

**GENERACIÓN DE UN MODELO OPERATIVO DE LOS HORNOS ELÉCTRICOS  
DE CERRO MATOSO EN FUNCION DE LAS PROPIEDADES QUIMICAS DE LA  
ESCORIA**

**JOSE JAIME MENDOZA NAVARRO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2013**

**GENERACIÓN DE UN MODELO OPERATIVO DE LOS HORNOS ELÉCTRICOS  
DE CERRO MATOSO EN FUNCION DE LAS PROPIEDADES QUIMICAS DE LA  
ESCORIA**

**JOSE JAIME MENDOZA NAVARRO**

**Trabajo de grado realizado para optar por el título  
de Ingeniero Metalúrgico**

**TUTOR**

**CMSA ING. Whilmar Vargas Puello**

**COTUTOR**

**Profesor Walter Pardavé.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **ADVERTENCIA LEGAL**

**AGRADECEMOS TENER PRESENTE QUE EL CONTENIDO TECNICO, TANTO EN FORMAS, FORMATOS, INFORMACIÓN, IDEAS Y CONCEPTOS UTILIZADOS EN EL PROYECTO SON PROPIEDAD DE CERRO MATOSO S.A Y DE CARÁCTER CONFIDENCIAL. LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL ESTA PROHIBIDA. LOS DOCUMENTOS SON PARA USO EXCLUSIVO DE CERRO MATOSO S.A Y CUALQUIER OTRO USO ES PROHIBIDO SIN EL CONSENTIMIENTO ESCRITO DE CERRO MATOSO. LA EXPOSICION DEL PRESENTE TRABAJO ES SOLAMENTE DE USO ACADEMICO.**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. MARCO TEÓRICO	18
3.1 ESCORIA	18
3.2 PROPIEDADES DE LA ESCORIA	18
3.2.1 Punto de fusión	18
3.2.2 Calor específico	19
3.2.3 Viscosidad	20
3.2.4 Tensión superficial	20
3.2.5 Conductividad eléctrica	21
3.2.6 Conductividad térmica	22
4. METODOLOGÍA	23
4.1 ACTIVIDADES	24
4.1.1 Identificación de los posibles escenarios de operación de los hornos eléctricos, de acuerdo con las necesidades existentes en la mina de CMSA	24
4.1.2 Identificar las principales propiedades fisicoquímicas de la escoria que influyen la operación de los hornos eléctricos.	26

4.1.3 Estudio del impacto y los problemas operativos que se generan debido al cambio de las propiedades Fisicoquímicas de las escorias.	29
4.1.4 Generación de un modelo operativo para el funcionamiento de los hornos eléctrico en CMSA, basado en las variaciones que se podrían presentar debido al cambio de la composición química de la escoria.	47
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
6. CONCLUSIONES	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
BIBLIOGRAFÍA	55
ANEXO	57

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama Ternario del sistema SiO <sub>2</sub> -MgO-FeO	19
Figura 2. Metodología a Desarrollar.	23
Figura 3. Esquema representativo de la estructura de las cadenas y redes de sílice.	26
Figura 4 Consumo específico de energía. Porcentaje de cambio vs Relación Sílice-Magnesio	29
Figura 5. Viscosidad (Riboud) vs Relación Sílice-Magnesio.	30
Figura. 6 Viscosidad (CMSA) vs Relación Sílice-Magnesio.	31
Figura 7. Viscosidad (Riboud), Porcentaje de Cambio vs Relación Sílice-Magnesio	32
Figura. 8 Viscosidad (CMSA), Porcentaje de Cambio vs Relación Sílice-Magnesio.	33
Figura 9. Bloque de la piquera de metal.	35
Figura. 10 Resistividad vs Relación Sílice-Magnesio	37
Figura 11 Resistividad y Porcentaje de Cambio vs Relación Sílice-Magnesio	38
Figura 12 Conductividad Térmica, Porcentaje de Cambio vs Relación Sílice-magnesio	39
Figura 13. Proceso de enfriamiento y solidificación de una escoria de baja relación SiO <sub>2</sub> /MgO.	41
Figura 14 Diagramas Pseudobinario Escorias	42
Figura 15. Diagrama Pseudobinario Escorias (Acercamiento).	44
Figura 16. Carta de Navegación en función de las propiedades químicas de la escoria (Viscosidad)	47
Figura 17. Carta de Navegación en función de las propiedades químicas de la escoria (Conductividad Eléctrica)	48

Figura 18. Parámetros temperatura de la escoria	49
Figura 19. Carta de Navegación en función de las propiedades químicas de la escoria (Conductividad Térmica).	49

