

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION ESTUDIOS DE POST-GRADO  
DOCTORADO EN INGENIERIA DE MATERIALES



OPTIMIZACION DEL PROCESO DE FUSION DE  
MAGNESIA (MgO) POR HORNO DE ARCO ELECTRICO  
MEDIANTE LA VALIDACION DE UN MODELO  
MATEMATICO.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES

PRESENTA  
GUADALUPE ALAN CASTILLO RODRIGUEZ  
(Dipl.-Ing. M.C. Ing.)

San Nicolás de los Garza, N. L., México, Julio de 1997

OPTIMIZACION DEL PROCESO DE FUSION DE  
MAGNETITA (MgO) POR HORNO DE ARCO ELÉCTRICO  
MEDIANTE LA VALIDACION DE UN MODELO  
MATEMÁTICO.

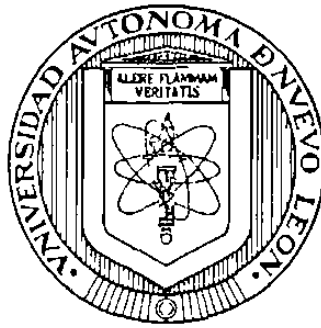
TD  
Z5853  
.M2  
EIME  
1997  
C3



1020119962

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
DIPLOMADO EN INGENIERÍA DE MATERIALES



PROCESO DE FUSIÓN DE MAGNESIA (MgO) POR HORNO DE ARCO  
DIANTE LA VALIDACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO.

**TESIS**

QUE SE PRESENTA PARA OBTENER EL GRADO DE  
DIPLOMADO EN INGENIERÍA DE MATERIALES

PRESENTA

**GUADALUPE ALAN CASTILLO RODRIGUEZ**  
(Dipl.-Ing. M.C. Ing.)

San Nicolás de los Garza, N.L. México, Julio de 1997

TD  
Z5853  
M2  
FINE  
1997  
C3

0119-57860



FONDO TESIS

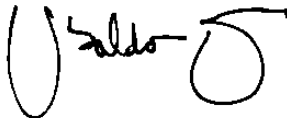
**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**  
**DOCTORADO EN INGENIERIA DE MATERIALES**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Optimización del Proceso de Fusión de Magnesia (MgO) por Horno de Arco Eléctrico Mediante la Validación de un Modelo Matemático" desarrollada por el Dipl.-Ing. M.C.-Ing. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez sea aceptada como opción al Grado de:

**DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES**

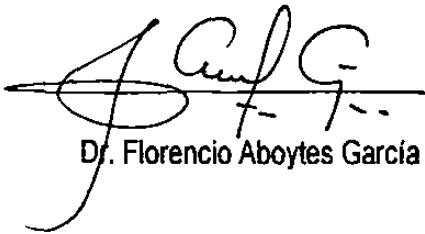
El Comité de Tesis



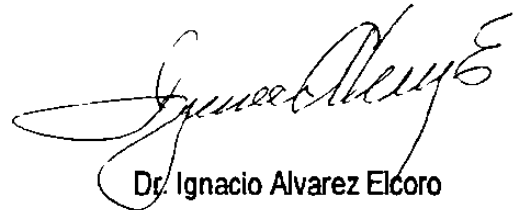
Dr. Ubaldo Ortiz Méndez



Dr. Alberto Pérez Unzueta



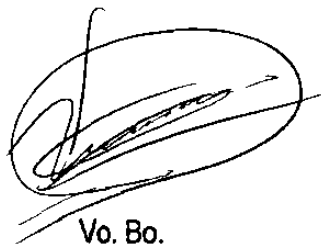
Dr. Florencio Aboytes García



Dr. Ignacio Alvarez Elcoro



(Dr.-Ing. Tushar Kanti Das Roy  
Asesor



Vo. Bo.

M.C. Roberto Villarreal Garza  
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. México, Junio de 1997

## ***DEDICATORIA***

A ***Dios*** por darme la oportunidad de vivir, de desarrollarme y servir a mis semejantes

Por el apoyo y comprensión durante el desarrollo de este trabajo y por el amor que en todos los aspectos de la vida me ha manifestado, a mi ***Esposa***:

***Edna Leticia***

y como un ejemplo de superación personal y de deseo de contribución a la humanidad en el paso por la vida, a mis ***Hijas***:

***Edna y Edith***

## AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de este trabajo.

A la **Universidad Autónoma de Nuevo León**, especialmente al Programa de Doctorado en Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, dónde compartiendo con compañeros y profesores adquiri los principios básicos indispensables para el buen desempeño de mi profesión.

