltaje en el transformador eléctrico, puede entonces deducirse aquí que; las variables de operación de las que depende directamente el suministro de energía a la carga son la corriente de arco I_a y el tiempo de fusión t_f . Estas dos variables son para el operario del horno indispensables: la primera la usa para mantener un nivel de potencia estable durante toda la fusión y con esta y la segunda aplicados en la ecuación (75) se determina el suministro de energía.

Por las condiciones propias del proceso de arrancar en vacío y posteriormente levantar los electrodos y alimentar materia prima a la olla del horno, es razonable pensar en que para un suministro de potencia constante existe una velocidad de levantamiento de electrodos y un flujo de materia prima adecuados que permitan que la zona fundida alcance un radio de reacción o fusión suficientemente grande alrededor de cada electrodo, de tal manera que se alcance a fundir todo el material del centro y el de la periferia pero sin llegar a fundir la coraza de acero de la olla.

Según el concepto de energía para calentar una masa de 1 kg de material desde la temperatura ambiente hasta su temperatura de fusión más el calor latente de fusión, es expresado en KWh/kg , es decir, existe un valor de energía único en KWh para fundir 1 kg de ese material. Si la cantidad de material no es constante y varía con el tiempo en kg/h , se requerirá entonces variar en la misma proporción el suministro de energía en KWh/h ó KW , es decir que para que se funda el material con

un flujo de alimentación determinado se deberá suministrar energía en la misma proporción al flujo másico, lo que se expresaría en $\frac{KW}{kg/h}$.

Durante la fusión la cantidad de material varía conforme se levantan los electrodos y se alimenta material al horno, por lo que para un suministro de potencia constante debe mantenerse una velocidad de electrodos v_e constante y un flujo de material alimentado también constante. Es claro entonces que la rapidez con que se levantan los electrodos es una variable importante en el proceso de fusión de MgO por HAE. Si se considera ahora que tanto el suministro de potencia como la velocidad de los electrodos y los selectores de flujo de alimentación de material son constantes y de la misma manera el volumen de la olla tampoco varía, es entonces importante hacer notar que el flujo de material alimentado podría variar si la densidad de la carga dentro del horno cambia, es decir que si el tamaño de las briquetas es fino la cantidad de masa será mayor en el mismo volumen que si el material es grueso y por ello requerirán valores distintos de suministro de potencia. Por lo anterior es claro entonces que la densidad ρ de la carga en el horno es una de las variables que se deben considerar en el proceso de fusión.

Resumiendo, las variables de operación eléctricas y del proceso propio son las siguientes:

I_a : la corriente del arco eléctrico
 t_f : el tiempo de fusión
 v_e : la velocidad de levantamiento de los electrodos
 ρ : la densidad de la carga en la olla del horno
 P_w : la potencia eléctrica de suministro
 m_a : la cantidad de material alimentado

La conjugación de las variables arriba citadas proporcionarán un radio de reacción r_{re} o de fusión de material alrededor de cada electrodo y de ellos dependerá su tamaño; el tamaño del radio de reacción debe ser tal que se alcance a fundir todo el material del centro del horno y la mayor cantidad posible

de la periferia sin sobrecalentar la coraza. Por ello juega un papel muy importante el la distancia entre centros de electrodos, ya que si ellos están muy separados (muy cerca de la coraza) la posibilidad de sobrecalentar la coraza en corto tiempo será mayor sin llegar a fundir el material del centro; por otro lado si los electrodos están muy juntos se requerirían radios de reacción demasiado grandes para abarcar la periferia del horno, lo que solicitaría potencias muy altas y/o velocidades muy lentas.

Por lo anterior aunque la distancia entre electrodos sea fijo durante la fusión, debe ser considerado para seleccionar una distancia adecuada que permita: 1. Fundir todo el material del centro del horno. 2. Que no se sobrecaliente la coraza de acero del horno. 3. Que las pérdidas eléctricas por efectos inductivos no se incrementen. El proceso completo encierra una serie de factores que influyen en el resultado de la fusión pero que son propios de las dimensiones de la instalación del sistema, es decir que sólo serían movibles cuando se analizara alguna instalación similar pero con dimensiones distintas. Estos factores serán dados en el transcurso del desarrollo de este trabajo.

4.2. El Modelo Físico

En esta sección se hace una descripción física del análisis teórico desarrollado en este trabajo, éste debe ser capaz de abarcar la mayoría de las variables que describan al proceso de fusión de magnesia real pero también, debe ser factible de validar con el objeto de proporcionar un valor agregado a la tecnología de los procesos de fusión de óxidos cerámicos por horno de arco eléctrico. Las condiciones que aquí se consideran son las siguientes:

- i) Se desprecia el efecto de dos electrodos sobre el tercero, es decir se analizan en primer término los electrodos de manera independiente.
- ii) Se considera que el calor generado por el arco eléctrico se dispersa radial- y concéntricamente desde los electrodos, de manera que se forman tres círculos, uno alrededor de cada electrodo; cada uno de estos círculos delimitan la frontera entre material fundido y material sin fundir.

El calor que absorbe el material de la periferia externa al círculo y el que se desprende al medio que rodea al horno se considera como una sola pérdida térmica global.

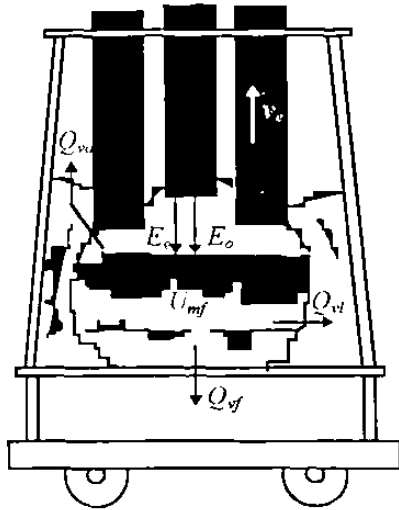


Fig. 28. Representación de la distribución de energías en el sistema aquí considerado.

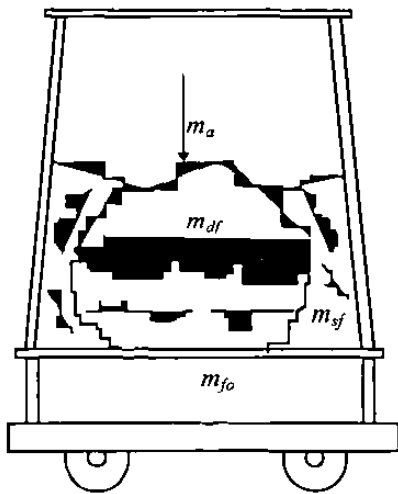
Tomando en cuenta las consideraciones anteriores se asume entonces que el lingote tenderá a formar un cilindro desde la parte inferior de la olla hasta la parte superior conforme los electrodos se desplazan a la velocidad v_e , además como el mismo material alimentado sirve como aislante debemos considerar también un radio de reacción máximo r_{remax} . Con lo anterior se tiene entonces un sistema con geometría cilíndrica rodeado de un universo (material sin fundir) con geometría de cono truncado hueco en la periferia y de cilindro en el fondo del horno. En la Fig. 28. se muestra esquemáticamente la distribución de energía dentro del sistema considerado. Inicialmente se tiene una energía neta entrando al volumen considerado para fundirse, de ahí se desprende una parte de ella a la periferia y la otra al fondo de la olla. Se considera que el calor desprendido al medio ambiente es aquel que el material aislante permite pasar, siendo que en su mayoría el calor es absorbido por la misma materia prima.

Se considera que el calor desprendido al medio ambiente es aquel que el material aislante permite pasar, siendo que en su mayoría el calor es absorbido por la misma materia prima.

4.3. Interpretación Matemática

4.3.1. Balance de Materia

El balance de materia es simple desde que se tienen sólo tres clases de material resultante distinto: uno de ellos es el material fundido, otro es el material sin fundir y el tercero es el del fondo de la olla del horno; este último es siempre constante e independiente de la alimentación, mientras que los otros dos varían y dependen del flujo de material alimentado. En suma se tiene que el material finalmente fundido más el material que queda sin fundir resultan la masa total alimentada tal como se representa en la Fig. 29. y mediante la relación (76):



$$m_{sf} = m_a - m_{df} \quad (76)$$

dónde:

m_a : masa total alimentada (kg)

m_{df} : masa disponible para fundirse (kg)

m_{sf} : masa sin fundirse (kg)

m_{fo} : masa del fondo de la olla (kg)

Fig. 29. Representación del balance de materia en el horno de arco eléctrico.

De la misma forma la relación de flujo alimentado será determinado por la suma de la rapidez de fusión del material disponible y de la rapidez de generación de material sin fundir.

4.3.2. Balance de Energía

Aplicando la primera ley de la termodinámica al sistema descrito en la sección 2.2. se obtiene la expresión siguiente:

$$E_o + E_g = U_{mf} + Q_{vf} + Q_{vf} \quad (77)$$

donde E_o ha sido definida por la ecuación (72), E_g es la energía que por la combustión del grafito de los electrodos se desprende (KWh), U_{mf} es la energía que finalmente absorbe el material fundido (KWh), Q_{vf} es la energía que absorbe el material que sirve como aislante en la periferia del lingote formado (KWh) y Q_{vf} es la energía que absorbe el material del fondo de la olla del horno (KWH). En la relación (77) la energía que absorbe el material fundido U_{mf} es termodinámicamente su entalpía H (J/kg) más su calor latente de fusión L_f (J/kg); la entalpía es una función de estado que la definen la presión y la temperatura del sistema y es representada por la siguiente expresión:

$$\partial H = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP \quad (78)$$

Considerando que la presión es constante se tiene que la entalpía será definida por el primer término de la expresión anterior, la que de otra forma es realmente la capacidad calorífica de la sustancia a presión constante:

$$dH = C_p(T) dT \quad (79a)$$

$$C_p(T) = \left(\frac{dH}{dT} \right)_P \quad (79b)$$

dónde:

$C_p(T)$: capacidad calorífica a presión constante ($J/kg \text{ } ^\circ K$)

H : entalpía específica (J/kg)

T : Temperatura del sistema ($^\circ K$)

Aplicando estas definiciones se obtiene una expresión matemática de la energía necesaria para fundir una masa disponible para fusión m_{df} de la siguiente forma:

$$U_{mf} = 3.6 \times 10^6 m_{df} \left[\int_{T_i}^{T_f} C_p(T) dT + L_f \right] \quad (80)$$

En la relación anterior T_i y T_f representan la temperatura inicial y de fusión respectivamente en $^\circ K$. Asumiendo la geometría descrita en la sección 4.2. se tendrá entonces que la masa disponible para fundirse estará dada por el volumen de un cilindro de material multiplicado por la densidad de la carga en el interior de la olla del horno. El volumen de m_{df} será definido por el radio de reacción r_{re} y por la carrera ascendente del electrodo, ésta última es variable en el tiempo y es a su vez definida por la velocidad del electrodo y el tiempo de fusión. De manera que la cantidad de material dispuesto para fusión en el tiempo \dot{m}_{df} es definida por la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{df} = \pi r_{re}^2 v_e \rho \quad (81)$$

dónde \dot{m}_{mf} es la masa disponible para fusión por unidad de tiempo (kg/h), r_{re} es el radio de reacción (cm), v_e es la velocidad ascendente del electrodo (cm/h) y ρ es la densidad aparente de la carga de material en la olla del horno (kg/cm^3). Combinando las expresiones (80) y (81) se obtiene una expresión de energía de material fundido derivada en el tiempo \dot{U}_{mf} ($KW = KWh/h$):

$$\dot{U}_{mf} = 3.6 \times 10^{-6} \pi r_{re}^2 v_e \rho \left[\int_{T_i}^{T_f} C_p(T) dT + L_f \right] \quad (82)$$

De la misma manera el calor que absorbe el material de la periferia del horno y que sirve como aislante Q_{vi} es definido por el producto de la expresión (79a) y la masa m_{sf} , ésta última es definida por la expresión (76) por lo que Q_{vi} será definida como sigue:

$$Q_{vi} = 3.6 \times 10^{-6} (m_a - m_{dt}) \int_{T_i}^{T_{of}} C_p(T) dT \quad (83)$$

La masa total alimentada m_a será determinante por la velocidad de los electrodos y el flujo de alimentación al horno bajo la condición de mantener una profundidad de sumersión de electrodo en el material h_c (cm) constante. Para deducir una expresión matemática de esto último partiremos del concepto básico de que la masa total alimentada será igual al producto del volumen que ocupa V_a (cm^3) por su densidad aparente en la olla del horno ρ (kg/cm^3):

$$m_a = V_a \rho \quad (84)$$

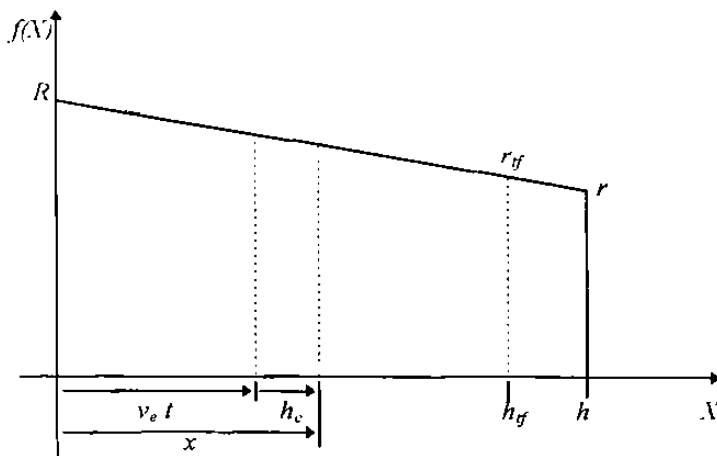


Fig. 30. Geometría de la mitad de la coraza del horno en los ejes coordenados $f(X)$ vs. X .

Aquí el volumen es definido partiendo del concepto del sólido de revolución generado por el giro de la mitad de la geometría de la coraza del horno (Fig. 30.) alrededor del eje X :

$$V_a = \pi \int_0^h [f(x)]^2 dx \quad (85)$$

dónde la función $f(X)$ es definida desde la geometría de la Fig. 30. y se expresa como sigue:

$$f(x) = R + \frac{(r_{gf} - R)}{h_{gf}} \cdot x \quad (86)$$

dónde R es el radio mayor de la coraza (cm), r_{gf} es el radio de la coraza (cm) en el nivel dónde se termina la fusión, h_{gf} es el nivel que alcanza la superficie del material alimentado (cm) al momento de terminar la fusión y la variable x (cm) es el desplazamiento del electrodo el cual como se puede observar en el diagrama de la Fig. 30., es igual a la profundidad de sumersión del electrodo en el material h_c (cm) más el producto de la velocidad de los electrodos v_e (cm/h) por el tiempo t (h). Sustituyendo este concepto en la expresión (86) y ésta a su vez en la expresión (85) se obtiene una expresión del volumen de material alimentado en función de variables operativas como son la velocidad del electrodo y el tiempo de la fusión, dónde el diferencial dx ha sido sustituido por el producto de la velocidad por el diferencial de tiempo de fusión dt :

$$V_a = \pi \cdot v_e \int_0^{t_f} \left[R + \frac{(r_{gf} - R)}{h_{gf}} \cdot (h_c + v_e \cdot t) \right]^2 dt \quad (87)$$

Al no integrarse la expresión anterior resulta el volumen de material alimentado derivado en el tiempo y multiplicando por la densidad de la carga en la olla del horno se obtiene una expresión que describe la rapidez de alimentación de material al horno \dot{m}_a (kg h) en función de la velocidad del electrodo v_e (cm h), el tiempo de fusión t_f (h), la profundidad de sumersión de los electrodos h_c (cm) y la densidad aparente de la carga en la olla del horno ρ :

$$\dot{m}_a = \pi \cdot \rho \cdot v_e \left[R + \frac{(r_{gf} - R)}{h_{gf}} \cdot (h_c + v_e \cdot t_f) \right]^2 \quad (88)$$

sustituyendo las expresiones (81) y (88) en la expresión (83) se obtiene una expresión que describe la rapidez de absorción de energía del material sin fundir \dot{Q}_{vl} (KWh h KW):

$$\dot{Q}_{vl} = 3.6 \times 10^{-6} \cdot \pi \cdot v_e \cdot \rho \left\{ \left[R + \frac{(r_{gf} - R)}{h_{gf}} \cdot (h_c + v_e \cdot t_f) \right]^2 - r_{rc}^2 \right\} \cdot \int_{T_i}^{T_{gf}} C_p(T) dT \quad (89)$$

De la misma manera se obtiene la energía que absorbe el material del fondo de la olla del horno Q_{vf} :

$$Q_{vf} = 3.6 \times 10^{-6} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h_j \cdot \rho \cdot \int_{T_i}^{T_{cf}} C_p(T) dT \quad (90)$$

dónde h_j (cm) es la profundidad del carro de fusión o fondo de la olla del horno, T_i (°K) es la temperatura inicial del material y T_{cf} (°K) es la temperatura promedio que toma toda la carga sin fundir dentro del horno en el tiempo. Para obtener un valor estimado de esta temperatura media se asume como una aproximación que su valor se incrementa desde la temperatura inicial T_i en forma lineal en el tiempo t , de manera que puede escribirse la siguiente expresión:

$$T_{cf} = T_i + V_c \cdot t \quad (91)$$

dónde V_c (°K/h) es la rapidez de calentamiento promedio del material sin fundir, este depende de la potencia de suministro eléctrica y de la cantidad de material presente; partiendo de que la energía necesaria (KWh) para incrementar la temperatura en un °K de una unidad de masa de una sustancia (kg), se tiene desde otro punto de vista que esa energía en KWh es realmente el producto de la potencia de suministro P_o (KW) por el tiempo t (h). Dimensionalmente las unidades de la velocidad de calentamiento se obtienen de la siguiente manera:

$$V_c [=] \frac{\frac{KW}{kg \cdot \frac{KWh}{kg \cdot ^\circ K}}}{h} [=] \frac{^\circ K}{h}$$

En base a valores promedio de aproximadamente 10 ton de material sin fundir y 2.5 MW de suministro de potencia con un valor promedio de capacidad calorífica de 3.1355×10^4 KWh kg °K se obtiene un valor de rapidez de calentamiento promedio V_c de aproximadamente 800 °K/h. Este valor es bastante congruente al compararse con algunas mediciones de temperatura que se han practicado en la periferia interna de la coraza alcanzando éstas durante la fusión valores desde 673 hasta 873 °K; obteniendo un promedio entre éstas y la máxima que es la de fusión (3073 °K) y con un tiempo de fusión de 2.5 h se calculan valores de V_c desde 750 °K hasta 790 °K y que son muy próximos al obtenido anteriormente. Ahora realizando por separado la integral de la expresión (90)

se obtiene la entalpía H en función de la temperatura T_{cf} , la que a su vez es función del tiempo por la expresión (91); de manera que se obtiene una expresión para la entalpía en función del tiempo:

$$H(t) = 1.25 \times 10^{-4} \cdot \left\{ \frac{[93680 \cdot (T_i + V_c \cdot t)^2 + 22.4 \times 10^8 + 3 \cdot (T_i + V_c \cdot t)^3]}{T_i + V_c \cdot t} - \frac{[93680 \cdot T_i^2 + 22.4 \times 10^8 + 3 \cdot T_i^3]}{T_i} \right\} \quad (92)$$

la expresión anterior es derivable en el tiempo de manera que es posible obtener una expresión que describa la rapidez de absorción de energía ($KW = KWh/h = J/h$) por unidad de masa de sustancia en $J/kg \cdot h$:

$$\dot{H} = \frac{1.25 \times 10^{-4}}{40.3044 \cdot \frac{kg}{kmol}} \cdot \left\{ \frac{[187360 \cdot (T_i + V_c \cdot t) \cdot V_c + 9 \cdot (T_i + V_c \cdot t)^2 \cdot V_c]}{T_i + V_c \cdot t} - \frac{[93680 \cdot (T_i + V_c \cdot t)^2 + 22.4 \times 10^8 + 3 \cdot (T_i + V_c \cdot t)^3]}{(T_i + V_c \cdot t)^2} \cdot V_c \right\} \quad (93)$$

dónde \dot{H} esta dada en $J/kg \cdot h$; sustituyendo esta expresión por la integral de la expresión (90) se obtiene la rapidez de absorción de calor del material del fondo de la olla del horno \dot{Q}_{vf} (KW):

$$\dot{Q}_{vf} = 3.6 \times 10^{-6} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h_j \cdot \rho \cdot \dot{H} \quad (94)$$

La variable E_o de la expresión (77) ha sido ya descrita por la relación (75) y desde ésta última es posible obtener una expresión de rapidez de suministro de energía eléctrica o potencia para un electrodo ($\dot{E}_o = \frac{dE_o}{dt} = P_o$) en KW , quedando la siguiente expresión:

$$\dot{E}_o = P_o = I_a^2 \left[\sqrt{\left(\frac{U}{\sqrt{3} I_a} \right)^2 - X_T^2} - R_v \right] \quad (95)$$

Para determinar por combustión de grafito de los electrodos E_g se parte del poder calorífico del grafito P_c ($9.23887 KWh/kg$)^{5,15} por lo que se obtiene:

$$E_g = c_e \cdot P_c \quad (96)$$

dónde c_e es el consumo de los electrodos (kg) el cual es obtenido a partir de un valor promedio obtenido con información de 1 año de operación del horno de dónde se obtuvo que los electrodos se consumen a razón de 9.7535 kg/MWh , por lo que la relación (95) puede ser sustituida por la siguiente:

$$E_g = 9.7535 \times 10^{-3} \frac{kg}{kWh} \cdot P_o \cdot t_f \cdot P_c \quad (97)$$

dónde P_o ha sido ya definida por la relación y (95); de aquí mismo puede obtenerse la rapidez de desprendimiento de calor por combustión del grafito \dot{E}_g (KW):

$$\dot{E}_g = 9.7535 \times 10^{-3} \frac{kg}{kWh} \cdot P_o \cdot P_c \quad (98)$$

Resumiendo, al derivar la expresión (77) con respecto al tiempo se obtiene una que describe un balance de flujos de energía por unidad de tiempo o potencias:

$$\dot{E}_o + \dot{E}_g = \dot{U}_{mf} + \dot{Q}_{vf} + \dot{Q}_{vf} \quad (99)$$

dónde pueden ser sustituidas las expresiones (81) y (82), para después despejar y obtener una expresión que describa la rapidez de fusión de una fase eléctrica:

$$\dot{m}_{yf} = \frac{P_o + \dot{E}_g - \dot{Q}_{vf} - \dot{Q}_{vf}}{3.6 \times 10^{-6} \cdot \left[\int_{T_i}^{T_f} C_p(T) dT + L_f - \int_{T_i}^{T_{ef}} C_p(T) dT \right]} \quad (100)$$

dónde el denominador es representado por f y el resto de la variables se presentan a continuación:

$$\dot{Q}_{vf} = 3.6 \times 10^{-6} \cdot \pi \cdot v_e \cdot \rho \cdot \left\{ \left[R + \frac{(r_g - R)}{h_y} \cdot (h_c + v_e \cdot t_f) \right]^2 - r_{re}^2 \right\} \cdot \int_{T_i}^{T_{ef}} C_p(T) dT \quad (89)$$

$$\dot{Q}_{vf} = 3.6 \times 10^{-6} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h_y \cdot \rho \cdot \dot{H} \quad (94)$$

$$P_o = I_a^2 \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_a} \right)^2 - X_T^2} - R \right] \quad (95)$$

$$\dot{E}_g = 9.7535 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{KWH}} \cdot P_o \cdot P_c \quad (98)$$

Con esto queda descrito en principio un Modelo Operacional del Proceso de Fusión de Magnesia por Horno de Arco Eléctrico, con el que se es capaz de describir el comportamiento de la productividad del horno en función de variables de operación como lo son: el tiempo de fusión, la corriente del arco, el nivel de voltaje, la rapidez de levantamiento de los electrodos, la densidad de la carga; además de poder variar dado el caso parámetros como las dimensiones de la olla y su geometría. Como se ha descrito, puede variarse la temperatura inicial de la carga y analizarse su efecto en la productividad del horno.

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACIÓN

5.1. Equipo y Materias Primas Usadas

El equipo de fusión usado para la validación de la teoría desarrollada en el Capítulo 6. es el de la Planta de Óxidos Fundidos (MAGNELEC) del Grupo Peñoles; el HAE ha sido ya descrito en la sección 6., de igual forma los lingotes obtenidos en cada prueba de fusión fueron quebrados y clasificados con los equipos propios de la misma planta. Para el quebrado de los lingotes se usa un martillo hidráulico y la clasificación de producto se hace en un tamiz vibratorio. La materia prima usada es MgO sinterizado proveniente de la Planta Química del Rey S. A. de C. V. (Subsidiaria de Industrias Peñoles S. A. de C. V.) y material de reciclado de la misma unidad de fusión, el análisis químico típico del material es el que se presenta en las Tablas 16. y 17. Realmente el típico del reciclado es variable pero un valor promedio es el que aquí se presenta. La granulometría típica de ambos se presentan en las Tablas 18. y 19.

Tabla 16. Análisis típico del material de reciclado.

Compuesto	% Peso
CaO	0.740
Fe ₂ O ₃	0.082
Al ₂ O ₃	0.092
SiO ₂	0.120
MgO	98.88
B ₂ O ₃	0.008
C	0.086
LOI	0.260

Tabla 17. Análisis típico del material de Química del Rey.

Compuesto	% Peso
CaO	0.87 max.
Fe ₂ O ₃	0.12 max.
Al ₂ O ₃	0.15 max.
SiO ₂	0.20 max
MgO	98.65 min.
B ₂ O ₃	0.01 max.

Tabla 18. Granulometría típica de materia de Química del Rey.

Malla	% Peso
+1/2	18.65
-1/2+3/8	59.75
-3/8+4	20.41
-4+6	0.30
-6	0.87

Tabla 19. Granulometría típica de materia de recicló.

Malla	% Peso
+1/2	8.54
-1/2+3/8	36.41
-3/8+4	21.58
-4+6	5.80
-6	27.64

5.2. Objetivo y Diseño de Pruebas

Existen muchos métodos estadísticos de diseño experimental muy útiles para validar teorías de procesos pero debido a que el equipo disponible para desarrollar la parte experimental de este trabajo es el mismo de la planta MAGNELEC, fue necesario programar pruebas de tal forma que permitiera cumplir con los objetivos de este trabajo:

1. Obtener información que permitiera validar el modelo.
2. No afectar negativamente la producción normal de la planta.
3. Obtener información de operación práctica que permitiera emitir propuestas para incrementar la productividad del horno.

Por lo anterior fueron corridas 4 pruebas preliminares bajo las condiciones descritas en la Tabla 20. Los datos de estas pruebas fueron corridos en el modelo y se compararon los resultados obtenidos, con ello fue posible ceder confianza a las sugerencias operativas del modelo y crear entonces una serie de experimentos en rangos de operación suficientemente significativos en los productos sin llegar a afectar negativamente la línea de producción.

Tabla 20. Condiciones de operación de pruebas preliminares.

Experimento Grupo-No.	Potencia MW	Tiempo hrs:min	Nivel de Voltaje	% Materia prima	
				Reciclo	QUIREY
1-1	3.25	2:15	6	0	100
1-2	3.00	2:30	6	0	100
1-3	3.35	2:30	3	0	100
1-4	3.20	2:30	6	0	100

De acuerdo al modelo se creo la tabla de experimentos mostrada en la Tabla 21.; con los resultados obtenidos de este grupo de pruebas se diseño otro al que se agregaron mas variables de análisis y cuyas condiciones operativas son descritas en la Tabla 22.

Tabla 21. Condiciones de operación de pruebas del grupo 2.

Experimento Grupo-No.	Corridas	Nivel de Voltaje	Corriente Relativa	Tiempo hrs:min	Velocidad de electrodos cm/h	% Materia prima	
						Reciclo	QUIREY
2-1	3	6	0.43116	3:00	50	75	25
2-2	3	6	0.51739	3:00	50	75	25
2-3	3	6	0.43116	2:30	60	75	25
2-4	3	3	0.34493	2:00	75	75	25
2-5	2	6	0.51739	2:30	60	75	25
2-6	1	3	0.34493	2:30	60	75	25

Por los resultados que se habían obtenido se tomó la alternativa de clasificar el material por tamaño como *material fino* y *material grueso*. Con los resultados de estas fusiones se contaba ya con información suficiente para:

1. Validar la teoría de este trabajo.
2. Declarar métodos de mejora para el horno de la planta

sin embargo para confirmar las sugerencias resultantes de este trabajo y asegurar su utilidad en la planta, se corrieron dos últimas pruebas diseñadas en base a la confianza cedida por los resultados arrojados de las pruebas anteriores. Las condiciones operativas de estas últimas fusiones son descritas en la Tabla 23.

Tabla 22. Condiciones de operación de pruebas del grupo 3.

Experimento Grupo-No.	Nivel de Voltaje	Corriente Relativa	Tiempo hrs:min	Velocidad de electrodos cm/h	Materia prima			
					Reciclo		QUIREY	
					%	Tamaño	%	Tamaño
3-1	6	0.51739	2:30	60	75	Grueso	25	Grueso
3-2	6	0.51739	2:30	60	75	Grueso	25	Grueso
3-3	6	0.51739	3:00	50	75	Grueso	25	Grueso
3-4	3	0.34493	2:00	75	75	Grueso	25	Grueso
3-5	3	0.34493	2:00	75	75	Grueso	25	Grueso
3-6	3	0.34493	2:00	75	75	Grueso	25	Grueso
3-7	3	0.34493	2:30	60	75	Grueso	25	Grueso
3-8	6	0.43116	3:00	50	75	Fino	25	Grueso
3-9	3	0.34493	2:30	60	75	Grueso	25	Grueso
3-10	6	0.43116	3:00	50	75	Fino	25	Grueso
3-11	6	0.43116	3:00	50	75	Fino	25	Grueso
3-12	6	0.43116	3:00	50	75	Fino	25	Grueso
3-13	6	0.51739	2:30	60	75	Fino	25	Grueso
3-14	6	0.51739	2:30	60	75	Fino	25	Grueso
3-15	6	0.43116	2:30	60	75	Fino	25	Grueso
3-16	6	0.43116	2:30	60	75	Fino	25	Grueso
3-17	6	0.51739	3:00	50	75	Fino	25	Fino
3-18	6	0.51739	3:00	50	75	Fino	25	Fino
3-19	6	0.51739	2:30	60	75	Fino	25	Fino
3-20	6	0.51739	3:00	50	75	Fino	25	Grueso
3-21	6	0.51739	3:00	50	75	Fino	25	Grueso
3-22	6	0.43116	3:00	50	75	Fino	25	Fino
3-23	6	0.51739	3:00	50	75	Fino	25	Fino

Tabla 23. Condiciones de operación de pruebas finales.

Experimento Grupo-No.	% Materia prima grueso		Nivel de Voltaje	Corriente Relativa	Tiempo hrs:min	Velocidad de electrodos cm/h
	Reciclo	QUIREY				
F-1	75	25	6	0.51739	3:00	35
F-2	75	25	6	0.51739	2:30	30
F-3	75	25	6	0.51739	3:00	35
F-4	75	25	6	0.51739	2:30	30

5.3. Desarrollo de Pruebas

Las pruebas se desarrollaron en las instalaciones de la planta MAGNELEC del Grupo Peñoles en Ramos Arizpe, Coah., con la colaboración del personal que en ella labora. La preparación de las pruebas no requiere de acciones especiales, es decir se prepara como las fusiones normales de producción. Durante las fusiones se registran datos necesarios para evaluar y comparar los resultados finalmente. Las variables registradas son las siguientes:

1. Altura de electrodos de cada fase durante la fusión.
2. Tiempo.
3. Potencia activa.
4. Potencia reactiva.
5. Consumo de energía.
6. Factor de potencia.
7. Nivel de voltaje del transformador.
8. Voltaje en cada fase.
9. Corriente de arco en cada fase.

Todas las variables se registran cada 5 minutos; el enfriamiento de los lingotes es el que en producción normal se aplica pero no así el quebrado de ellos ya que los lingotes resultantes de pruebas fueron pesados por fase eléctrica. La clasificación del producto fue hecha obedeciendo los procedimientos normales de operación del área.

Una fusión consiste en alimentar material previamente seleccionado a la olla del horno una vez que se ha encendido el arco, los electrodos deben levantarse a una velocidad previamente establecida con la precaución de seguir alimentando material para evitar que el arco eléctrico se descubra y dañe la coraza de la olla que carece de aislante; a la vez debe mantenerse la precaución de suministrar la corriente previamente establecida que permita sostener una potencia deseada. la operación de levantamiento de electrodos y alimentación de material manteniendo una potencia constante continua

hasta que se complete la carrera máxima de los pistones y se llene la olla con material. El tiempo dependerá de la velocidad de electrodos manejada. Una vez que se termina la fusión el lingote es dejado enfriar de 4 a 5 días para después separarlo del reciclo o material sin fundir y 4 o 5 días después es quebrado para seleccionar el producto fundido (núcleo) y la costra (material sin fundir adherido al núcleo). El núcleo es molido, ensacado y pesado por fase eléctrica.

De cada lingote de prueba fue tomada una muestra para determinar la densidad (BSG) del producto, distribución del tamaño de cristal y la composición química; con los métodos que aplican los laboratorios del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CIDT) y de la planta Química del Rey S. A. de C. V., ambos subsidiarios del Grupo Industrial Peñoles.

5.4. Técnicas de Análisis Petrográficos y de BSG de Muestras

El método utilizado para la determinación del diámetro promedio de cristal de la magnesia electrofundida, es el desarrollado por el CIDT. En realidad el método fue desarrollado para la medición de tamaños de cristales de magnesia sinterizada, la única diferencia en el análisis esta en la magnificación utilizada. El método consta de las etapas siguientes:

1. Preparación de la muestra.

- a) Homogeneización de la muestra, quebrándola y obteniendo una fracción de -4+6 mallas.
- b) Se encapsula la fracción en resina, haciendo vacío para permitir la penetración de esta en los poros abiertos. Se deja fraguar.
- c) Pulir a acabado espejo (desbaste grueso y fino con cinco pasos de lijas, pulido grueso con pastas de diamante de 6 micrones y pulido fino con pastas de alúmina de 1.0, 0.3 y 0.05 micrones).

2. Método de medición.

2.1. Consideraciones.

- a) Valor medido: Diámetro de volumen medio.
- b) Técnica empleada: Microscopía óptica por luz reflejada y análisis de imágenes.
- c) Número de datos que se obtienen: 500 mínimo.
- d) Magnificación: 500X (50X para magnesia electrofundida).

2.2. Procedimiento de obtención de datos.

- a) Fijar un punto de inicio de medición, seleccionando algún extremo de la probeta.
- b) En el campo seleccionado medir aquellos cristales que coincidan con el eje horizontal de la retícula de medición.
- c) El diámetro de cada cristal corresponde a la magnitud del segmento que divide al cristal en dos secciones de área equivalente.
- d) Una nueva área de análisis se obtiene moviendo tres campos de observación.
- e) Se efectúan mediciones en toda el área expuesta de la probeta pulida.

2.3. Presentación de datos.

Los datos son agrupados en rangos con progresión geométrica, donde cada rango varía en proporción $\sqrt{2}^n$. La selección de este tipo de clases se basa en que la resolución es prácticamente constante, por lo que los errores de las mediciones son equivalentes en cada rango.

2.4. Cálculo del diámetro promedio del cristal (DPC).

El diámetro promedio es obtenido mediante la relación siguiente:

$$DPC = \frac{\sum_i^n d_i^3 \cdot f_i}{\sum_j^n d_j^2 \cdot f_j} \quad (101)$$

dónde.

d : el tamaño promedio de la clase de un rango dado.

f : frecuencia numérica de d .

Debido al gran tamaño de cristales obtenidos en las muestras, es necesario analizar las muestras a una magnificación de 50X.

Los BSG (Bulk Specific Gravity) fueron obtenidos de acuerdo a la norma C 357 - 85 de la ASTM, la que describe el método de prueba para densidad "bulk" de materiales refractarios granulares.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1. Pruebas Preliminares

6.1.1. El Consumo de Energía Eléctrica

Para confirmar que las consideraciones eléctricas presentadas en la sección 3.2.1 se aproximaban a la realidad, son presentados en las Figs. 31., 32., 33., y 34. los consumos de energía de las pruebas preliminares; como puede observarse los valores calculados son bastante congruentes con los medidos en planta. Los valores medidos en planta fueron obtenidos mediante la sumatoria de productos de lecturas de potencia e intervalos de tiempo.

En la Tabla 24. son presentados los cálculos y lecturas de energía. Es importante aclarar que las lecturas en planta se han hecho mediante instrumentos analógicos por lo que aún cuando la precisión en las comparaciones sea muy exacta, debe considerarse que existe una diferencia de aproximación en los datos teóricos considerados.

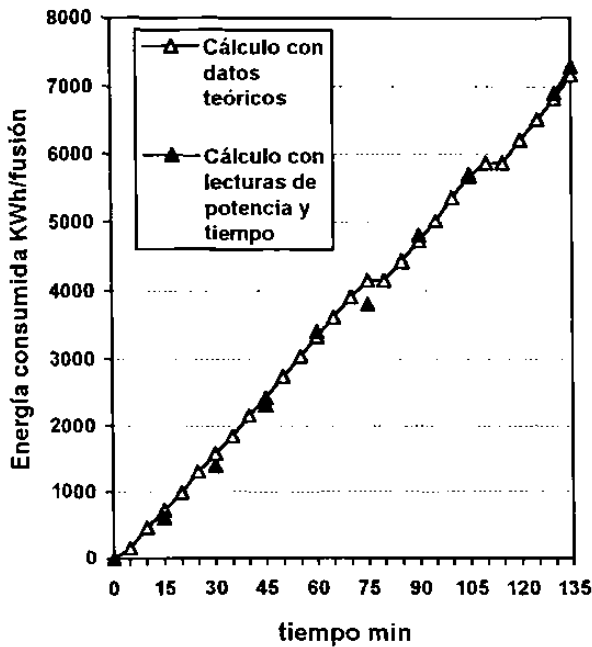


Fig. 31. Comparación del consumo de energía entre datos de planta y cálculos teóricos del experimento 1-1.

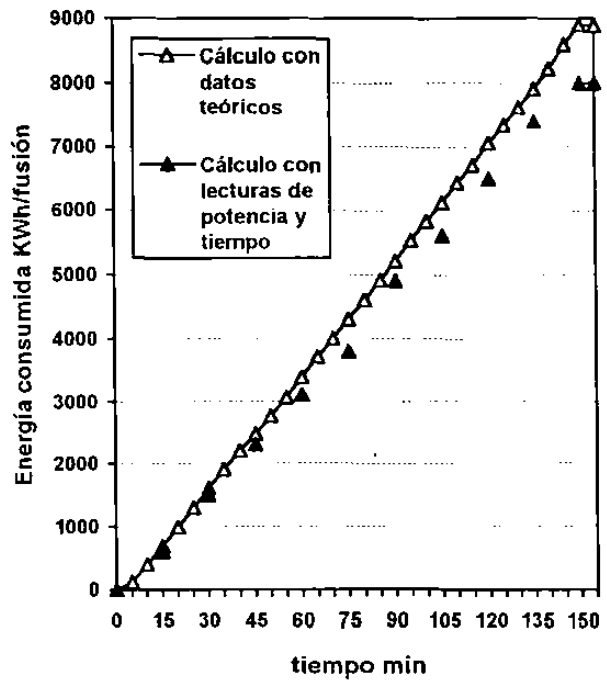


Fig. 32. Comparación del consumo de energía entre datos de planta y cálculos teóricos del experimento 1-2.

Los cálculos teóricos presentados en la tabla y graficados en las figuras fueron determinados con la expresión de energía (75) obtenida y descrita en la sección 4.1. Para esto se hicieron durante las fusiones lecturas de voltaje de línea y corrientes de arco, con ellas, el valor correspondiente de reactancia inductiva considerada en la sección 3.2.1 y el tiempo de fusión fueron obtenidos los valores aquí presentados.

Durante las fusiones la corriente de arco no es estable y varía de manera casi insignificante del valor deseado, por consecuencia el valor de la potencia suministrada es también variante; por esto en adelante todos los cálculos han sido basados en los consumos de energía de cada fusión y en el tiempo real que el arco estuvo encendido, ya que con esto ha sido posible determinar un suministro de potencia promedio en cada fase durante el tiempo de fusión en cada experimento.

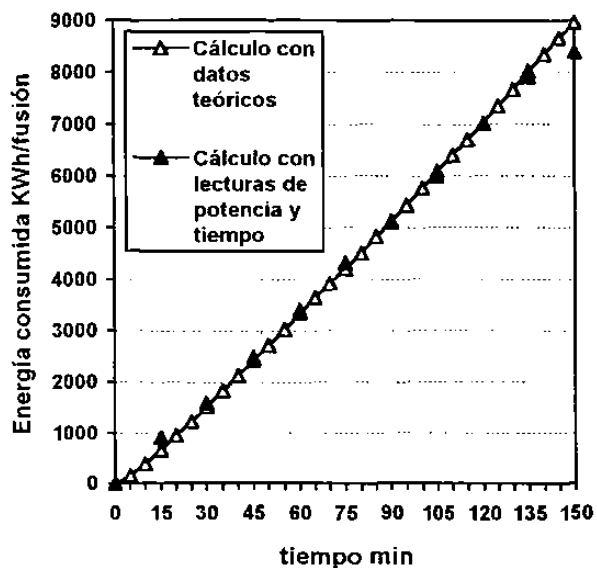


Fig. 33. Comparación del consumo de energía entre datos de planta y cálculos teóricos del experimento 1-3.

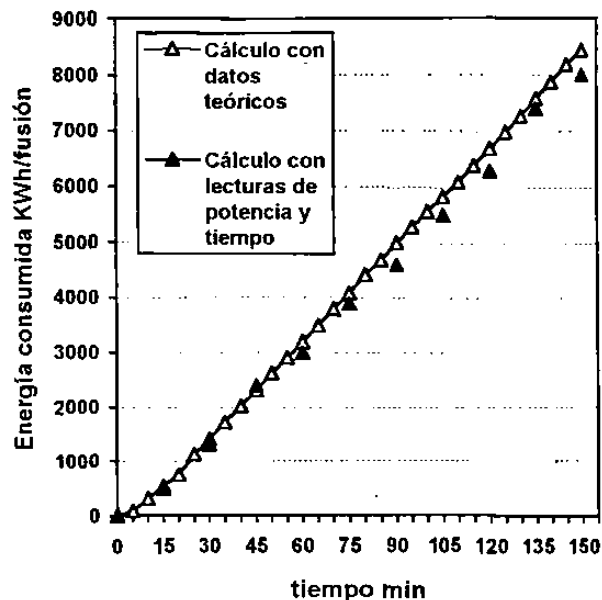


Fig. 34. Comparación del consumo de energía entre datos de planta y cálculos teóricos del experimento 1-4.

Tabla 24. Datos leídos y calculados para el consumo de energía de las Pruebas Preliminares.