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Promedio Actual y posibles escenarios de operación.	25
Tabla 2. Posibles Escenarios de operación Futura	42
Tabla 3. Temperatura de liquidus de escenarios.	43
Tabla 4. Escenario de operación 1(Especies solidificadas)	44
Tabla 5. Escenario de operación 2. (Especies solidificadas)	45
Tabla 6. Escenario de Operación 3. (Especies solidificadas)	45
Tabla 7. Escenario de Operación 4(Especies solidificadas)	46
Tabla 8 Impactos en factores operativos.	50

## RESUMEN

**TITULO:** GENERACIÓN DE UN MODELO OPERATIVO DE LOS HORNOS ELÉCTRICOS DE CERRO MATOSO EN FUNCION DE LAS PROPIEDADES QUIMICAS DE LA ESCORIA\*

**AUTOR:** JOSE JAIME MENDOZA NAVARRO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Escorias, hornos eléctricos, escenarios, impedancia, viscosidad, resistividad.

En los hornos eléctricos, la operación es netamente controlada por el comportamiento de la escorias, por tanto la composición química de estas es de gran importancia para abordar estudios o trabajos referentes a los hornos eléctricos en Cerro Matoso S.A. Las propiedades químicas y físicas de un material cualquiera que sea, está determinada por su composición química, en el caso de las escorias con las que comúnmente se trabaja en Cerro Matoso S.A, son los óxidos de magnesio y de silicio los que controlan los comportamientos de la escoria debido a que se encuentran en mayor proporción, los óxidos de hierro y alúmina presentes se encuentran menor proporción, sin embargo afectan las propiedades de la escoria. El estudio comprende un análisis y una propuesta de escenarios que posiblemente se tendrán en operación, acompañado de las razones y motivos por los cuales se hace esta propuesta.. Para comprender los efectos de los cambios químicos se realizó un análisis grafico de las propiedades físico-químicas de la escoria, encontrando que los aumentos de óxidos básicos como el Mgo y FeO afectan la viscosidad y la resistividad, dos de las propiedades de mayor importancia. De acuerdo a estos cambios se propuso posibles comportamientos de los hornos eléctricos y las posibles acciones a tomar para el control integral de éste.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierias Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Tutor: CMSA ING. Whilmar Vargas Puello Cotutor Profesor Walter Pardavé.

## ABSTRACT

**TITLE:** A BUSINESS MODEL GENERATION OF ELECTRIC FURNACES IN TERMS OF CERRO MATOSO CHEMICAL PROPERTIES OF SLAG\*

**AUTHOR:** JOSE JAIME MENDOZA NAVARRO\*\*

**KEYWORDS:** Slags, electric furnace, scenarios, impedance, viscosity, resistivity.

In electric Furnace, the operation is clearly controlled by the behavior of the slag, so the chemical composition of these is of great importance to address regarding studies or in electric furnace at Cerro Matoso SA. The chemical and physical properties of a material whatsoever, is determined by their chemical composition, in the case of slag with commonly works in Cerro Matoso SA , are the oxides of magnesium and silicon that control the behavior of because the slag are in greater proportion , the alumina and iron oxides present are lesser extent , however affect slag properties . The study includes an analysis and a proposal of scenarios that may be taken into operation , together with the reasons and grounds on which this proposal is made. To understand the effects of chemical changes a graphic analysis of the physicochemical properties of the slag was performed , finding that increases in basic oxides such as MgO and FeO affect the viscosity and resistivity , two of the most important properties . According to these changes possible behaviors of electric ovens is proposed and possible actions to take for integrated control of this According to these changes possible behaviors of electric ovens is proposed and possible actions to take for integrated control of this

---

\* Project of grade

\*\* Faculty of Physical Chemistry Ingenierias. School of Metallurgical Engineering. Tutor: CMSA ING. Whilmar Vargas Puello Cotutor Profesor Walter Pardavé.

## INTRODUCCIÓN

En los hornos eléctricos, la operación es netamente controlada por el comportamiento de la escorias, por tanto la composición química de estas es de gran importancia para abordar estudios o trabajos referentes a los hornos eléctricos en Cerro Matoso S.A.

Las propiedades químicas y físicas de un material cualquiera que sea, está determinada por su composición química, en el caso de las escorias con las que comúnmente se trabaja en Cerro Matoso S.A., son los óxidos de magnesio y de silicio los que controlan los comportamientos de la escoria debido a que se encuentran en mayor proporción, los óxidos de hierro y alúmina presentes se encuentran menor proporción, sin embargo afectan las propiedades de la escoria.

Este proyecto se crea debido a la necesidad que tiene la empresa de operar de manera más eficiente los hornos, cuando se habla de una manera más eficiente se refiere a conocer con anterioridad las posibles situaciones como sobrecalentamiento de la escoria, de metal o consumo innecesario de energía; estas son algunas de las posibles situaciones a las que se podría enfrentar Cerro Matoso S.A.