Al **Grupo Industrial Peñoles**, en especial a su Director General el Ing. Jaime Lomelín Guillén y al Director de su División Químicos Industriales el Ing. Alberto G. Ross S., por el apoyo y la confianza que tuvieron en mí durante mi visita al extranjero para el complemento de la investigación. Agradezco al personal que labora en la empresa MAGNELEC S.A. de C.V. por las facilidades otorgadas durante la validación del modelo, muy especialmente al personal operativo de la misma.

Al **Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD)** por el apoyo y las facilidades brindadas durante mi visita a su país para el desarrollo del proyecto de investigación.

Al **Dr. Tushar Kanti Das Roy** y al **Dr. Ubaldo Ortiz Méndez** por la confianza que tuvieron en mí para desarrollar este trabajo, por su asesoría técnica y científica y especialmente por el respaldo que me dieron en las distintas actividades en las que me vi involucrado para el éxito del mismo.

Al **Prof. Dr.-Ing. K.J. Leers** por haberme dado la oportunidad de participar con su equipo de trabajo en el Instituto de Materiales no Metálicos de la Universidad Técnica de Clausthal en Alemania dónde adquirí experiencias y amigos inolvidables.

Al **Prof. Dr.-Ing. R. Scholz** y al **Prof. Dr.-Ing. K. Bretthauer** de la Universidad Técnica de Clausthal de Alemania por sus valiosas sugerencias y comentarios durante el análisis del proyecto de investigación.

Al **Dr. Rafael Colás** por el entusiasmo que me brindó para el desarrollo de este trabajo y mis actividades en el extranjero.

Por los momentos inolvidables que desde niños compartimos y por haber sido modelos en los años básicos de aprendizaje y formación, a mis **Hermanos**: Edgar Radamés, Flor Esthela, Luis Fernando, Aurelio Gabriel, Juan Rigoberto, Francisco Javier, Jorge Rafael (†) y Juan Angel. A todas aquellas personas que de alguna manera han contribuido no sólo en el desarrollo de este trabajo, sino en otros aspectos importantes de la vida brindándome su amistad y apoyo entre los que destacan el Sr. Américo Gómez, Ing. Benjamín Pérez, M.C. Carlos Lizcano, M.C. Marco Antonio Amaya y M.C. Mario de la Fuente por mencionar algunos.



## **AGRADECIMIENTO ESPECIAL**

Por haberme dado un nombre, haberme formado en el camino de ser justo, honesto y servidor a mis semejantes; por haberme enseñado con su ejemplo los principios de superación personal y después confiando en mi aprendizaje, darme la libertad de escoger mi propio camino, a mis **Padres:**

***María del Patrocinio Rodríguez de Castillo***  
***Francisco Castillo Alfaro (†)***

**OPTIMIZACION DEL PROCESO DE FUSION DE MAGNESIA (MgO) POR HORNO DE ARCO ELECTRICO MEDIANTE LA VALIDACION DE UN MODELO MATEMATICO**

Responsable:

Dipl.-Ing. M.C.-Ing. Guadalupe Alan Castillo Rodriguez

Asesor:

Dr.-Ing. Tushar Kanti Das Roy

## **Palabras del Autor**

A través de los libros el hombre ha logrado transmitir el conocimiento y el descubrimiento, que por su inquietud natural de descifrar su origen ha ido dando a conocer a sus semejantes; igualmente durante la historia de la humanidad a tratado de mejorar su calidad de vida y lo ha logrado mediante los avances de la ciencia y la tecnología, estos avances se han alcanzado gracias al deseo de contribución de algunos a sus semejantes.

El deseo de contribución es una cualidad natural del ser humano que se desarrolla en función de un entorno favorable en el que el mismo ser se ve envuelto desde que nace hasta que muere. Durante mi vida he tenido las maravillosas experiencias de conocer y llegar a sentir en lo mas profundo del ser, el deseo de contribución sin compromiso y de servicio desinteresado que en otras personas existe, conociendo así su alta calidad y valores humanos; al grado de extrañar a quien sin poder llegar a conocer me diera la confianza de lograr la supervivencia y un grado académico en su propia cultura y totalmente extraña a mí, Prof. Dr.-Ing. H.W. Hennieke (†), Prof. Dr.-Ing. K.J. Leers y Dr. Ubaldo Ortiz Méndez, a quienes les debo las inolvidables experiencias vividas en Göttingen y en Clausthal-Zellerfeld Alemania y de quienes conservaré siempre su grato recuerdo: *"sólo lo que hacemos por los demás determina el valor de nuestras vidas"*.