Experimento 1-1		Experimento 1-2		Experimento 1-3		Experimento 1-4		Tiempo
Cálculo Energía KWh	Lectura Energía KWh	Cálculo Energía KWh	Lectura Energía KWh	Cálculo Energía KWh	Lectura Energía KWh	Cálculo Energía KWh	Lectura Energía KWh	min
0	0	0	0	0	0	0	0	0
158.7		129.9		155.9		77.94		5
461		403.2		376.6		307.3		10
718.7	600	689.2	600	650.4	900	536.2	500	15
983.5		983.4		943.8		748.8		20
1301		1296		1247		1127		25
1581	1400	1601	1500	1526	1600	1418	1300	30
1847		1903		1841		1725		35
2158		2198		2139		2025		40
2420	2300	2475	2300	2433	2500	2328	2400	45
2732		2760		2714		2638		50
3035		3060		3028		2929		55
3330	3400	3382	3100	3341	3400	3197	3000	60
3610		3717		3647		3491		65
3904		4011		3916		3793		70
4152	3800	4306	3800	4195	4300	4100	3900	75
4152		4606		4506		4429		80
4424		4918		4818		4698		85
4710	4800	5214	4900	5128	5100	5006	4600	90
5008		5527		5431		5299		95
5354		5828		5766		5575		100
5665	5700	6122	5600	6093	6000	5839	5500	105
5867		6437		6399		6101		110
5867		6707		6700		6404		115
6200		7052	6500	7015	7000	6698	6300	120
6506		7337		7346		6984		125

6.1.2. La Velocidad de los Electroodos

En las Figs. 35., 36., 37. y 48. se presenta el desplazamiento que cada electrodo de cada experimento tuvo durante las fusiones, en ellas se trazan rectas de regresión lineal con lo que se ha obtenido un valor de velocidad promedio para cada electrodo. En la Tabla 25. se dan los datos colectados para cada prueba realizada. Es importante hacer notar aquí que cada electrodo tiene un comportamiento de velocidad independiente, lo que ocasiona heterogeneidad en el lingote fundido.

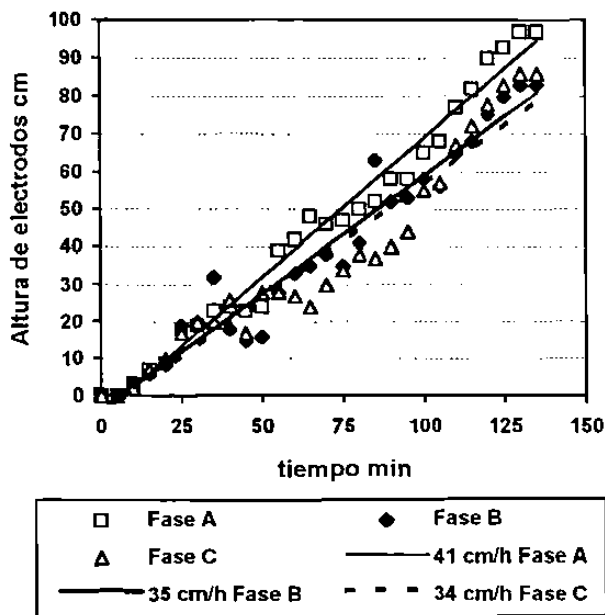


Fig. 35. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 1-1.

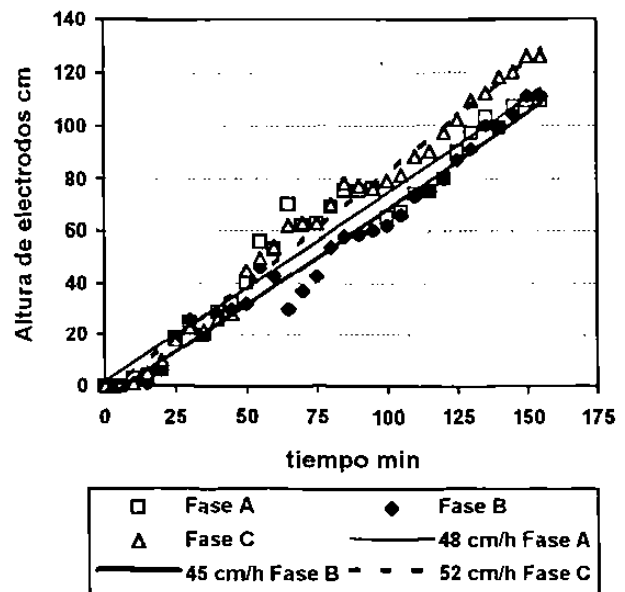


Fig. 36. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 1-2.

La razón por la que el desplazamiento de los electrodos en una misma fusión sea diferente, se debe a que se trató de mantener un suministro de potencia constante durante cada fusión, esto se hace levantando y bajando los electrodos para mantener estable la corriente del arco a un mismo nivel de voltaje previamente seleccionado. Debido a la heterogeneidad de la carga de material su calentamiento no es homogéneo y por lo tanto la conductividad es diferente en distintas zonas dentro del horno, esto provoca incrementos y disminuciones bruscas de la corriente del arco y obliga a levantar o bajar los electrodos de manera independiente, ocasionando con ello que cada electrodo tenga finalmente una velocidad independiente.

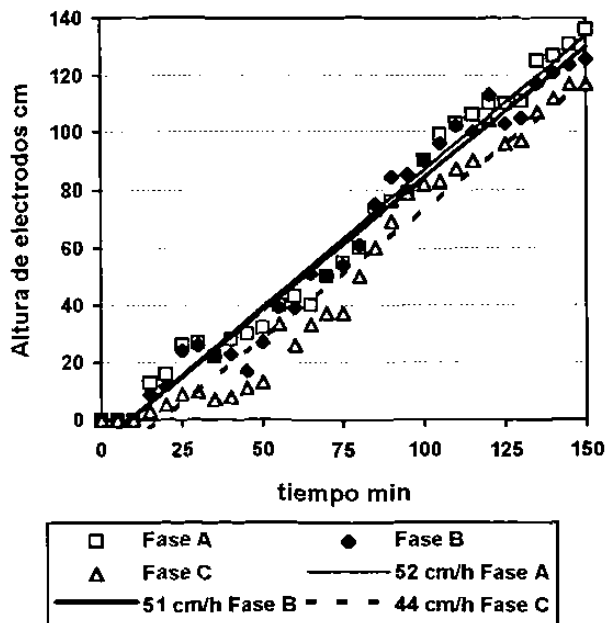


Fig. 37. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 1-3.

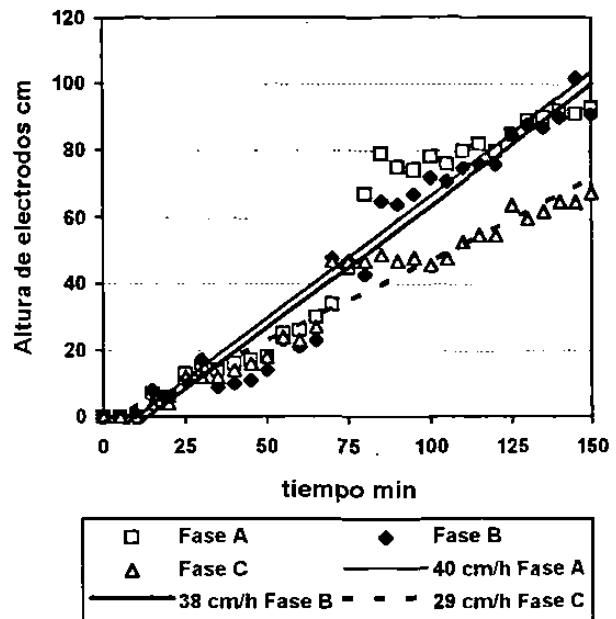


Fig. 38. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 1-4.

Tabla 25. Datos colectados de altura de electrodos durante las pruebas preliminares.

Experimento 1-1			Experimento 1-2			Experimento 1-3			Experimento 1-4			Tiempo min
Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			
Fase A	fase B	Fase C	Fase A	fase B	Fase C	Fase A	fase B	Fase C	Fase A	fase B	Fase C	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
3	3	2	3	1	1	0	0	0	0	0	0	10
7	6	7	4	1	5	13	9	3	7	8	4	15
9	8	10	6	6	10	16	12	5	6	6	4	20
18	19	17	19	19	18	26	24	9	13	11	12	25
19	20	20	25	26	23	27	26	10	14	17	12	30
23	32	20	20	20	22	22	22	7	14	9	12	35
24	18	26	29	28	26	28	23	8	16	10	14	40
23	15	17	32	30	28	30	17	11	17	11	16	45
24	16	28	40	32	45	32	27	13	18	14	18	50
39	28	28	56	46	50	40	39	33	25	23	24	55
42	33	27	53	43	54	43	39	26	26	21	23	60
48	35	24	70	30	62	40	51	33	30	23	27	65
46	38	30	62	37	63	50	50	37	34	48	47	70
47	35	34	63	43	63	55	54	37	45	47	47	75
50	41	38	69	54	70	60	61	50	67	43	47	80
52	63	37	75	58	78	73	75	60	79	65	49	85
58	52	40	75	59	77	76	84	69	75	64	47	90

6.1.3. La Productividad

La productividad es uno de los índices de desempeño que caracterizan los procesos productivos en general. En la fusión de magnesia por horno de arco eléctrico es importante conocer este índice de desempeño por fusión realizada en términos de cantidad de producto obtenido. Otro índice de desempeño que caracteriza este proceso es la cantidad de energía consumida por unidad de producto fundido que será visto más adelante. Aquí hemos definido la productividad del horno como los kilogramos de producto obtenido entre el tiempo de fusión (kg producto/hora):

$$\dot{m}_{df} = \text{Productividad} = \frac{\text{kg producto}}{\text{tiempo de fusión}}$$

6.1.3.1 Efecto de la Velocidad de los Electrodo

En la Tabla 26. se presentan los datos de las pruebas preliminares y los resultados de productividad por fase eléctrica; aquí se han obtenido los pesos de los lingotes obtenidos de cada prueba por fase según se encontraron físicamente localizados en el horno durante la fusión.

Tabla 26. Resultados de productividad por fase eléctrica de pruebas preliminares.

Experimento	Fase eléctrica	Nivel de voltaje	Corriente relativa	Velocidad de electrodos cm/h	Tiempo de fusión hrs.	P_e KW	E_e KW	$Q_n + Q_f$ KW	f KWh/kg	m_f teórico kg/h	m_f real kg/h
1-1	A	6	0.562667	41	2.25	889	97	541	1.184	376	321
	B	6	0.568703	35		890	98	499		414	401
	C	6	0.565901	34		890	97	491		419	424
1-2	A	6	0.536797	47	2.5	877	95	614	1.121	319	316
	B	6	0.514161	45		864	92	593		323	354
	C	6	0.516964	51		862	92	641		283	282
1-3	A	3	0.474278	52	2.5	1096	111	671	1.121	477	430
	B	3	0.481608	50		1105	112	657		499	442
	C	3	0.455738	44		1071	108	614		503	548
1-4	A	6	0.548654	40	2.5	883	96	584	1.121	352	335
	B	6	0.559433	38		887	97	568		371	359
	C	6	0.548438	28		883	96	485		440	457

En las Figs. 39., 40., 41. y 42. se presentan gráficamente los resultados de productividad contra velocidad de electrodos; como cada electrodo se comporta diferente a los otros dos se han graficado

de forma independiente cada fase (A, B y C) y de acuerdo al modo de operación y comportamiento de cada electrodo se han trazado las curvas del modelo de acuerdo a la función (100) descrita en la sección 4.3.2. Aquí puede observarse como disminuye la productividad con el incremento de la velocidad de los electrodos para una misma potencia de suministro, un mismo tiempo de fusión y una misma densidad de materia prima. Lo anterior es natural puesto que a altas velocidades de electrodos el radio de reacción r_{re} es pequeño ya que la transferencia de calor hacia la periferia es baja.

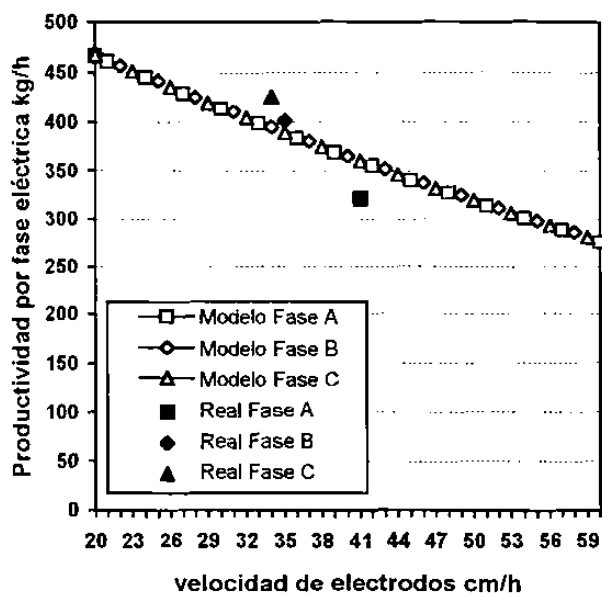


Fig. 39. Resultados del modelo y de la Prueba 1-1, de productividad por fase eléctrica.

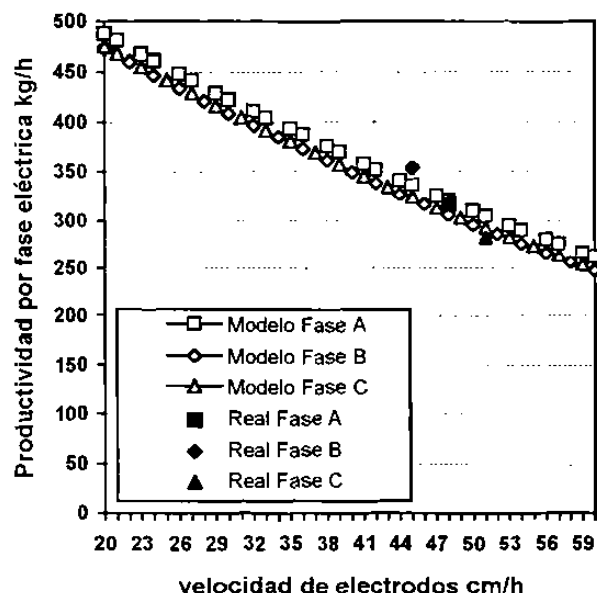


Fig. 40. Resultados del modelo y de la Prueba 1-2, de productividad por fase eléctrica.

En la gráfica de la Fig. 39, las fases A, B y C mantuvieron la misma potencia de entrada pero su velocidad de levantamiento fue distinta; debido a que la operación eléctrica fue la misma o muy cercanas entre sí, las curvas del modelo se empalman, mientras que los tres puntos experimentales difieren en la velocidad de electrodos. Por la escala considerada se aprecia un error casi mínimo pero como se ha mencionado antes debe considerarse aquí los errores de lectura de datos eléctricos y el de selección de producto durante el quebrado del lingote.

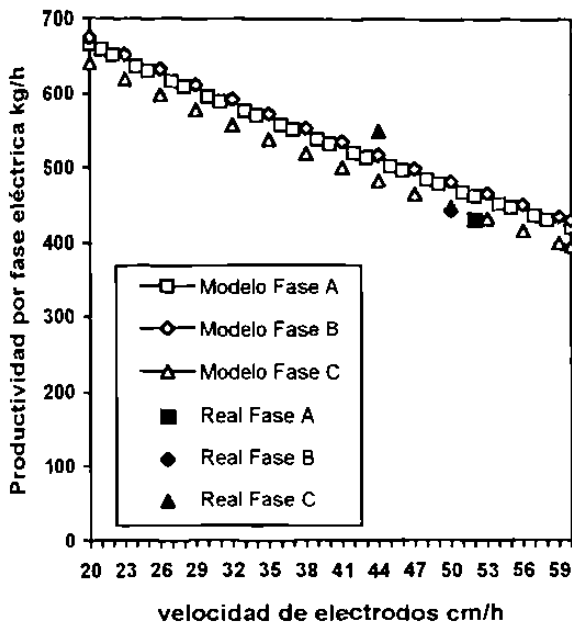


Fig. 41. Resultados del modelo y de la Prueba 1-3, de productividad por fase eléctrica.

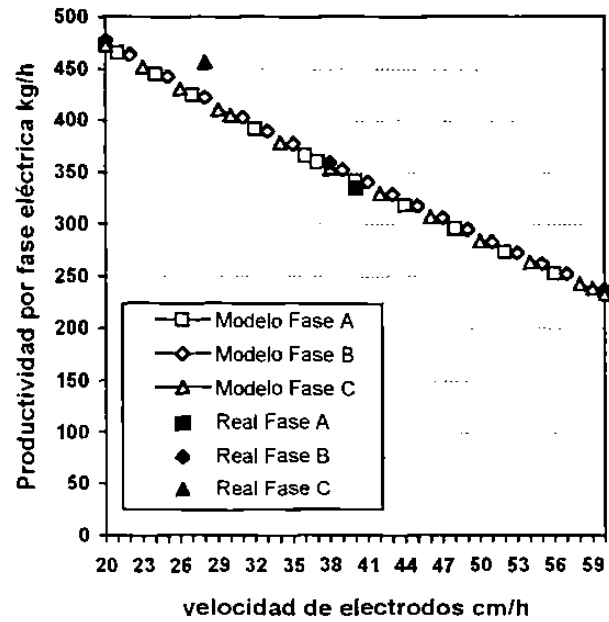


Fig. 42. Resultados del modelo y de la Prueba 1-4, de productividad por fase eléctrica.

En las gráficas de las Figs. 40. y 41. las corrientes de fase en cada experimento fue distinta por que la potencia entre fases de cada prueba es también ligeramente distinta, es por ello que los trazos del modelo teórico obtenidos con las condiciones operativas de cada fase eléctrica en cada prueba son distintas y se presentan paralelos un trazo de otro en cada gráfica. Mientras que en la gráfica de la Fig. 42. el comportamiento de las tres fases eléctricas fue muy parejo, es decir el suministro de potencia en las tres fue prácticamente el mismo, por ello los tres trazos teóricos se empalman.

6.1.3.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico

En las Figs. 43., 44., 45. y 46. se muestran gráficamente los resultados de productividad por fase eléctrica contra la corriente de arco relativa, estas curvas han sido trazadas partiendo de la sustitución de los datos de la Tabla 26, en la expresión (100) de la sección 4.3.2 para cada fase eléctrica en cada prueba realizada. En las mismas gráficas se traza la curva de potencia monofásica y

del factor de potencia; además se señala el punto de productividad promedio de las tres fases en cada experimento, con esta información se traza un área de trabajo eléctrico para cada prueba tal como se señala en cada gráfica.

En la Fig. 43. se observan dos curvas de productividad empalmadas correspondientes a las fases B y C que como se puede leer en la Tabla 26., tuvieron una velocidad de electrodos de 35 y 34 cm/h respectivamente (valor muy cercano); al compararse estos dos trazos con la curva de productividad de la fase A, la que tuvo una velocidad de electrodo de 41 cm/h, se observa una pequeña diferencia en el resultado para un mismo punto de trabajo eléctrico.

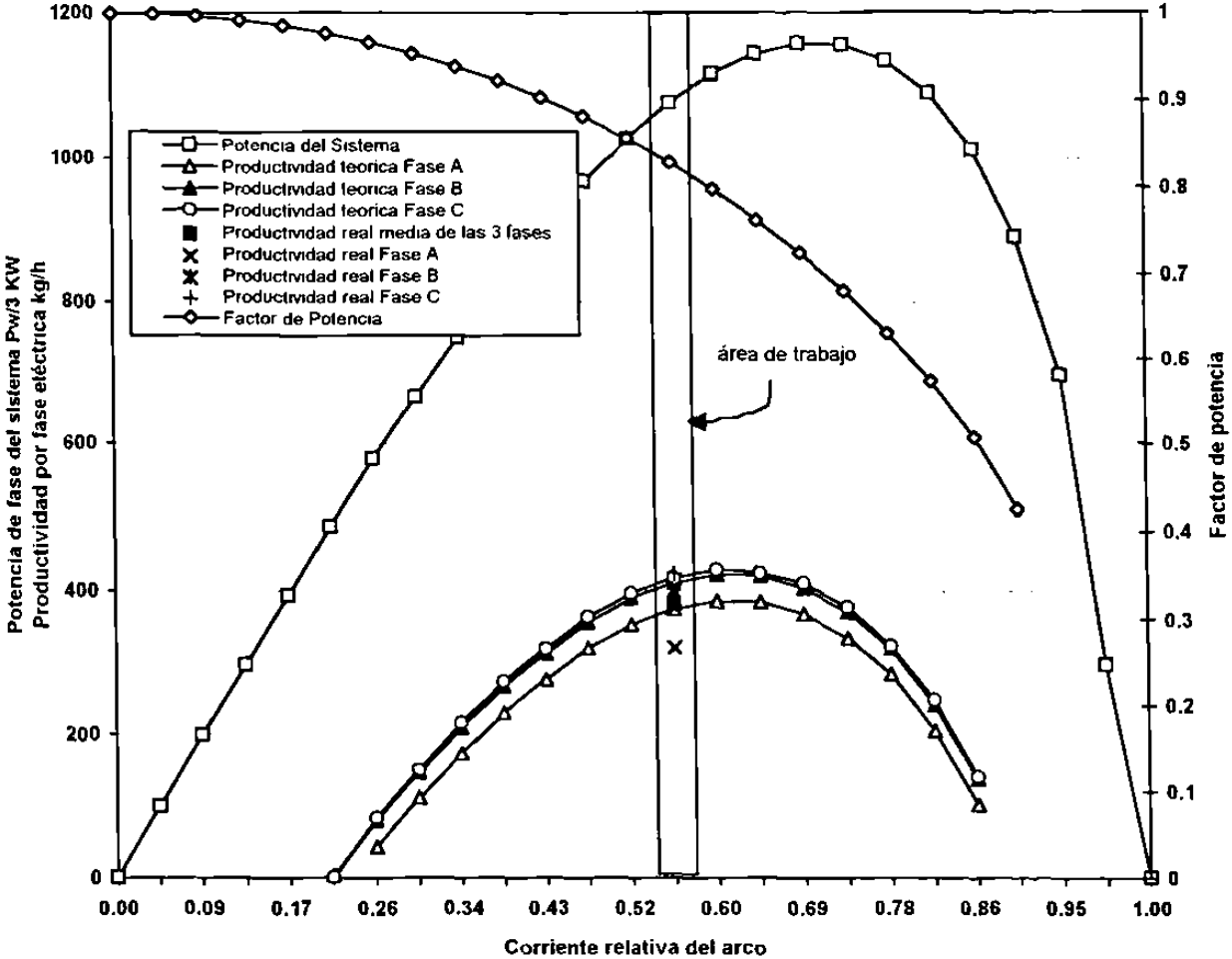


Fig. 43. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 1-1 de las preliminares.

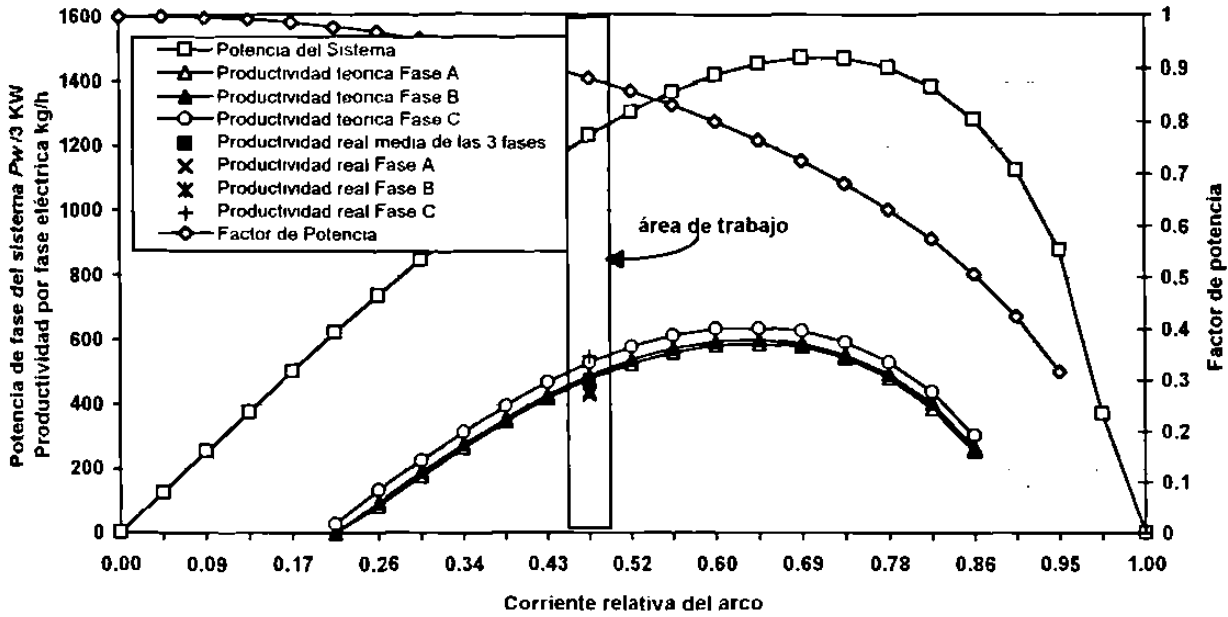


Fig. 44. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 1-2 de las preliminares.

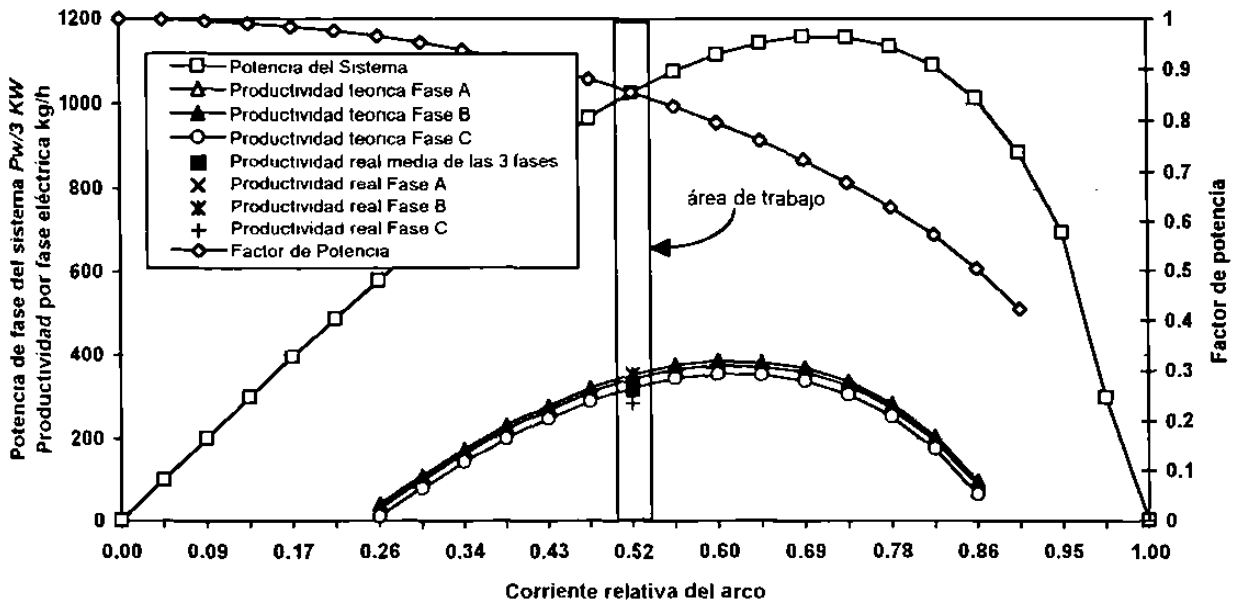


Fig. 45. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 1-3 de las preliminares.

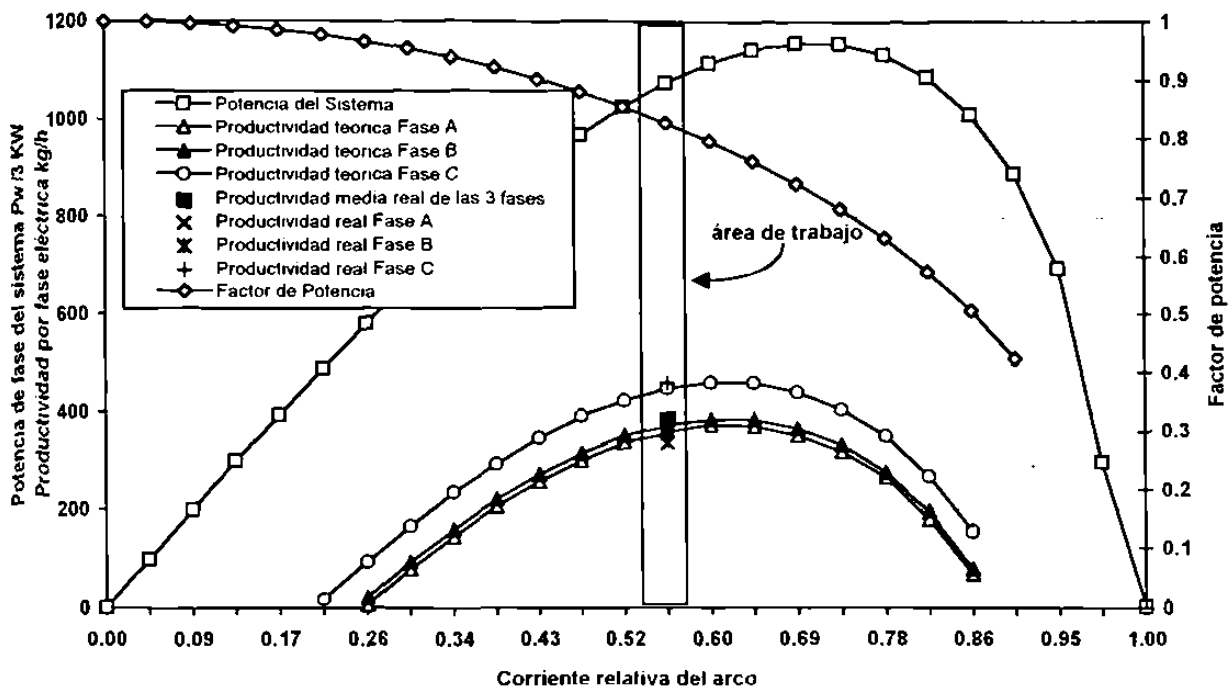


Fig. 46. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 1-4 de las preliminares.

En la Fig. 43 como en las otras tres se observa que las curvas trazadas con velocidades más bajas proporcionan productividades mayores para un mismo punto de trabajo. Además puede observarse que existe un límite de corriente de arco máxima para un mismo nivel de voltaje en el que se obtiene una productividad máxima para una velocidad de electrodo constante. Esta corriente de arco máxima para la productividad no coincide con el valor de corriente de arco máxima para la curva de potencia del sistema, en las Figs 43 , 44 y 46 que han sido trazadas para un mismo nivel de voltaje (6), la primera corresponde a aproximadamente un valor de 0.60 con un factor de potencia ó $\cos\phi$ de 0.80, mientras que la segunda corresponde a un valor aproximado de 0.7071 con $\cos\phi$ igual a 0.7071 ó $\frac{1}{\sqrt{2}}$. Para la Fig. 45. cuyas curvas han sido trazadas para el nivel de voltaje 3, el valor del límite de corriente de arco máxima para productividad máxima a cualquier velocidad de electrodo es de aproximadamente 0.64 con $\cos\phi$ igual a 0.7683, mientras que para la curva de potencia el límite de corriente de arco máxima es de aproximadamente 0.7071 con $\cos\phi$ igual a 0.7071. Si la corriente

sobrepasa los valores máximos para cada curva de productividad o potencia, éstos decrecientan su valor hasta un valor cero

Como se muestra en las Figs. 43. y 46. las pruebas fueron corridas en un punto de trabajo eléctrico muy similar, es decir la potencia suministrada por fase en cada una de estas pruebas fue prácticamente la misma, sin embargo las curvas de productividad no coinciden; al comparar las 6 curvas trazadas se puede observar en el caso de la fase C que tuvo la velocidad de electrodo más baja (28 cm h) se obtiene una productividad más alta para un mismo punto de trabajo eléctrico. Si ahora se comparan estas 6 curvas con las tres de productividad de la Fig. 44. puede observarse que la que menos productividad presenta es la de la fase C de la prueba 1-2, la que tuvo la velocidad más alta (51 cm h) de las 9 curvas comparadas. Todas estas 9 curvas han sido trazadas para el nivel de voltaje 6 porque así fueron corridas las pruebas experimentales 1-1, 1-2 y 1-4.

Por otro lado el punto de trabajo eléctrico de la prueba 1-2 (Fig 44.) fue a una corriente de arco inferior (aproximadamente 0.52) y por lo tanto un factor de potencia mayor ($\cos\phi = 0.854$); en la operación del horno trabajar con corrientes de arco menores ocasiona que el operario levante los electrodos en intervalos de tiempo pequeños lo que resulta en una velocidad de levantamiento de electrodos alta, que para esta prueba fue de 47 , 45 y 51 cm h para las fases A, B y C respectivamente. Seguramente si la prueba habría sido corrida a una corriente de arco mayor, la velocidad de los electrodos habría sido menor; esto último lo creemos así pero como mas adelante se explicara existe una influencia inevitable del tamaño de grano de la carga dentro del horno.

La prueba 1-3 fue corrida en el nivel de voltaje 3 y las curvas de la Fig. 45. han sido trazadas bajo esta condición. En primer lugar se observa que los niveles de potencia que se alcanzan aquí son mayores que los alcanzados por las curvas trazadas con el nivel de voltaje 6 (Figs. 43., 44. y 46.), teniéndose que para valores de corriente de arco ligeramente inferiores (0.475) se alcanzan potencias mayores o similares que con corrientes de arco mayores en el nivel de voltaje 6; la ventaja de esto es que se trabaja con factores de potencia ($\cos\phi$) mayores por lo que eléctricamente el sistema tiene un mayor aprovechamiento de la energía.

Comparando las curvas de productividad trazadas para ambos niveles de voltaje 6 y 3 con datos de las pruebas 1-2 y 1-3 respectivamente (Figs. 44. y 45.) se observa que en el nivel de voltaje 3 con factores de potencia mayores y velocidades de electrodo similares que con el nivel de voltaje 6 se obtiene una productividad mayor. Por ejemplo se observa que la velocidad de electrodos de estas dos pruebas fue de 47, 45 y 51 *cm h* para las fases A, B y C respectivamente en la prueba 1-2 y de 52, 50 y 44 *cm h* para las fases A, B y C respectivamente en la prueba 1-3, es decir los valores de velocidades manejadas fue muy similar; considerando lo anterior se observa que en la Fig. 44. el factor de potencia manejado fue $\cos\phi = 0.8541$ y a este corresponde una productividad inferior a 400 *kg h* de cada fase eléctrica con las velocidades de electrodos aquí manejadas, mientras que para el mismo rango de velocidades pero operando en el nivel de voltaje 6 con un factor de potencia ligeramente superior a $\cos\phi = 0.8799$ se obtienen productividades arriba de 400 *kg/h* de cada fase eléctrica. Como fue mostrado en la sección 2.2.3. al trabajar con factores de potencia altos, el aprovechamiento de la energía eléctrica es más alto que trabajando con factores de potencia bajos en un mismo nivel de voltaje previamente seleccionado. Sin embargo como ya se citó arriba y será explicado mas adelante, existe una relación inevitable entre la velocidad de electrodos, el factor de potencia y la carga de material dentro del horno.

6.1.4. El Consumo Específico de Energía

Aquí hemos definido el consumo específico de energía como el cociente de la energía eléctrica consumida (*KWh*) entre el peso del producto obtenido (*kg*):

$$E_e = \text{Energía específica} = \frac{\text{Energía consumida}}{\text{peso del producto}} [=] \frac{\text{KWh}}{\text{kg}}$$

Los datos teóricos y reales para cada fase eléctrica y trifásicos en cada prueba son presentados en la Tabla 27., dónde el consumo de energía específica teórica E_{ec} ha sido calculado mediante el cociente de la potencia del sistema P_w y la productividad teórica ahí mismo tabulada; mientras que el consumo de energía específico real E_{er} fue calculado por el cociente de la potencia del sistema P_w y la productividad real de pruebas. Dada la proximidad de los consumos de energía calculados y leídos

en planta que se presentaron en la Tabla 24 de la sección 6.1.1. se ha considerado aquí la misma potencia de suministro del sistema para el cálculo de los consumos de energía específica teórica y real en cada prueba realizada.

Tabla 27. Resultados del consumo de energía por fase eléctrica y trifásico de pruebas preliminares.

Experimento	Fase eléctrica	Nivel de voltaje	Corriente relativa	Velocidad de electrodos cm/h	Tiempo de fusión hrs.	P_w KW	m_g teórico kg/h	m_g real kg/h	E_c calculado KWh/kg	E_r real KWh/kg
1-1	A	6	0.562667	41	2.25	1078	376	321	2.867	3.358
	B	6	0.568703	35		1084	414	401	2.618	2.703
	C	6	0.565901	34		1081	419	424	2.579	2.549
	Total	-	-	-		3243	1209	1146	2.682	2.829
1-2	A	6	0.536797	47	2.5	1049	319	316	3.288	3.319
	B	6	0.514161	45		1022	323	354	3.164	2.887
	C	6	0.516964	51		1025	283	282	3.621	3.634
	Total	-	-	-		3096	925	952	3.347	3.361
1-3	A	3	0.474278	52	2.5	1230	477	430	2.578	2.860
	B	3	0.481608	50		1243	499	442	2.490	2.812
	C	3	0.455738	44		1195	503	548	2.375	2.180
	Total	-	-	-		3668	1479	1420	2.480	2.366
1-4	A	6	0.548654	40	2.5	1063	352	335	3.019	3.173
	B	6	0.559433	38		1078	371	359	2.905	3.002
	C	6	0.548438	28		1062	440	457	2.413	2.323
	Total	-	-	-		3203	1163	1151	2.754	2.780

6.1.4.1 Efecto de la Velocidad de los Electroodos

En las Fig. 47 se presentan gráficamente los resultados del consumo de energía específica contra velocidad de electrodos; es evidente que conforme se incrementa la velocidad de electrodos el consumo de energía por unidad de producto aumenta. Lo anterior es razonable ya que como se había visto en la sección 6.1.3.1, la cantidad de producto obtenido es menor para velocidades de electrodos altas para un mismo suministro de potencia, es decir que para cada potencia manejada se requiere una velocidad de electrodos determinada que resulte en un alto desempeño (alta productividad y bajos consumos de energía) del horno.

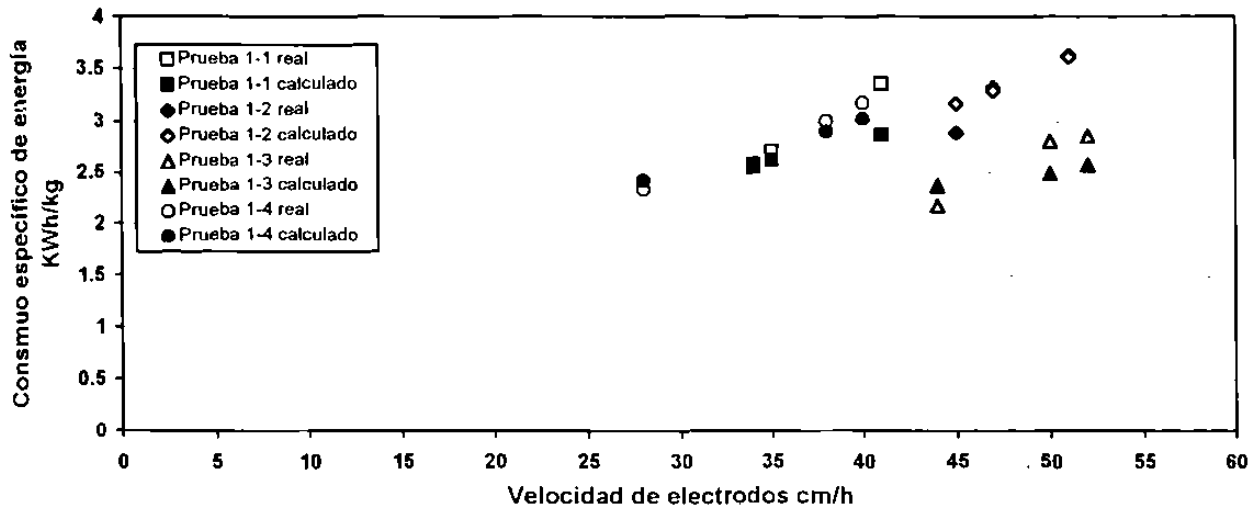


Fig. 47. Resultados reales y teóricos del consumo específico de energía en función de la velocidad de levantamiento de los electrodos para las pruebas preliminares.

En realidad la cantidad de producto obtenido es una función de la rapidez de su fusión real lo que depende de su capacidad calorífica, calor latente de fusión, masa disponible y potencia suministrada y, como se ha visto ya la masa disponible es variable con la velocidad de electrodos que se maneje en la fusión, es decir que para altas velocidades el radio de reacción r_{re} es pequeño por lo que la masa disponible para fusión es menor y por lo tanto la masa sin fundir será mayor; desde otro punto de vista se requiere una velocidad de levantamiento de electrodos adecuada que proporcione una rapidez de masa en la zona de fusión ideal para una rapidez de suministro de energía (potencia) determinada.

6.1.4.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico

En las Figs 48 , 49 , 50. y 51 se muestran gráficamente los resultados de consumos de energía específica por fase eléctrica contra la corriente de arco relativa, en las mismas gráficas se trazan las curvas de factor de potencia como referencia del punto de trabajo eléctrico de cada fase en cada experimento. Se señala además el consumo específico de energía medio real de las tres fases en cada experimento, con esta información se traza al igual que para la productividad un área de trabajo eléctrico para cada prueba así como se señala en cada gráfica

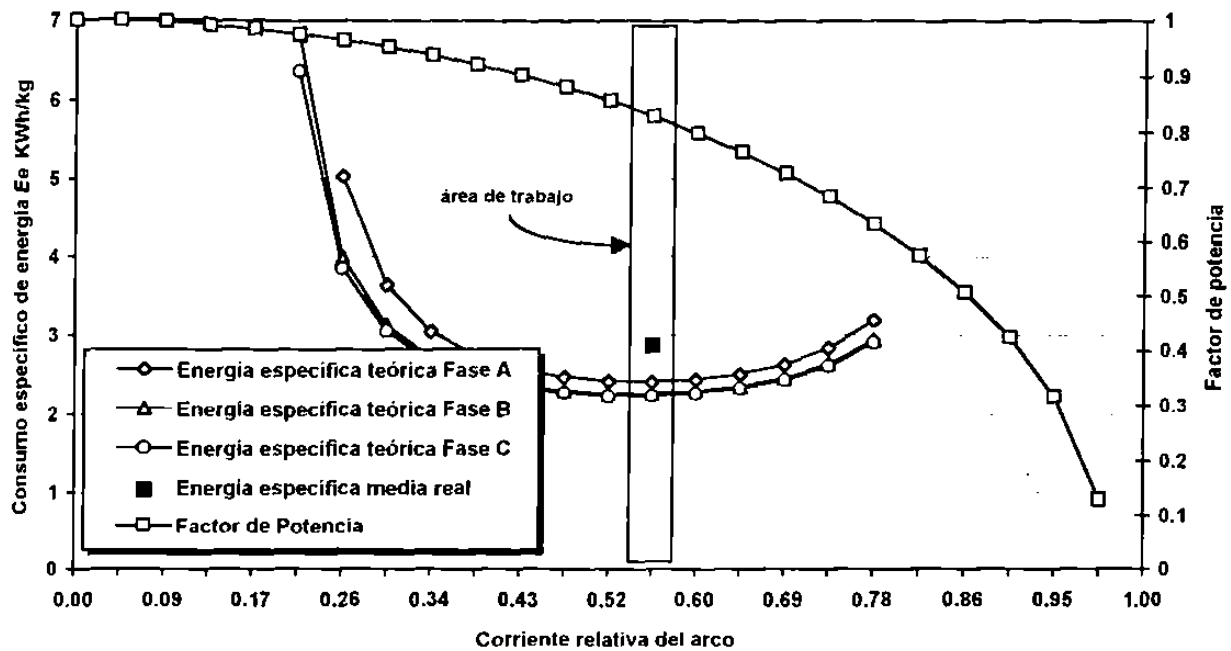


Fig. 48. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 1-1 de las preliminares.