Los cambios que se pueden generar, radican en el cambio de composición del mineral presente en la mina, en los 30 años de explotación de mineral se ha requerido estudios de los comportamientos e impactos de los hornos y diferentes sistemas de procesamiento de minerales de acuerdo a las composiciones químicas y los cambios que esta genera en el mineral y por ende en la escoria.

Actualmente existe una restricción en la composición del mineral, los rangos de trabajo son diferentes, por lo tanto obligan a la unidad de negocios mina a restringir la extracción de mineral más heterogéneo en cuanto a su composición química.

Todas estas necesidades han llevado a la unidad de negocios de secado-calcinación-fundición (DRKEF) a generar un modelo operativo específico para los rangos de composición química de la escoria, en los cuales puede variar la operación de los hornos eléctricos en Cerro Matoso S.A.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Luego de trabajar con escorias de relación  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$  alrededor de 2,6-2,9 a lo largo de los últimos 30 años en Cerro Matoso S.A., se hace un cambio de operación en los hornos eléctricos debido a la nueva composición química de las superpilas en el área 200 (preparación de minerales), donde la operación de DRKEF se ve en la necesidad de cambiar su modelo operativo para poder trabajar con escorias de relación Silicio/Magnesio inferiores, alrededor de 1,8-2,0. A este paso se le denomina comúnmente trabajar del otro lado del valle ya que al graficar las variables relación  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$  vs Temperatura de Líquidus de la escoria con %Fe específico se presenta una curva con un valle.

Es así como, se puede generar un modelo operativo o carta de navegación para la operación de los hornos eléctricos cuando se trabaja con escorias de características específicas, teniendo en cuenta variables del proceso como potencia, impedancia, voltaje y propiedades físico-químicas como la conductividad eléctrica, conductividad térmica, viscosidad, temperatura de líquido, temperatura de sangría, espumación entre otros.

Adicionalmente se pretende relacionar todas estas variables operativas con las variables de respuesta más importantes para el control estructural del horno eléctrico que son principalmente las expansiones radiales en la pared media, temperatura de los elementos enfriadores de cobre y los flujos de calor de los mismos.

A lo largo del trabajo en Cerro Matoso S.A. se ha establecido que se deben hacer ajustes en los modelos operativos y de control, de acuerdo con las condiciones a las cuales se trabaja, ya sean condiciones físico-químicas del mineral o

condiciones más específicas como la humedad del mineral y como ésta afecta el proceso.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Generar un modelo operativo para el funcionamiento de los hornos eléctricos de Cerro Matoso S.A en función de las propiedades químicas de la escoria.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar los posibles escenarios de composición química de las escorias con relación sílice magnesio alrededor de 1.8 y 2, cuando los porcentajes de Hierro varían entre 10 y 12%.
- Evaluar las propiedades físico-químicas de la escoria para cada uno de los escenarios propuestos.
- Asociar el impacto que tiene el cambio de las propiedades físico-químicas de la escoria sobre las variables operativas de los hornos eléctricos de CMSA.

### 3. MARCO TEÓRICO

Para entrar a debatir sobre los efectos del mineral en baja o alta relación en el control operacional, se deben estudiar las propiedades de la escoria:

#### 3.1 ESCORIA

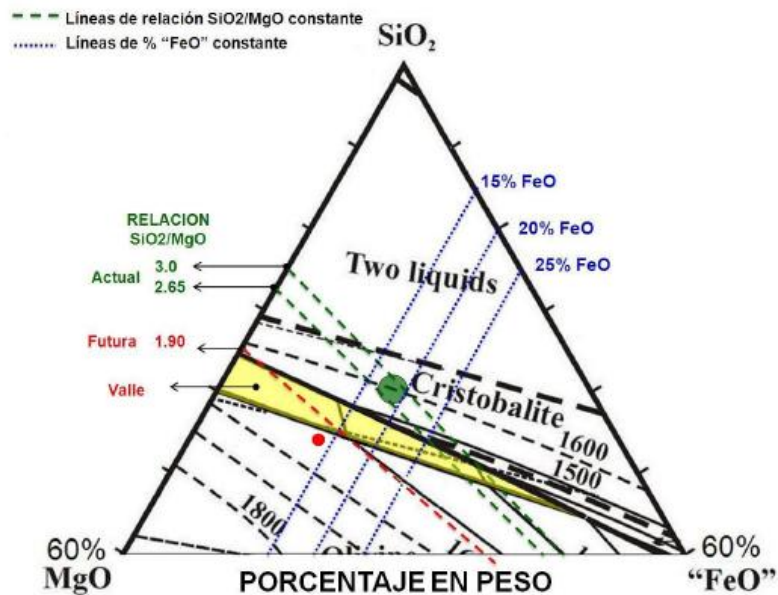
En un proceso de fundición, la escoria se puede definir como el subproducto formado por óxidos y silicatos metálicos, entre otros; contiene elementos que no se reducen durante el proceso de reducción o que se oxidan durante el proceso de refinación.