Esta obra fue escrita para aquellas personas que se sientan comprometidas con la mejora del proceso aquí estudiado y en general, para todos aquellos que deseen ampliar su visión en la ingeniería de procesos de materiales y que además tengan desarrollada la cualidad de contribución y servicio.

***Alan Castillo***

## INDICE

Capítulo	página
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. FUNDAMENTOS	
2.1. Fundamentos Eléctricos	
2.1.1. Descripción del Horno de Arco Eléctrico (HAE).....	10
2.1.2. Análisis del Circuito del HAE	
2.1.2.1. El Circuito Eléctrico Equivalente (Circuito Fundamental).....	12
2.1.2.2. El Diagrama Vectorial del HAE.....	15
2.1.2.3. Potencias Relativas del HAE.....	30
2.2. Fundamentos Termodinámicos	
2.2.1. Conceptos Generales.....	39
2.2.2. Energía Interna, Trabajo y Calor.....	41
3. DESCRIPCIÓN DEL HAE PARA FUSIÓN DE MAGNESIA GRADO REFRACTARIO DEL GRUPO PEÑALES	
3.1. El Horno de Fusión.....	43
3.2. El transformador Eléctrico.....	43
3.2.1. Consideraciones y Simplificaciones.....	45
3.2.2. El Diagrama Vectorial.....	48
3.2.3. Las Curvas Características de Potencia.....	49
3.3. El Proceso Industrial de Fusión de Magnesita Grado Refractario por HAE del Grupo Peñales.....	69
4. EL MODELO	
4.1. Selección de Variables.....	71
4.2. El Modelo Físico.....	74
4.3. Interpretación Matemática	
4.3.1. Balance de Materia.....	75
4.3.2. Balance de Energía.....	76
5. EXPERIMENTACIÓN	
5.1. Equipo y Materias Primas Usadas.....	84
5.2. Objetivo y Diseño de Pruebas.....	85
5.3. Desarrollo de Pruebas.....	88
5.4. Técnicas de Análisis Petrográficos y de BSG de Muestras.....	89
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	
6.1. Pruebas Preliminares	
6.1.1. El Consumo de Energía Eléctrica.....	91
6.1.2. La Velocidad de los Electrodo.....	94
6.1.3. La Productividad.....	96
6.1.3.1 Efecto de la Velocidad de los Electrodo.....	96
6.1.3.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico.....	98

6.1.4. El Consumo Especifico de Energía.....	103
6.1.4.1 Efecto de la Velocidad de los Electrodo.....	104
6.1.4.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico.....	105
6.1.5. La Calidad del Producto.....	109
6.2. Pruebas del Grupo 2	
6.2.1. El Consumo de Energía Eléctrica.....	111
6.2.2. La Velocidad de los Electrodo.....	112
6.2.3. La Productividad	
6.2.3.1 Efecto de la Velocidad de los Electrodo.....	120
6.2.3.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico.....	126
6.2.4. El Consumo Especifico de Energía.....	134
6.2.4.1 Efecto de la Velocidad de los Electrodo.....	136
6.2.4.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico.....	137
6.2.5. La Calidad del Producto.....	145
6.3. Pruebas del Grupo 3.....	148
6.3.1. El Desplazamiento de los Electrodo.....	148
6.3.2. La Productividad y el Consumo Especifico de Energía.....	154
6.3.3. La Calidad del Producto.....	155
6.4. Pruebas Finales	
6.4.1. Introducción.....	157
6.4.2. La Velocidad de los Electrodo.....	158
6.4.3. La Productividad	
6.4.3.1 Efecto de la Velocidad de los Electrodo.....	161
6.4.3.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico.....	162
6.4.4. El Consumo Especifico de Energía.....	165
6.4.4.1 Efecto de la Velocidad de los Electrodo.....	165
6.4.4.2 Efecto del Punto de Trabajo Eléctrico.....	166
6.4.5. La Calidad del Producto.....	170
6.5. Discusión General del Trabajo.....	171
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	174
8. SUGERENCIAS AL PROCESO.....	177
9. APORTACIONES	
9.1. Aportación Industrial.....	178
9.2. Aportación Tecnológica.....	178
LITERATURA.....	179
ÍNDICE DE FIGURAS.....	182
ÍNDICE DE TABLAS.....	190
APÉNDICE	
Presentación del Programa Lineal del Modelo.....	192
CURRICULUM VITAE.....	197