En las cuatro figuras puede observarse que conforme la velocidad de los electrodos es menor, las curvas correspondientes son paralelas a las que tienen altas velocidades pero con valores de consumo de energía específica inferiores. En la Fig 48, por ejemplo se observa que las fase A, B y C en la prueba 1-1 tuvieron velocidades de 41, 35, y 34 cm/h correspondientemente y en la gráfica se ve que la curva trazada bajo las condiciones operativas de la fase A es paralela a las curvas de B y C pero con valores de energía específica mayores.

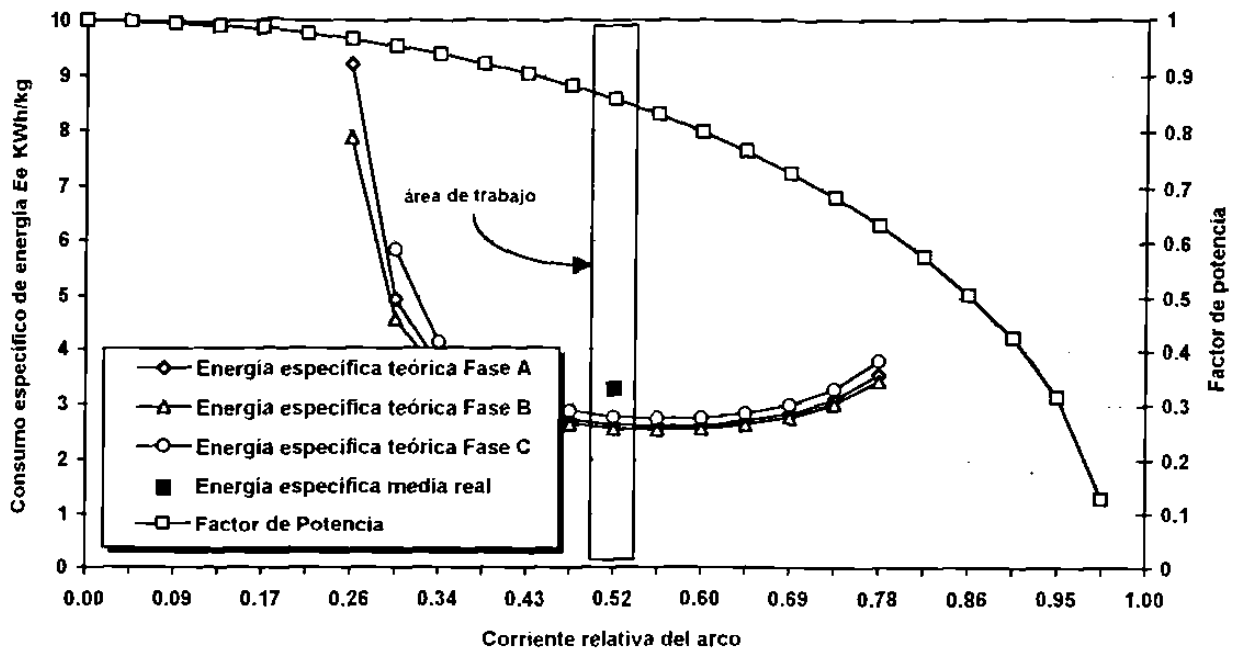


Fig. 49. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 1-2 de las preliminares.

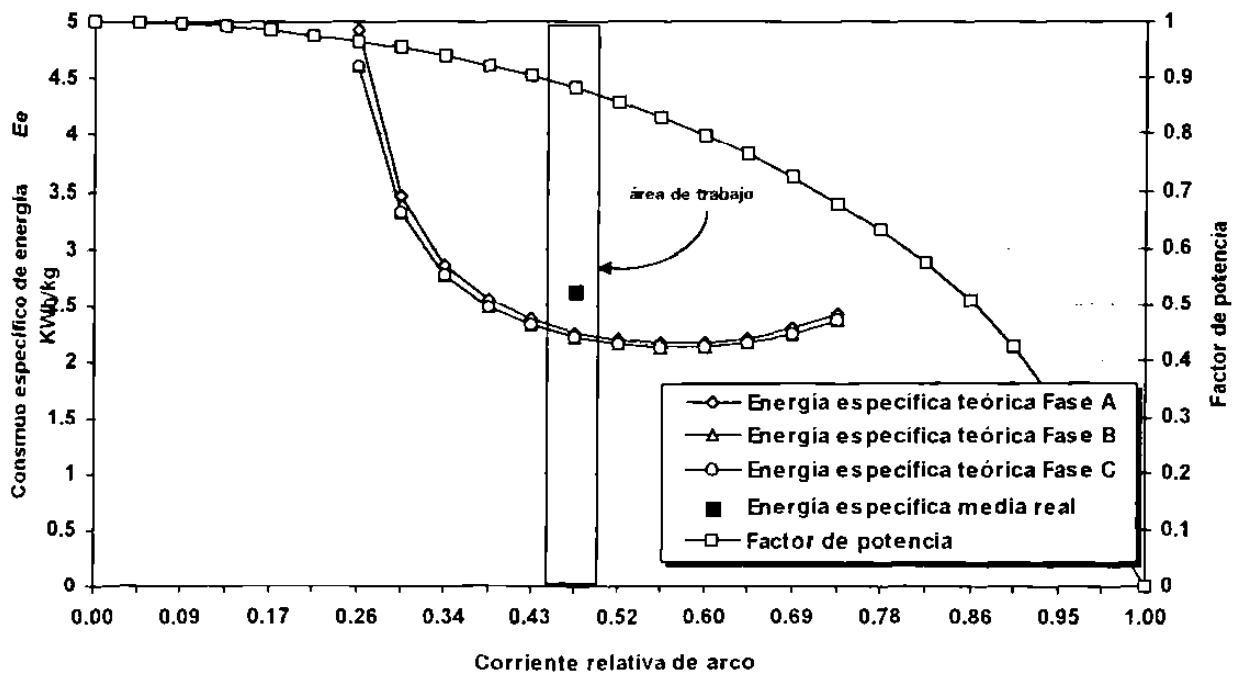


Fig. 50. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 1-3 de las preliminares.

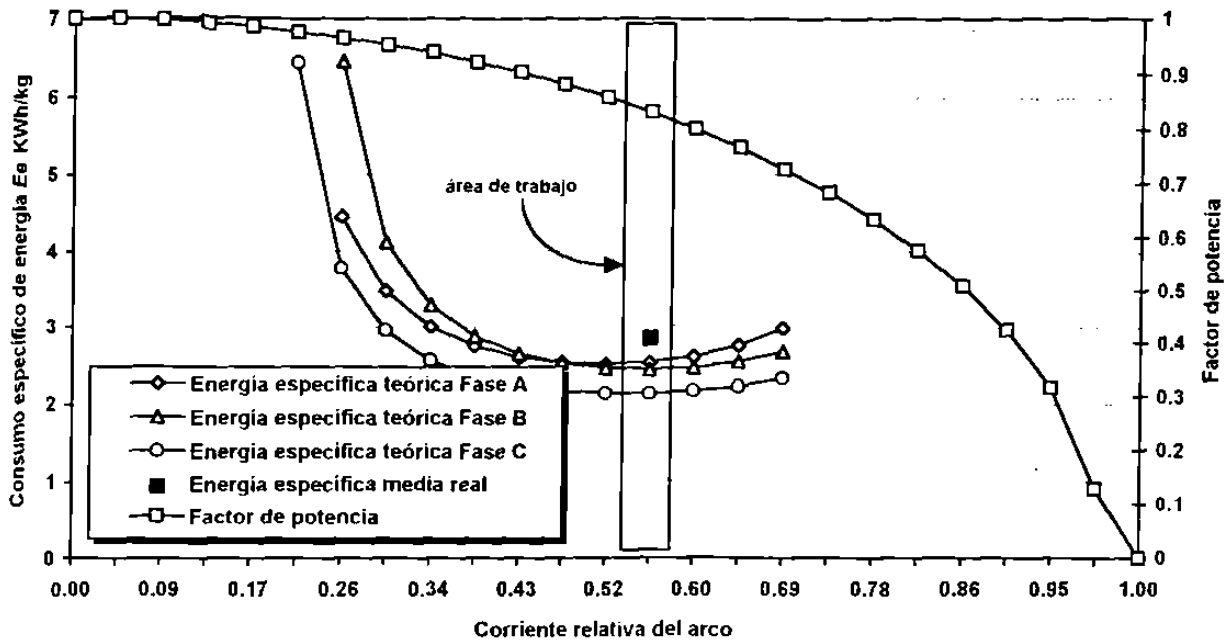


Fig. 51. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 1-4 de las preliminares.

En las curvas de las Figs. 49. y 50. de las pruebas 1-2 y 1-3 las que fueron corridas en los niveles de voltaje 6 y 3 respetivamente y con valores de velocidad de electrodos similares (de 44 a 52 cm/h), al comparar se observa que en las curvas de la prueba 1-3 se obtuvo un mejor y más bajo consumo de energía específica con un factor de potencia más alto que en la prueba 1-2, es decir que el aprovechamiento de la energía fue mayor. Por otro lado como puede verse en estas cuatro figuras, conforme la corriente de arco aumenta el consumo específico de energía disminuye hasta un mínimo en el que se mantiene hasta ciertos valores de corriente de arco para posteriormente proyectarse en aumento de energía eléctrica por unidad de producto fundido. Para las Figs. 48., 49. y 51. los valores de corriente con consumo de energía mínima se presentan en el valor de corriente relativa de aproximadamente 0.56 con un factor de potencia ($\cos\phi$) igual a 0.828, es decir que el valor máximo de corriente de arco para consumo de energía por unidad de producto obtenido mínimo esta desplazado a la izquierda del valor de corriente máxima para potencia del sistema máxima (0.7071, $\cos\phi$ 0.7071). Lo anterior se repite para las curvas de la Fig. 50 y puede compararse con las curvas de potencia de las Figs. 43 , 44 , 45. y 46. de la sección 6.1.3.2.

6.1.5. La Calidad del Producto

En el producto de magnesia fundida por arco eléctrico para grado refractario se consideran tres aspectos básicos para determinar la calidad del producto; estos son:

1. Pureza química %
2. Densidad (BSG) gr/cm^3
3. Tamaño promedio de cristal μm

Dado que la pureza del producto de magnesia electrofundida depende principalmente de la pureza de la materia prima usada y ésta es del orden del 98.89%, se ha considerado en este trabajo para análisis sólo el BSG y el tamaño de cristal como factores de calidad del producto.

En la Tabla 28 se presentan los resultados del tamaño de cristal promedio de las muestras de pruebas preliminares. Aquí se intentó crear una caracterización por zonas del lingote y como se aprecia en los resultados no puede verse algún patrón uniforme o sistemático entre los tamaños de cristal de una prueba a otra en la misma zona del lingote. La razón es que el crecimiento de cristales es afectado por la dirección del flujo de calor en el material durante la fusión y después de ella durante el enfriamiento y debido a que la distribución del material no es homogénea dentro del horno, los perfiles de temperatura y por lo tanto de distribución del calor en la carga es heterogénea y durante la operación no se tiene control sobre esto último. Por otro lado las impurezas (del orden de 1 %) forman fases de bajo punto de fusión y son segregadas desde los cristales de MgO cristalizado, estas fases se infiltran entre las fronteras de cristales de magnesia e inhiben su unión directa y con ello su crecimiento; además por la misma naturaleza del proceso de fusión con electrodos sumergidos en el material, quedan gases atrapados y al enfriarse forman poros que de igual forma inhiben el crecimiento de cristales de MgO. Las impurezas y gases atrapados son desplazados a las zonas de más alta temperatura y como la distribución de ésta no es homogénea y difícil de predecir, lo más probable es que la distribución de impurezas en el interior sea al azar y distinta en cada fusión.

Tabla 28. Tamaño de cristal promedio y BSG de pruebas preliminares.

Prueba/localización No.	BSG gr/cm ³	Tamaño promedio de cristal μm
1-1 /C	3.50	618.19
1-1 /L	3.50	737.47
1-2 /C	3.49	543.63
1-2 /L	3.49	467.75
1-3 /S	3.49	533.75
1-3 /C	3.49	578.57
1-3 /L	3.49	557.57
1-4 /S	3.50	597.58
1-4 /C	3.50	667.91

L inferior del lingote, C centro del lingote, S superior del lingote

En las Figs 52 y 53 se muestran micrografías de las muestras 1-2/I y 1-3/I respectivamente; aquí puede apreciarse que no existe una regularidad definida de acuerdo a las zonas en los lingotes de fusión. En la Fig 52 se presenta una muestra de la parte inferior del lingote en la que se observan cristales con tamaño promedio de $467.75 \mu\text{m}$ y con una intensa porosidad irregular entre fronteras de cristales con tamaños del orden de $40 \mu\text{m}$. En la muestra de la Fig 53 también de la zona inferior del lingote se observan cristales con una distribución no homogénea, escasa porosidad fina intracristalina y con tamaño promedio del cristal de $557.57 \mu\text{m}$.



Fig. 52. Muestra 1-2/I con cristales irregulares y con una intensa porosidad irregular intercrystalina .

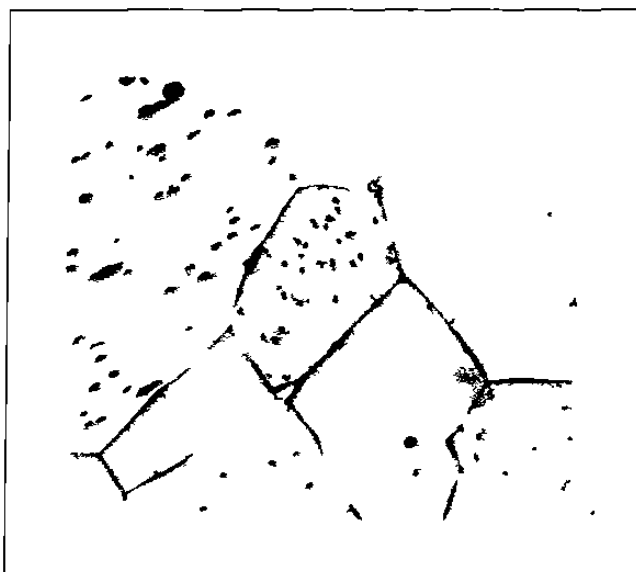


Fig. 53. Muestra 1-3/I con distribución de cristales no homogénea y porosidad fina intracristalina.

6.2. Pruebas del Grupo 2

6.2.1. El Consumo de Energía Eléctrica

En la Tabla 29 se presentan los resultados de las mediciones y cálculos del consumo de energía eléctrica de las pruebas 2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 2-5 y 2-6, pertenecientes al Grupo de Pruebas 2.

Tabla 29. Consumos de energía de pruebas del grupo 2.

Experimento Grupo-No.-Corrida	Consumo de Energía Real KWh	Consumo de Energía Calculado KWh
2-1-1	6900	6891
2-1-2	8300	8191
2-1-3	7500	7516
2-2-1	8700	8699
2-2-2	8300	7620
2-2-3	8200	8327
2-3-1	6900	6644
2-3-2	6100	5754
2-3-3	7300	6445
2-4-1	4900	5028
2-4-2	5200	5274
2-4-3	4500	4580
2-5-1	6600	4715
2-5-2	6900	5519
2-6-1	5200	4944

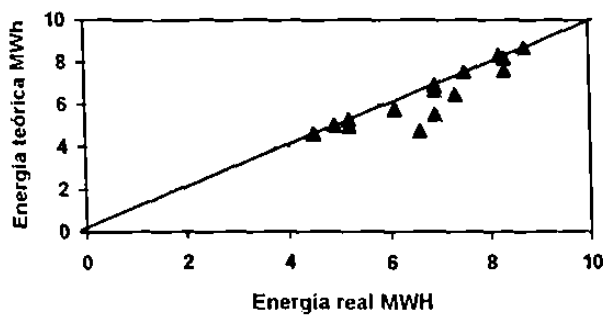


Fig. 54. Relación de energía consumida teórica y real

En la Fig. 54. se presenta una gráfica de la Tabla 29 ; como se puede apreciar los valores reales y teóricos son aproximadamente correspondientes en su mayoría, la línea que se ha trazado es para mostrar la correspondencia ideal entre los valores calculados y reales. Cabe recordar que los valores calculados fueron obtenidos con la expresión (75) con lecturas de voltaje y corriente durante las fusiones, por lo que se espera un margen de

diferencia entre los datos. En su mayoría los datos calculados corresponden bien con los datos reales.

6.2.2. La Velocidad de los Electrodo

En las Figs 55., 56., 57., 58., 59., 60, 61., 62, 63, 64, 65., 66., 67., 68. y 69. se presentan los desplazamientos que cada electrodo durante cada experimento tuvo en el desarrollo de los mismos, al igual que para las pruebas preliminares se han trazado rectas de regresión lineal para obtener valores promedio de velocidad para cada electrodo. En las Tablas 30, 31., 32., 33. y 34. se presentan los datos colectados para cada prueba realizada. Como en la sección 6.1.2. aquí también se observa que cada electrodo tiene un comportamiento de velocidad independiente, ocasionando heterogeneidad de producto en el interior del lingote.

En este grupo de fusiones de prueba se alimentó una mezcla de material reciclado desde el mismo proceso mas material nuevo sin reciclar; este material no fue clasificado por tamaños es decir, el tamaño de granos del material fue muy variado. Como puede observarse en las gráficas de desplazamiento de electrodos el comportamiento de cada fase en cada prueba es distinto e independiente; por ejemplo en la Fig. 55. a aproximadamente 40 min de fusión la fase **B** se dispara hacia arriba y posteriormente vuelve a bajar, creemos que por la gran variedad de tamaños de grano en la materia prima sucedió que en ese momento cayó material fino en la zona del arco de la fase **B**, la conductividad eléctrica del material fino es más alta que la del material grueso y esto provocó un incremento brusco de la corriente obligando al operario del horno a levantar el electrodo de la fase **B** para mantener el valor de ésta última estable. De la misma manera la caída brusca del electrodo de la misma fase, consideramos que la resistencia eléctrica en este punto aumentó debido a que se alimentó en ese momento material grueso ocasionando con ello una caída de la corriente y obligando al operario a bajar el electrodo.

En la Tabla 35 se presentan los resultados de análisis granulométricos de muestras de materia prima de las pruebas 2-1-1, 2-2-1, 2-5-1 y 2-6-1; aquí puede observarse que la primera presenta un mayor porcentaje de material fino y la gráfica de comportamiento de electrodos resultante es muy inestable, mientras que los desplazamientos de electrodos en las otras fusiones son más estables y uniformes y presentan según la Tabla 35 menor cantidad de material fino.

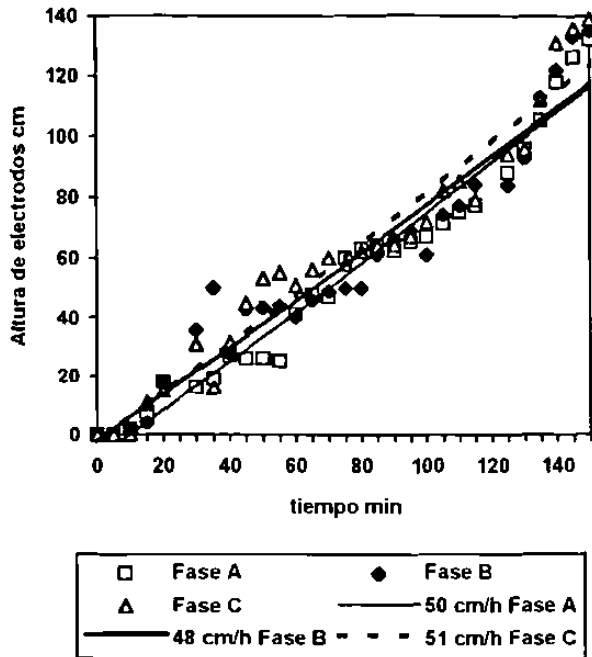


Fig. 55. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-1-1.

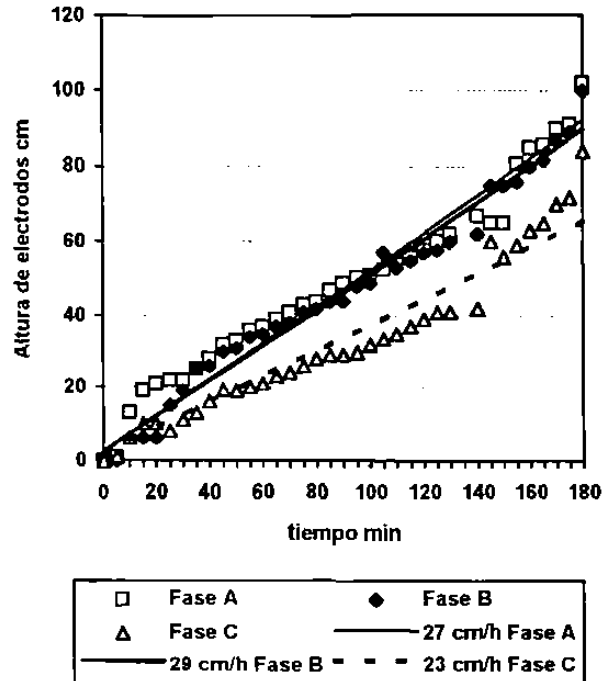


Fig. 56. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-1-2.

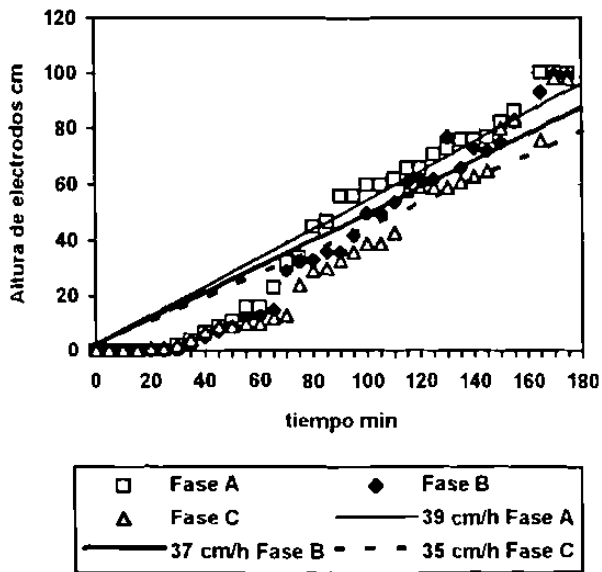


Fig. 57. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-1-3.

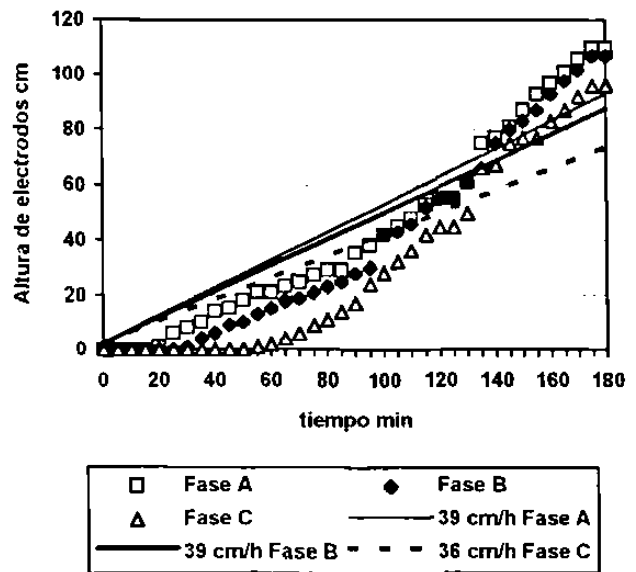


Fig. 58. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-2-1.

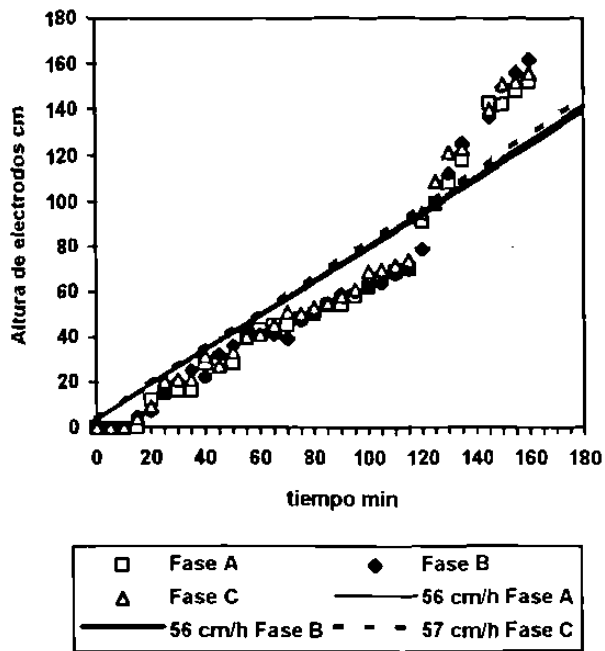


Fig. 59. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-2-2.

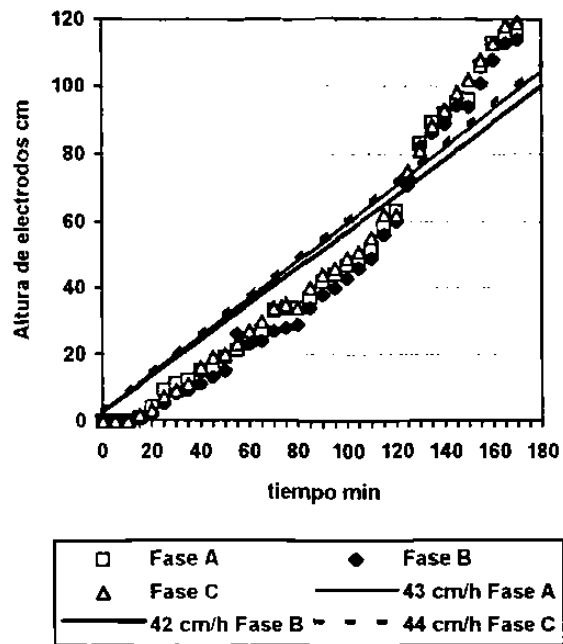


Fig. 60. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-2-3.

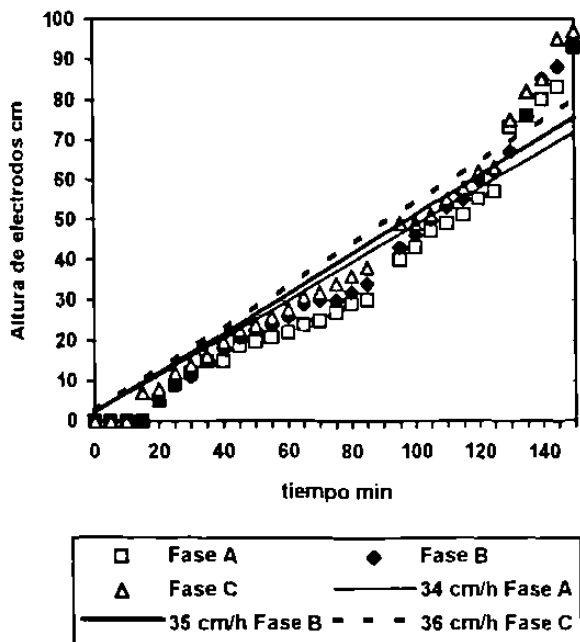


Fig. 61. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-3-1.

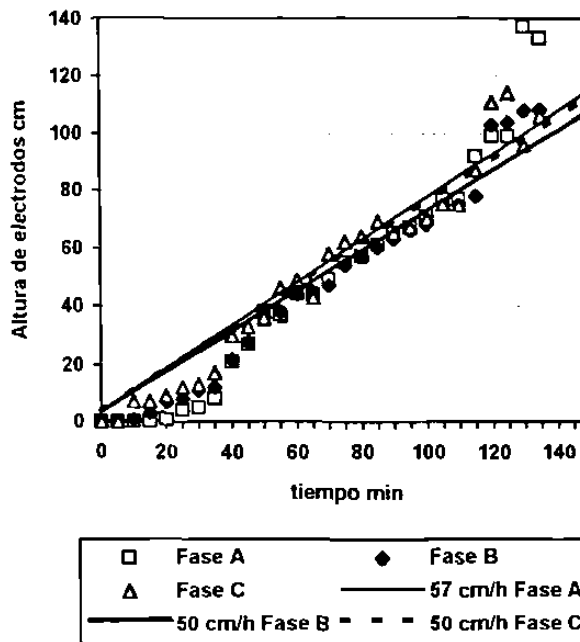


Fig. 62. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-3-2.

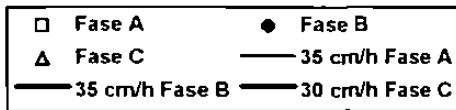
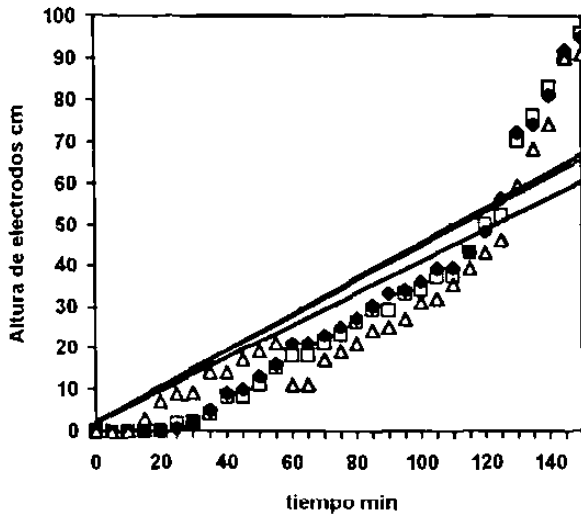


Fig. 63. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-3-3.

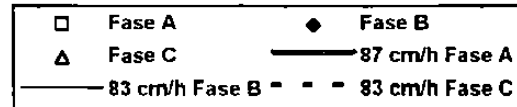
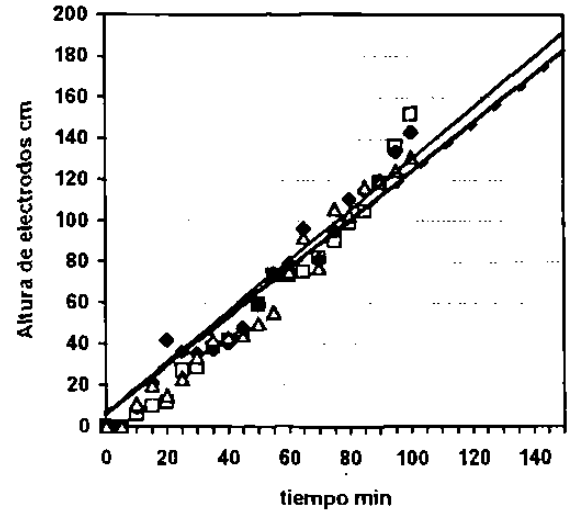


Fig. 64. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-4-1.

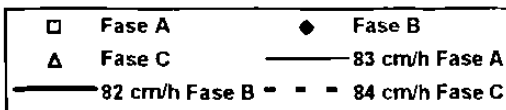
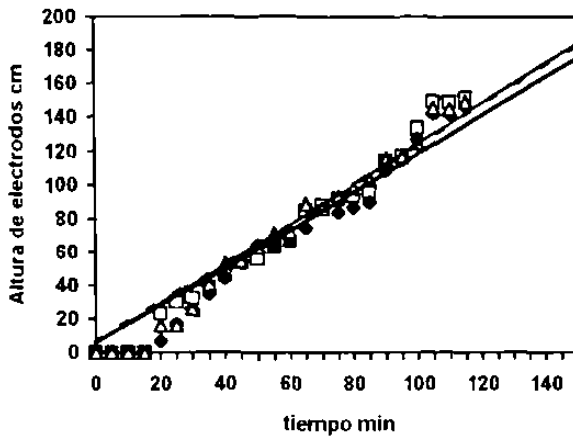


Fig. 65. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-4-2.

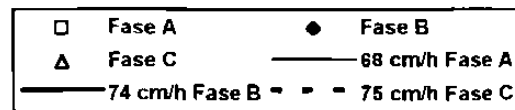
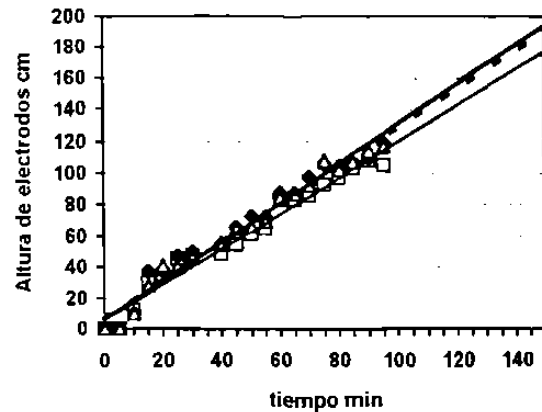


Fig. 66. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-4-3.

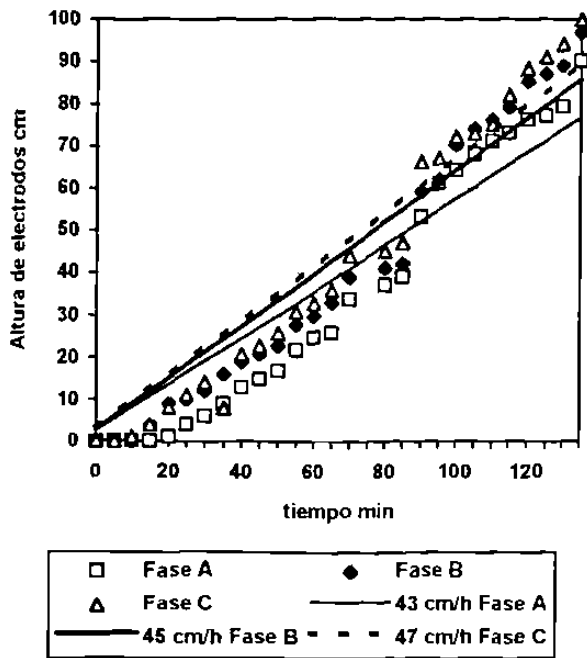


Fig. 67. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-5-1.

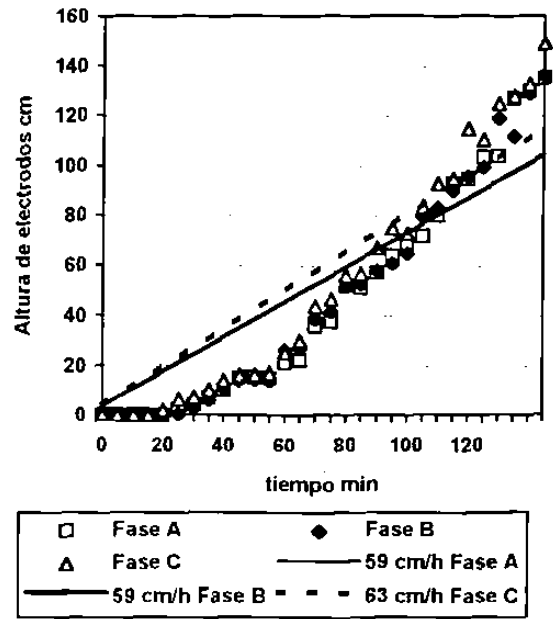


Fig. 68. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-5-2.

Es importante hacer notar que la prueba 2-6-1 fue realizada en el nivel de voltaje 3 mientras que las 2-1-1, 2-2-1 y la 2-5-1 fueron desarrolladas en el nivel de voltaje 6 (menor que el nivel 3 en cuanto a voltaje se refiere), sin embargo lo que hasta aquí se ha pretendido es discutir una razón probable de los cambios bruscos que ocasionalmente ocurren en el desplazamiento de los electrodos durante las fusiones de prueba y de operación normal de la planta. Por otro lado se puede apreciar que las fusiones con velocidad de electrodos más alta son las que se realizaron en el nivel de voltaje 3 (2-4-1, 2-4-2, 2-4-3 y 2-6-1), la discusión de esto es dada en la sección 10.5. de este mismo capítulo.

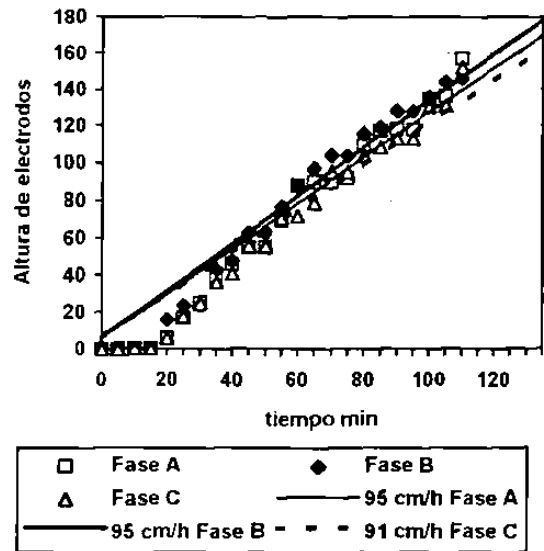


Fig. 69. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante el experimento 2-6-1.

Tabla 30. Datos colectados de altura de electrodos durante el experimento 2-1.

Experimento 2-1-1			Experimento 2-1-2			Experimento 2-1-3			Tiempo
Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			min
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0	0	5
2	2	0	13	6	6	0	0	0	10
6	4	11	19	6	10	0	0	0	15
18	18	15	21	6	10	0	0	1	20
			22	15	8	0	0	1	25
16	36	31	22	19	11	2	0	2	30
19	50	16	25	25	13	4	2	4	35
27	28	32	28	26	16	7	5	7	40
26	43	45	32	30	19	9	7	9	45
26	43	53	33	31	19	11	9	9	50
25	44	55	36	34	20	16	12	10	55
41	40	51	37	35	21	16	13	10	60
48	46	56	39	37	23	23	15	12	65
47	49	60	41	38	24	32	29	13	70
60	50	58	43	41	26	34	32	24	75
63	50	62	44	42	28	45	33	29	80
64	61	64	47	44	29	47	36	30	85
62	66	64	49	44	29	56	36	33	90
65	69	67	50	48	30	56	42	36	95

Tabla 31. Datos colectados de altura de electrodos durante el experimento 2-2.

Experimento 2-2-1			Experimento 2-2-2			Experimento 2-2-3			Tiempo
Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			min
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
0	0	0	0	5	4	1	1	2	15
1	0	0	12	7	9	4	2	3	20
6	0	0	15	15	20	9	5	7	25
8	1	0	16	20	21	11	8	9	30
10	4	0	16	25	21	12	9	11	35
14	6	0	28	22	31	15	11	16	40
15	9	0	30	32	27	15	13	19	45
18	10	0	28	36	33	19	15	20	50
21	13	1	39	43	40	21	26	23	55
21	15	2	43	41	41	24	23	27	60
23	18	4	45	41	45	27	24	30	65
25	19	6	45	39	51	33	27	34	70
27	21	9	48	47	50	34	28	35	75
29	23	11	50	51	53	34	29	34	80
29	25	14	54	55	55	37	34	40	85
35	28	17	54	59	58	42	38	44	90
38	30	24	58	60	61	44	40	46	95

Tabla 32. Datos colectados de altura de electrodos durante el experimento 2-3.

Experimento 2-3 1			Experimento 2 3 2			Experimento 2 3 3			Tiempo
Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			min
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
0	0	0	0	1	7	0	0	0	10
0	0	7	0	3	7	0	0	3	15
5	5	8	1	7	9	0	0	7	20
9	9	12	4	8	12	2	1	9	25
12	11	14	5	11	13	2	2	9	30
15	15	16	8	12	17	4	5	14	35
15	18	20	21	22	30	8	9	14	40
19	21	23	27	28	33	8	10	17	45
20	23	24	38	36	36	11	13	19	50
21	24	26	37	38	46	15	16	21	55
22	26	28	44	44	49	18	21	11	60
24	29	31	44	45	43	18	21	11	65
25	30	32	49	47	58	21	23	17	70
27	30	34	55	54	62	23	25	19	75
29	32	36	57	57	64	26	27	21	80
30	34	38	61	60	69	29	30	24	85
			65	63	65	29	33	25	90
40	43	49	67	66	67	33	34	27	95

Tabla 33. Datos colectados de altura de electrodos durante el experimento 2-4.

Experimento 2-4-1			Experimento 2-4-2			Experimento 2-4-3			Tiempo
Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			min
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
6	9	11	0	0	0	12	10	10	10
10	21	20	0	0	0	30	37	28	15
12	42	15	23	7	16	35	37	41	20
27	36	23	30	17	16	45	47	40	25
28	35	33	33	26	26	47	50	46	30
38	37	42	39	35	41				35
42	40	43	46	45	54	48	55	54	40
45	48	44	54	55	55	54	66	65	45
59	59	50	56	64	63	61	73	66	50
73	74	55	63	64	72	65	73	70	55
73	79	75	67	67	73	83	88	85	60
75	96	92	85	75	89	83	88	87	65
82	81	77	88	86	86	86	98	93	70
90	95	106	92	84	94	93	106	108	75
99	111	103	94	87	98	97	104	103	80
105	115	117	96	90	103	103	107	107	85
119	120	119	114	109	115	108	110	114	90
137	134	125	117	115	117	105	119	117	95

Tabla 34. Datos colectados de altura de electrodos durante el experimento 2-5 y 2-6.

Experimento 2-5-1			Experimento 2-5-2			Experimento 2-6-1			Tiempo
Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			Altura de electrodos cm			min
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
0	0	1	0	0	0	0	0	0	10
0	4	4	0	0	0	0	0	0	15
1	9	8	0	0	2	6	16	6	20
4	10	11	2	0	6	17	24	18	25
6	12	14	4	3	7	25	24	25	30
9	16	8	7	6	10	38	43	36	35
13	19	21	10	11	14	46	48	41	40
15	21	23	15	14	16	55	63	56	45
17	23	26	15	14	16	55	63	56	50
22	28	31	15	14	17	69	77	71	55
25	30	33	21	26	25	88	88	72	60
26	33	36	22	27	30	90	97	79	65
34	39	44	36	39	44	90	104	95	70
			38	42	47	92	104	95	75
37	41	45	52	52	56	109	115	104	80
39	42	47	51	53	57	117	119	108	85
53	59	66	57	58	67	118	128	113	90
61	62	67	64	61	75	118	128	113	95

Tabla 35. Resultados de análisis de malla de materia prima para algunos experimentos.

Malla	Experimento	Experimento	Experimento	Experimento
Plg./malla	2-1-1	2-2-1	2-5-1	2-6-1
	%	%	%	%
1	0	0	0	0.94
3/4	0	0	0.91	4.83
1/2	1.13	2.13	9.64	10.91
3/8	9.06	11.16	24.87	21.65
4 malla	12.15	23.19	28.96	24.93
6 malla	6.56	8.74	8.09	11.05
18 malla	29.34	25.48	14.03	18.15
Recividor	41.76	29.30	13.51	7.55

6.2.3. La Productividad

6.2.3.1 Efecto de la Velocidad de los Electrodo

En las Tablas 36. y 37. se presentan los datos de las pruebas del grupo 2 y los resultados de productividad por fase eléctrica; al igual que en las pruebas preliminares se han obtenido los pesos de los lingotes fundidos en cada prueba por fase según se encontraron físicamente localizados en el horno durante la fusión

Tabla 36. Resultados de productividad por fase eléctrica de pruebas 2-1, 2-2 y 2-3.