La relación de escoria-metal de los hornos fundidores de la empresa Cerro Matoso S.A corresponde a 14:1, considerándose un subproducto de altos volúmenes, siendo necesario un tratamiento posterior al colado, que consiste en la granulación de la escoria, del procesamiento en la planta de trituración para finalmente ser almacenada.[13]

#### 3.2 PROPIEDADES DE LA ESCORIA

**3.2.1 Punto de fusión** Los diagramas binarios y ternarios proveen información valiosa a la hora de intentar predecir algunas propiedades y el comportamiento de diferentes mezclas de compuestos o especies, los diagramas ternarios se construyen a partir de los diagramas binarios. A continuación se muestra un diagrama ternario  $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$ , donde se encontrará la zona de interés de estudio.

**Figura 1. Diagrama Ternario del sistema SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO**



**Fuente:** Diagramas ternarios Escoria Cerro Matoso S.A DIAZ, ANA. [11].

En la figura 1 se observa en amarillo la zona correspondiente al denominado valle, esta área en el diagrama ternario, nos proporciona información teórica del comportamiento de la temperatura de la escoria en esta zona.

**3.2.2 Calor específico** El calor específico de un material es la cantidad de energía que se requiere para aumentar en un grado centígrado la temperatura de un gramo de sustancia, por ende a mayor calor específico, mayor requerimiento de energía para calentar.

Con escorias de nuevas composiciones se tendrá un incremento del consumo específico de energía, debido a esto se tendrá que analizar, que tanto afecta el consumo de energía en CMSA este tipo de escorias.

El calor específico está influenciado por las características del material, que a su vez están regidas por su composición química.

**3.2.3 Viscosidad** La viscosidad es la medida de la resistencia de un material no cristalino a una deformación permanente; describe "la capacidad de deslizamiento de un fluido" y es proporcional a la velocidad a la que las partes de un fluido son separadas entre sí; establece, además, la proporcionalidad existente entre el esfuerzo por unidad de área ( $F/A$ ) necesario para producir un gradiente de velocidades en un fluido.

La viscosidad de las escorias fundidas dependen de sus componentes; las escorias de silicato usualmente disminuye con el incremento del contenido del óxido básico. En ciertas escorias la viscosidad de las mezclas puede ser considerablemente menor que la viscosidad de cualquiera de los componentes que las constituyen. Lo anterior se aprovecha durante la fabricación de acero en que la composición de las escorias se ajusta de tal manera que proporciona la baja viscosidad que se desea. Las escorias fluidas resultantes permiten un mejor contacto escoria-metal y también una descarga más fácil de la escoria fundida.[4].

**3.2.4 Tensión superficial** El fenómeno que explica la tendencia de un líquido a disminuir su superficie hasta alcanzar el estado de menor energía buscando un equilibrio estable se denomina tensión superficial.

Esta propiedad es responsable de la resistencia que un líquido presenta a la penetración de su superficie, de la tendencia a la forma esférica de las gotas de un líquido, del ascenso de los líquidos en los tubos capilares y de la flotación de objetos u organismos en la superficie de los líquidos.

La tensión superficial de las escorias depende del índice de basicidad, escorias acidas (alto  $\text{SiO}_2$ ) tienden a tener menor tensión superficial dado que el  $\text{SiO}_2$  actúa como tensoactivo reduciendo la tensión superficial.

Por experiencia en el trabajo hecho en CMSA, se sabe que debido a los cambios de la composición química, las escorias serán más ácidas (disminución de MgO), lo cual disminuye la tensión superficial.[2]

**3.2.5 Conductividad eléctrica.** La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí, también es definida como la propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones (y huecos en el caso de los semiconductores) pueden pasar por él, varía con la temperatura y es una de las características más importantes de los materiales.

La conductividad es la inversa de la resistividad, por tanto  $\sigma = 1/\rho$  y su unidad es el S/m (siemens por metro).

La conductividad en medios líquidos (Disolución) está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico, estos conductores iónicos se denominan electrolitos o conductores electrolíticos.

La determinación de la conductividad recibe el nombre de determinación conductométrica y tiene diferentes aplicaciones como, por ejemplo:

- En la electrólisis, ya que el consumo de energía eléctrica en este proceso depende en gran medida de la conductividad
- En los estudios de laboratorio para determinar el contenido de sal de varias soluciones durante la evaporación del agua (por ejemplo en el agua de calderas o en la producción de leche condensada).
- En el estudio de las basicidades de los ácidos, puesto que pueden ser determinadas por mediciones de la conductividad.

- Para determinar las solubilidades de electrólitos escasamente solubles y para hallar concentraciones de electrólitos en soluciones por titulación.