# RESUMEN

Basado en una revisión bibliográfica de hornos de arco eléctricos y de conceptos básicos de termodinámica, se hace una descripción detallada del comportamiento eléctrico de los hornos de arco eléctrico trifásicos usados para la fusión de materiales, además se describen los fundamentos termodinámicos (postulados 1 y 2) que soportan el análisis de este trabajo. Se describe el proceso de fusión de magnesia (MgO) para grado refractario del Grupo Peñoles y se obtienen las curvas de trabajo eléctrico de su horno en particular. Basado en la experiencia con el proceso y las bien conocidas leyes de la física se desarrolla un modelo operacional en el que se toman en cuenta la velocidad de levantamiento de los electrodos, el voltaje de línea del transformador, la corriente del arco, la densidad de la materia prima dentro del horno y la geometría del mismo. Los experimentos se desarrollan en las instalaciones de MAGNELEC S.A. de C.V. subsidiaria del Grupo Peñoles, usando los equipos de producción normales de la planta.

Con los resultados obtenidos se construyen gráficas de desplazamiento de electrodos (*cm*) contra tiempo (*h*), productividad (*kg/h*) contra la velocidad de electrodos (*cm/h*) y contra el punto de trabajo eléctrico (*factor de potencia*); de igual forma se obtienen gráficas del consumo específico de energía (*KWh/kg*) contra la velocidad de electrodos y contra el punto de trabajo eléctrico. Se hace además un análisis de la calidad del producto obtenido en cuanto a tamaño de cristal y densidad se refiere.

Se encuentra que el desplazamiento de los electrodos es inestable cuando se usa materia prima con tamaños de grano distintos y mezclados (sin clasificar), lo que provoca un descontrol de la velocidad de levantamiento de los electrodos al momento de la fusión; se encuentra además que con altas

velocidades de levantamiento de electrodos para el resto de las variables constantes, la productividad del horno se decrementa. Por otro lado se determina que existe un punto máximo de productividad por fusión en el horno a un factor de potencia único para cada nivel de voltaje del transformador y para cada valor de velocidad de electrodos y densidad de carga de materia prima; además se detecta que el valor del factor de potencia para este punto máximo es mayor que el necesario para alcanzar la potencia de suministro máxima del transformador en cada nivel de voltaje.

Del mismo modo se determina que existe un valor mínimo de consumo de energía unitaria a un factor de potencia único para cada nivel de voltaje del transformador y para cada valor de velocidad de electrodos y densidad de carga de materia prima; detectándose además que este valor de factor de potencia es también mayor que el necesario para alcanzar la potencia de suministro máxima del transformador para cada nivel de voltaje. Se determina además que con materias primas de grano grueso se tiene un control mayor en la velocidad de los electrodos, lo que permite alcanzar bajas velocidades y cumplir condiciones de operación deseables con las que se logran altos índices de desempeño del horno. Se determina además que no es factible predecir calidades de producto específicas por zonas dentro del lingote ya que su variedad dentro del mismo se da al azar y sin un control externo.

Con los resultados de este trabajo se concluye que es posible predecir resultados de fusiones basándose en el modo de operación del horno y en los valores de las variables usadas en este trabajo. Se concluye además que para cada nivel de voltaje del transformador y para cada valor de velocidad de levantamiento de electrodos existe un rango de corriente de arco en el que se pueden obtener máximas productividades y consumos de energía por unidad de masa mínimos, y que el factor de potencia correspondiente a estos rangos de corriente son mayores que el necesario ( $1/\sqrt{3}$ ) para alcanzar la potencia máxima del sistema.

Además se concluye que las velocidades de electrodos altas son provocadas por la presencia de material fino en la carga dentro del horno lo que a su vez provoca para cualquier caso de operación eléctrica una disminución en el desempeño de las fusiones con el horno, por lo que se observa la

necesidad de alimentar materia prima con tamaño de grano uniforme para asegurar un control en la velocidad de levantamiento de electrodos y en el suministro de potencia. Concluyéndose a la vez que el control de la velocidad de electrodos es esencial durante la fusión para lograr índices de desempeño altos y que así como se encuentra estrechamente relacionada a la granulometría de la materia prima también lo esta al suministro de potencia, si uno de ellos cambia su valor los otros dos se ven forzados a cambiar para asegurar índices de desempeño altos al término de la fusión.