Experimento	Prueba	Fase eléctrica	Nivel de voltaje	Corriente relativa	Velocidad de electrodos cm/h	Tiempo de fusión hrs.	P_e KW	E_e KW	$Q_e + Q_f$ KW	f KWh/kg	m_g teórico kg/h	m_g real kg/h
2-1	1	A	6	0.4397859	50	2.5	800	82	568	1.121	280	300
		B		0.4527208	48		813	84	556		305	354
		C		0.4570324	51		817	85	574		293	320
	2	A	6	0.4397859	27	3	800	82	530	1.026	343	325
		B		0.4440975	29		804	83	551		328	319
		C		0.4305590	23		790	81	490		350	319
	3	A	6	0.4104668	39	2.916	767	78	576	1.042	258	251
		B		0.4014124	37		756	77	560		261	255
		C		0.4009812	35		755	77	543		277	315
2-2	1	A	6	0.4829021	39	3	840	88	586	1.026	334	338
		B		0.4958370	39		851	90	586		346	312
		C		0.4699673	36		829	87	603		304	293
	2	A	6	0.5044603	56	2.67	857	91	595	1.089	325	349
		B		0.5001486	56		854	90	595		321	344
		C		0.4885073	57		845	89	600		307	338
	3	A	6	0.4872138	43	2.833	844	89	685	1.058	234	212
		B		0.4872138	42		844	89	677		242	272
		C		0.4742789	44		833	87	694		214	286
2-3	1	A	6	0.4290068	34	2.5	788	81	487	1.121	341	344
		B		0.4281445	35		787	81	495		333	336
		C		0.4290068	36		788	81	502		327	340
	2	A	6	0.4078798	57	2.25	763	78	511	1.167	283	315
		B		0.4195212	50		777	79	476		326	317
		C		0.3997309	50		753	76	476		303	320
	3	A	6	0.4126226	35	2.5	769	78	544	1.121	271	280
		B		0.4169343	35		774	79	544		276	285
		C		0.4182277	30		776	79	502		315	306

Tabla 37. Resultados de productividad por fase eléctrica de pruebas 2-4, 2-5 y 2-6.

Experimento	Prueba	Fase eléctrica	Nivel de voltaje	Corriente relativa	Velocidad de electrodos cm/h	Tiempo de fusión hrs.	P_e KW	E_g KW	$Q_m + Q_g$ KW	f KWh/kg	m_g teórico kg/h	m_g real kg/h
2-4	1	A	3	0.3758180	87	1.6667	938	92	658	1.275	292	286
		B		0.3617454	83		915	90	641		285	246
		C		0.3953761	83		977	96	641		339	337
	2	A	3	0.3776985	83	1.9167	945	93	698	1.229	277	350
		B		0.3574338	82		907	89	694		246	252
		C		0.3829155	84		955	94	641		282	254
	3	A	3	0.3758180	68	1.5833	938	92	638	1.290	304	319
		B		0.3621766	74		916	90	696		240	221
		C		0.3880464	75		964	95	701		277	266
2-5	1	A	6	0.4872138	43	2.25	844	89	556	1.167	323	310
		B		0.4915254	45		847	89	569		315	304
		C		0.4872138	47		844	89	583		300	300
	2	A	6	0.4785905	59	2.4167	837	88	608	1.136	279	281
		B		0.4742789	59		833	87	608		275	250
		C		0.4725542	63		831	87	629		255	240
2-6	1	A	3	0.3707998	95	1.8333	932	91	694	1.244	265	280
		B		0.3880464	95		964	95	694		293	300
		C		0.3751115	91		940	92	679		284	310

En las Figs. de la 70. a la 84. se presentan gráficamente los resultados de productividad contra velocidad de electrodos; aquí vuelve a apreciarse la caída de la productividad con el aumento de la velocidad de los electrodos para un mismo suministro de potencia y un mismo tiempo de fusión.

Al observar cada gráfica puede apreciarse que algunas tienen pendientes más pronunciadas que otras a lo que creemos es por los valores de densidad aparente de carga de materia prima en el interior de la olla del horno ρ . Para un mismo valor de potencia si la densidad de carga ρ es alta, se tendrá una cantidad mayor de material en la zona de fusión por lo que para lograr la fusión plena del mismo volumen de material deseado se requiere más energía que para densidades de carga bajas; es decir se requiere que la velocidad de los electrodos sea más lenta para densidades de carga altas que para densidades de carga bajas. En la Fig. 85 se presentan tres curvas de productividad contra densidades de carga de material en el horno trazadas para los valores de operación promedio de las pruebas 2-2-2, 2-2-3, 2-3-1, 2-3-3 y 2-5-1. Para cada una de ellas se han colocado los valores reales obtenidos en las pruebas citadas; la medición de ρ se hizo con una muestra de material en un volumen de 150 cm^3 de un vaso de precipitados.

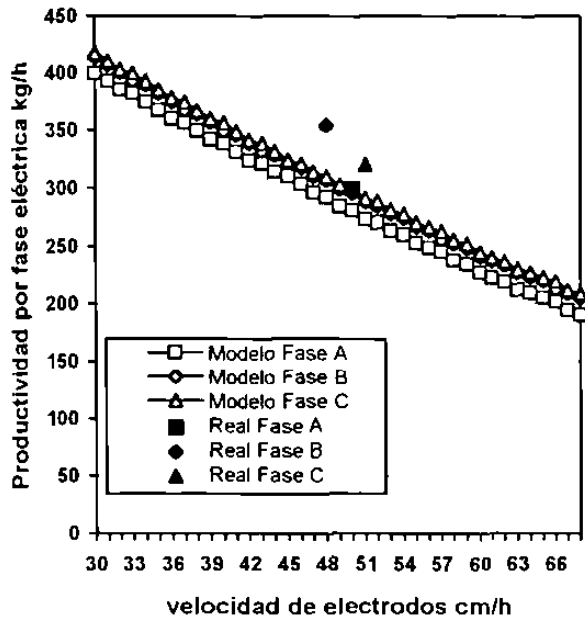


Fig. 70. Resultados del modelo y de la Prueba 2-1-1, de productividad por fase eléctrica.

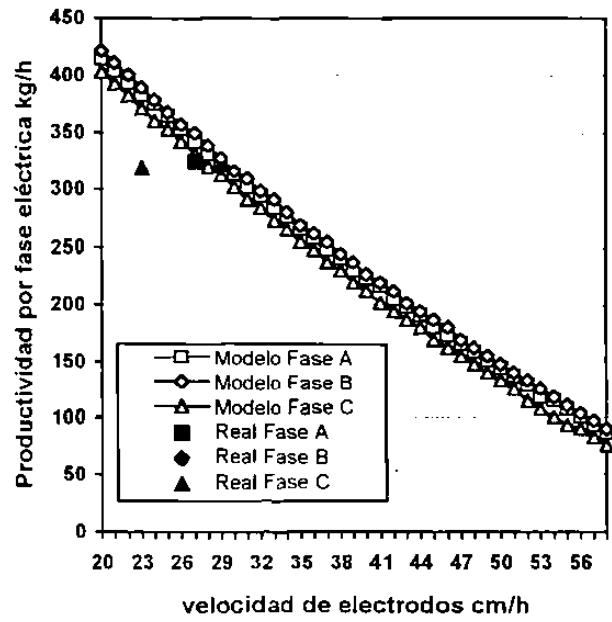


Fig. 71. Resultados del modelo y de la Prueba 2-1-2, de productividad por fase eléctrica.

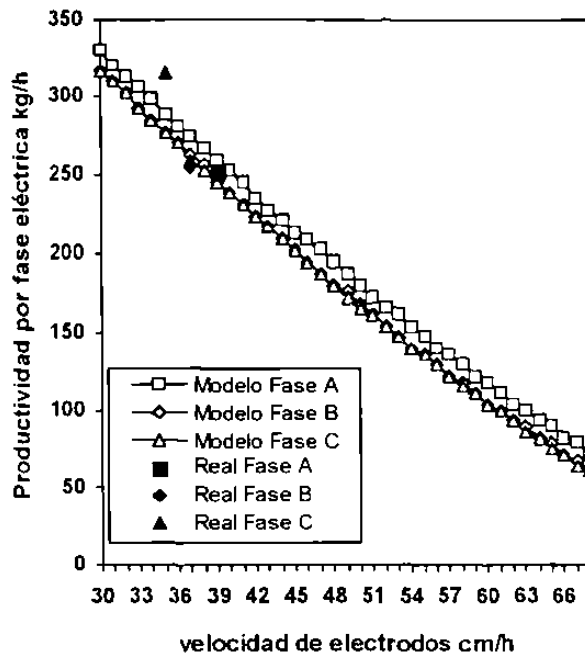


Fig. 72. Resultados del modelo y de la Prueba 2-1-3, de productividad por fase eléctrica.

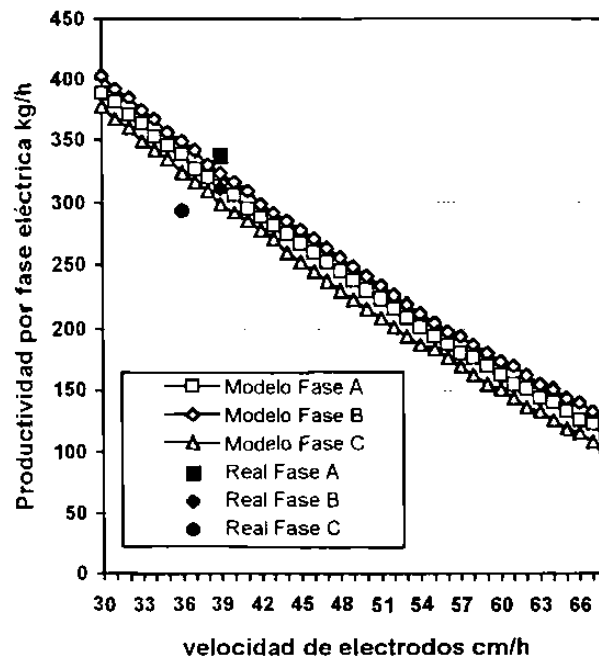


Fig. 73. Resultados del modelo y de la Prueba 2-2-1, de productividad por fase eléctrica.

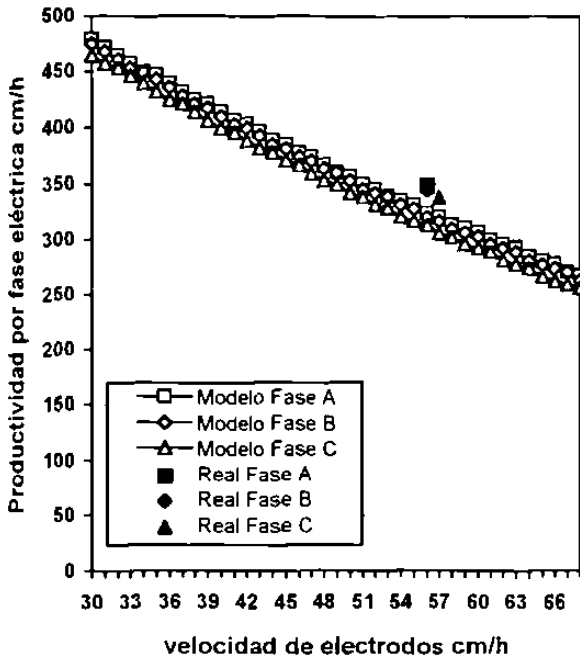


Fig. 74. Resultados del modelo y de la Prueba 2-2-2, de productividad por fase eléctrica.

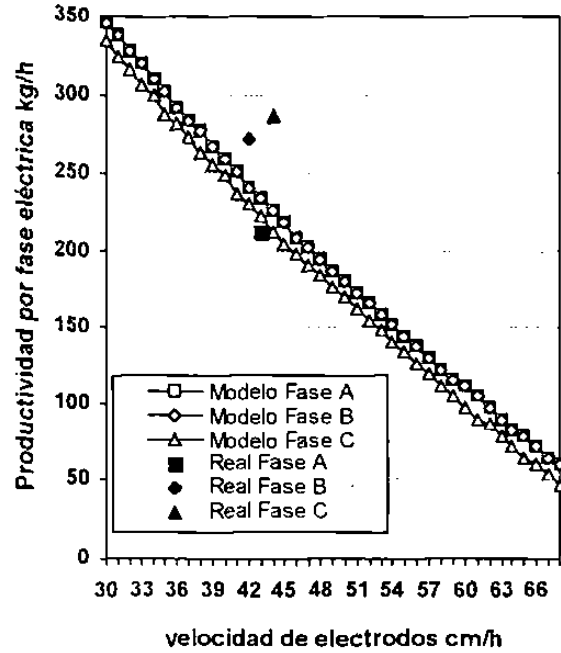


Fig. 75. Resultados del modelo y de la Prueba 2-2-3, de productividad por fase eléctrica.

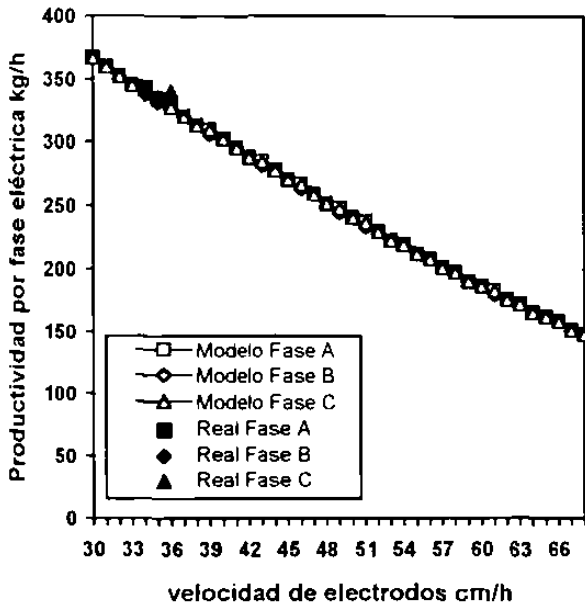


Fig. 76. Resultados del modelo y de la Prueba 2-3-1, de productividad por fase eléctrica.

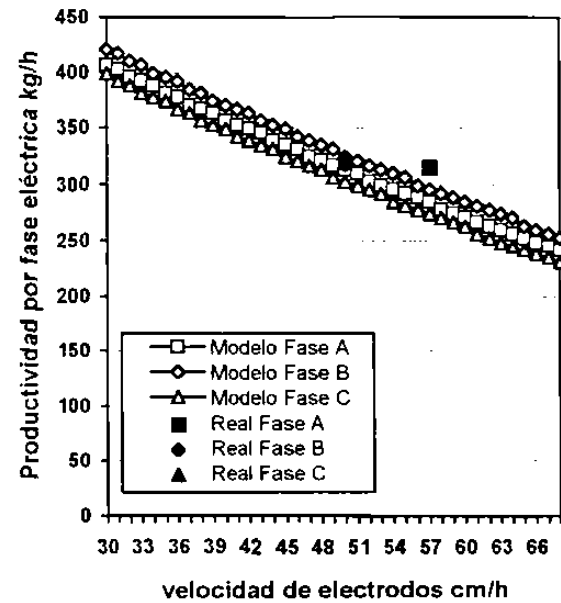


Fig. 77. Resultados del modelo y de la Prueba 2-3-2, de productividad por fase eléctrica.

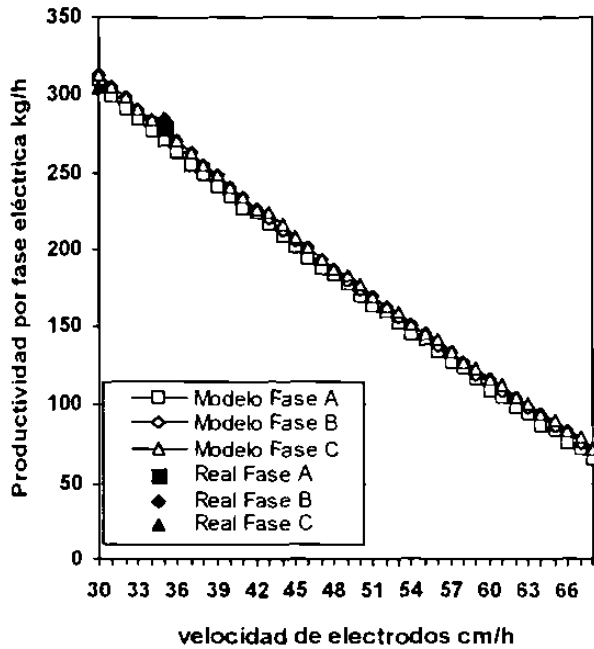


Fig. 78. Resultados del modelo y de la Prueba 2-3-3, de productividad por fase eléctrica.

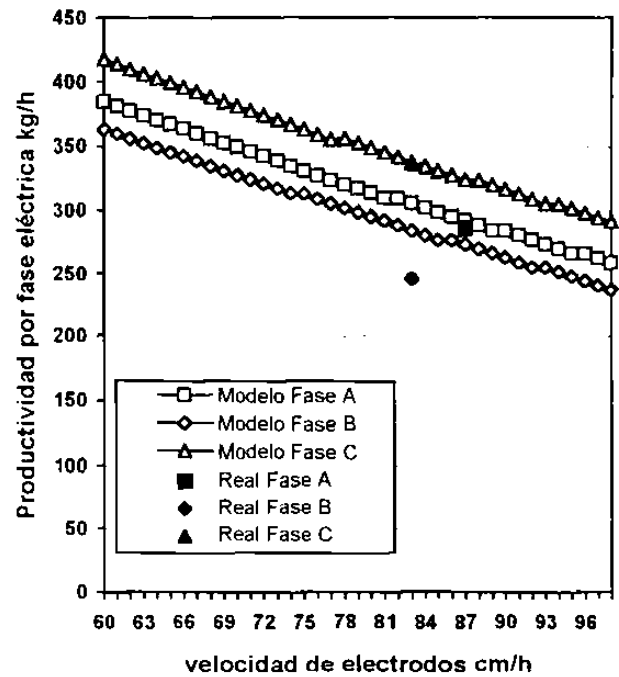


Fig. 79. Resultados del modelo y de la Prueba 2-4-1, de productividad por fase eléctrica.

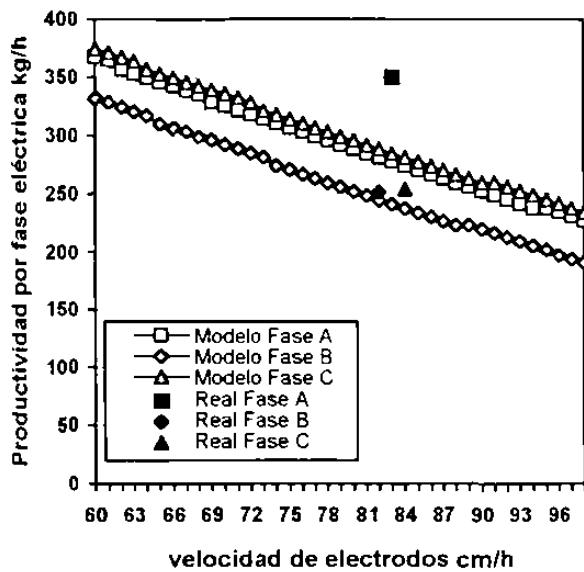


Fig. 80. Resultados del modelo y de la Prueba 2-4-2, de productividad por fase eléctrica.

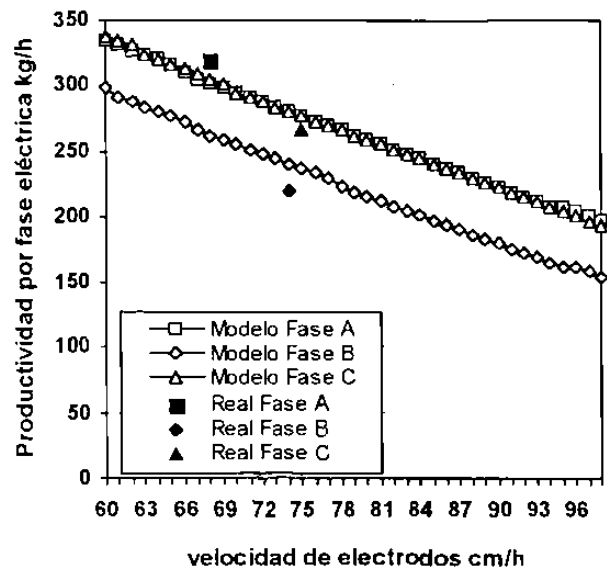


Fig. 81. Resultados del modelo y de la Prueba 2-4-3, de productividad por fase eléctrica.

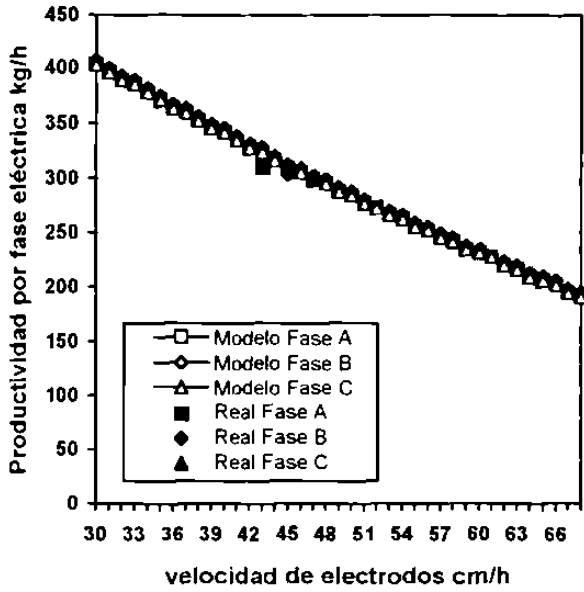


Fig. 82. Resultados del modelo y de la Prueba 2-5-1, de productividad por fase eléctrica.

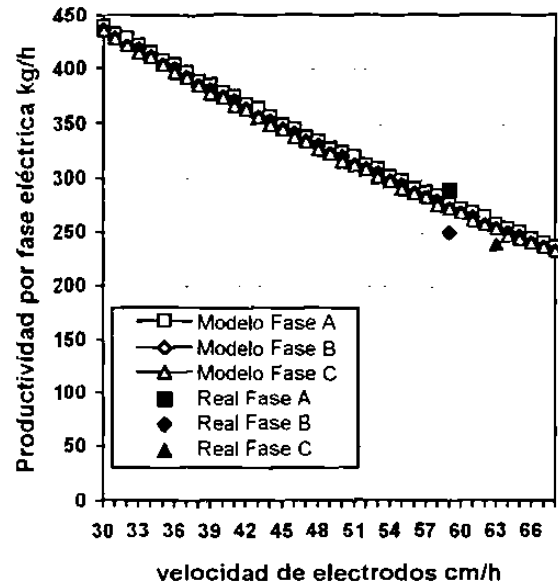


Fig. 83. Resultados del modelo y de la Prueba 2-5-2, de productividad por fase eléctrica.

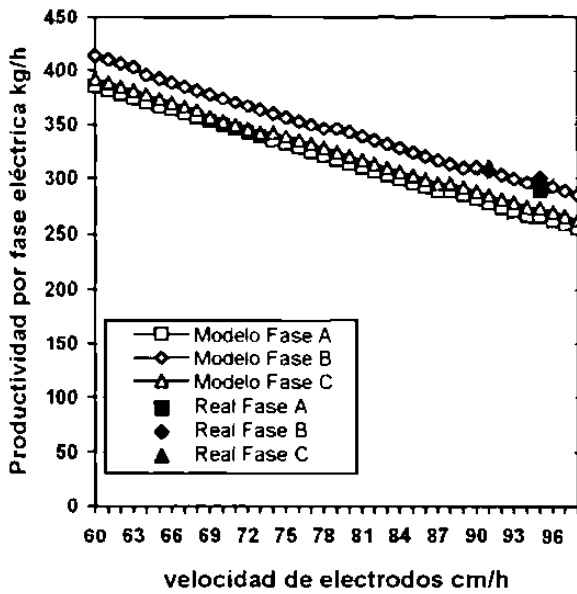


Fig. 84. Resultados del modelo y de la prueba 2-6-1, de productividad por fase eléctrica.

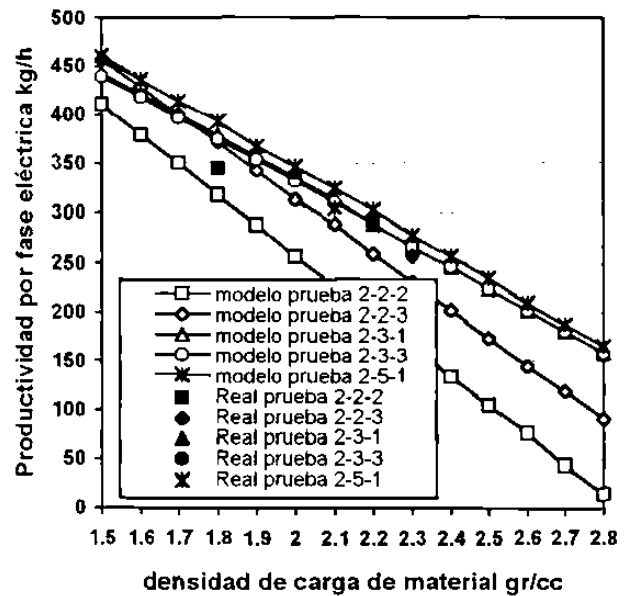


Fig. 85. Comportamiento de la productividad por fase eléctrica en función de la densidad de materia prima.

6.2.3.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico

Al igual que en la sección 6.1.3.2 (página 95) pero ahora para las pruebas del Grupo 2, en las Figs. de la 86. a la 100. se muestran gráficamente los resultados de productividad por fase eléctrica contra la corriente de arco relativa, en las que de igual forma se trazan las curvas de potencia monofásicas del sistema y de factor de potencia y además se señala el punto de productividad promedio de las tres fases de cada experimento, trazándose además un área de trabajo eléctrico para cada prueba.

En estas gráficas es notable que las fusiones realizadas con el nivel de voltaje 3 presentaron velocidades de electrodos de 70 a 95 *cm h*, es decir muy altas, lo que ocasiona productividades en términos de *kg de producto fusión* bajas. En otras palabras las altas velocidades de levantamiento de electrodos permiten tiempos de fusión cortos ya que se alcanza rápidamente la carrera máxima de los mismos

Consideramos que con niveles de voltaje altos (como el 3) se alcanzan velocidades altas debido a que los portadores de carga en la diferencia de potencial suministrada por el transformador del horno son mayores que con niveles de voltaje bajos (como el 6) En otras palabras con altas diferencias de potencial de suministro en el secundario del transformador del horno es más fácil vencer la resistencia eléctrica que tanto el arco como la carga presentan al paso de la corriente; se asume que con el nivel de voltaje 3 se alcanza y se rebasa más pronto el valor de corriente deseada obligando al operario del horno a levantar los electrodos más rápido

Aún con altas velocidades de electrodos operando en el nivel de voltaje 3 las productividades obtenidas en estas pruebas (2-4-1, 2-4-2, 2-4-3 y 2-6-1) fueron altas, la razón es que como se puede observar tanto en los datos de las Tablas 36. y 37 como en las Figs. 95, 96., 97. y 100., con bajos valores de corriente de arco se alcanzan valores de potencia suministrada altos (arriba de 900 *KW* por fase eléctrica) lo que a su vez conlleva trabajar con factores de potencia altos (arriba de 0.91), significando esto último un mejor aprovechamiento de la energía suministrada a la carga de material dentro del horno Es por ello que la productividad del horno sea muy parecida al operar con altos voltajes y altas velocidades que con bajos voltajes y bajas velocidades de electrodos.

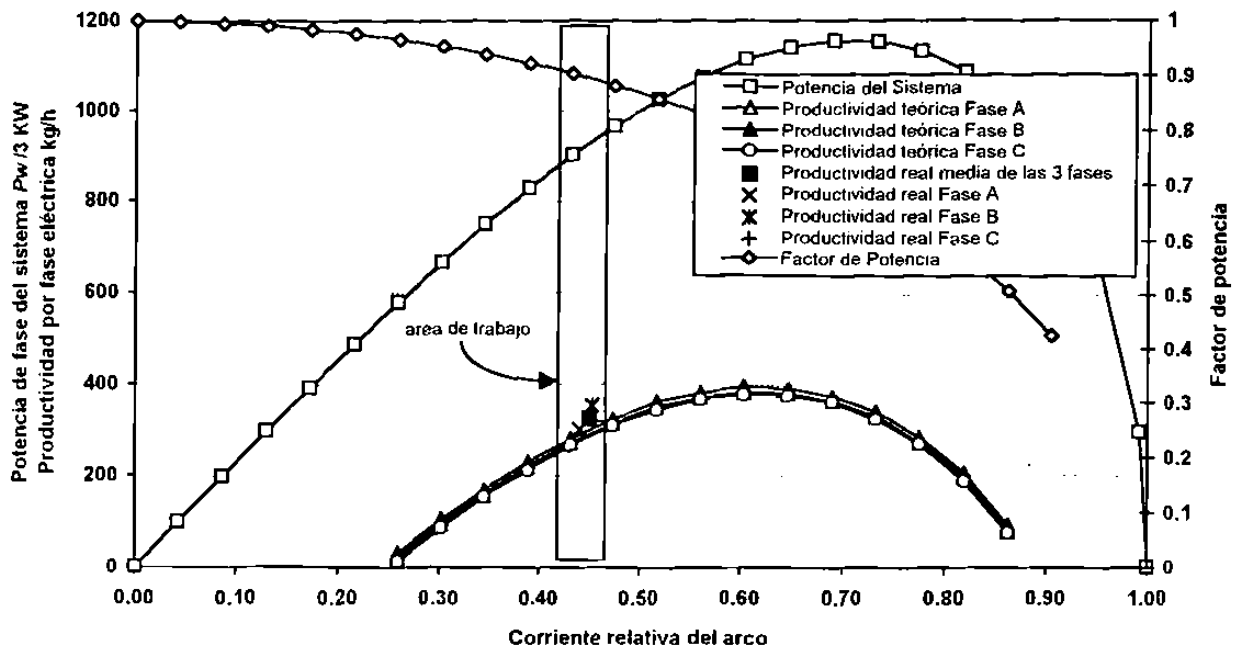


Fig. 86. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-1-1.

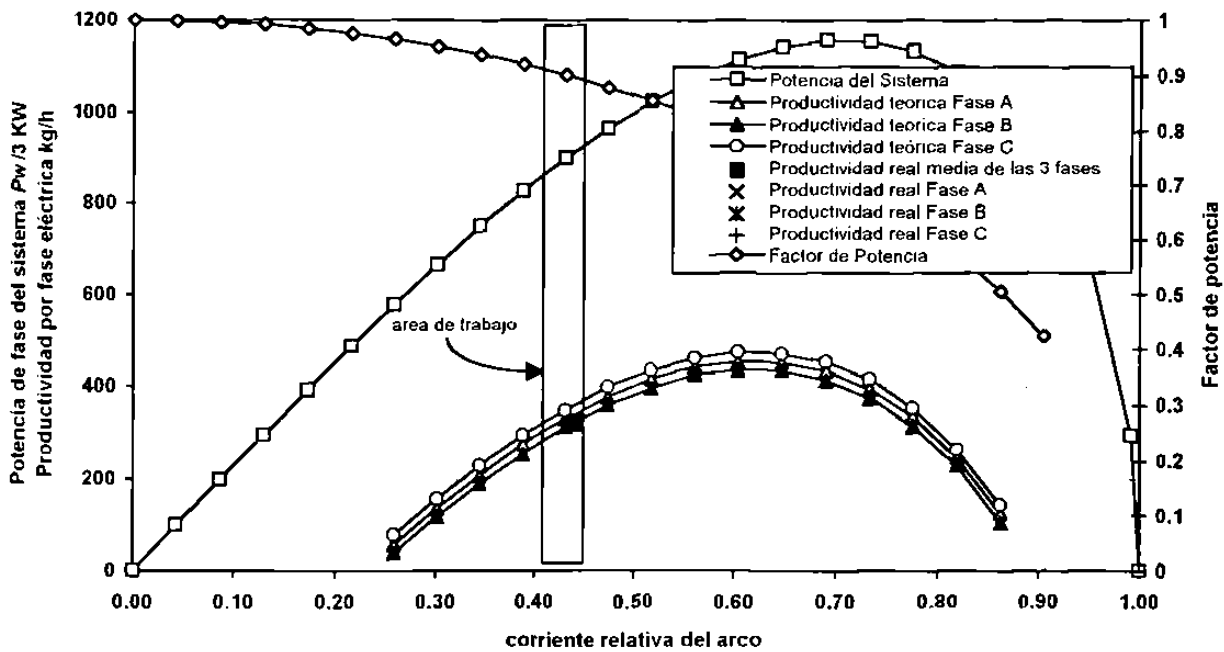


Fig. 87. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-1-2.

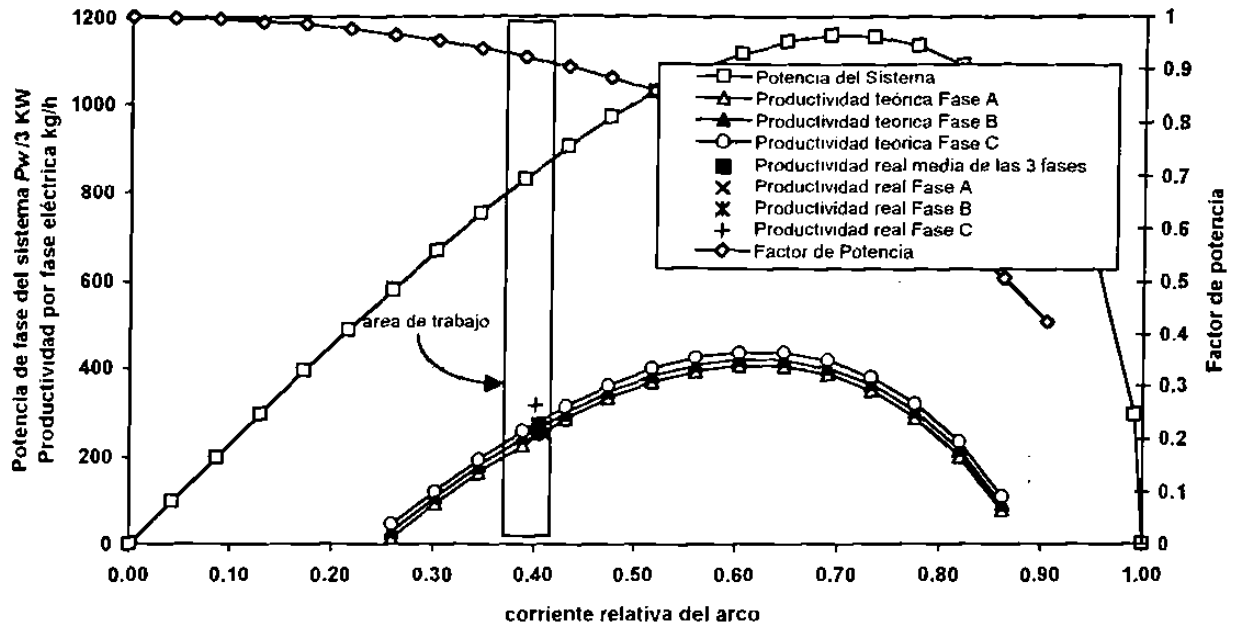


Fig. 88. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-1-3.

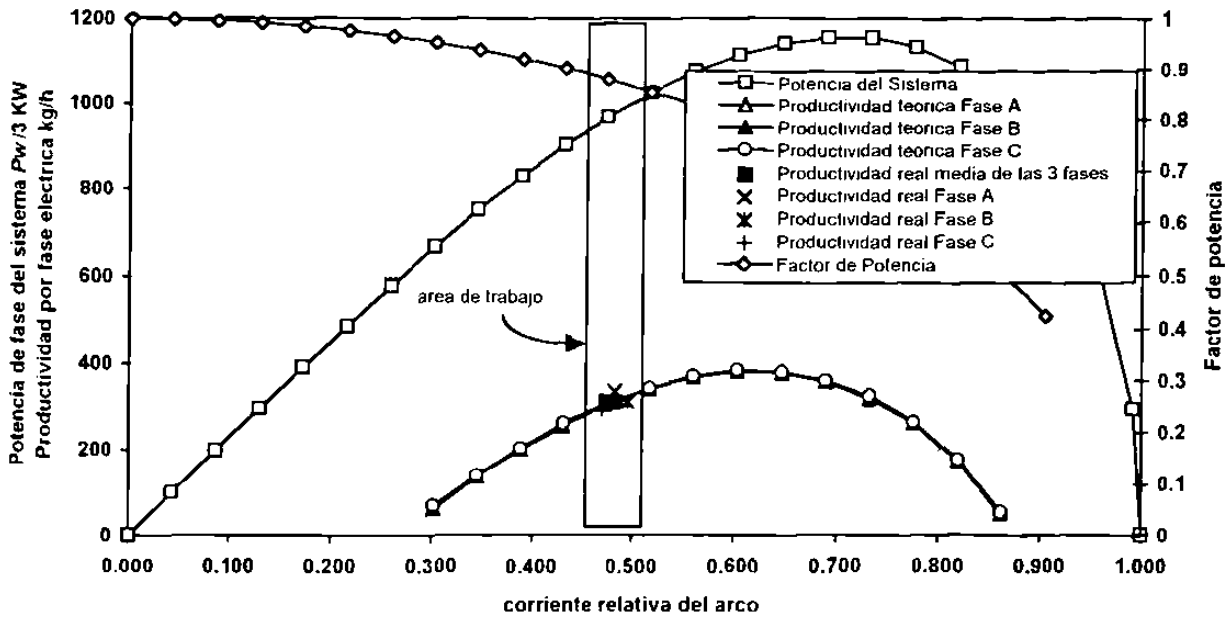


Fig. 89. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-2-1.

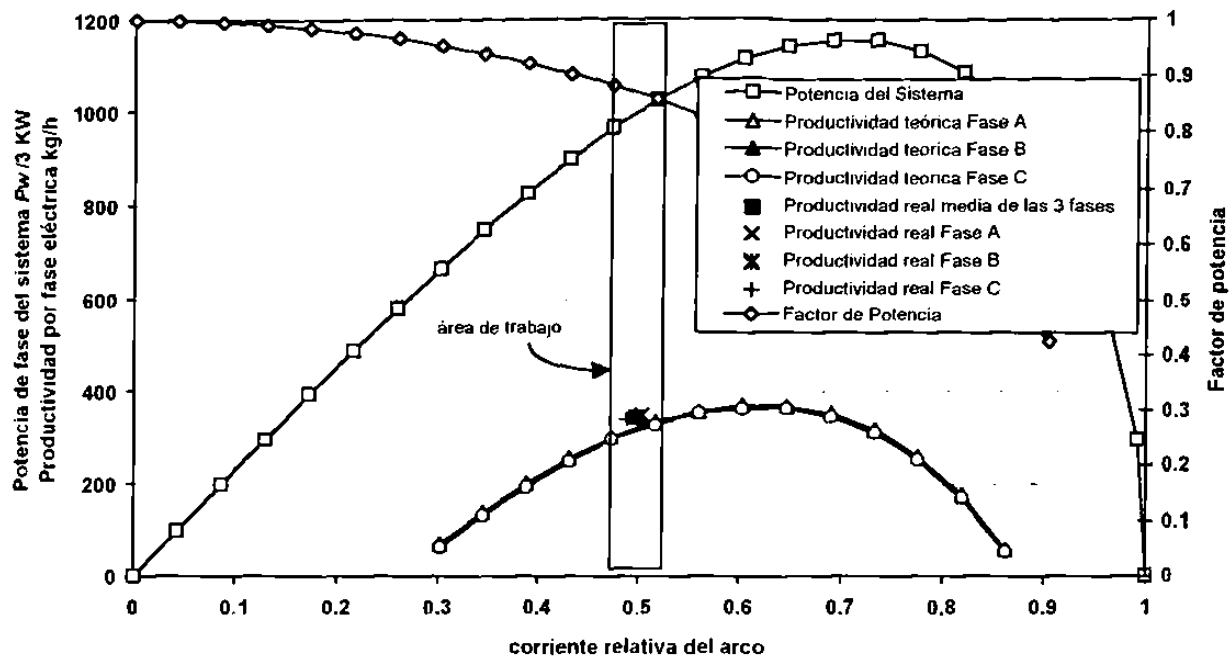


Fig. 90. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-2-2.

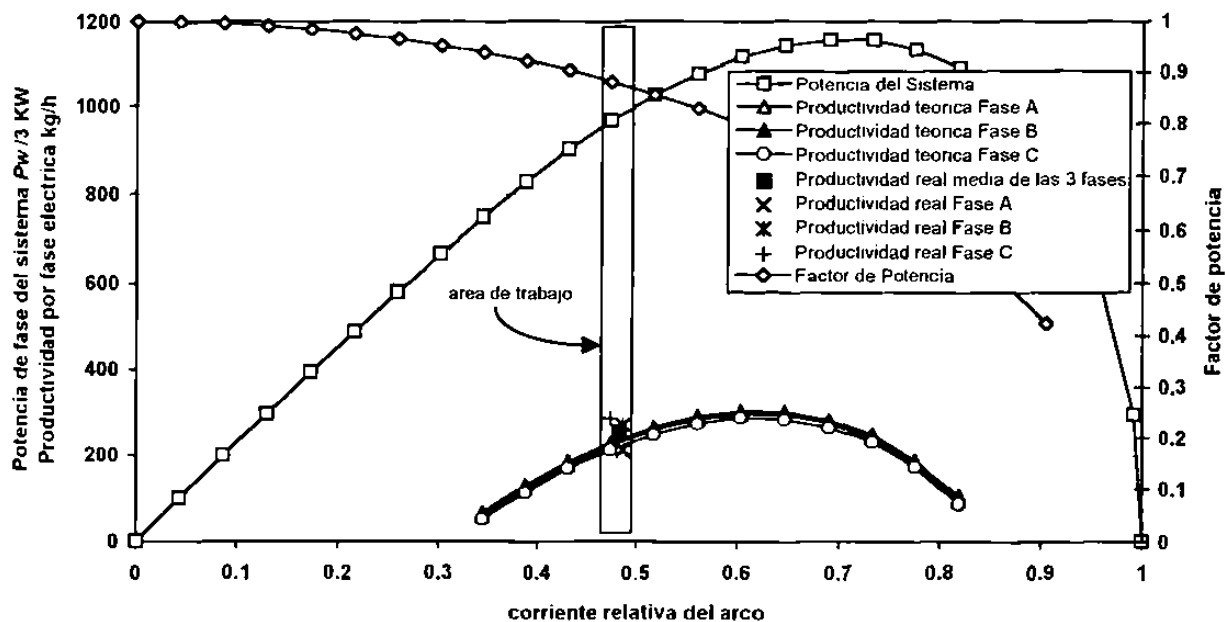


Fig. 91. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-2-3.