**3.2.6 Conductividad térmica** La habilidad de un material para transferir calor se denomina conductividad térmica y se puede definir como la cantidad de calor transportado de las regiones de alta temperatura a las regiones de baja temperatura en una sustancia conforme a la ley de Fourier descrita en la ecuación 1.

$$q = -\lambda \text{grad}T \quad \text{Ecuación 1.}$$

Dónde:

$$T = \text{grad}T = \frac{\Delta T}{\Delta d} \quad [\text{K}]$$

$$\lambda = \text{conductivida} \quad [\text{W/m}]$$

$$q = \text{Flujo de calor} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

La conductividad térmica se da dentro de todos los materiales ya sean sólidos, líquidos o gaseosos mediante los mecanismos de conducción, convección y radiación.

El óxido de magnesio se caracteriza por tener un punto de fusión alto y propiedades refractarias, es decir que tiene baja conductividad térmica de tal manera que en la medida que se incremente el contenido de MgO en las escorias se espera que se disminuya la conductividad térmica [2].

## 4. METODOLOGÍA

A continuación se muestra los pasos a seguir para desarrollar la investigación.

**Figura 2. Metodología a Desarrollar.**



**Fuente:** Autor.

## **4.1 ACTIVIDADES**

Este plan está compuesto por los principales pasos y actividades a realizar en el proyecto de grado. El orden de estas actividades es:

### **Revisión bibliográfica.**

En esta etapa se realizó una documentación base de la operación de hornos eléctricos, las variables que influyen en la operación de estos hornos, las propiedades a estudiar de la escoria y todo lo concerniente a la operación. Esta documentación se llevó a cabo en la base de datos de CMSA y tesis relacionadas con el tema.

### **Adquisición del material de estudio.**

Para este estudio fueron utilizados los recursos informáticos de la empresa, programas como Office 2010, SlagAn32, VisualTemp, Factsage<sup>TM</sup> y base de datos de la empresa la cual está constituida por información en línea e históricos; la recolección de éstos fueron hechos desde el año 2000 hasta el 2013,.la frecuencia de recolección de datos fue de 5 minutos de operación normal.

#### **4.1.1 Identificación de los posibles escenarios de operación de los hornos eléctricos, de acuerdo con las necesidades existentes en la mina de CMSA.**

La composición de la escoria tiene un cambio relativo con respecto a la composición química de las superpilas, nombre que se les da a pilas de mineral utilizado a lo largo del proceso, las cuales sirven de alimentación para el proceso de secado-calcinación-fundición, basado en esta afirmación se dice que la composición química de la pila y la escoria tienen cierta similitud. Dicha similitud permite predecir cuales son las composiciones de la escoria, basándose en la composición de la pila.

Teniendo en cuenta los cambios que se pueden generar, se propone posibles escenarios, los cuales hacen referencia a composiciones químicas de la escoria, la cual está compuesta principalmente por 4 óxidos; sílice ( $\text{SiO}_2$ ), Magnesio ( $\text{MgO}$ ), Óxido de Hierro ( $\text{FeO}$ ) y Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), estos son ácidos con excepción de la alúmina, la cual se comporta como anfótera.

Para el análisis de las futuras escorias se realizó un estudio de los históricos de Cerro Matoso S:A: y se escogieron 4 composiciones, las cuales corresponden a las que se podrán tener en operación, para realizar un análisis operativo estos escenarios serán comparados con la operación actual en CMSA, en la Tabla 1 se puede apreciar la composición química de los estos.

Promedio Actual (A): Escenario de operación actual.

E1: Escenario de operación 1.

E2: Escenario de operación 2.

E3: Escenario de operación 3.

E4: Escenario de operación 4.

**Tabla 1. Promedio Actual y posibles escenarios de operación.**

	Prom. Actual		E1=↓R-↓Fe		E2=↓R-↑Fe		E3=↑R-↑Fe		E4 =↑R-↓Fe	
	SiO <sub>2</sub> /MgO	%Fe	SiO <sub>2</sub> /MgO	%Fe	SiO <sub>2</sub> /MgO	%Fe	SiO <sub>2</sub> /MgO	%Fe	SiO <sub>2</sub> /MgO	%Fe
Óxidos	1.98	11.4	2.0	10	2.0	11	2.2	11	2.2	10
%SiO <sub>2</sub>	54.28%		55.16%		54.22%		56.02%		56.89%	
%MgO	27.65%		27.58%		27.11%		25.48%		25.865%	
%FeO	14.76%		14.18%		15.59%		15.63%		14.18%	
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.81%		3.08%		3.08%		2.86%		3.08%	

*Fuente: Autor*

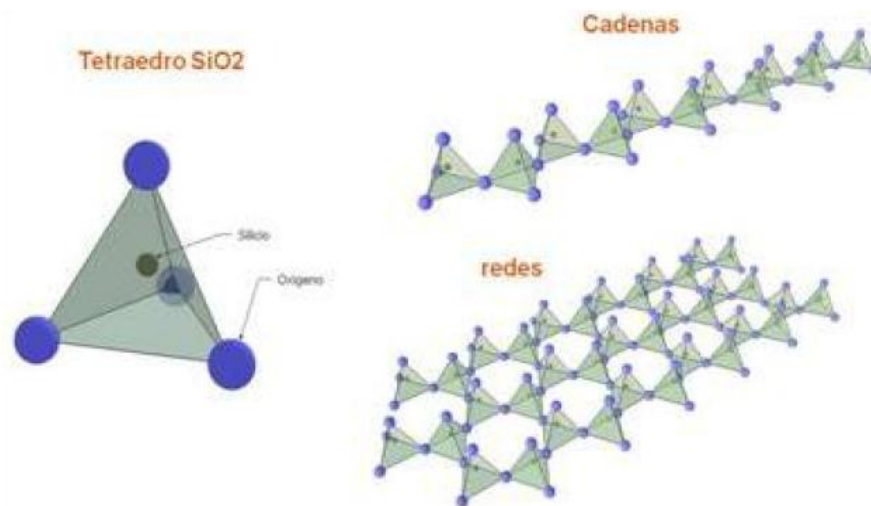
Se consideran valores bajos de hierro, alrededor de 10% en peso y altos valores de hierro de 11% en peso.

#### 4.1.2 Identificar las principales propiedades fisicoquímicas de la escoria que influyen la operación de los hornos eléctricos.

##### Viscosidad

Las escorias ricas en sílice, poseen una estructura reticular, es decir, su estructura cristalina consiste en cadenas de sílice entrelazadas formando redes, estas se unen gracias al enlace que se presenta entre los átomos de oxígeno ubicados en los vértices de cada tetraedro de sílice, un átomo de oxígeno es compartido entre dos tetraedros.

**Figura 3. Esquema representativo de la estructura de las cadenas y redes de sílice.**



**Fuente:** Granulación de escoria en régimen de baja relación de SiO<sub>2</sub>/Mgo en Cerro Matoso S.A, LERECH OSORIO SOHAD [13].

La viscosidad de la escoria es fuertemente impactada por el cambio de su composición química (aumento o disminución de óxidos) y el incremento de la temperatura, esto debido a que un aumento de los óxidos básicos genera una

ruptura de las cadenas de sílice, produciendo cadenas más cortas que facilitan la movilidad entre ellas, otro fenómeno que también ocasiona las rupturas de las cadenas es el aumento de temperatura. [2]. Basado en las anteriores afirmaciones se afirma que si aumenta la relación sílice/magnesio de las escorias por disminución de MgO, se tendrá mayor viscosidad.

En CMSA se tiene en cuenta la viscosidad Riboud y la CMSA, viscosidades que las obtenemos con el programa SlagAn32.

### **Conductividad Eléctrica**

La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene una sustancia para conducir la electricidad cuando está sometida a un diferencial de voltaje, la cantidad de corriente eléctrica que puede transportar un material depende del estado de la materia en que se encuentre (Sólido, líquido, gaseoso), del número de elementos portadores de carga (electrones, iones, etc.) y el tamaño de estos.

La conductividad de la escoria es el resultado de la combinación de la facilidad con la que se mueven los elementos portadores de carga eléctrica (con los electrones y aniones de la masa de escoria fundida) y la cantidad de los mismos presentes en el baño de escoria, esta a su vez depende de la temperatura y de la composición química; la cantidad de elementos portadores de carga depende de la composición química de la escoria.[3]. Se estudiará el comportamiento de la conductividad eléctrica dependiendo de la relación  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$ , del %Fe y la temperatura.

### **Impedancia**

Cuando varios cables conductores de energía están muy cercanos unos a otros, algunos serán atraídos y otros repelidos dependiendo de la magnitud y dirección de la fuerza del campo magnético de cada cable. Este proceso de atracción y repulsión es causa de un fenómeno llamado inductancia mutua.

La oposición al paso de la corriente en un circuito de Corriente Alterna causado por la auto inductancia o por la inductancia mutua, recibe el nombre de reactancia (X). En la operación del Horno Eléctrico de Arco está presente, principalmente, la reactancia de tipo inductivo, y se le designa Como (XL).

Para optimizar la potencia del arco en los hornos más pequeños, los transformadores de 7,500 KVA, o menos, tienen reactores suplementarios ajustables en el circuito primario de potencia. En los hornos más grandes, cuyas corrientes de operación son mucho mayores la reactancia es también un factor importante en la operación, pero no necesitan reactores suplementarios.

Existe también otro tipo de reactancia, llamada reactancia capacitiva, frecuentemente introducida en el circuito de potencia del Horno Eléctrico de Arco para corregir el factor de potencia o para estabilizar las líneas de voltaje "suaves", o de baja rigidez.