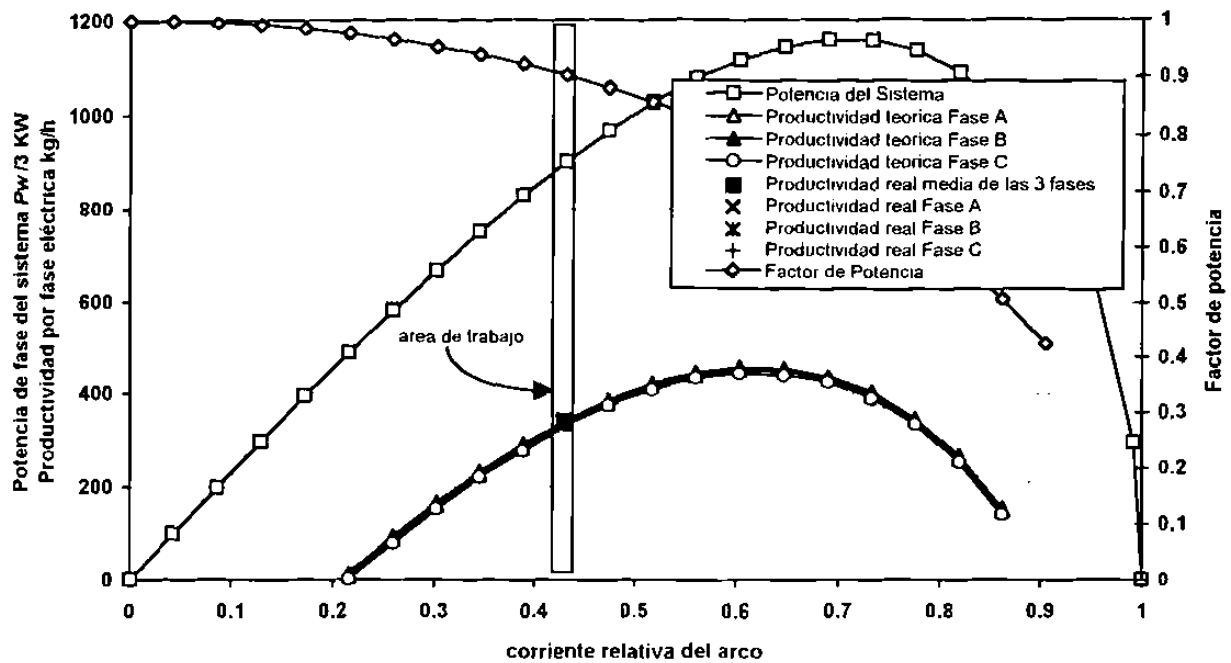


Fig. 92. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-3-1.

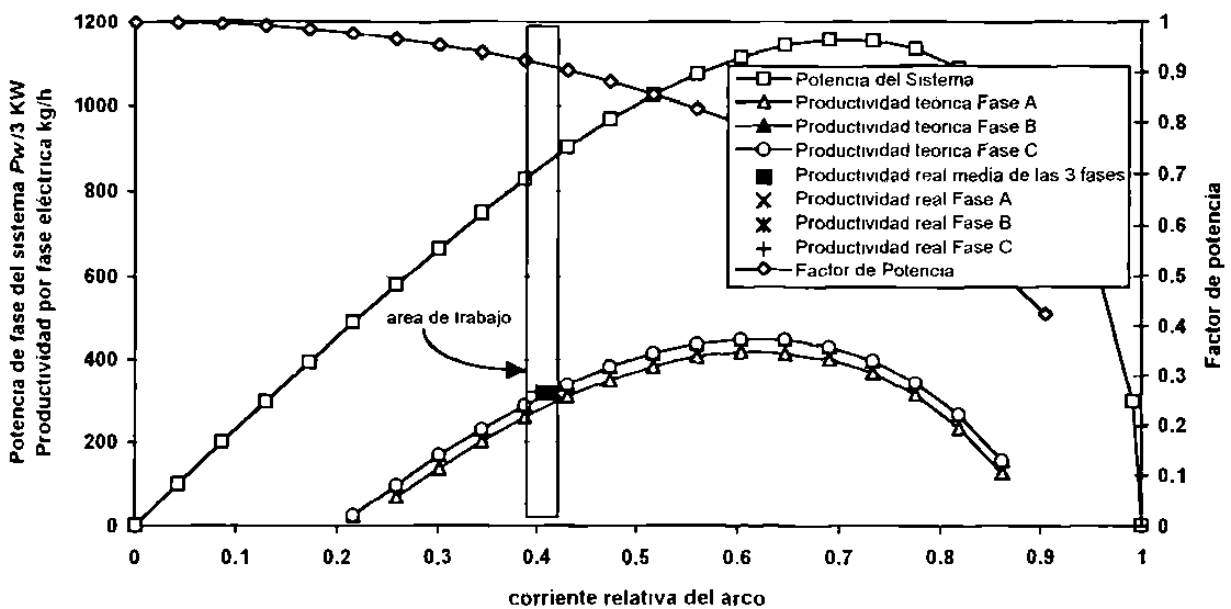


Fig. 93. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-3-2.

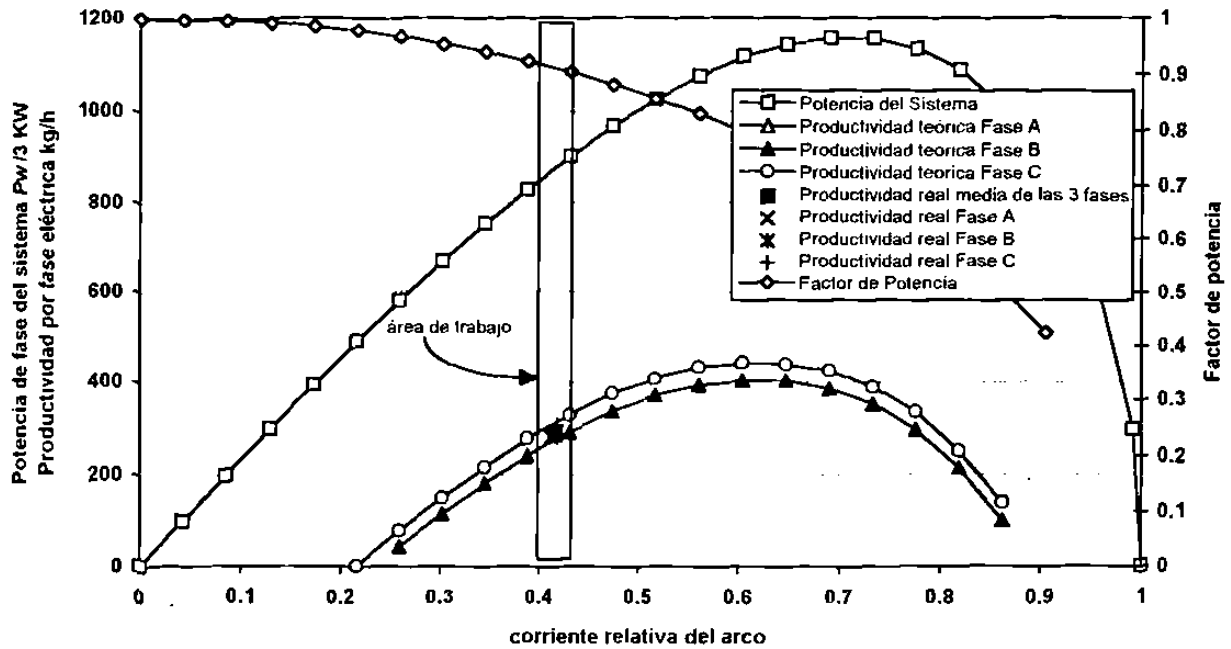


Fig. 94. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-3-3.

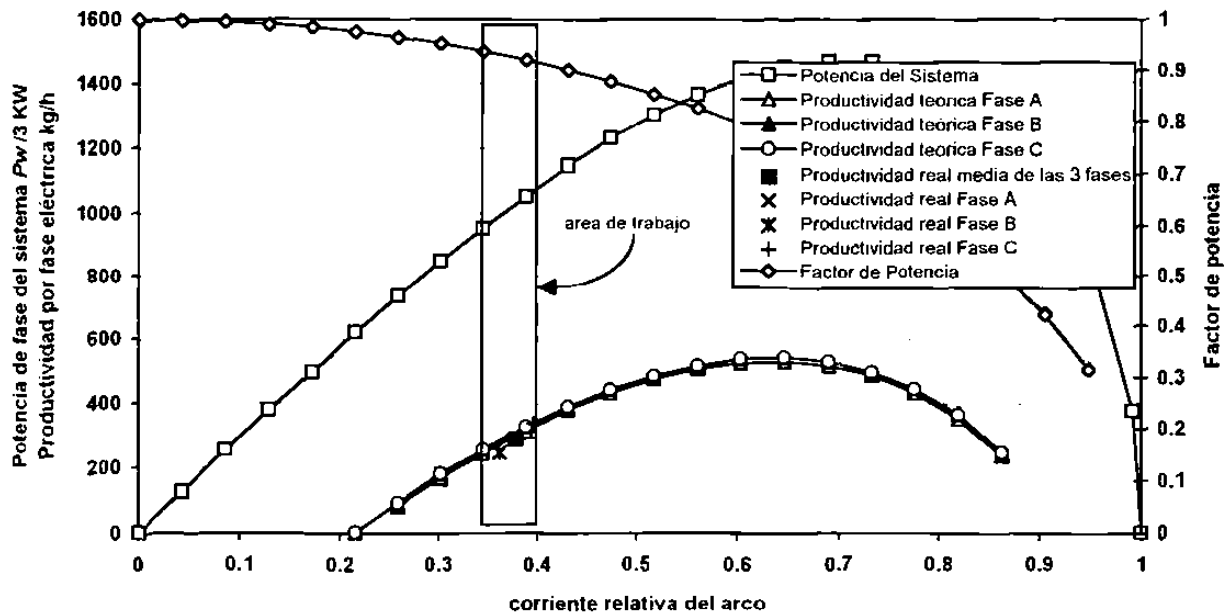


Fig. 95. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-4-1.

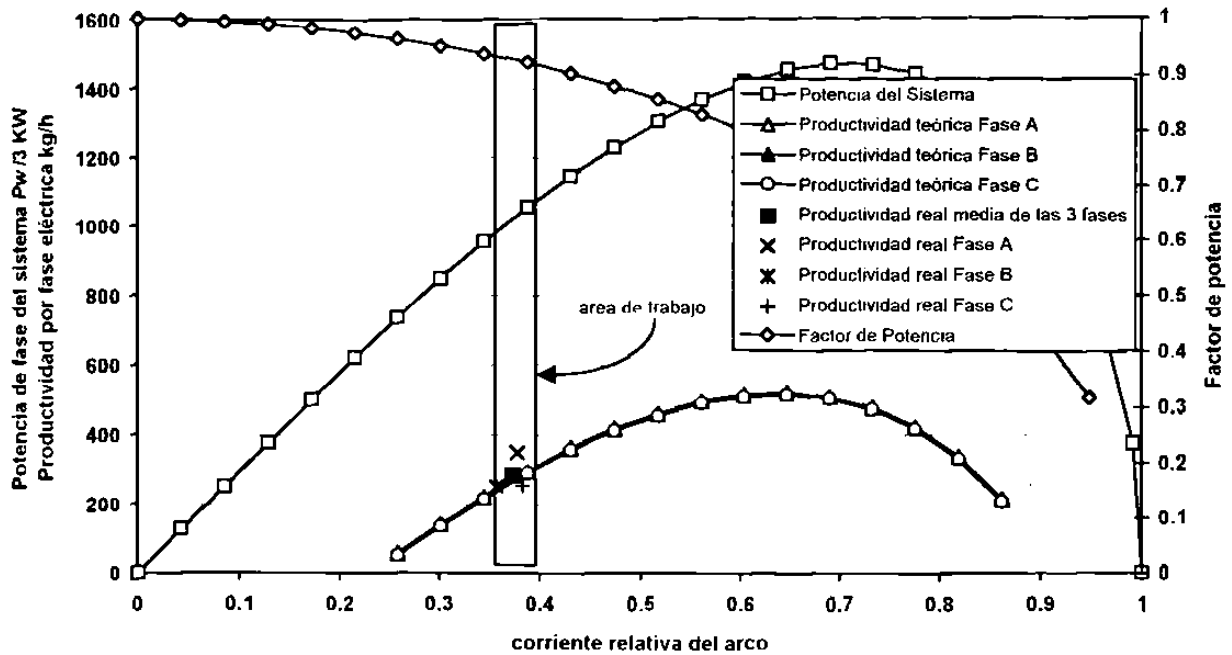


Fig. 96. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-4-2.

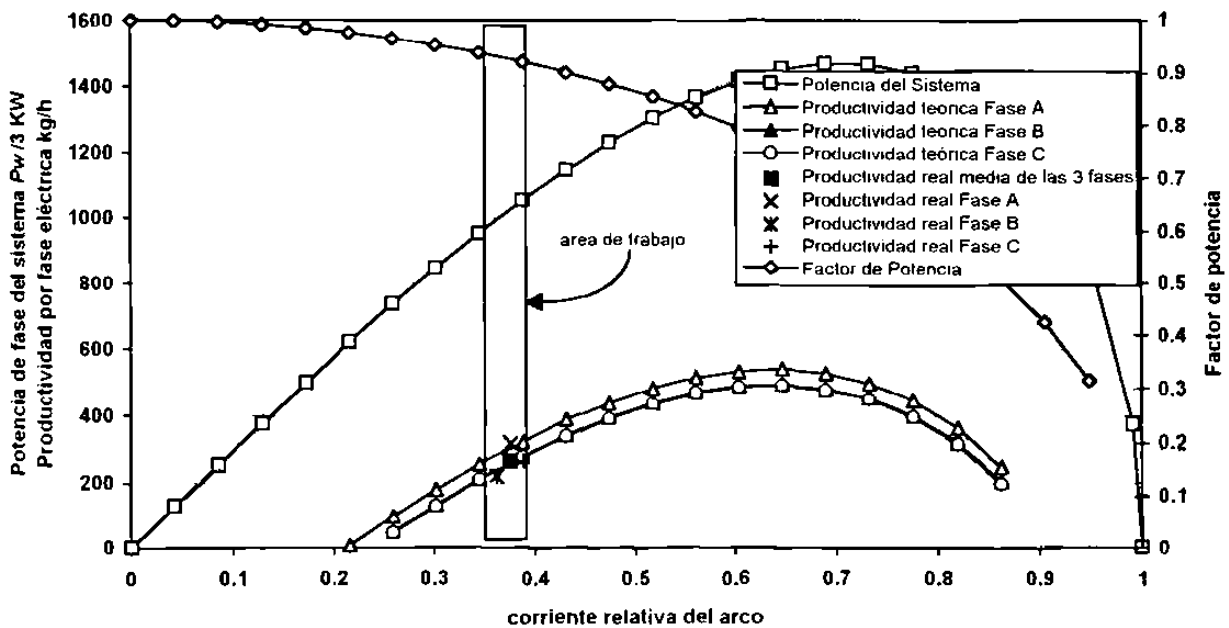


Fig. 97. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-4-3.

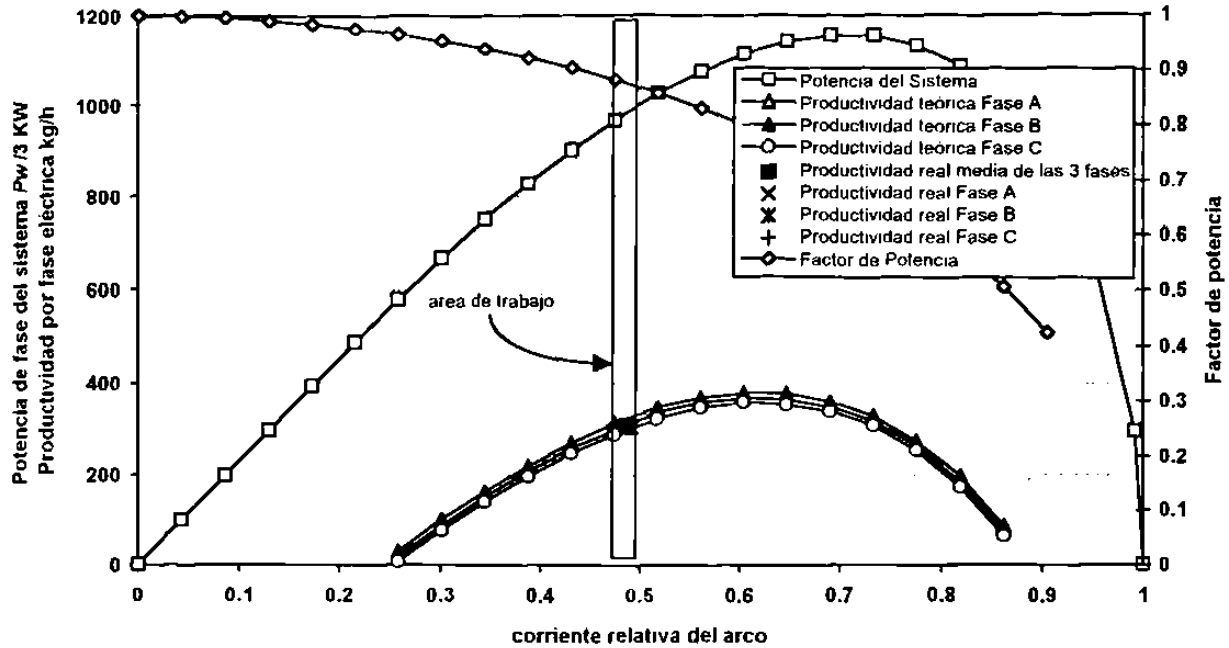


Fig. 98. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-5-1.

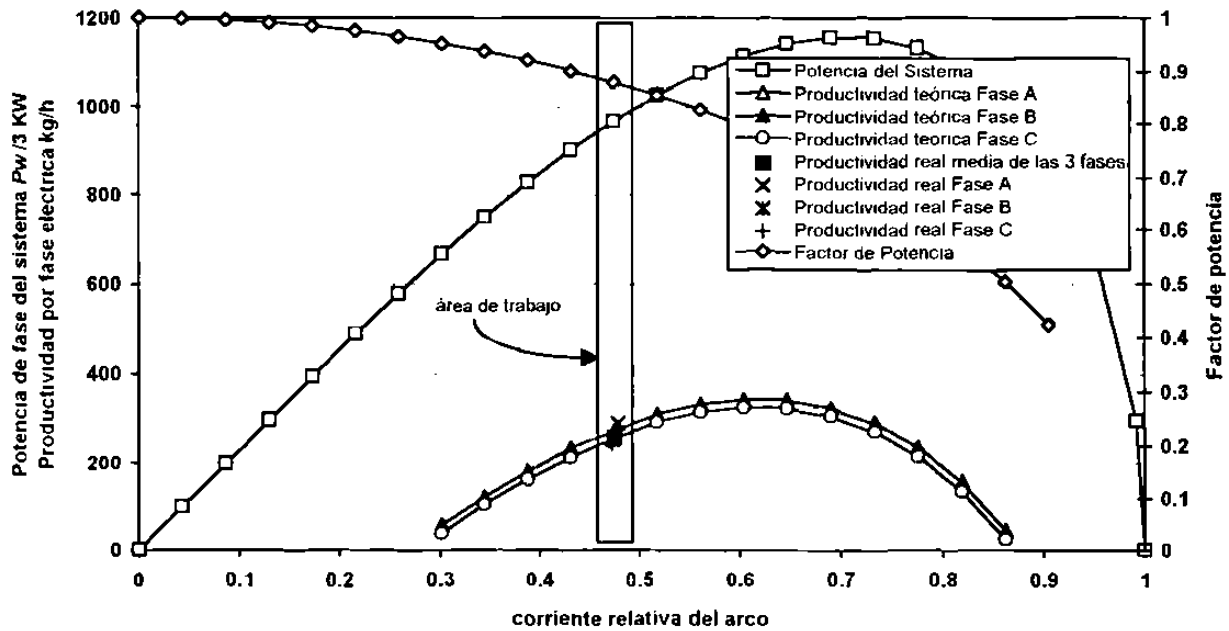


Fig. 99. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-5-2.

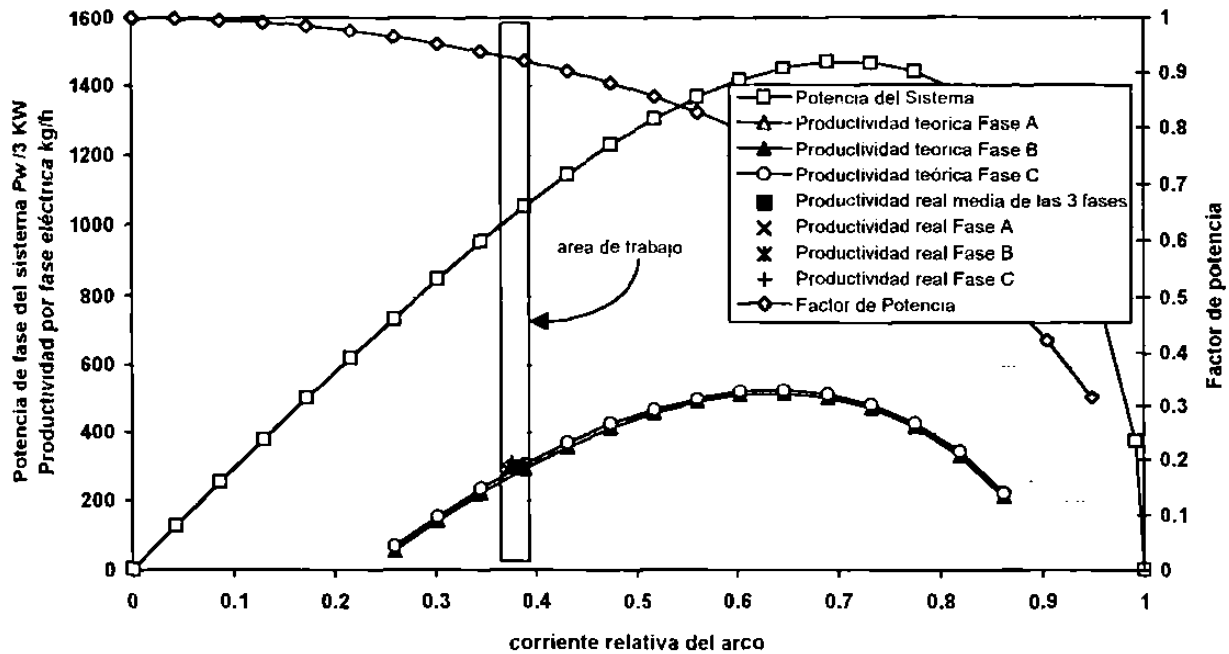


Fig. 100. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-6-1.

6.2.4. El Consumo Específico de Energía

Los datos teóricos y reales trifásicos y para cada fase eléctrica en cada prueba son presentados en las Tablas 38 y 39. Aquí se han tomado las mismas consideraciones que en la sección 6.1.4.

Tabla 38. Resultados del consumo de energía por fase eléctrica de prueba 2-1.

Experimento	Prueba	Fase eléctrica	Nivel de voltaje	Corriente relativa	Velocidad de electrodos cm/h	Tiempo de fusión hrs.	I_{ar} KW	m_{gr} teórico kg/h	m_{gr} real kg/h	E_{cc} calculado KWh/kg	E_{cc} real KWh/kg
2-1	1	A	6	0.4397859	50	2.5	915	280	300	3.267	3.050
		B		0.4527208	48		935	305	354	3.065	2.641
		C		0.4570324	51		941	293	320	3.211	2.940
		Total		-	-		2791	878	974	3.181	2.877
	2	A	6	0.4397859	27	3	915	343	325	2.667	2.815
		B		0.4440975	29		922	328	319	2.810	2.890
		C		0.4305590	23		900	350	319	2.571	2.821
		Total		-	-		2737	1021	963	2.682	2.842
	3	A	6	0.4104668	39	2.916	867	258	251	3.360	3.454
B		0.4014124		37	852		261	255	3.264	3.341	
C		0.4009812		35	851		277	315	3.072	2.701	
Total		-		-	2570		796	821	3.232	3.165	

Tabla 39. Resultados del consumo de energía por fase eléctrica de pruebas 2-2, 2-3, 2-4, 2-5 y 2-6.

Experimento	Prueba	Fase eléctrica	Nivel de voltaje	Corriente relativa	Velocidad de electrodos cm/h	Tiempo de fusión hrs.	P_w KW	m_{gr} teórico kg/h	m_{gr} real kg/h	E_{cc} calculado KWh/kg	E_{cc} real KWh/kg
2-2	1	A	6	0.4829021	39	3	980	334	338	2.934	2.899
		B		0.4958370	79		998	346	312	2.884	3.198
		C		0.4699673	36		961	304	293	3.161	3.279
		Total		-	-		2939	984	943	2.993	3.125
	2	A	6	0.5044603	56	2.667	1009	325	349	3.104	2.891
		B		0.5001486	56		1003	321	344	3.124	2.915
		C		0.4885073	57		987	307	338	3.214	2.920
		Total		-	-		2999	953	1031	3.147	2.908
	3	A	6	0.4872138	43	2.833	986	234	212	4.213	3.650
B		0.4872138		42	986		242	272	4.074	3.625	
C		0.4742789		44	967		214	286	4.518	3.381	
Total		-		-	2939		690	770	4.259	3.816	
2-3	1	A	6	0.4290068	31	2.5	898	341	344	2.633	2.610
		B		0.4281445	75		896	333	336	2.690	2.667
		C		0.4290068	36		898	327	340	2.746	2.641
		Total		-	-		2692	1001	1020	2.689	2.639
	2	A	6	0.4078798	57	2.25	863	283	315	3.049	2.739
		B		0.4195212	50		882	326	317	2.705	2.782
		C		0.3997309	50		849	303	320	2.801	2.653
		Total		-	-		2594	912	952	2.844	2.724
	3	A	6	0.4126226	35	2.5	871	271	280	3.214	3.110
B		0.4169343		35	878		276	285	3.181	3.080	
C		0.4182277		30	880		315	306	2.793	2.875	
Total		-		-	2629		862	871	3.049	3.018	
2-4	1	A	3	0.3758180	87	1.667	1021	292	286	3.496	3.569
		B		0.3617454	83		994	285	246	3.487	4.040
		C		0.3953761	83		1070	339	337	3.156	3.175
		Total		-	-		3085	916	869	3.367	3.550
	2	A	3	0.3776985	83	1.9167	1030	277	350	3.718	2.942
		B		0.3574338	82		983	246	252	3.995	3.900
		C		0.3829155	84		1042	282	254	3.695	4.102
		Total		-	-		3055	805	856	3.795	3.568
	3	A	3	0.3758180	68	1.5833	1021	304	319	3.358	3.200
B		0.3621766		74	995		240	221	4.145	4.502	
C		0.3880464		75	1054		277	266	3.805	3.962	
Total		-		-	3070		821	806	3.739	3.808	
2-5	1	A	6	0.4872138	43	2.25	986	323	310	3.052	3.180
		B		0.4915254	45		992	315	304	3.149	3.263
		C		0.4872138	47		986	300	300	3.286	3.286
		Total		-	-		2964	938	914	3.159	3.242
	2	A	6	0.4785905	59	2.4167	973	279	290	3.487	3.355
		B		0.4742789	59		967	275	250	3.516	3.868
Total	-	-	0.4725542	63	-	969	255	240	3.784	4.020	
2-6	1	A	3	0.3707998	95	1.8333	1014	265	290	3.826	3.496
		B		0.3880464	95		1054	293	300	3.597	3.513
		C		0.3751115	91		1024	284	310	3.605	3.703
		Total		-	-		3092	842	900	3.672	3.435

6.2.4.1 Efecto de la Velocidad de los Electrodo

En las Figs 101., 102., 103., 104 y 105 se presentan gráficamente con puntos dispersos los resultados del consumo de energía específica contra la velocidad de levantamiento de los electrodos;

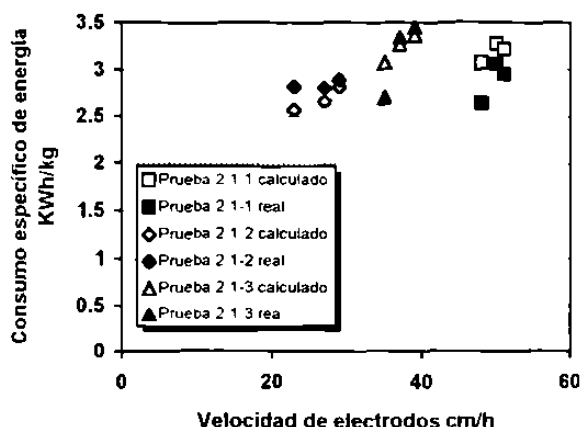


Fig. 101. Resultados reales y calculados del consumo específico de energía en función de la velocidad de levantamiento de electrodos para las pruebas 2-1.

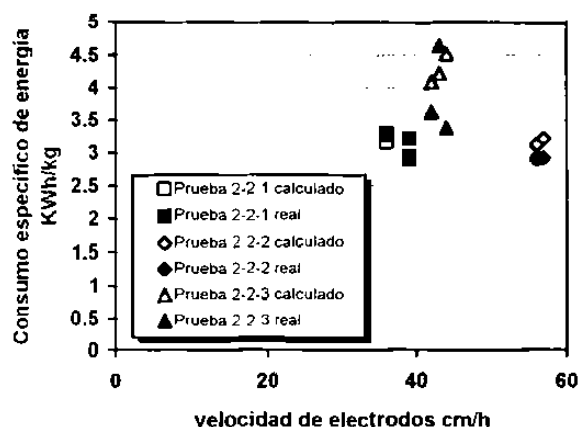


Fig. 102. Resultados reales y calculados del consumo específico de energía en función de la velocidad de levantamiento de electrodos para las pruebas 2-2.

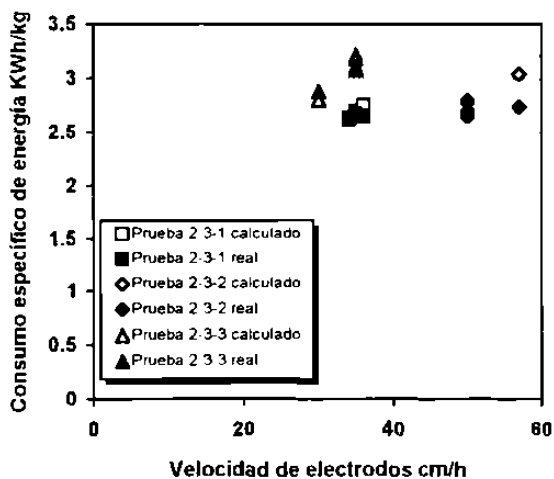


Fig. 103. Resultados reales y calculados del consumo específico de energía en función de la velocidad de levantamiento de electrodos para las pruebas 2-3.

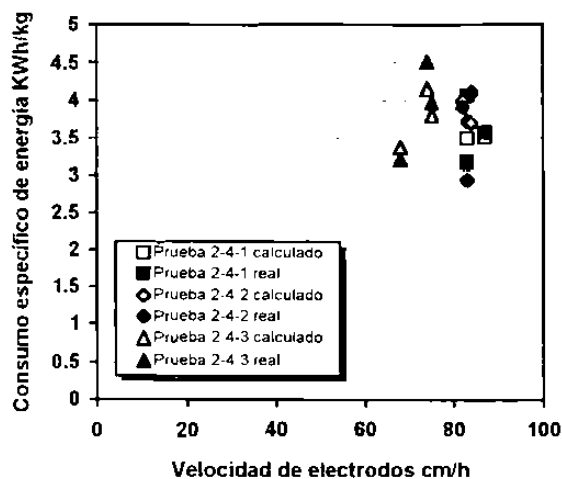


Fig. 104. Resultados reales y calculados del consumo específico de energía en función de la velocidad de levantamiento de electrodos para las pruebas 2-4.

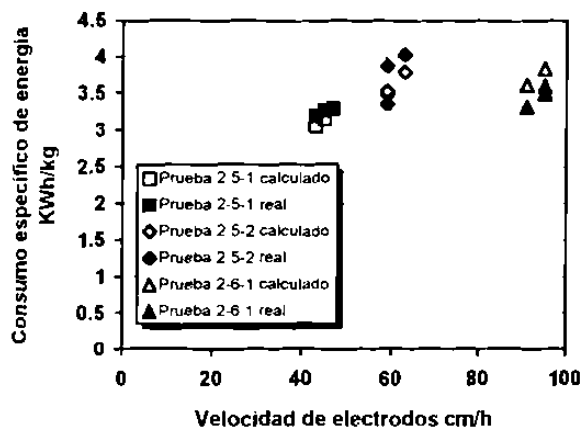


Fig. 105. Resultados reales y calculados del consumo específico de energía en función de la velocidad de electrodos para las pruebas 2-5 y 2-6.

al igual que en la sección 6.1.4.1 se observa que conforme se incrementa la velocidad de electrodos el consumo de energía por unidad de producto también aumenta. Es importante hacer notar que los puntos de las distintas pruebas unas entre otras no se mueven en una misma línea porque para cada una e inclusive para cada electrodo, la potencia suministrada fue ligeramente distinta. Es por ello que se han graficado los puntos de trabajo para cada fase eléctrica o electrodo.

6.2.4.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico

En las Figs 106. a la 120. se muestran gráficamente los resultados de consumos de energía específica por fase eléctrica contra la corriente de arco relativa; en estas gráficas pueden observarse los mismos comportamientos de bajos consumos en determinados valores de corriente como en la sección 6.1.4.2 para las pruebas preliminares; se observa además de nueva cuenta la proyección en aumento de los consumos de energía al rebasar ciertos valores de corriente relativa de arco, cuyo valor esta ligeramente desplazado a la izquierda del valor de corriente para potencia máxima de suministro del sistema.

Lo anterior se debe a las pérdidas eléctricas en el circuito del horno, las cuales van en incremento conforme la corriente del arco aumenta en el orden de esta última al cuadrado ($P_v \propto I_a^2$) tal como lo describe la expresión (67) de la sección 3.2.3. Esta pérdida provoca una curva de potencia útil del horno con su punto máximo ligeramente desplazado a la izquierda, tal como lo muestran las Figs. 10. y de la 15 a la 26. en las secciones 2.2.3. y 3.2.3. El punto de corriente de arco para consumo de energía específico mínimo corresponde al valor para potencia util del horno máximo.

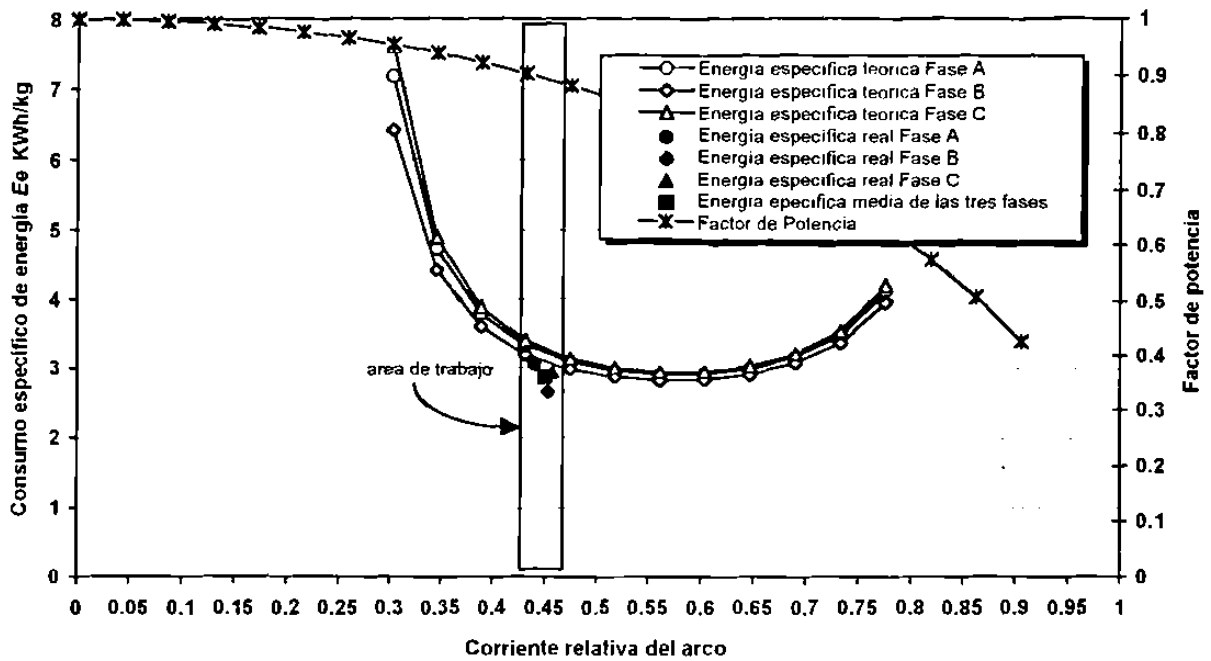


Fig. 106. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-1-1.

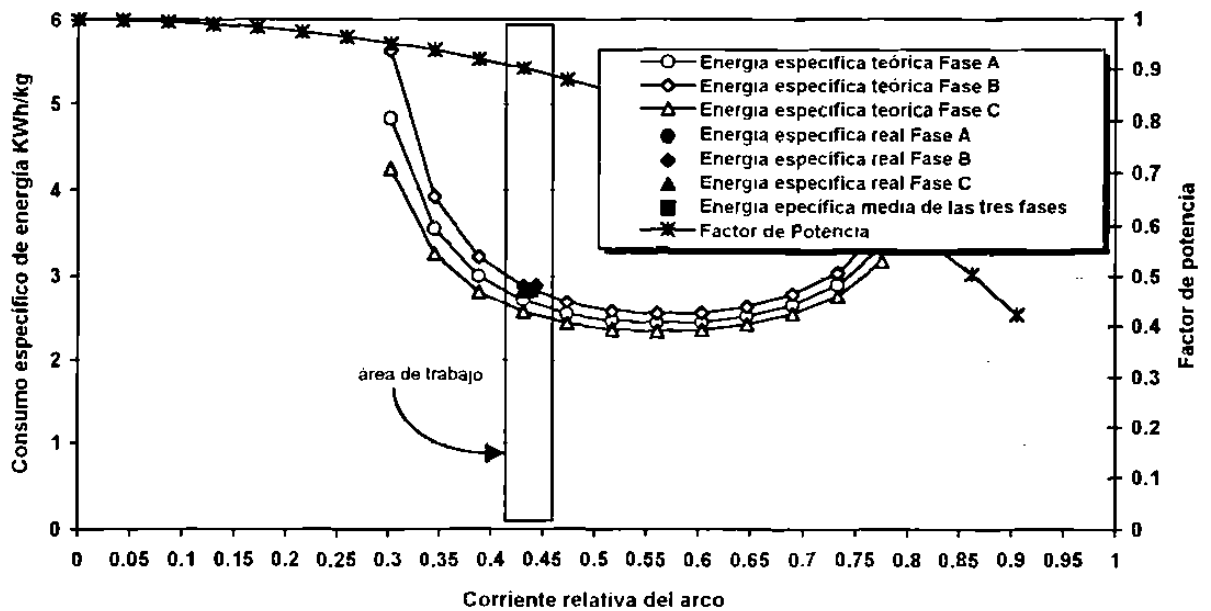


Fig. 107. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-1-2.

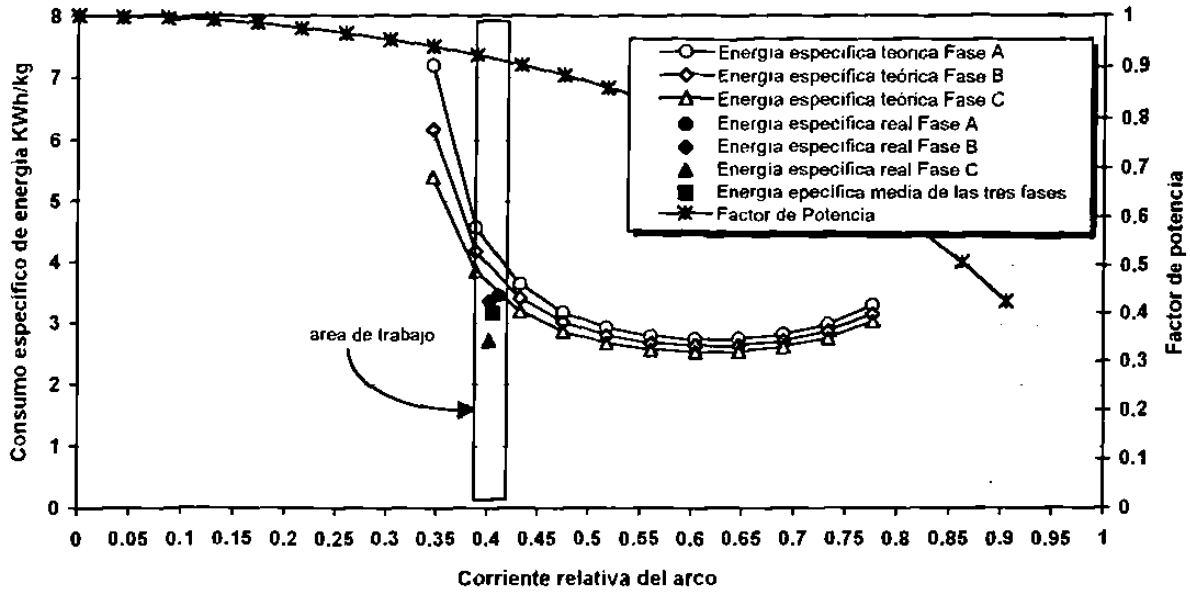


Fig. 108. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-1-3.

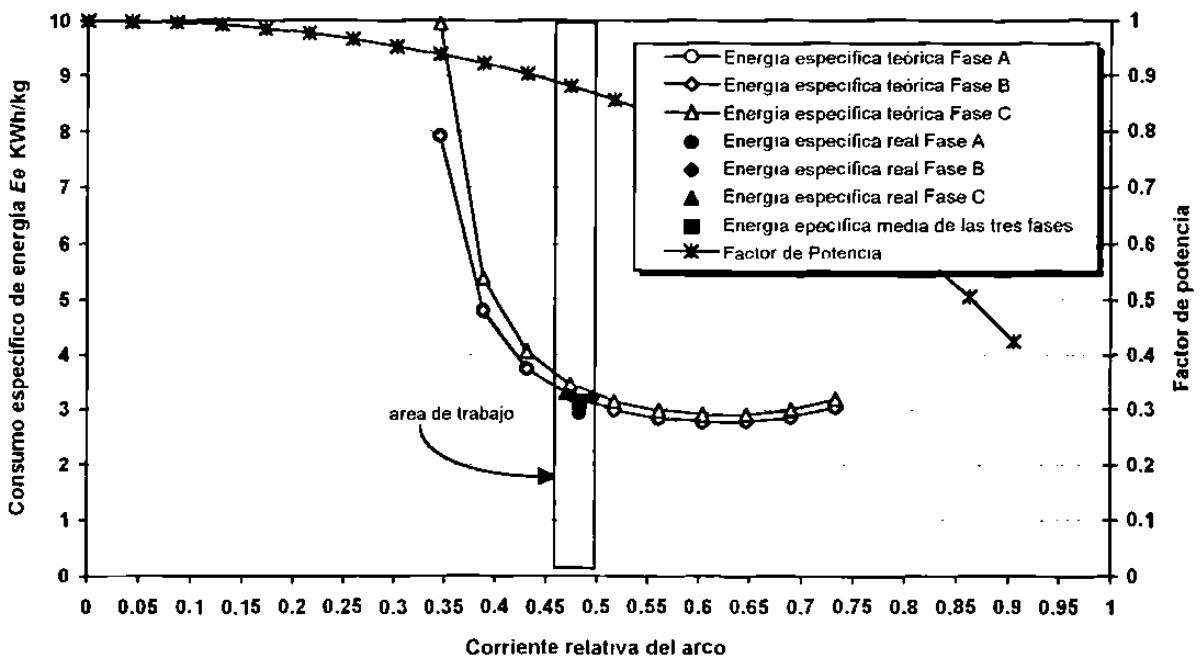


Fig. 109. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-2-1.