En un circuito de Corriente Alterna hay tres clases de oposición al flujo de la corriente eléctrica. La primera resulta del tamaño y composición de los conductores y se llama resistencia (R), la segunda es la reactancia inductiva (XL) y la tercera es la reactancia capacitiva (XC).

El efecto resultante de la interacción de estas tres clases de oposición al paso de la corriente recibe el nombre de impedancia (Z). Se conoce como impedancia al total de la oposición al flujo de Corriente Alterna en un circuito que contiene resistencia (R), reactancia inductiva (XL) y algunas veces reactancia capacitiva (XC) [9]

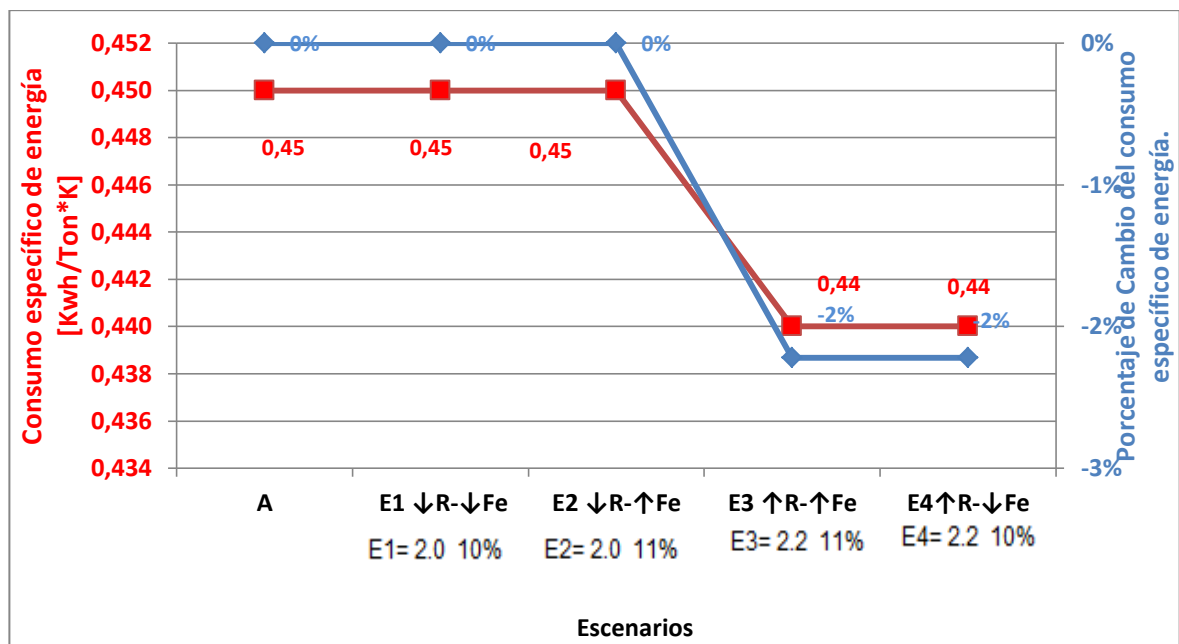
$$Z = \sqrt{R^2 + XL^2 - XC^2} \quad [\Omega]$$

*Ecuación 2*

### 4.1.3 Estudio del impacto y los problemas operativos que se generan debido al cambio de las propiedades Fisicoquímicas de las escorias.

#### Consumo específico de energía.

**Figura 4 Consumo específico de energía. Porcentaje de cambio vs Relación Sílice-Magnesio**



**Fuente:** Autor

Según la Figura 4 el consumo específico de energía disminuirá en un 2% cuando la relación sílice magnesio aumento de 2.0 a 2.2, dicho esto se puede afirmar que debido al calor específico la energía necesaria para fundir el mineral del calcinador es la misma que se consume hoy en día.

#### Efecto del cambio de viscosidad.

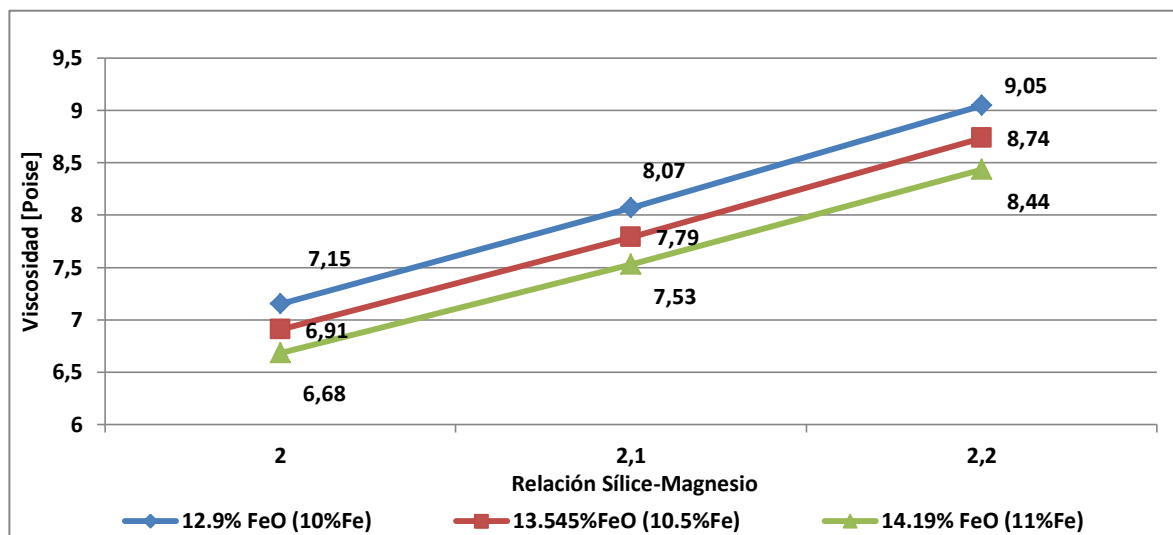
Los líquidos cuando se calientan generan un movimiento convectivo directamente proporcional a la temperatura y a la viscosidad del líquido, con este aumento