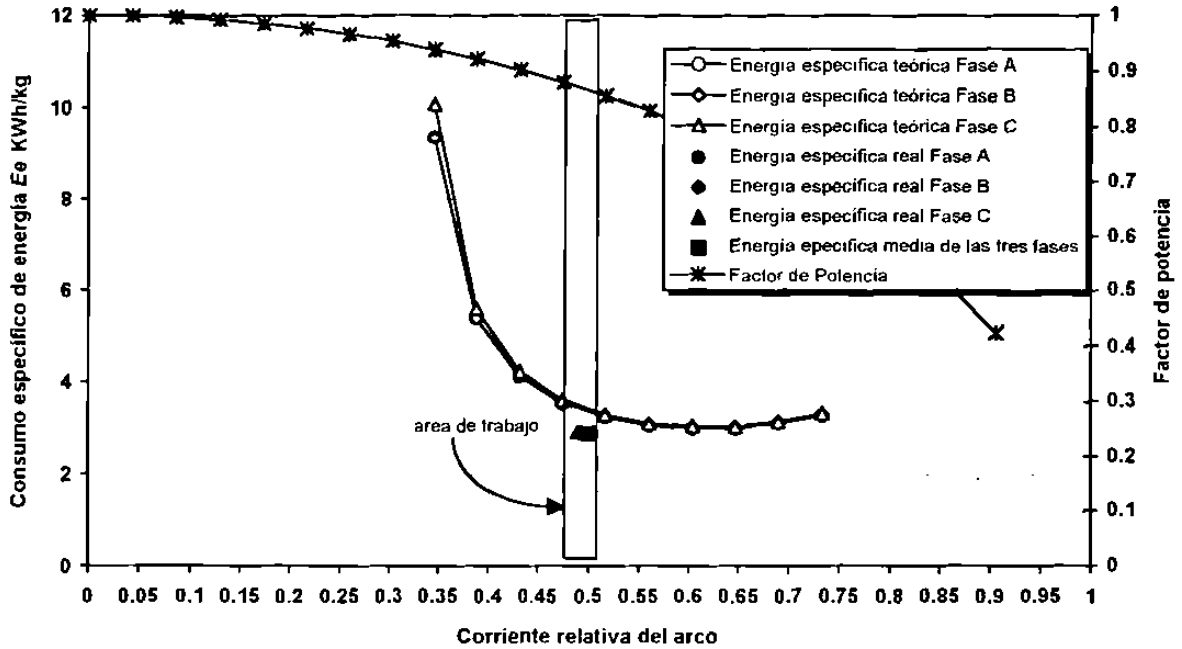


Fig. 110. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-2-2.

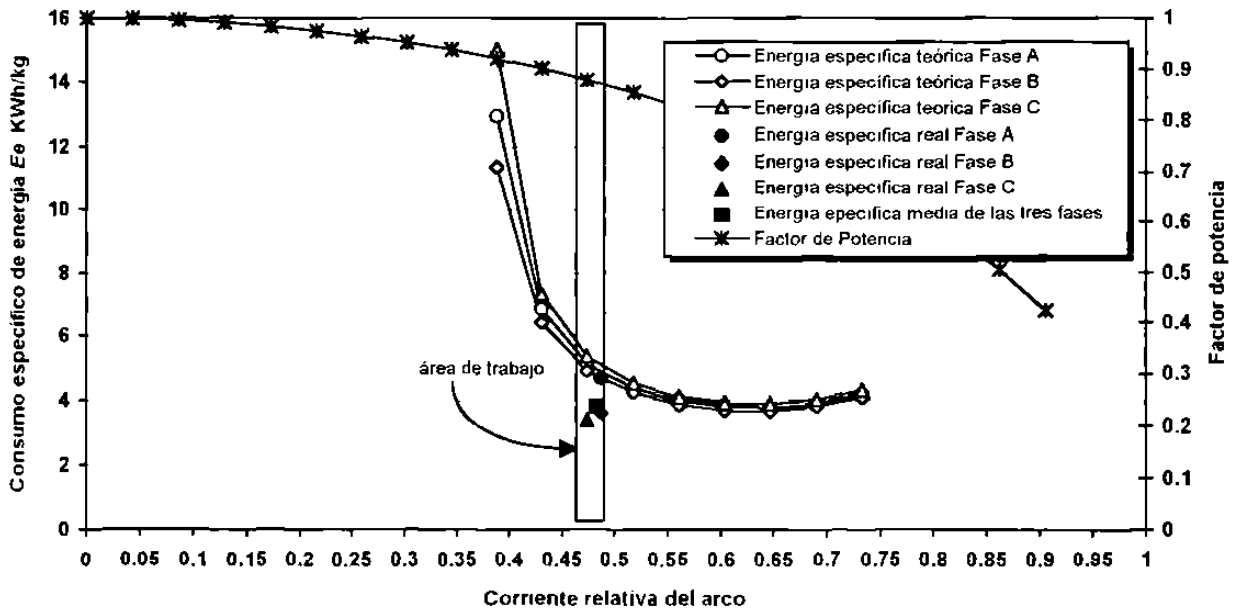


Fig. 111. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-2-3.

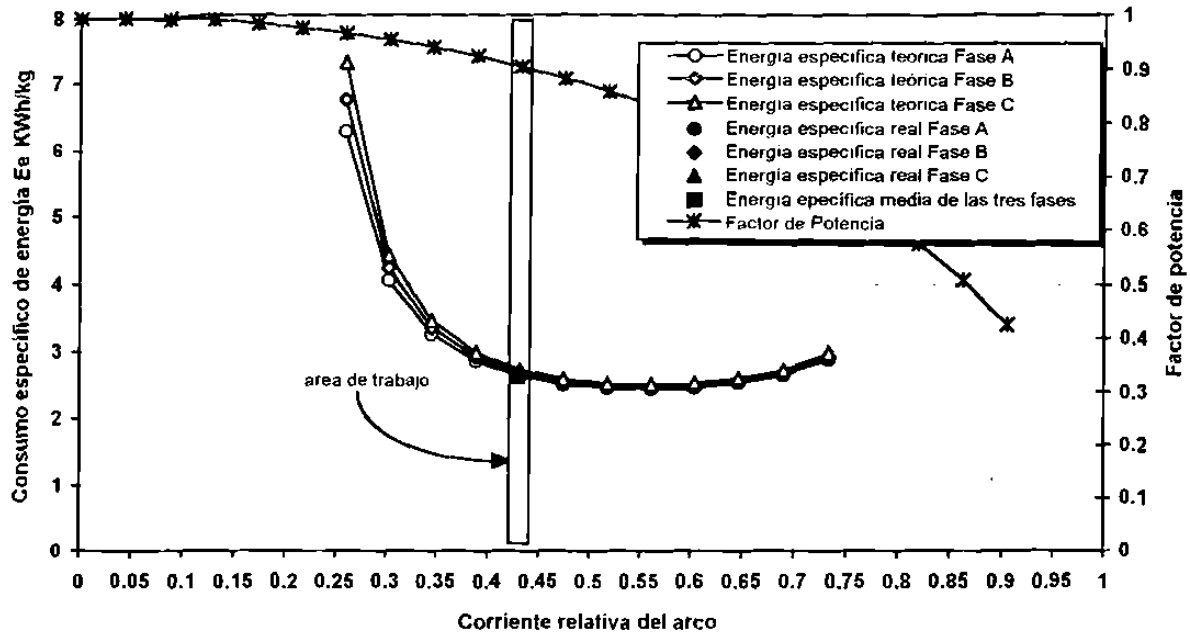


Fig. 112. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-3-1.

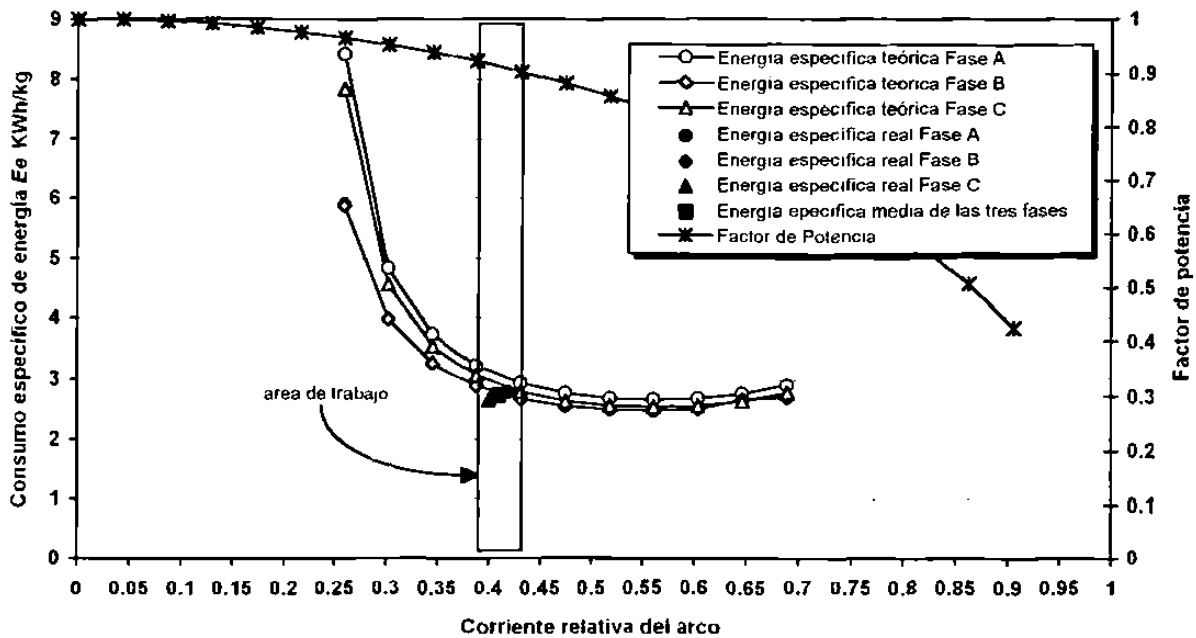


Fig. 113. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-3-2.

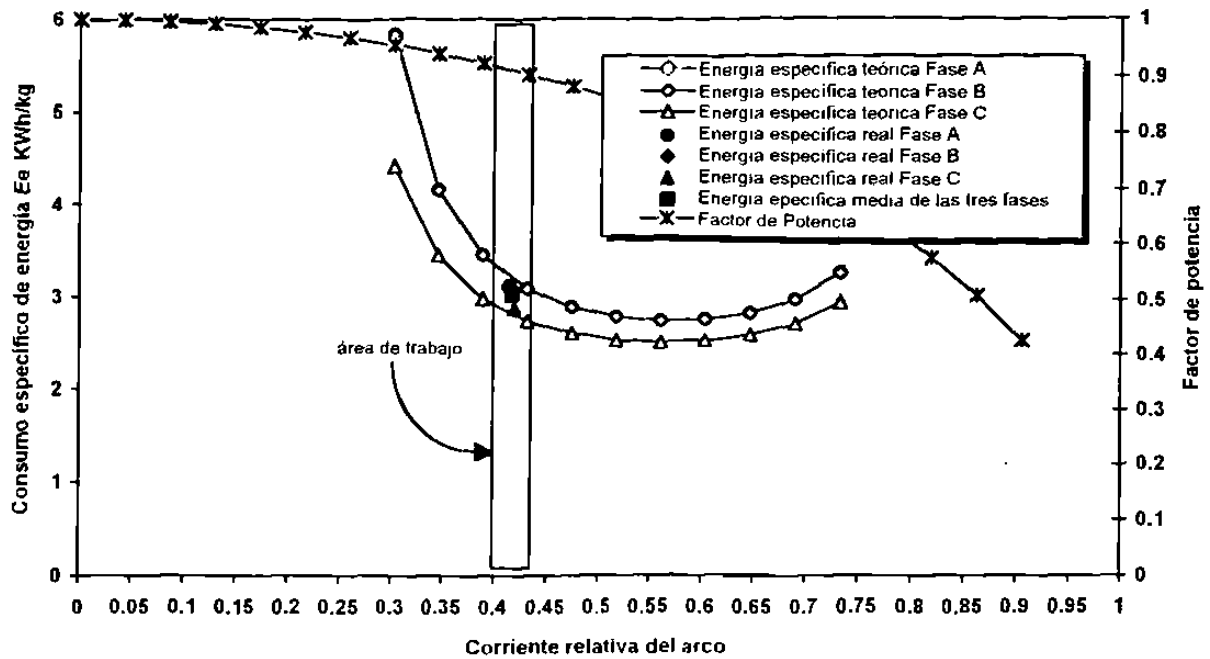


Fig. 114. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-3-3.

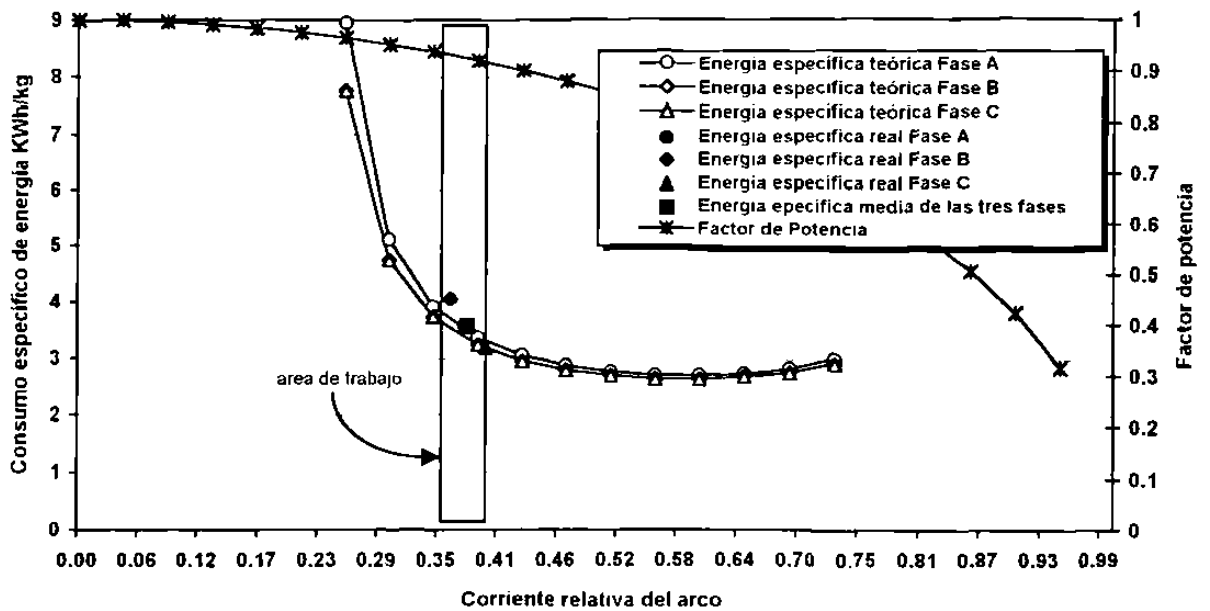


Fig. 115. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-4-1.

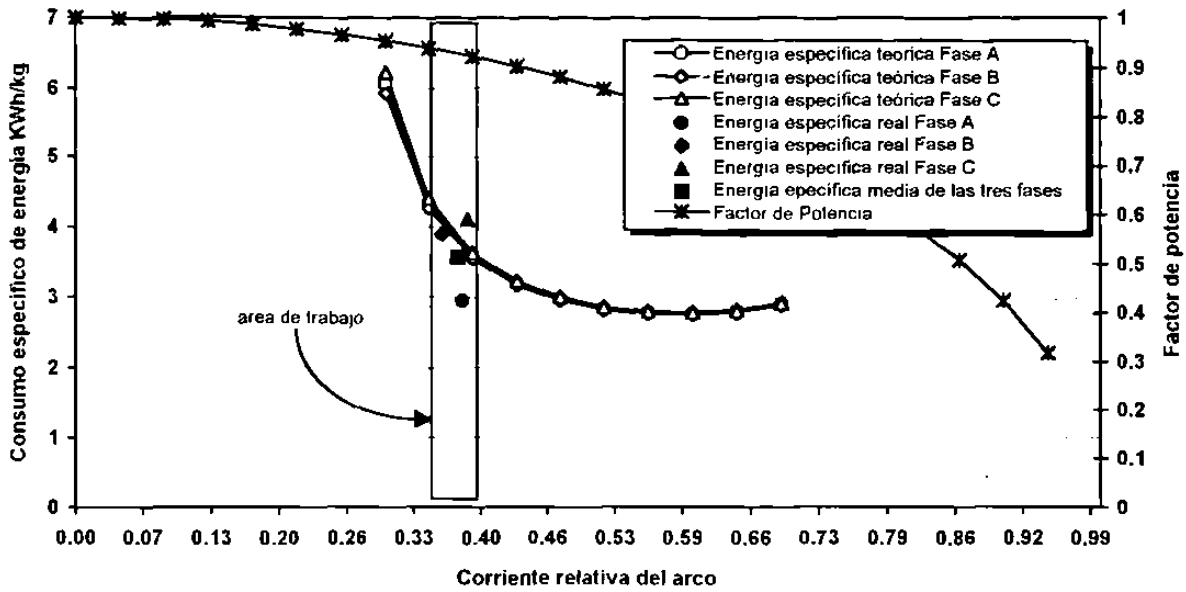


Fig. 116. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-4-2.

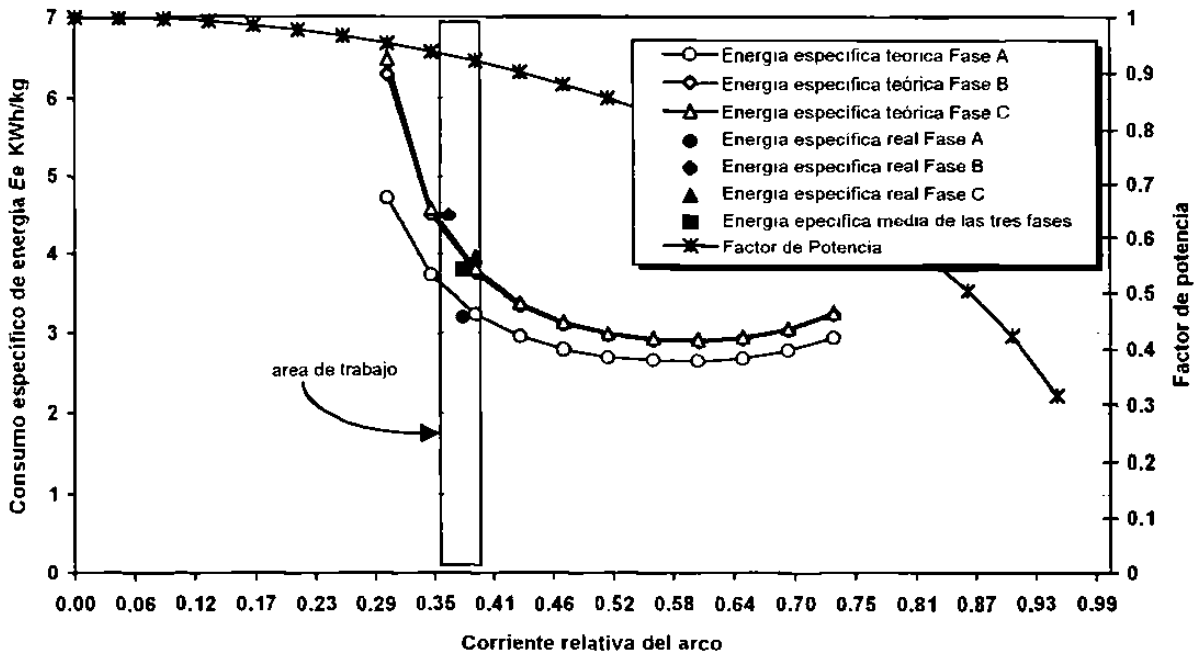


Fig. 117. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-4-3.

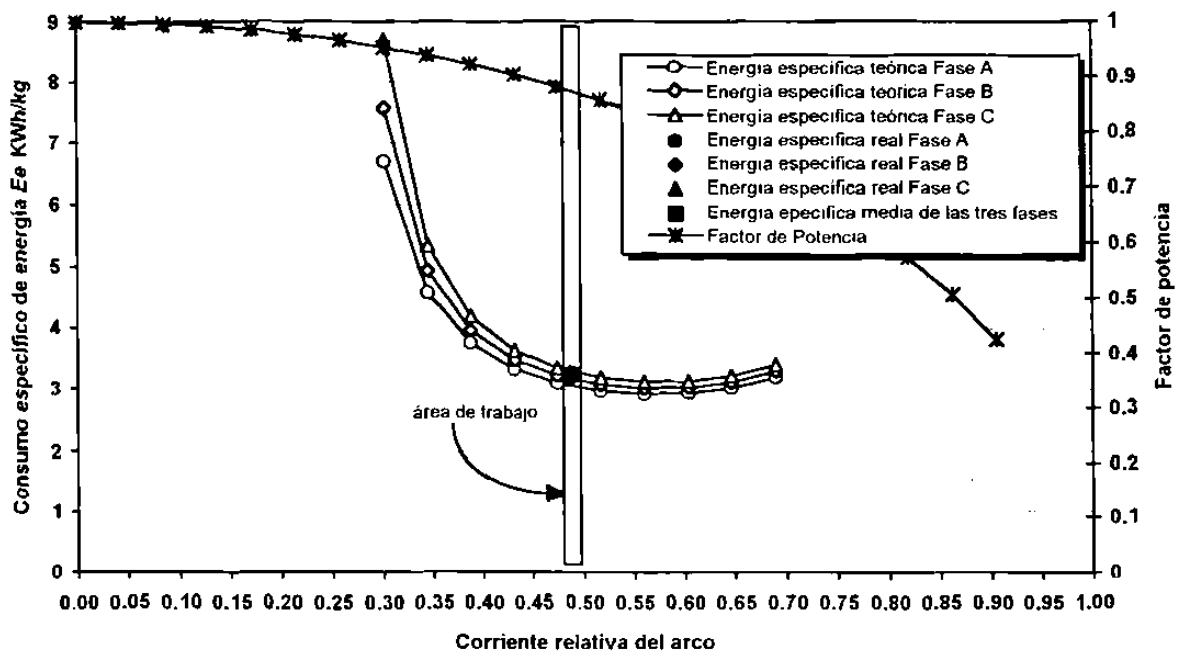


Fig. 118. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-5-1.

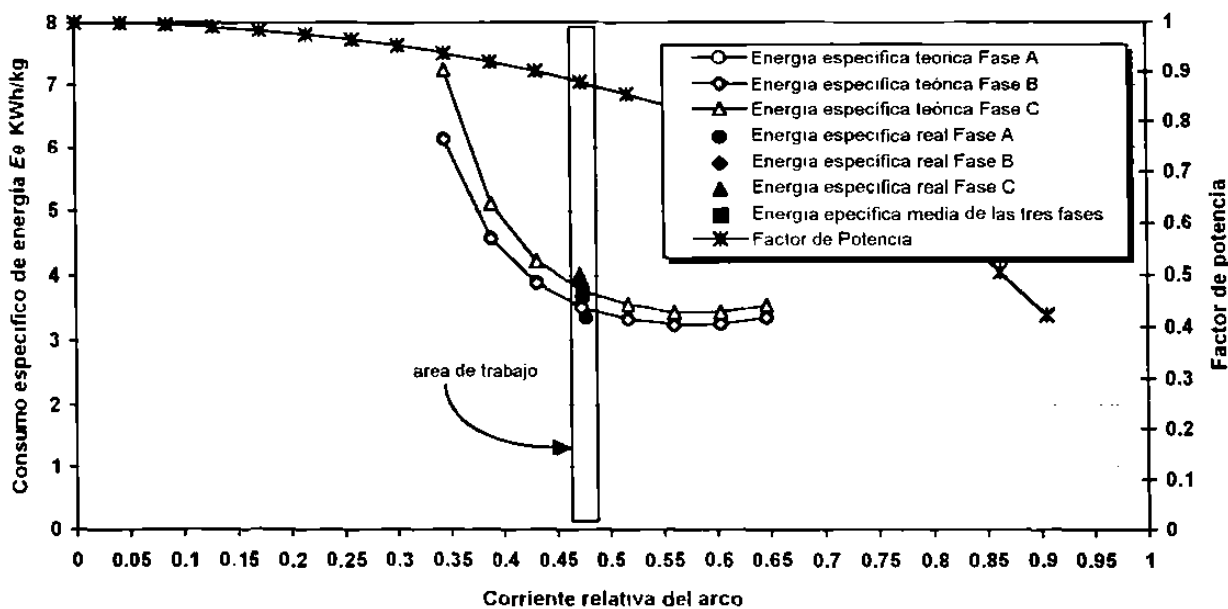


Fig. 119. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-5-2.

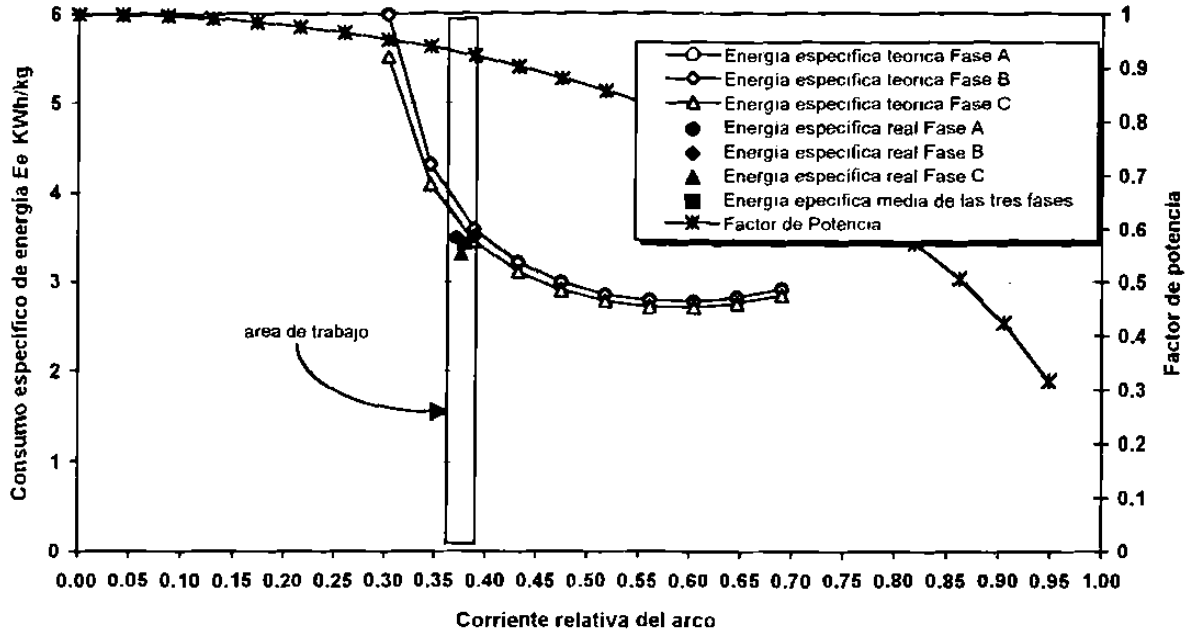


Fig. 120. Resultados del consumo específico de energía por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba 2-6-1.

6.2.5. La Calidad del Producto

Como fue mostrado con los resultados de los análisis de las muestras obtenidas en las pruebas preliminares de la sección 6.1.5., el tamaño de los cristales del producto electrofundido en un mismo lingote es muy variado y no sigue ningún patrón dentro del mismo, es decir que se pueden obtener tanto cristales de gran tamaño como pequeños en la parte inferior de los lingotes; por ello se decidió realizar los análisis de tamaño de cristal y BSG de una muestra representativa de todo un lingote. Esto último se hace durante el ensacado de producto de cada prueba realizada en donde se toman muestras aleatoriamente en esta parte del proceso, las muestras son mezcladas y cuarteadas para finalmente obtener una muestra considerada como representativa del lingote de prueba. Como puede observarse en los resultados hasta aquí presentados todos los experimentos tienen valores de operación distintos y en su mayoría no coinciden con las condiciones previamente especificadas, por

ello se ha hecho una selección al azar de muestras de lingotes de las pruebas para ser analizadas. En la Tabla 40. se presentan los resultados de análisis del tamaño de cristal y BSG de las muestras seleccionadas; al comparar el tamaño promedio de cristales de estas muestras con el que se obtiene en producción normal ($530 \mu\text{m}$) se observa un incremento promedio del 10 % aproximadamente.

Tabla 40. Tamaño de cristal promedio y BSG de pruebas del Grupo 2.

Experimento No.	BSG gr/cm^3	Tamaño promedio de cristal μm
2-1-3	3.51	653.28
2-2-1	3.50	613.89
2-2-2	3.50	635.84
2-3-3	3.50	618.20
2-4-3	3.50	626.40
2-5-2	3.49	563.05

El proceso de fusión de MgO por horno de arco eléctrico involucra inevitablemente fenómenos de transferencia de calor por radiación, conducción y por movimientos convectivos tal vez leves con el material durante su estado líquido de igual forma presenta la transferencia de calor por gases en movimiento interno al contacto con partes de carga con baja temperatura; adicional a esto esta presente la generación de calor en el material por el efecto Joule al pasar la alta corriente a través de él. además de la generación de gases y vapores por las posibles reacciones químicas presentes a la temperatura de fusión manejada (2800°C).

Algunos asesores tecnológicos sugieren la presencia y desplazamiento de gases y vapores de materiales de bajo punto de fusión como B_2O_3 y de SiO_2 , así como la formación de Mg metálico, C y CO_2 tras la reacción del grafito de los electrodos con el MgO arriba de $1800^\circ\text{C}^{(16)}$. Estos autores proponen que estos vapores y gases se desplazan alejándose de la zona caliente hacia las zonas de carga fría donde se enfrían y se depositan. Una manera de probar estas propuestas de fenómenos probables durante la fusión es analizando químicamente el material alojado en la periferia del lingote fundido, es decir material de recicló, en la Tabla 41 se muestra el resultado de tres muestras de material de recicló en los que se observa la presencia de C en diferentes porcentajes. Con esto puede considerarse que todos aquellos vapores y gases formados por las fases de bajo punto de fusión son

desplazados en distintas direcciones dentro de la masa fundiéndose y que se depositan en las zonas de relativamente baja temperatura por posible condensación; de acuerdo a la caracterización realizada con las pruebas preliminares es de esperarse que estos desplazamientos no son uniformes y que dependen de las condiciones propias del estado físico de distribución de calor dentro del horno, situación por el momento difícil de predecir y controlar por la complejidad de la combinación fenomenológica de transferencia de calor en la carga fundiéndose.

Tabla 41. Composición química de material de recicló.

Experimento	% CaO	% Fe ₂ O ₃	% Al ₂ O ₃	% SiO ₂	% B ₂ O ₃	% C	% MgO
2-5-2	0.740	0.082	0.092	0.120	0.0082	0.077	98.88
2-6-1	0.720	0.114	0.092	0.106	0.0073	0.080	98.88
2-6-1	0.80	0.072	0.097	0.117	0.0499	0.054	98.81

Como puede observarse en la Tabla 41. los contenidos de C y B₂O₃ son muy variados (sustancias más volátiles en el proceso) y aún en el mismo experimento éstos no son homogéneos; las muestras del experimento 2-6-1 fueron tomadas de distintas zonas en la periferia del lingote fundido al azar. Con lo anterior se pretende comprobar lo difícil que es tratar de predecir una calidad de producto en cada fusión realizada tanto en experimentación como en producción normal. En previas investigaciones¹⁶⁾ se ha determinado la influencia que el tiempo de fusión tiene sobre el tamaño de cristal, dando como resultado que con tiempos de fusión prolongados se obtienen tamaños de cristal grandes, fenomenológicamente esto es cierto considerando los conocidos mecanismos de nucleación y crecimiento de granos en materiales, Kingeri¹⁷⁾; se sabe que el crecimiento de cristales es un fenómeno termicamente activado y que evoluciona con el tiempo es decir, en nuestro caso de fusión, nucleación y crecimiento de cristales de MgO, por su alta temperatura de fusión y alta capacidad calorífica con tiempos de fusión prolongados se tendrán tanto zonas de material líquido (cerca del arco eléctrico) como zonas de material ya solidificado (en la parte inferior), lo que permite sostener largos tiempos con el material a alta temperatura dando lugar al crecimiento de cristales. Lo anterior ha sido posible a escala piloto¹⁶⁾ donde los electrodos permanecen inmóviles durante toda la fusión, pero a escala industrial es resultado es distinto debido al levantamiento continuo de los electrodos y a la también continua alimentación de materia prima dentro del horno, lo que cambia totalmente el resultado en las características del producto obtenido no dando lugar a un crecimiento continuo de cristales y de segregación de impurezas desde los cristales de MgO.

6.3. Pruebas del Grupo 3

Como se ha podido observar hasta los resultados de las pruebas preliminares y las del grupo 2 en las que se uso materia prima con tamaños de granos sin clasificarse con una gama desde la malla -4 hasta arriba de 3/8 de pulgada, la operación de las pruebas es bastante irregular; esto dió lugar a pensar en la influencia que esta diversidad de tamaños de grano tienen sobre el control y por ende en el resultado del producto obtenido. Por ello para este grupo de fusiones se ha clasificado el material como grueso y fino cribando la materia prima con una malla de una abertura determinada; es decir en esta sección se analiza solamente el resultado de la operación del horno usando material fino, grueso y una mezcla de ellos sin analizar los valores predictores del modelo, los que se tomarán de nueva cuenta en la sección 6.4.

6.3.1. El Desplazamiento de los Electrodo

En las Figs 121 a 124 se presentan las gráficas de desplazamiento de los electrodos de las pruebas 3-1, 3-2, 3-7 y 3-9 del grupo 3, las que fueron realizadas utilizando materia prima con tamaño de grano grueso; aún cuando la velocidad de las tres fases en cada experimento no es exactamente la misma se observa un desplazamiento entre ellos bastante uniforme.

Esta uniformidad no puede ser apreciada en las fusiones realizadas con material fino y mezcla de éste con material grueso como se observa en las Figs 125 a 128, donde se grafican los desplazamientos de electrodos de las pruebas 3-10, 3-11, 3-17 y 3-18 del grupo 3. En general se puede observar que los comportamientos en todas las fusiones fueron distintos, es decir no hubo un control real en ellas, las mismas fusiones controlaron las acciones del operario del horno. *Esto es lo que sucede comunmente en las operaciones normales y se debe principalmente al desconocimiento de: 1. Las características de la materia prima que se alimenta en cada fusión. 2. El modo de operación para cada granulometría de la materia prima.* Se observa además que los electrodos tienen también comportamientos independientes, existen puntos en los que repentinamente los electrodos suben y bajan bruscamente de una lectura a otra, esto obliga a tomar acciones que si no son las acertadas causará un decremento en los índices de desempeño del horno

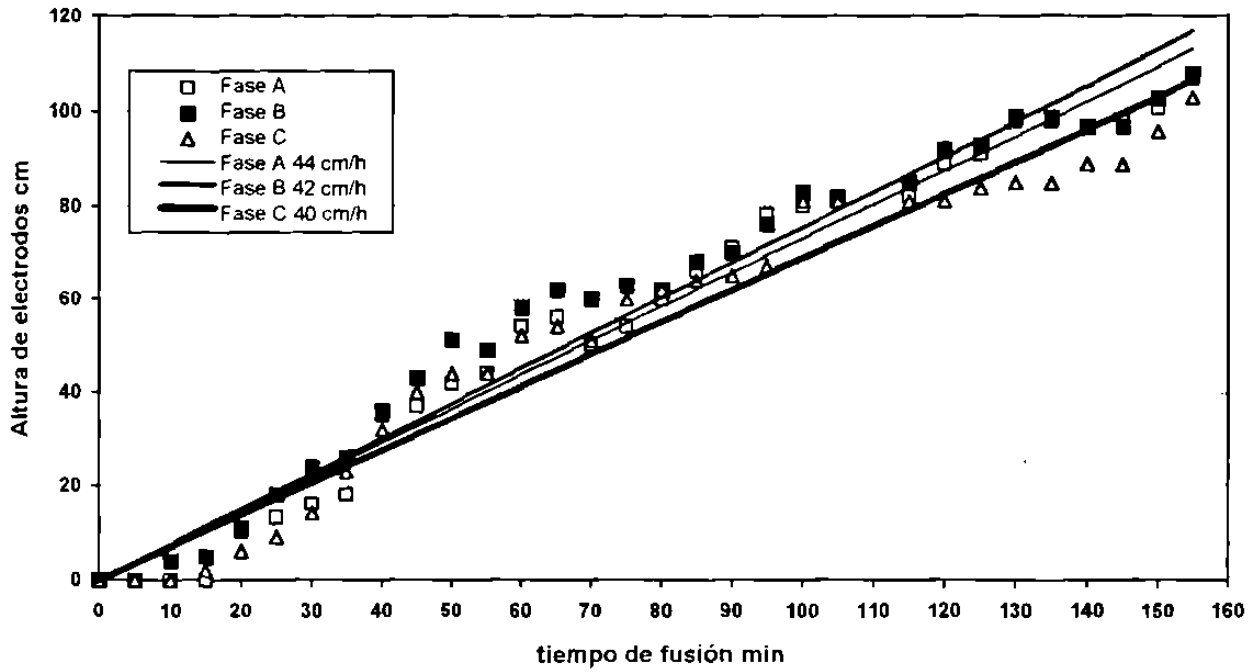


Fig. 121. Desplazamiento de los electrodos durante la prueba 3-1 del Grupo 3.

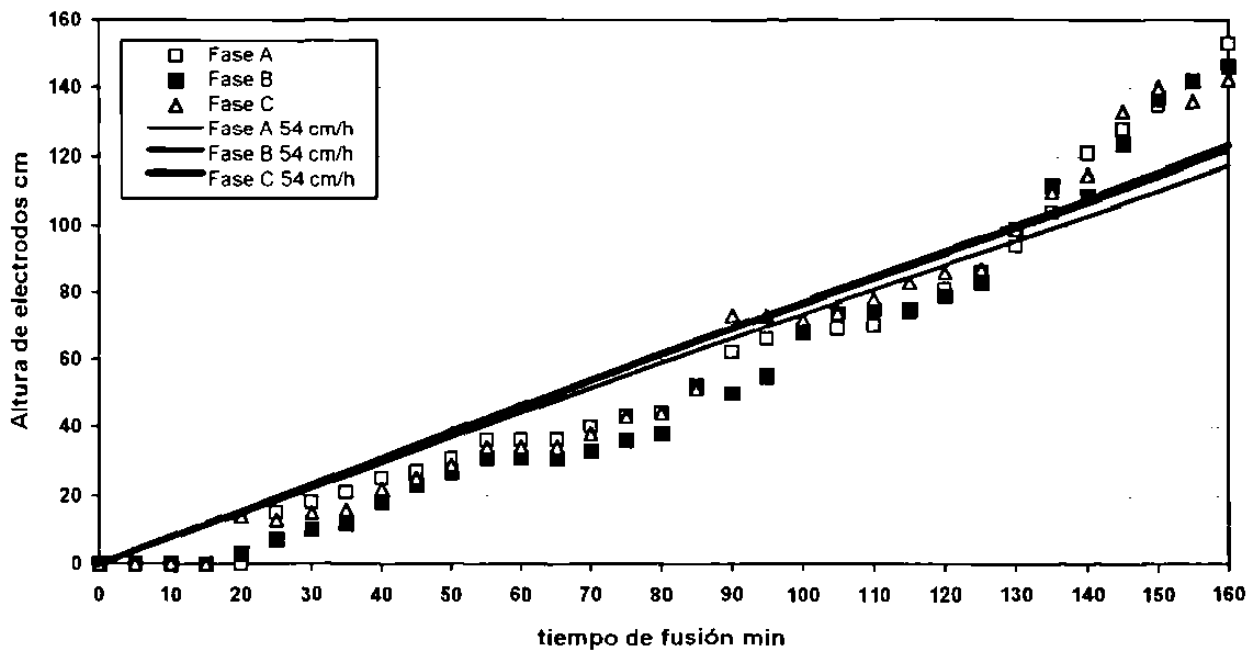


Fig. 122. Desplazamiento de los electrodos durante la prueba 3-2 del Grupo 3.

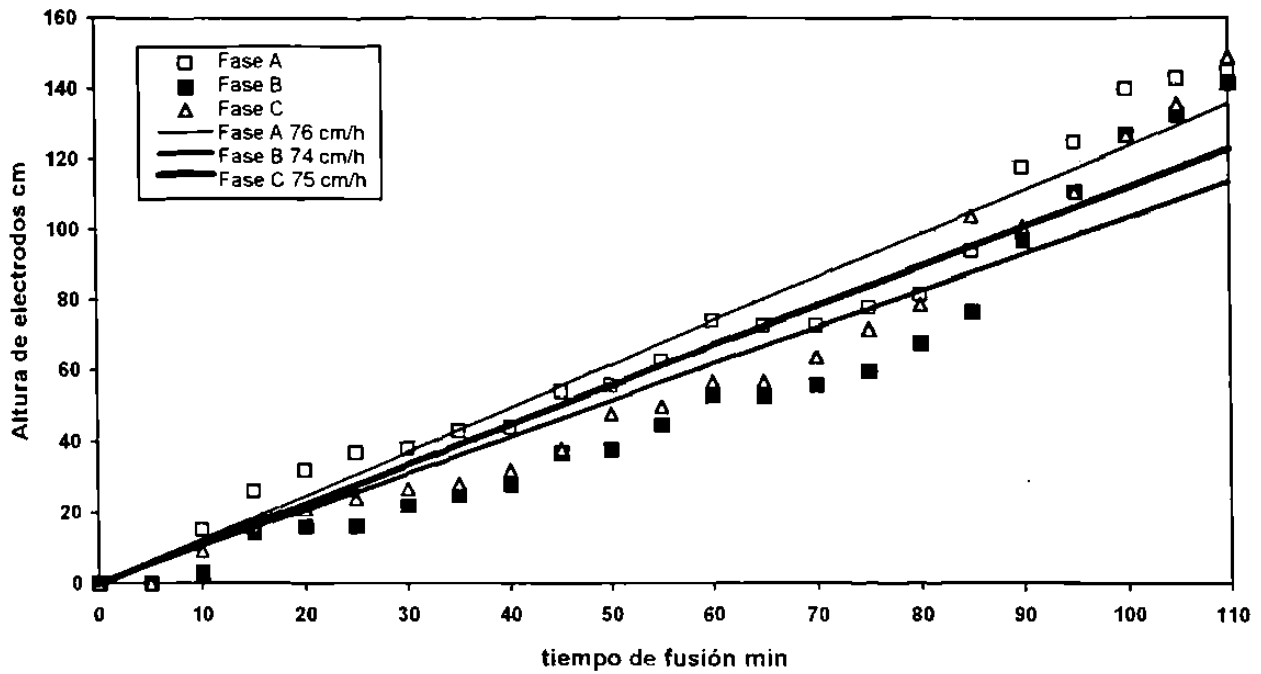


Fig. 123. Desplazamiento de los electrodos durante la prueba 3-7 del Grupo 3.

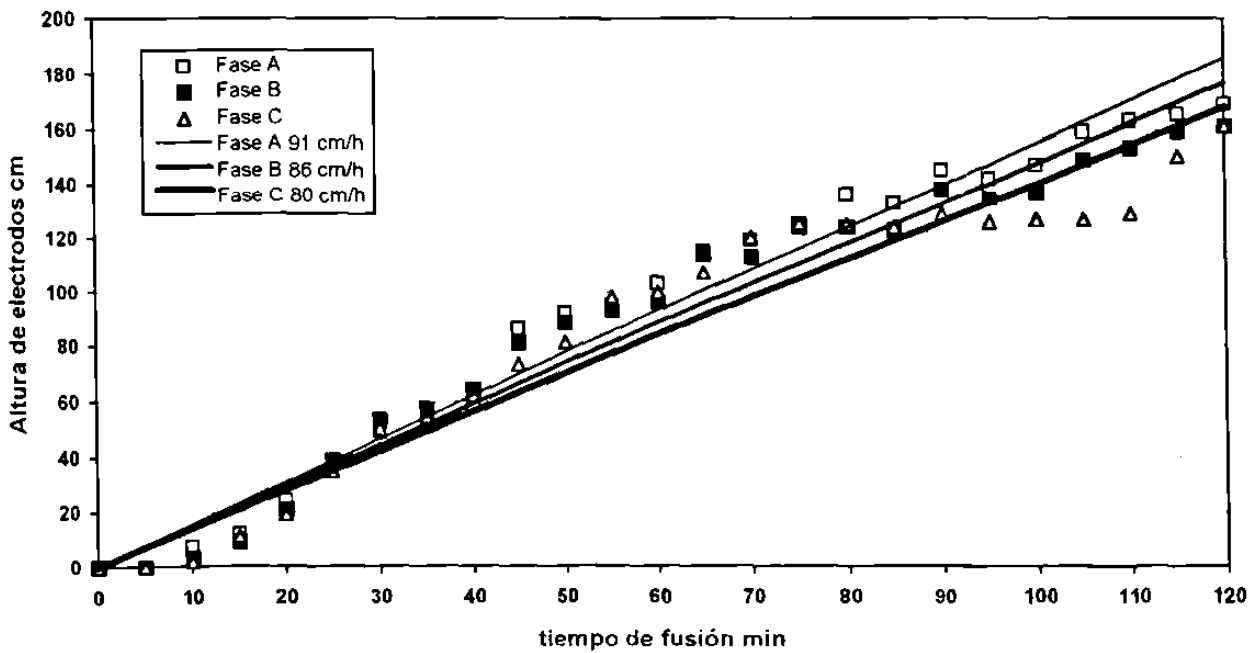


Fig. 124. Desplazamiento de los electrodos durante la prueba 3-9 del Grupo 3.

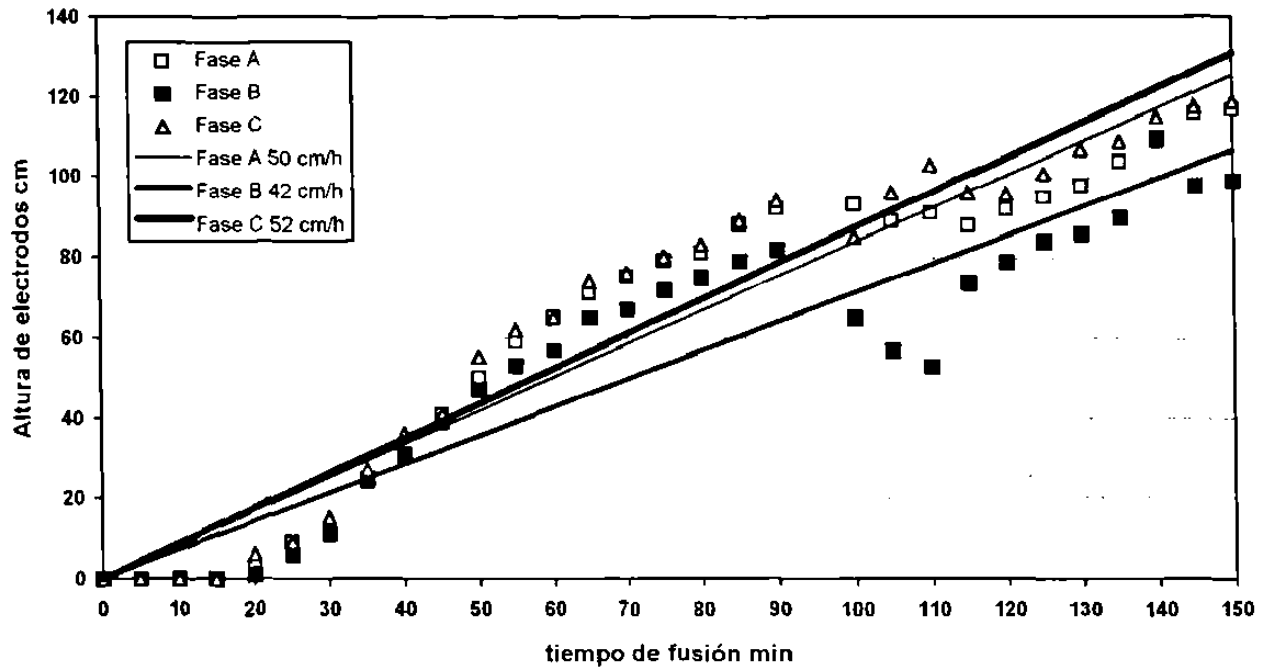


Fig. 125. Desplazamiento de los electrodos durante la prueba 3-10 del Grupo 3.

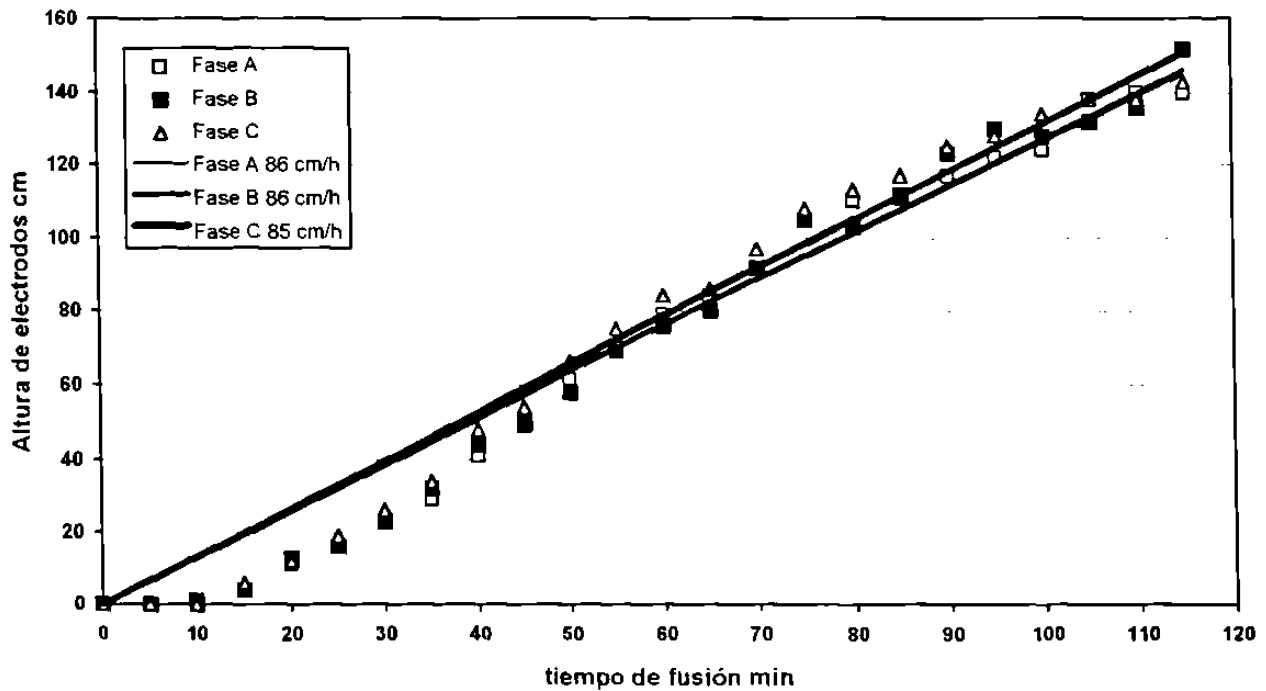


Fig. 126. Desplazamiento de los electrodos durante la prueba 3-11 del Grupo 3.

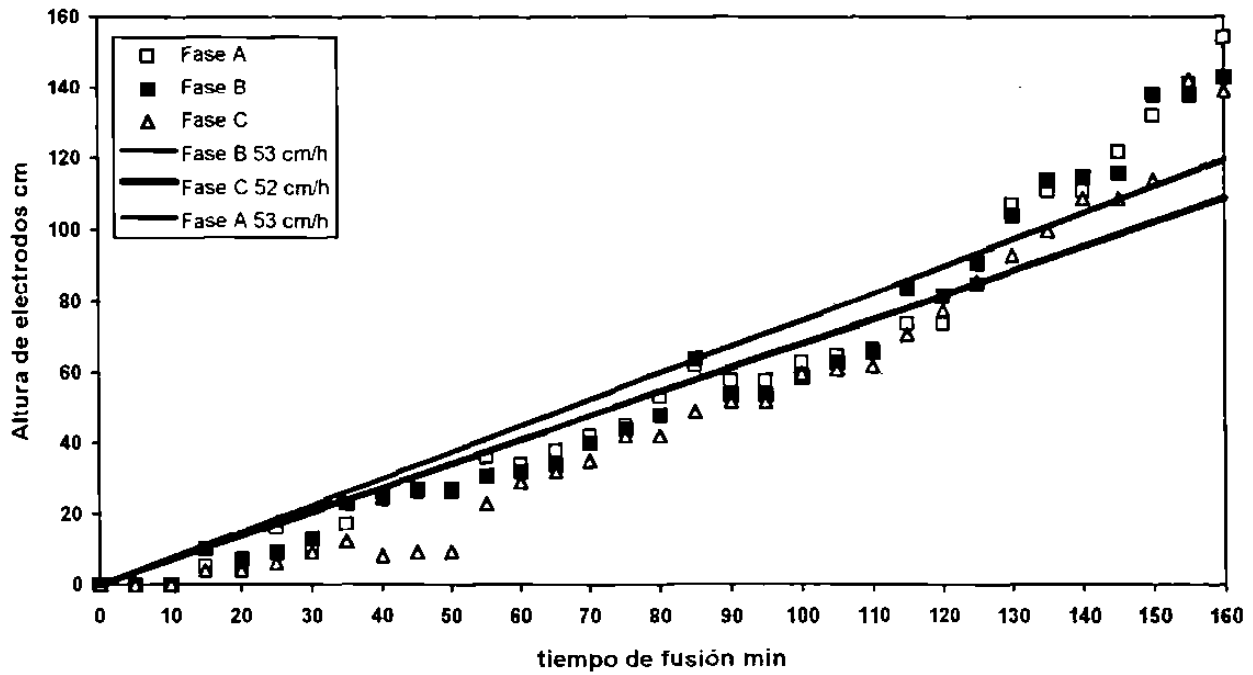


Fig. 127. Desplazamiento de los electrodos durante la prueba 3-17 del Grupo 3.

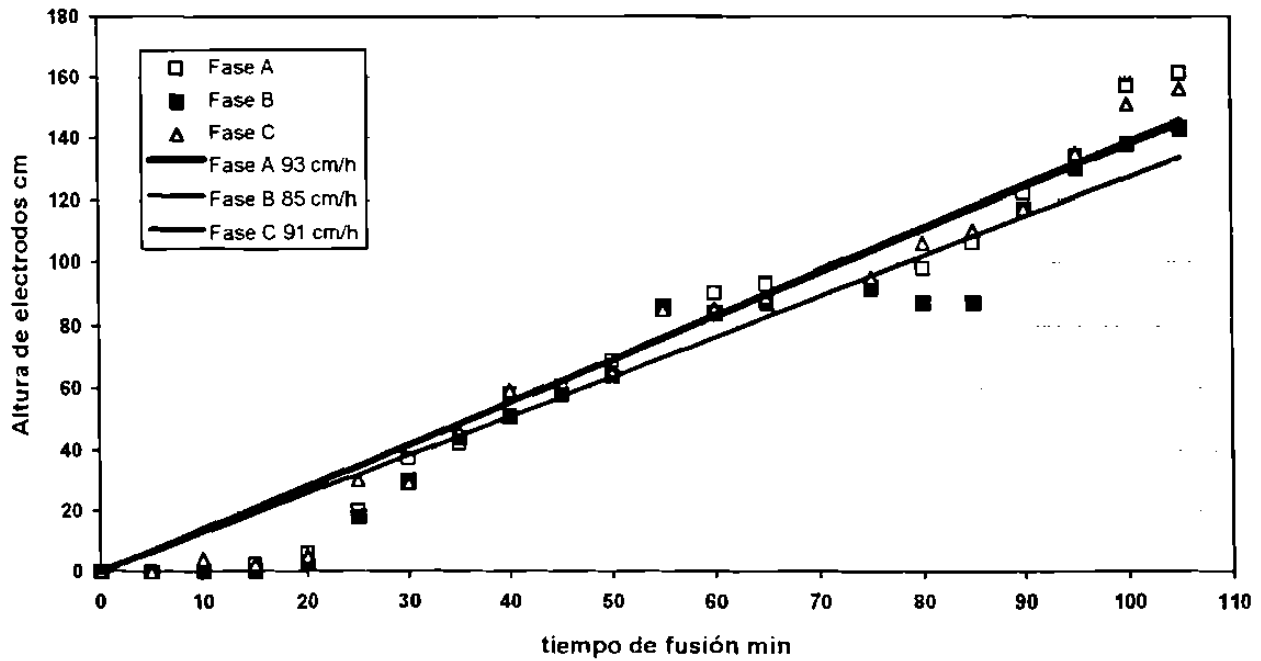


Fig. 128. Desplazamiento de los electrodos durante la prueba 3-18 del Grupo 3.

Lo anterior puede ser explicado por la siguiente razón: Es bien conocido que la resistencia eléctrica de un conductor es dada por el producto de su resistividad eléctrica y el cociente de su longitud y área transversal, es decir:

$$R_e = \frac{L}{A} \rho_e \quad (102)$$

dónde:

R_e resistencia eléctrica del conductor (Ω)

ρ_e resistividad eléctrica ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)

L longitud del conductor (m)

A área transversal del conductor (mm^2)

Considerando que la corriente fluye de un electrodo a otro se tiene entonces que L representa la distancia entre centros de electrodos y esta es fija; por otro lado la resistividad eléctrica es una propiedad intrínseca del material y varía sólo con la temperatura (a mayor temperatura menor resistividad e inversamente), Kingeri¹⁷⁾. Si se toma como ejemplo de comparación dos fusiones operadas bajo las mismas condiciones eléctricas pero con granulometría de la materia prima distintas podemos entonces considerar para ambas la resistividad igual entre ellas, ya que el grado de calentamiento dependerá de la potencia (en este caso igual) manejada.

Es simple darse cuenta que la materia prima con granulometría fina tendrá más superficie de contacto entre los granos, es decir, el área que el flujo electrónico atraviesa es grande y de acuerdo a la expresión (102), la resistencia eléctrica del material será menor; por lo anterior si se desea mantener una corriente constante a un Tap determinado para estabilizar la potencia suministrada, el operario se ve obligado a incrementar la resistencia del arco levantando los electrodos y ocasionando con ello una alta velocidad de electrodos. Por otro lado la materia prima con granulometría gruesa tendrá menos superficie de contacto entre los granos, es decir, el área que el flujo electrónico atraviesa es pequeña e inversamente a lo anterior la resistencia eléctrica será mayor; por lo anterior si se desea mantener una corriente constante a un Tap determinado para estabilizar la potencia suministrada, el operario se ve obligado a disminuir la resistencia del arco bajando los electrodos o en su caso dejándolos fijos, de esta forma mantener una velocidad de electrodos lenta.

La ventaja de la velocidad de electrodos lenta es que permite que el calor suministrado desde el sistema eléctrico se expande en un radio suficientemente grande que alcance a fundir el material desde el centro hasta una distancia cercana a la coraza del horno., por lo que debe existir un valor de velocidad optimo para cada potencia suministrada y cada tamaño de grano de materia prima. Mientras que con altas velocidades de electrodos el radio de reacción o fusión que se puede alcanzar es pequeño y no permite siquiera que el material del centro se funda.

Los movimientos bruscos de los electrodos registrados tanto en los experimentos como los que ocurren en fusiones de producción normal ocasionan también altas velocidades de electrodos repercutiendo en los efectos ya mencionados. Lo anterior se debe a que la materia prima se compone de una gran variedad de tamaños de granos y son alimentados de manera tal que la operación del horno no es estable

6.3.2. La Productividad y el Consumo Específico de Energía

En la Fig 129 se presentan resumidamente los resultados de productividad del horno durante las pruebas del grupo 3. Aquí se han graficado los porcentajes de variación con respecto al manejado en

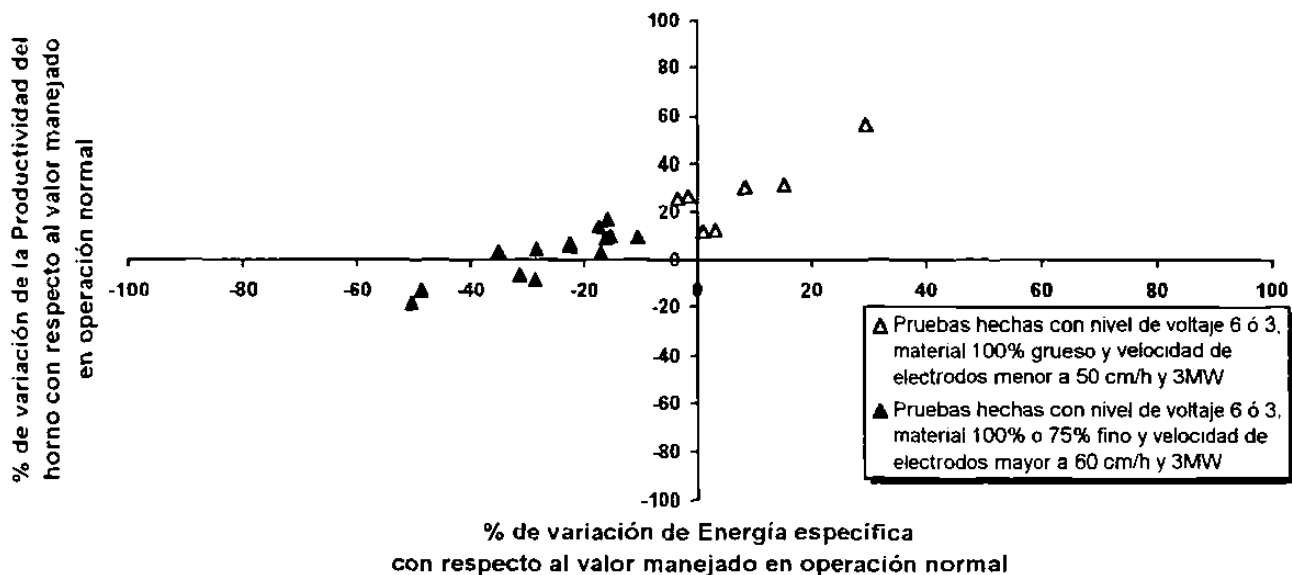


Fig. 129. Resultados de productividad y consumo de energía específica en % de variación con respecto al valor promedio manejado con modo de operación anterior del horno de la planta. Pruebas del Grupo 3.

planta durante la operación normal del horno; definidos como 100 veces el cociente de la diferencia del valor obtenido y el normal de planta entre el valor normal de planta

$$\% \text{ variacion} = 100 \cdot \frac{(\text{valor obtenido} - \text{valor normal})}{\text{valor normal}}$$

En la Fig 129. se puede observar que aunque el 80% de las fusiones están arriba del valor normal de productividad del horno, sólo el 23% supera el valor de energía específica manejado normalmente en el horno de la planta. En otras palabras, una operación de planta que tenga en promedio las características de operación de este tipo de fusiones tendría altos costos por consumo de energía eléctrica y una productividad, relativa a lo normal, invariante.

6.3.3. La Calidad del Producto

Como ya se ha mencionado es muy difícil obtener una relación del resultado del tamaño de cristal promedio con un modo estricto de operación en cuanto a velocidad de electrodos, corriente de arco y nivel de voltaje se refiere; por lo que aquí tratamos de relacionar este resultado con el tamaño del grano de materia prima usada para fundir.

En las Figs. 130. y 131. se presentan dos fotografías de lingotes obtenidos partiendo de materia prima fina y gruesa respectivamente. En la primera se puede observar en el centro un área bien definida de producto de MgO electrofundido que presenta tamaños de cristales del orden de $10^0 \text{ cm} \times 10^0 \text{ mm}$ de largo y ancho respectivamente, los que se pueden ver a simple vista. En esta misma fotografía se delimita claramente la frontera de producto (circular) con la costra adherida al mismo, en éste el producto de grandes cristales formó un cuerpo cilíndrico casi perfecto, producto de una velocidad de desplazamiento de electrodos y una potencia de suministro constantes. Por otro lado como puede apreciarse el espesor de la costra de material sin fundir adherido al producto de grandes cristales es grande, formado básicamente por material fino adherido entre sí, como una consecuencia probable de adhesión de fases líquidas por el efecto del calor absorbido durante la fusión.



Fig. 130. Fotografía del interior del lingote de la prueba 3-17 mostrando cristales del orden de 10^0 cm.

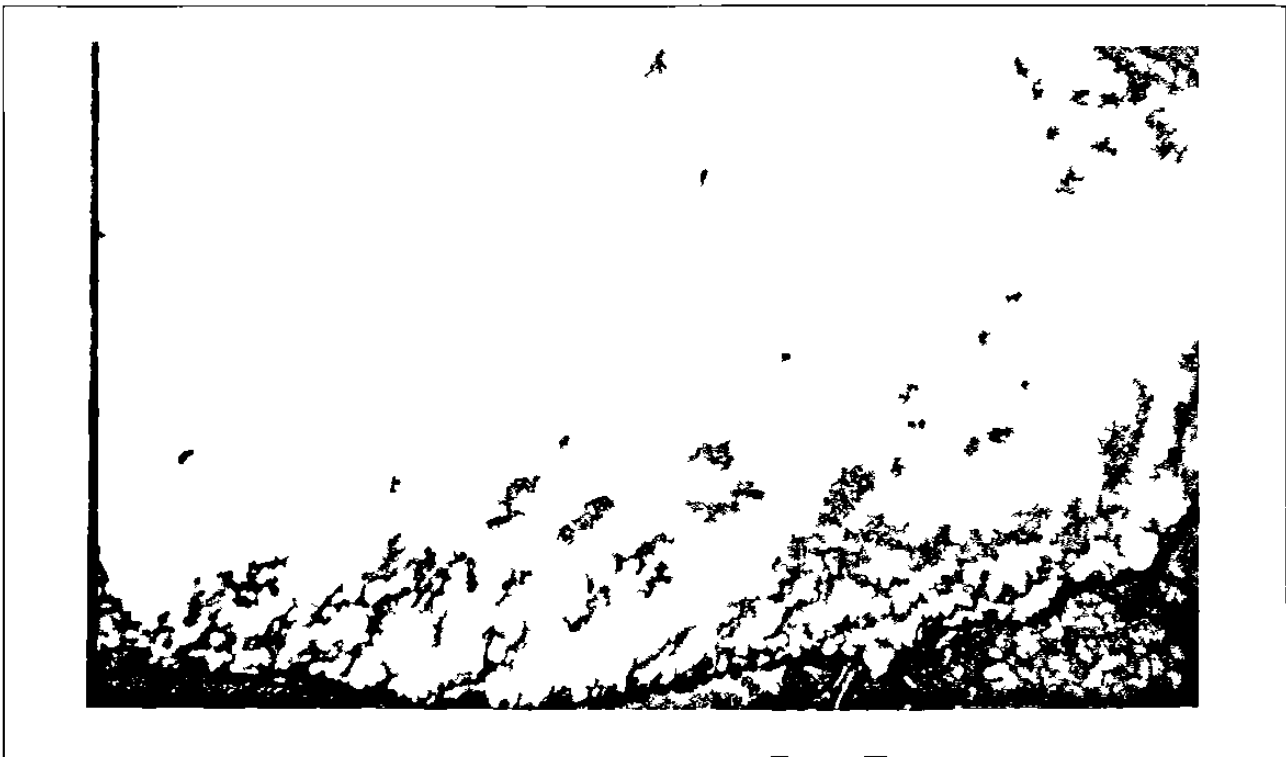


Fig. 131. Fotografía del interior del lingote de la prueba 3-3 mostrando una masa de MgO fundido con pequeños cristales.

En la segunda fotografía se observa el interior de un lingote de MgO electrofundido partiendo de materia prima de granos gruesos. Aquí puede observarse una masa de pequeños cristales equiaxiales de MgO y con un espesor de costra del orden de 1 a 2 cm, los cristales son tan pequeños que pueden observarse sólo por microscopía; el tamaño promedio de cristales de este tipo de muestras es de entre 580 y 730 μm

Hasta aquí existe la evidencia de que con materiales finos se obtienen cristales muy grandes (1000 μm) debido a que la transferencia de calor en el interior es muy rápida y por ello podríamos asumir que existe una homogeneidad de la temperatura en el material a lo largo de la carrera de los electrodos en diferentes etapas de levantamiento, es decir, no se pretende asegurar que exista un perfil de temperatura homogénea a lo largo de la carrera pero si al rededor de los electrodos concéntricamente al arco eléctrico durante toda la fusión, producto de una velocidad de levantamiento constante. Por lo contrario con materiales gruesos aunque se puedan lograr bajas velocidades de levantamiento de electrodos, es altamente probable que la temperatura en el interior del material se heterogénea.

6.4. Pruebas Finales

6.4.1. Introducción

De acuerdo a los resultados de las pruebas preliminares, las del Grupo 2, las del Grupo 3 y al modelo, existe una relación estrecha entre las variables:

1. Velocidad de electrodos
2. Corriente de arco
3. Nivel de voltaje del transformador
4. Granulometría de la materia prima

además de su efecto tanto individual como de interacción con la productividad del horno, el consumo específico de energía y la calidad del producto.

Tomando en cuenta la afirmación anterior y los resultados numéricos presentados hasta aquí, se ha diseñado una serie de cuatro pruebas finales con dos modos de operación distinto con lo que se pretende reproducir en una ocasión cada uno de estos modos. Las condiciones han sido ya presentadas en la Tabla 23 de la sección 5.2.

6.4.2. La Velocidad de los Electrodo

En las Figs 132. a 135. se presentan los desplazamientos que cada electrodo durante cada prueba tuvo en el desarrollo de las mismas. Aquí se puede observar a diferencia de las pruebas anteriores que los desplazamientos fueron mas uniformes y las velocidades conseguidas fueron bastante bajas (entre 20 y 40 *cm h*), lo que permite como consecuencia una alta productividad de las fusiones.

Lograr las condiciones de operación de estas pruebas se le atribuye en primer lugar a que el tamaño de grano de la materia prima fue clasificado a un tamaño específico llamado aquí "grosso", con lo que se asume una uniformidad de carga en el interior del horno y una distribución de temperatura sino homogénea, si suficientemente uniforme; de manera que el calor se distribuye alrededor de los electrodos. Además como ya se explicó en la sección 6.3.1., con la materia prima de granos gruesos el incremento de la corriente de arco es mas lento y por ello se pueden lograr bajas velocidades de desplazamiento de electrodos, logrando a su vez un radio de reacción o fusión alrededor de los electrodos grande.

Durante la operación de fusión de MgO por HAE suceden ocasionalmente problemas de sobrecalentamiento de la coraza a lo que le llaman puntos calientes. Estos llegan a suceder por gases formados en la zona de fusión y que al buscar salida la encuentran al azar por entre los espacios vacíos de granos de materia prima llegando hasta la coraza y sobrecalentándola. Creemos además que al tener velocidades de levantamiento de electrodos muy bajas, el radio de reacción o de fusión provocado por el calor otorgado por el arco y el paso de la corriente a través de la carga es muy grande, lo que provoca calentamientos en la coraza, por ello es considerable que existen valores de velocidad óptima para cada granulometría, nivel de voltaje y corriente de arco manejados

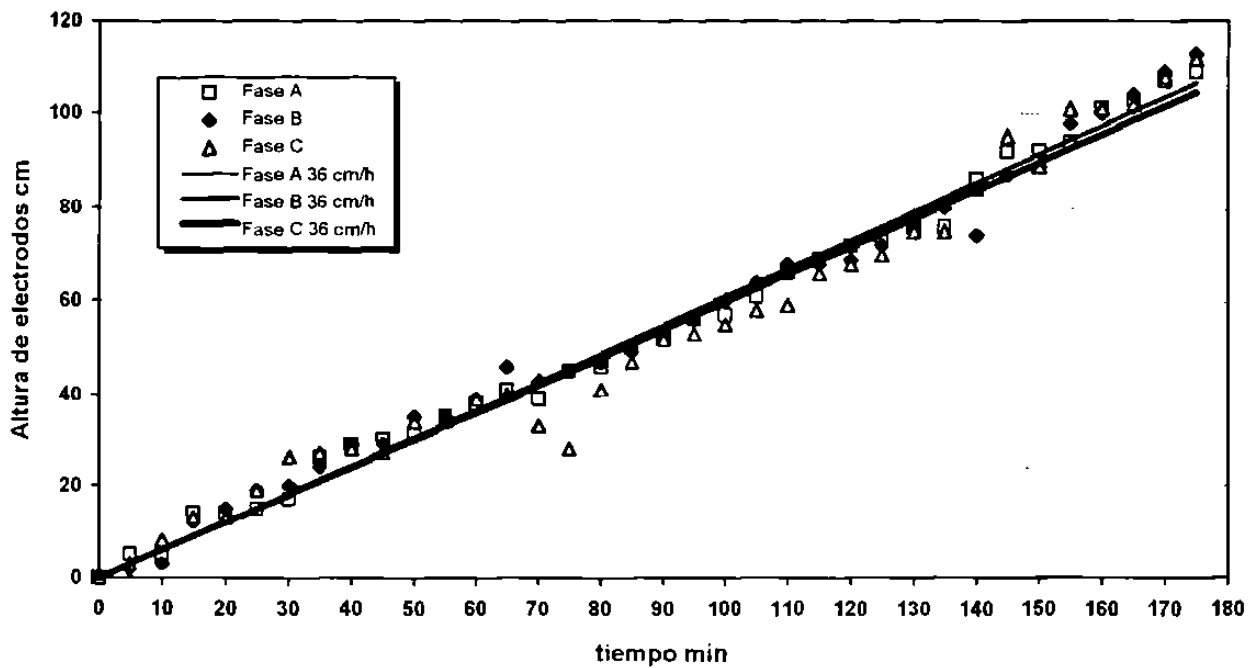


Fig. 132. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante la prueba F-1.

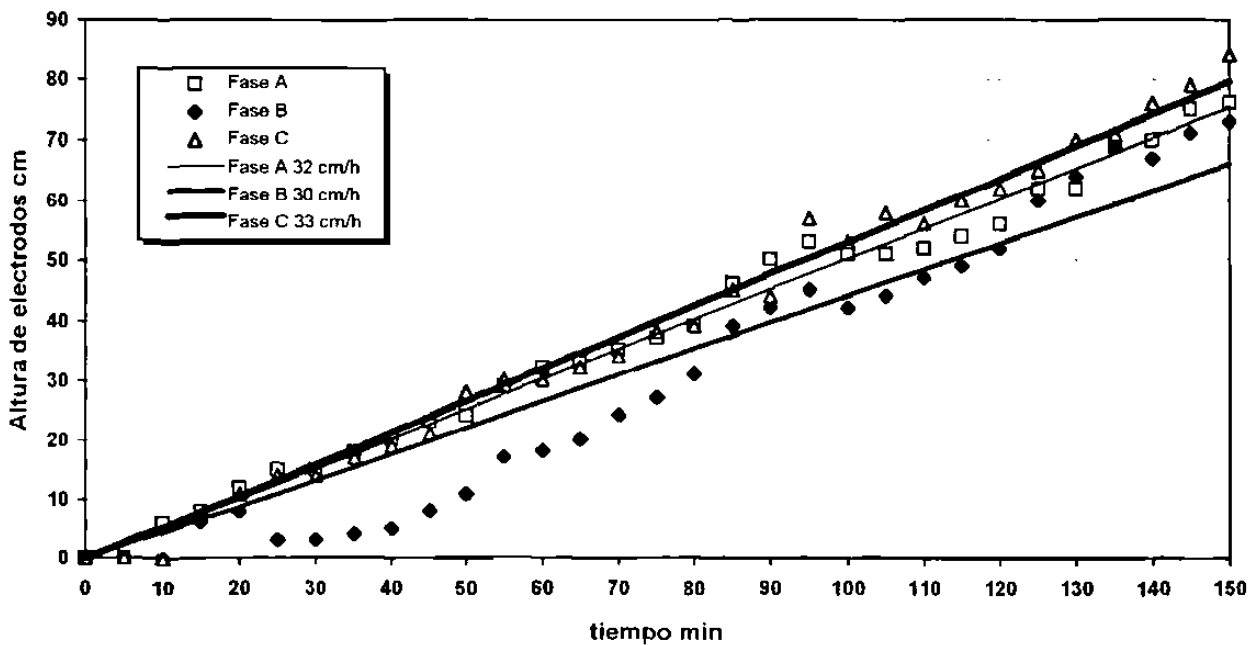


Fig. 133. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante la prueba F-2.

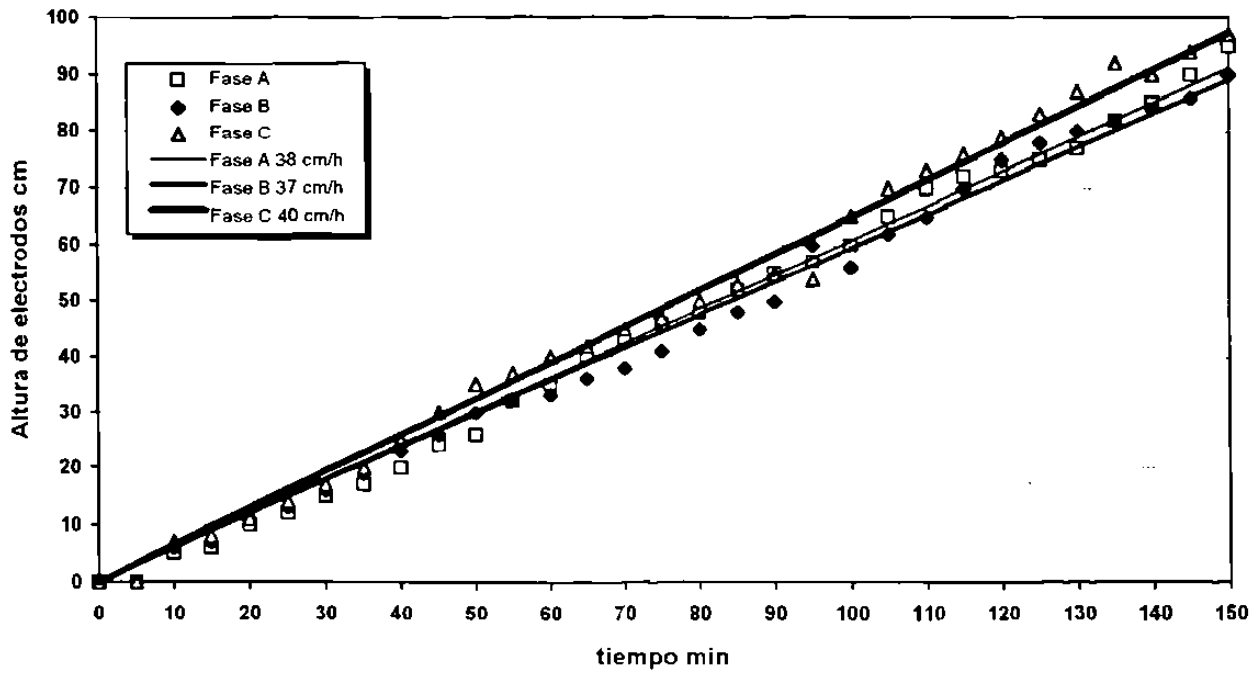


Fig. 134. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante la prueba F-3.

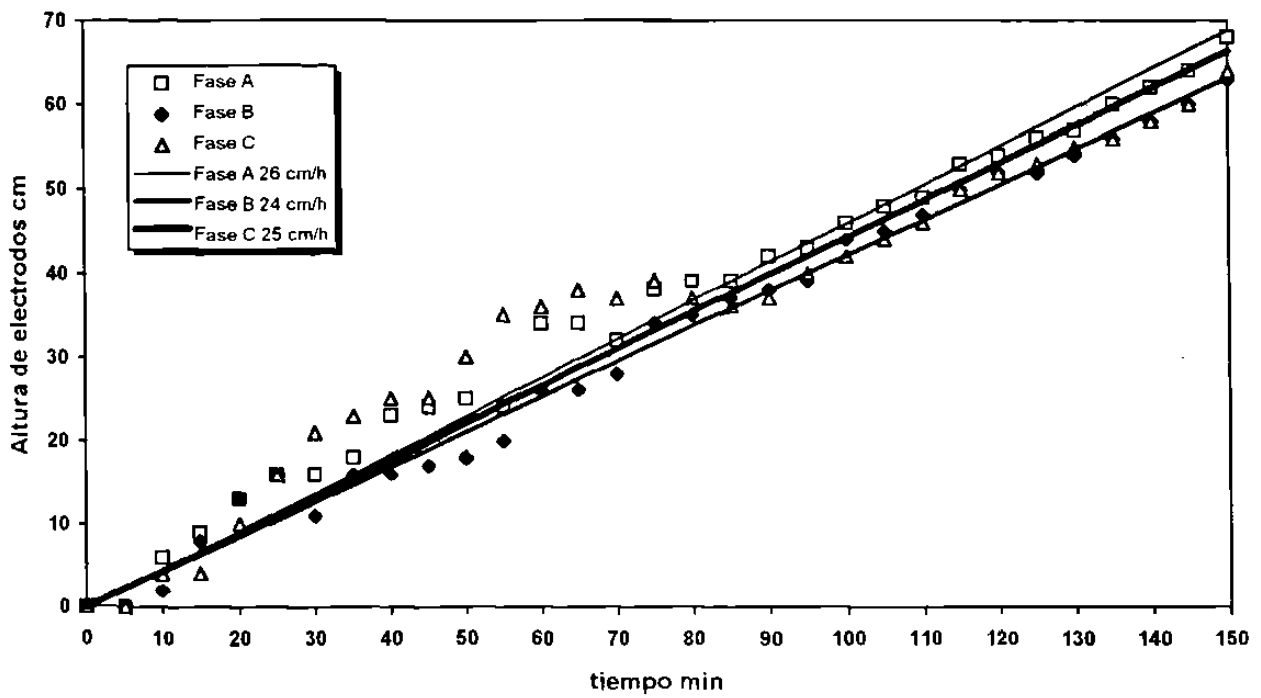


Fig. 135. Comportamiento de los electrodos de las tres fases durante la prueba F-4.

6.4.3. La Productividad

6.4.3.1 Efecto de la Velocidad de los Electrodo

En la Tabla 42 se presentan los datos de las pruebas finales y los resultados de productividad por fase eléctrica, mientras que en las Figs. 136. a 139 se presentan gráficamente los resultados de productividad contra velocidad de electrodos.

Tabla 42. Resultados de productividad por fase eléctrica de pruebas F-1, F-2 , F-3 y F-4.

Prueba	Fase eléctrica	Nivel de voltaje	Corriente relativa	Velocidad de electrodos cm/h	Tiempo de fusión hrs.	P_e KW	E_e KW	$Q_u + Q_g$ KW	f KWh/kg	m_g teórico kg/h	m_g real kg/h
F-1	A	6	0.5648231	36	2.9167	889	97	607	1.042	364	337
	B		0.5605114	36		888	97	607		363	335
	C		0.5734463	36		892	98	607		368	340
F-2	A	6	0.5993161	32	2.5	897	100	566	1.121	384	363
	B		0.5971603	30		897	100	548		400	365
	C		0.6014719	33		897	100	576		377	361
F-3	A	6	0.5066161	36	2.5	859	91	527	1.121	377	358
	B		0.5044603	37		857	91	535		369	353
	C		0.5087719	40		860	91	557		352	350
F-4	A	6	0.4176301	26	2.5	797	82	468	1.121	367	333
	B		0.4354742	24		795	82	450		381	336
	C		0.4311626	25		790	81	459		368	331

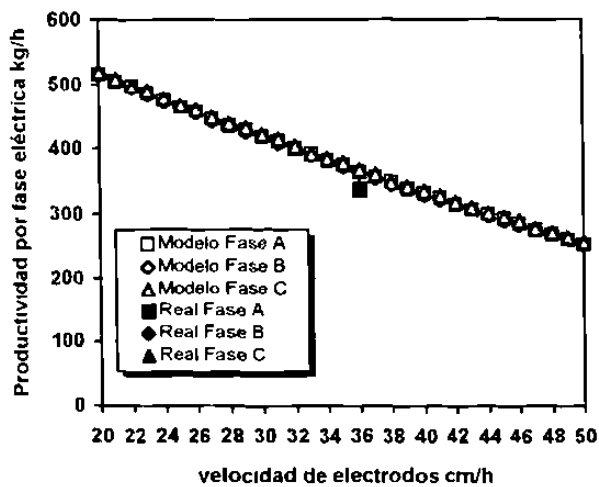


Fig. 136. Resultados del modelo y de la Prueba F-1, de productividad por fase eléctrica.

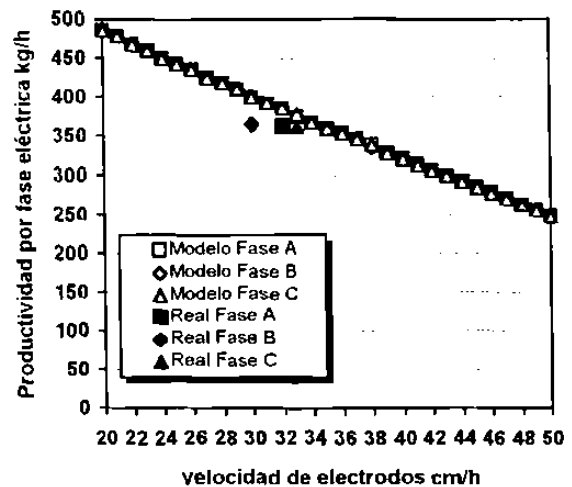


Fig. 137. Resultados del modelo y de la Prueba F-2, de productividad por fase eléctrica.

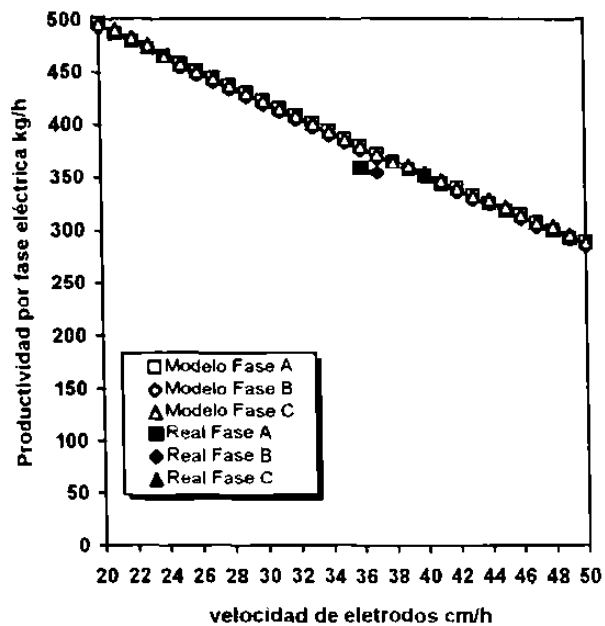


Fig. 138. Resultados del modelo y de la Prueba F-3, de productividad por fase eléctrica.

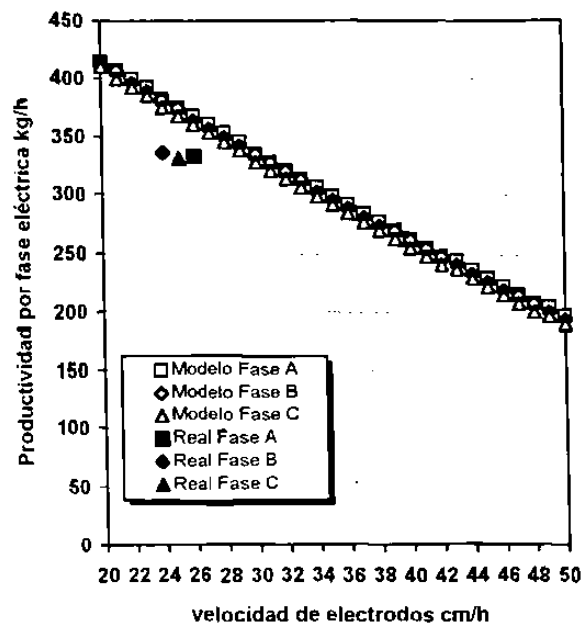


Fig. 139. Resultados del modelo y de la Prueba F-4, de productividad por fase eléctrica.

6.4.3.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico

En las Figs 140 a 143 se presentan gráficamente los resultados de productividad por fase eléctrica contra la corriente de arco relativa. Como puede observarse el área de trabajo se ve reducida en las cuatro pruebas, es decir el comportamiento de la corriente del arco y con ello la potencia suministrada fue muy estable; de la misma manera puede observarse que las curvas de productividad obtenidas para cada fase en cada prueba, son muy cercanas entre sí, es decir al igual que con la corriente también la velocidad de las tres fases fue bastante estable. Las curvas de las Figs. 140. y 143 fueron obtenidas para la misma densidad de carga de material dentro de la olla del horno, pero con velocidades de electrodos de 36 cm/h para la primera y de 25 cm/h para la segunda. Aquí volvemos a reafirmar el efecto que la velocidad de los electrodos tiene sobre la productividad del horno, en la Fig. 140 la productividad máxima alcanzada por las curvas es menor a 400 kg/h mientras que en la Fig. 143. la máxima rebasa los 400 kg/h para una misma corriente de arco, un mismo nivel de voltaje y por ello un mismo factor de potencia.

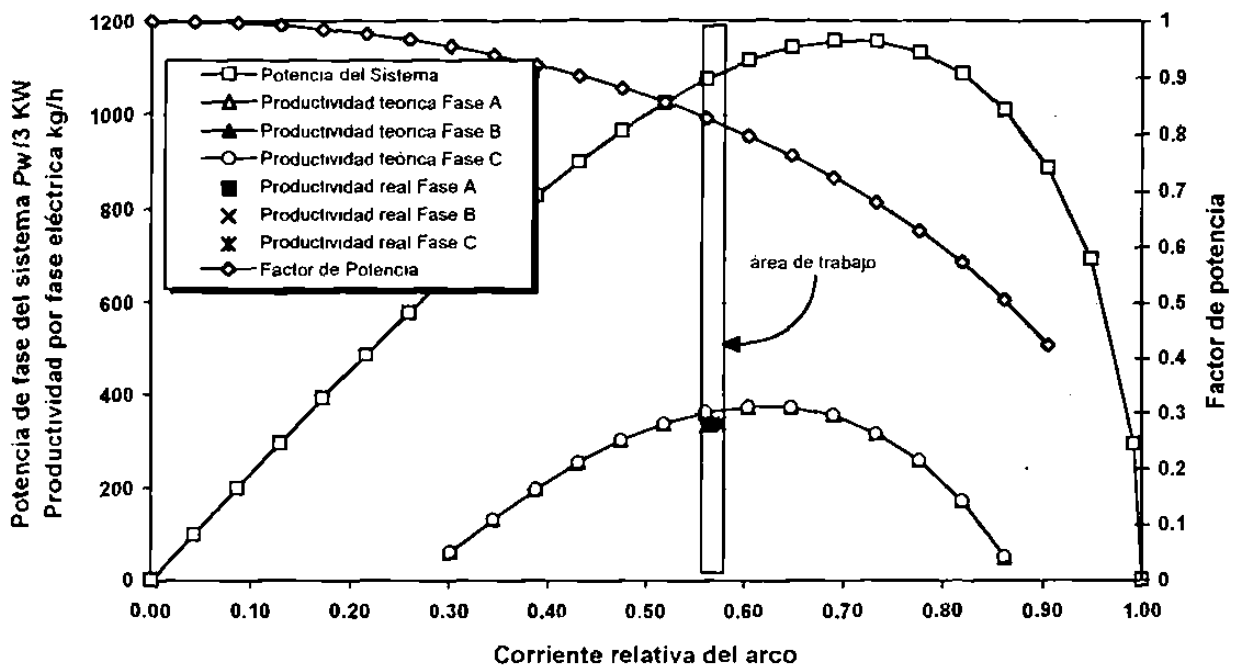


Fig. 140. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba F-1.

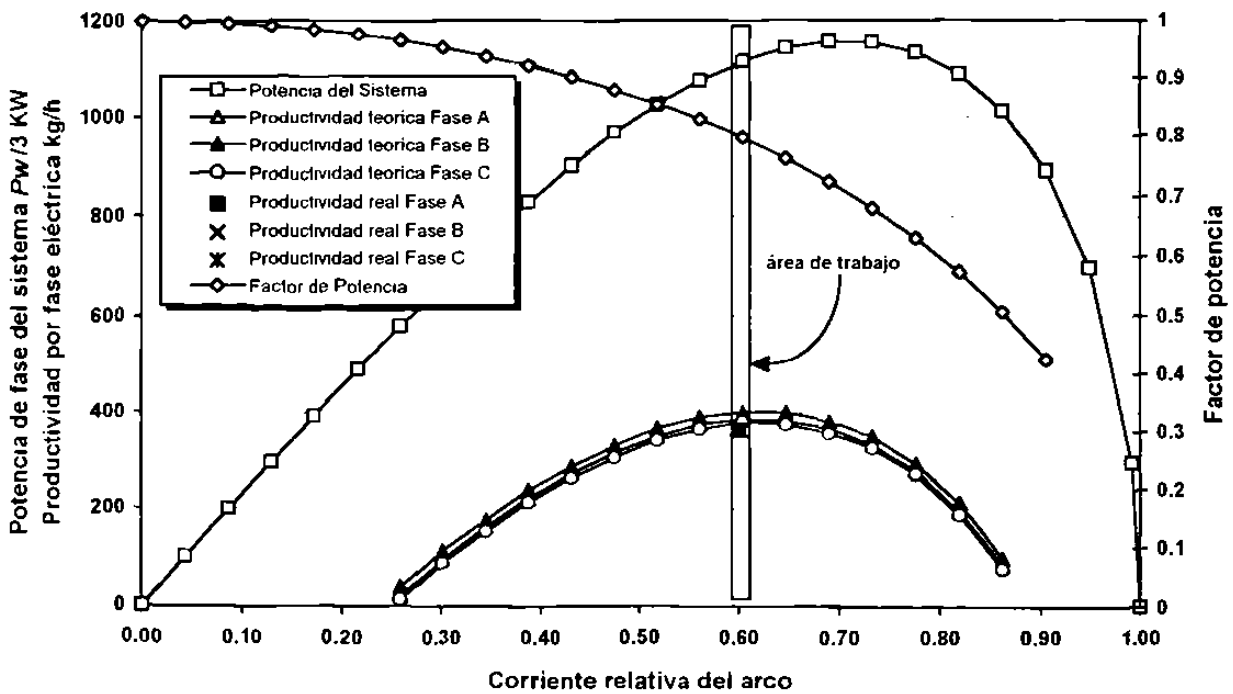


Fig. 141. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba F-2.

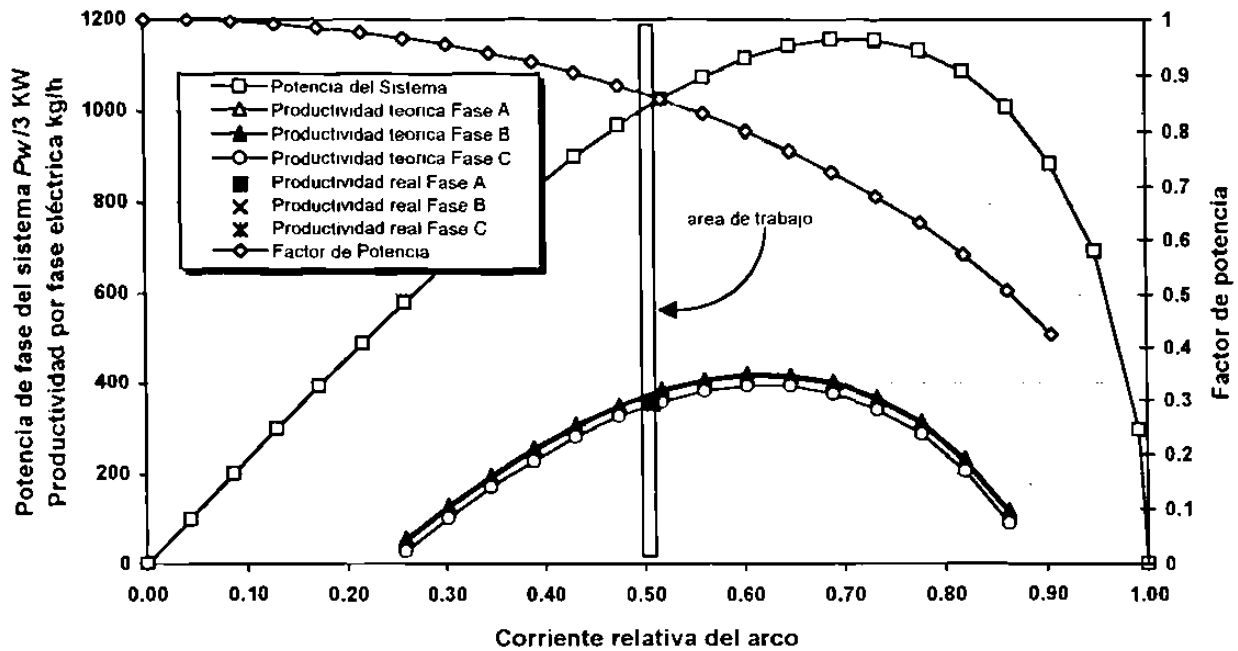


Fig. 142. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba F-3.

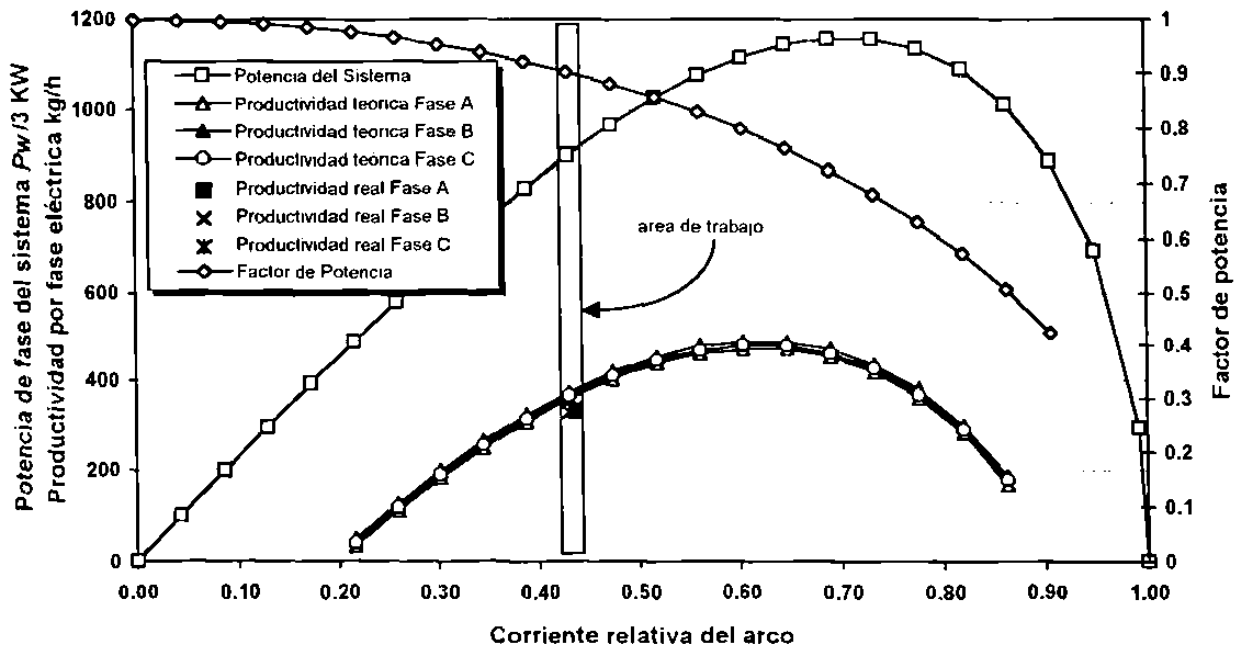


Fig. 143. Resultados de la productividad por fase eléctrica en función del punto de trabajo eléctrico en la prueba F-4.

6.4.4. El Consumo Específico de Energía

En la Tabla 43. se presentan los resultados de energía específica de las pruebas y los calculados.

Tabla 43. Resultados del consumo de energía por fase eléctrica de pruebas F-1, F-2, F-3 y F-4.

Prueba	Fase eléctrica	Nivel de voltaje	Corriente relativa	Velocidad de electrodos cm/h	Tiempo de fusión hrs.	P_w KW	m_g teórico kg/h	m_g real kg/h	E_{cc} calculado KWh/kg	E_{cr} real KWh/kg
F-1	A	6	0.5648231	36	2.9167	1080	364	337	2.967	3.204
	B		0.5605114	36		1075	363	335	2.961	3.208
	C		0.5734463	36		1088	368	340	2.956	3.200
F-2	A	6	0.5993161	32	2.5	1111	384	363	2.893	3.060
	B		0.5971603	30		1110	400	365	2.775	3.041
	C		0.6014719	33		1113	377	361	2.952	3.083
F-3	A	6	0.5066161	36	2.5	1012	377	358	2.684	2.826
	B		0.5044603	37		1009	369	353	2.734	2.858
	C		0.5087719	40		1015	352	350	2.883	2.900
F-4	A	6	0.4376301	26	2.5	911	367	333	2.482	2.735
	B		0.4354742	24		908	381	336	2.383	2.702
	C		0.4311626	25		901	368	331	2.448	2.722

6.4.4.1 Efecto de la Velocidad de los Electrodo

En la Fig. 144. se presenta gráficamente con puntos dispersos los resultados del consumo específico de energía contra la velocidad de levantamiento de los electrodos donde se aprecia el efecto claro.

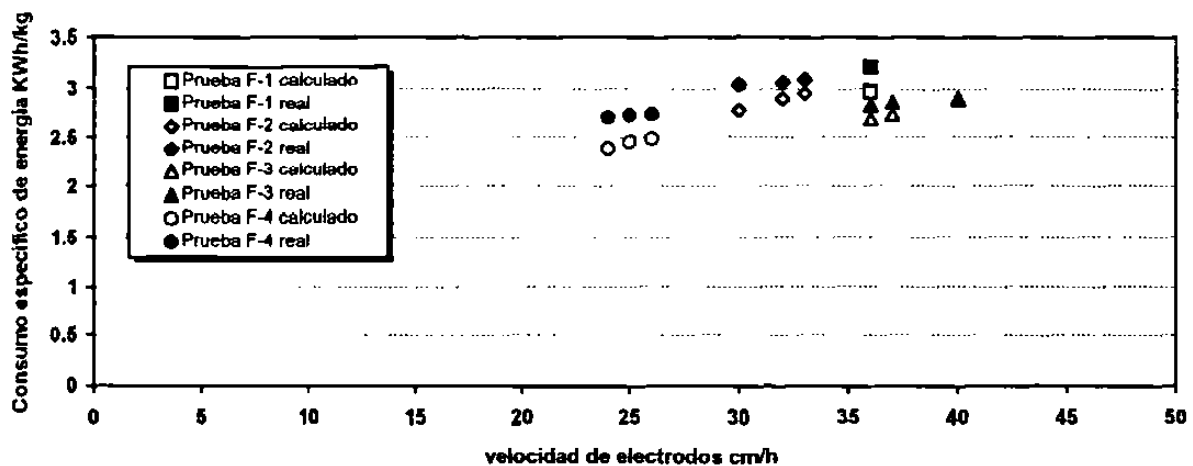


Fig. 144. Resultados reales y calculados del consumo específico de energía en función de la velocidad de levantamiento de los electrodos para las pruebas finales.

6.4.4.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico

Los resultados son presentados en las Figs. 145. a 148. dónde se han acoplado las curvas de productividad con la finalidad de hacer notar los puntos óptimos de operación calculados para las condiciones operativas de las pruebas finales.

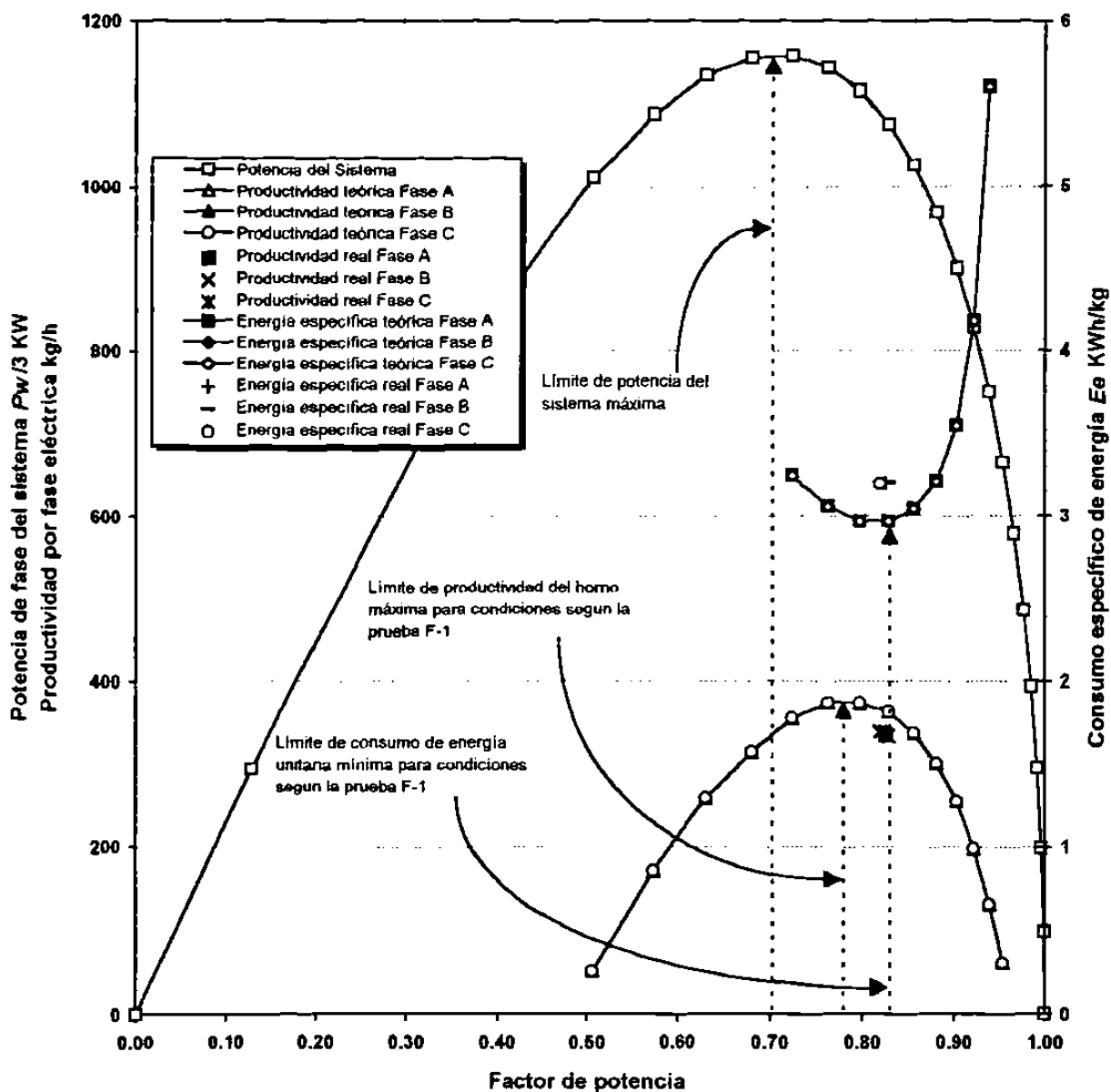


Fig. 145. Acoplamiento de las curvas de productividad y consumo específico de energía con resultados según las condiciones operativas de la prueba F-1.

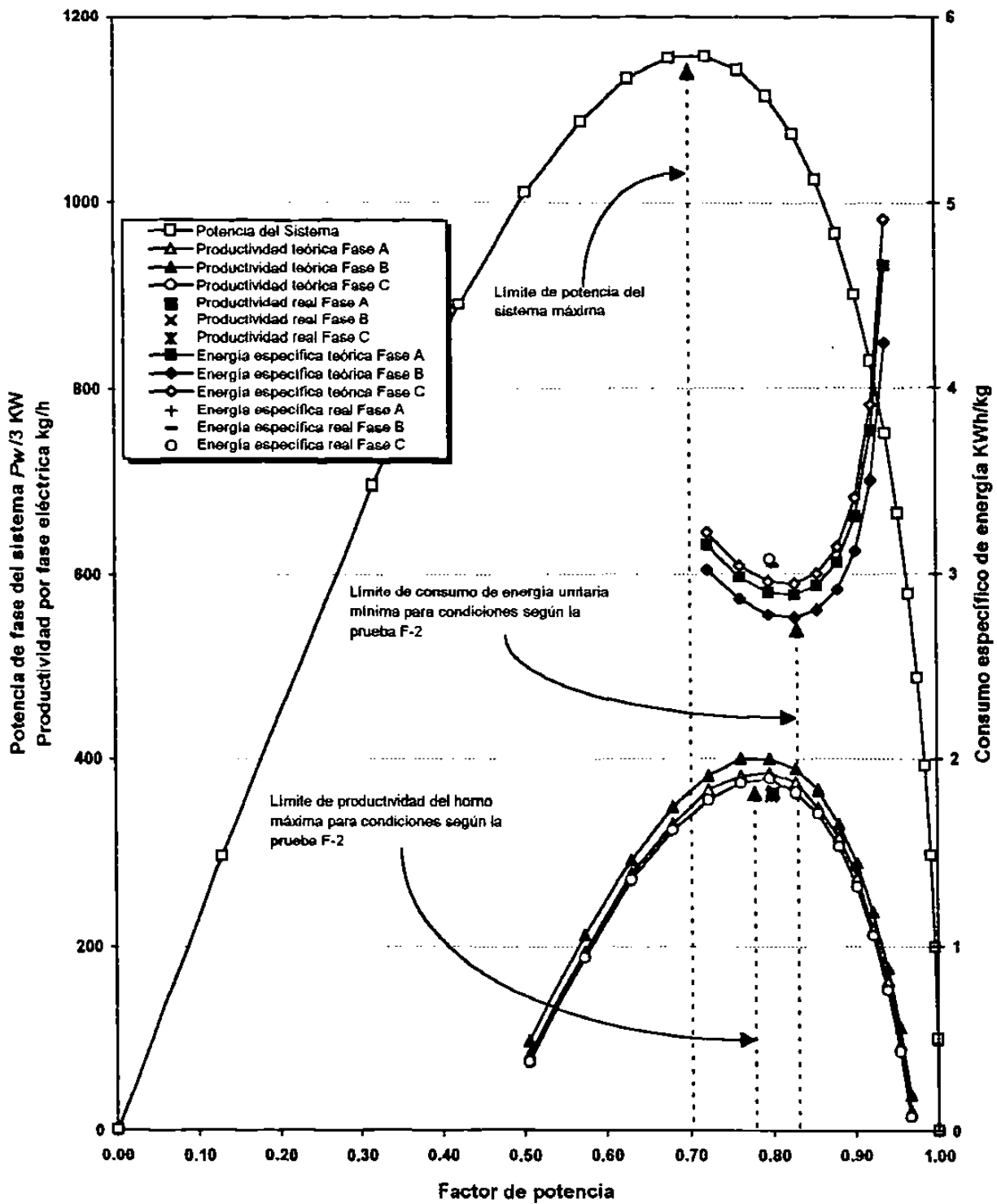


Fig. 146. Acoplamiento de las curvas de productividad y consumo específico de energía con resultados según las condiciones operativas de la prueba F-2.

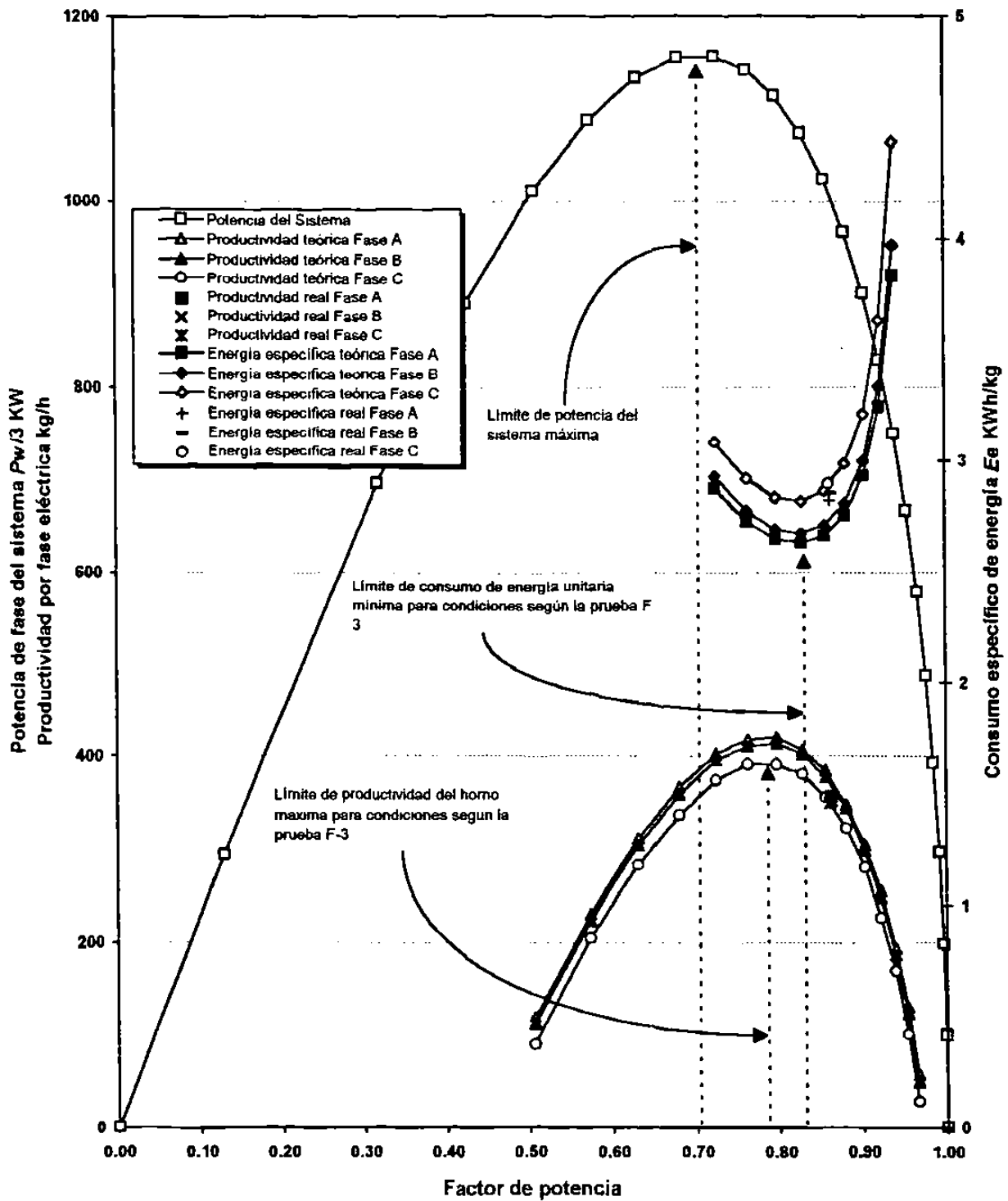


Fig. 147. Acoplamiento de las curvas F-3 de productividad y consumo específico de energía con resultados según las condiciones operativas de la prueba F-3.

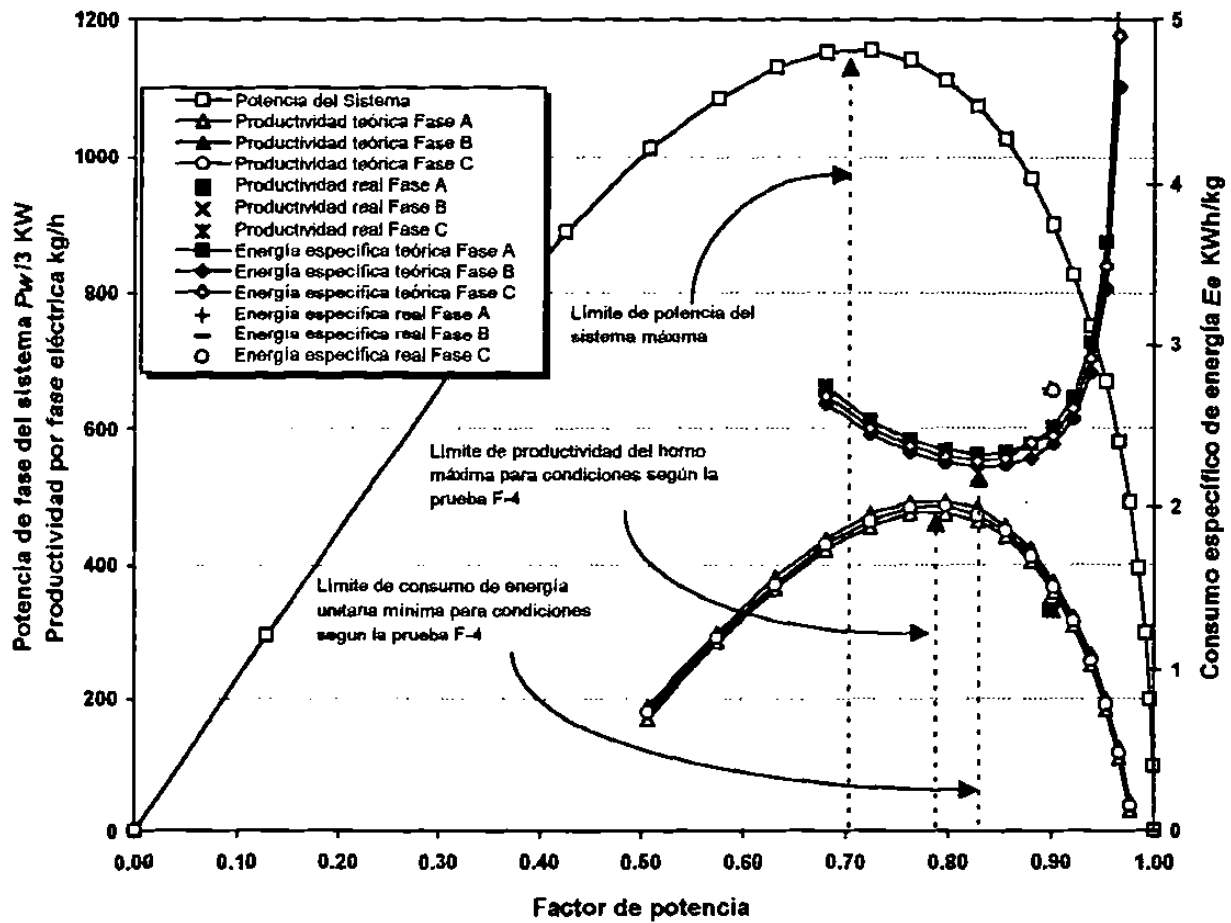


Fig. 148. Acoplamiento de las curvas de productividad y consumo específico de energía con resultados según las condiciones operativas de la prueba F-4.

Aquí se destaca que el valor de energía específica mínima se consigue para un factor de potencia mayor (0.8281) que el adecuado (0.7799) para conseguir el valor de productividad máxima del horno y ambos son mayores que el necesario ($0.7071 = \frac{1}{\sqrt{2}}$) para conseguir la potencia de suministro máxima que el sistema puede otorgar; debe entonces considerarse que estas curvas han sido obtenidas para el nivel de voltaje 6 de acuerdo a las condiciones de operación de las pruebas finales.

Es muy difícil en la práctica trabajar con valores tan exactos, por lo que definimos aquí un área de trabajo eléctrico para el nivel de voltaje 6 con un ancho de factor de potencia entre 0.7799 y 0.8281 lo que corresponde a una corriente relativa de arco entre 0.6257 y 0.5605 respectivamente.

6.4.5. La Calidad del Producto

En la Tabla 44. se presentan los resultados de los análisis de tamaño de cristal promedio y de BSG de las muestras obtenidas desde las pruebas finales.

Tabla 44. Tamaño de cristal promedio y BSG de pruebas finales.

Experimento No.	BSG g/cm^2	Tamaño promedio de cristal μm
F-1	3.50	639.91
F-2	3.51	729.27
F-3	3.50	635.84
F-4	3.50	653.28

La mejora en cuanto a tamaño de cristal se refiere es representado en la Fig. 149. dónde se han colocado los valores relativos al tamaño de cristal promedio que en operación normal de la planta se habían obtenido.

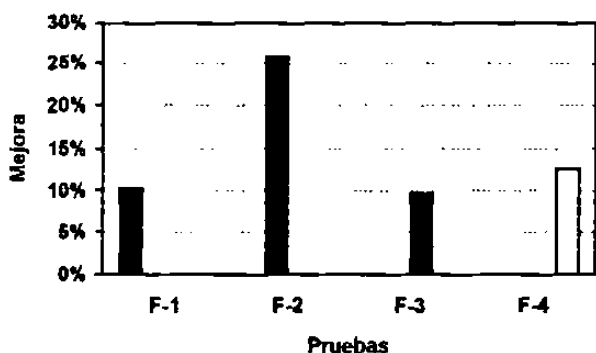


Fig. 149. Porcentaje de mejora en tamaño de cristal, relativo al tamaño promedio obtenido en operación normal.

Como ya se ha mencionado es muy difícil detectar la relación que pudiera existir entre el modo de operación eléctrico y de velocidad de electrodos con el tamaño de los cristales obtenidos y el BSG. Sin embargo se puede decir que el hecho de clasificar la materia prima y de operar el horno bajo ciertas y estrictas condiciones, lleva a un resultado de obtener un producto con características más uniformes y por ello mejores que al fundir materias primas sin ser clasificadas y

con resultados poco uniformes. Es claro que al clasificar la materia prima y operar el horno tal como se ha hecho con las pruebas finales se obtiene una mejora contundente en cuanto a calidad del producto, productividad del horno y consumo de energía específica, no significando esto que sea éste el modo de operar óptimo y único de un horno de arco eléctrico para fundir magnesia (MgO) para grado refractario.

6.5. Discusión General del Trabajo

Es claro que la velocidad de electrodos alta para un mismo suministro de potencia y un mismo tamaño de grano de materia prima, permite un radio de reacción o de fusión alrededor de los electrodos pequeño y por ello una productividad baja y un alto consumo de energía unitaria; inversamente, velocidades bajas y condiciones de potencia y materia prima constantes permiten radios de reacción o fusión suficientemente grandes y por ello se consiguen altas productividades y bajos consumos de energía unitaria.

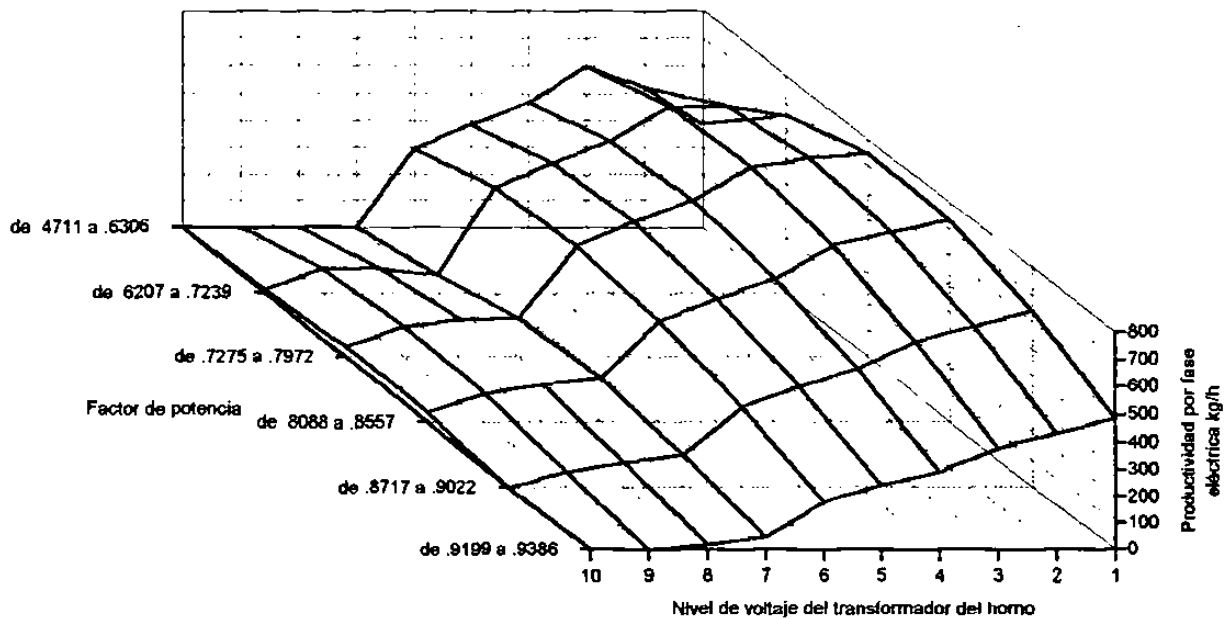


Fig. 150. Influencia del nivel de voltaje del transformador y del factor de potencia de operación sobre la productividad del horno para un tiempo de fusión de 2.5 hrs., velocidad de electrodos de 35 cm/h y densidad de carga de materia prima en el interior del horno de 2.2 gr/cm³.

Por otro lado para un mismo valor de corriente de arco, una misma velocidad de electrodos y una materia prima con características constantes se espera que con voltajes altos la potencia sea mayor y por ello, la productividad del horno sea más alta. En la Fig. 150. se presenta una gráfica 3-D de la productividad del horno por fase eléctrica en función del factor de potencia y del voltaje para una operación de 2.5 hrs., una velocidad de electrodos de 35 cm/h y una densidad de materia prima dentro de la olla del horno de 2.2 gr/cm³; debe recordarse aquí que el nivel de voltaje más alto del

transformador del horno aquí analizado tiene el valor de voltaje menor, mientras que el nivel más bajo tiene el valor de voltaje mayor. Dado que la reactancia es el producto de la frecuencia de operación por la inductividad y ésta última depende de la geometría del sistema físico instalado¹⁸⁾, es de esperarse que no sea la misma para cada nivel de voltaje del transformador, por lo que el factor de potencia no será el mismo en los distintos niveles de voltaje para un mismo valor de corriente de arco, es por ello que en la gráfica de la Fig. 150. se han colocado los rangos de factor de potencia para los que fueron trazadas las curvas dónde se respetaron sus valores para cada nivel de voltaje. En la misma gráfica de la Fig. 150. destacan tres cosas: 1) Existe un rango central de trabajo de factor de potencia en el que se obtienen productividades mayores que en los extremos izquierdo y derecho en este eje para cualquier nivel de voltaje seleccionado. 2) Los niveles de voltaje del 1 al 6 alcanzan, para los valores de factor de potencia graficados, productividades que van desde 200 hasta casi 800 kg/h por fase eléctrica; mientras que los niveles 7 al 10 alcanzan productividades tan sólo desde 0 hasta aproximadamente 150 kg/h. Se observa claramente una caída de la productividad al pasar del nivel de voltaje 6 al 7. 3) Conforme el voltaje de operación es mayor para las mismas condiciones de operación, la productividad es mayor.

Con lo anterior es de esperarse que trabajar el HAE de MAGNELEC para fundir magnesia (MgO) para grado refractario en el nivel de voltaje 1 con un factor de potencia de 0.7275, es decir una corriente relativa del arco de 0.68610, se alcanzará el valor de productividad máxima de este horno. Teóricamente podríamos decir que esto es cierto, sin embargo en la práctica es muy difícil conseguir las condiciones deseadas de velocidad de electrodos y tiempo de fusión para los niveles del transformador con alto voltaje, aún cuando la materia prima alimentada mantenga sus características de tamaño constante. Como fue ya explicado en la sección 6.3.1. con voltajes muy altos y una granulometría con la que en voltajes intermedios se alcancen por ejemplo 35 cm/h, es de esperarse que la velocidad de electrodos alcanzada sea mayor siempre y cuando se mantenga la misma potencia en ambos casos; lo anterior es porque con altos voltajes se vence más rápido la resistencia que la carga ofrece al paso de la corriente del arco, por lo que al rebasarse el valor deseado de ésta última y con ello la potencia suministrada, el operario del horno se ve obligado a levantar más rápido los electrodos, no teniendo nada que ver esto con el estado térmico de la carga; por ello es difícil alcanzar la productividad teórica en el caso de voltajes muy altos.

En otras palabras lograr las condiciones de operación deseadas implica tener una sensibilización con el proceso mismo, algo que algunos consultores tecnológicos le han llamado "arte". Esto último es actualmente algo inherente de este proceso en particular debido al vacío que existe en poder relacionar física y matemáticamente las condiciones eléctricas del sistema y el material con el estado térmico de la carga misma. En realidad este desconocimiento es general en todos los procesos que funden materiales por HAE.

Si bien los resultados que teóricamente se predicen no son totalmente alcanzables en la práctica por la dificultad de lograr las condiciones de operación adecuadas para cada caso, se ha logrado en cierta forma transferir una parte del modo de operación del HAE para fundir MgO grado refractario desde el *arte* al campo de la *técnica o tecnología*. Se requerirían una serie de pruebas experimentales con distintos modos de operación eléctrica y tamaños de materia prima para detectar los adecuados que aseguren una velocidad de electrodos deseada y finalmente un alto desempeño del horno. Aunque el camino en el conocimiento de este proceso y su optimización es largo, sin duda alguna los resultados de este trabajo marcan una ruta con la que se pueda sostener una mejora en la productividad de hornos con este proceso.

Con esto queda descrito el desarrollo tanto teórico como práctico de este trabajo con el cual es posible determinar los puntos óptimos de operación y además advertir de las posibles deficiencias en el desempeño del horno en ciertas áreas de trabajo, de igual forma sugiere ciertos modos y condiciones de operación que permiten alcanzar y mantener desempeños mayores que los que hasta 1996 se habían logrado en operación del horno de MAGNELEC.