habrá mayor resistencia a fluir y por lo tanto los movimientos de convección serán más débiles, de manera proporcional al cambio de esta propiedad.

Las condiciones de potencia que se utilizan para operar el horno eléctrico generan un campo electromagnético que contribuye a la generación de los movimientos convectivos de la escoria, el aporte de estos movimientos es directamente proporcional a los niveles de corriente eléctrica y al operar con mayores valores de viscosidad se aumenta los niveles de corriente de los electrodos y por ende habrá mayor agitación de la escoria.

Para efectos prácticos se realizaron Figura 5 y la Figura 6 utilizando las ecuaciones modeladas y programas adquiridos por Cerro Matoso S.A, para conocer valores puntuales de las propiedades de la escoria.

**Figura 5. Viscosidad (Riboud) vs Relación Sílice-Magnesio.**



Fuente: Autor

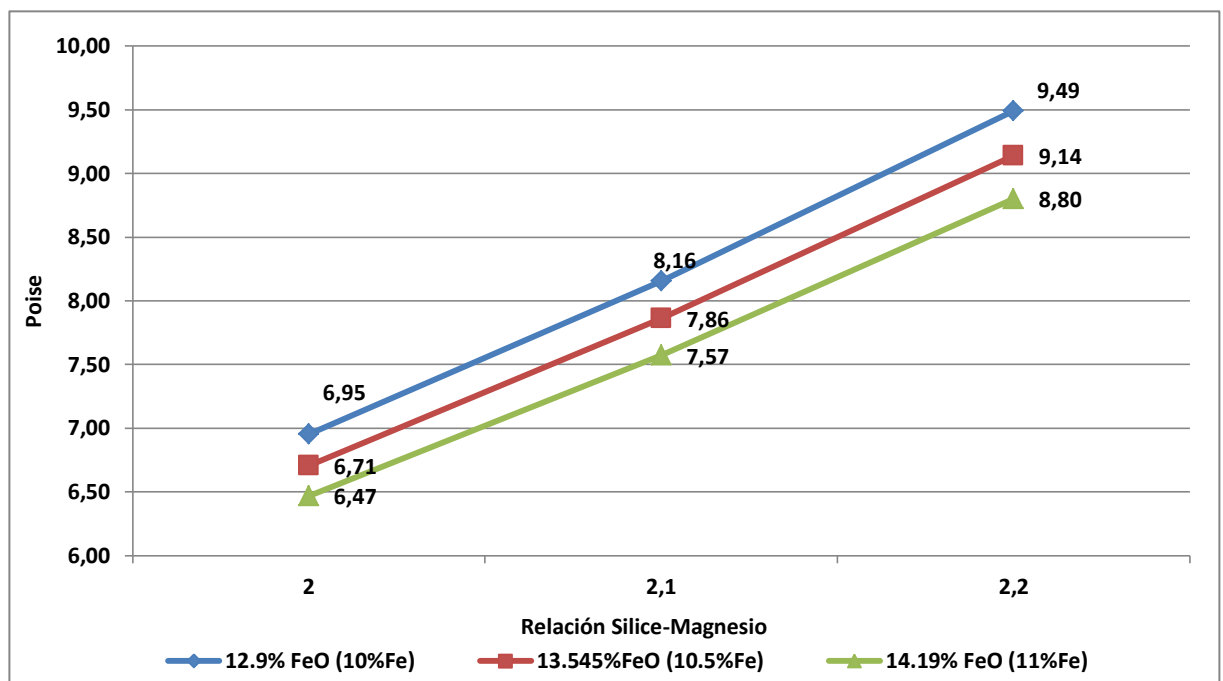
En la Figura 5, se observan 3 curvas correspondientes a valores de la viscosidad Riboud en función de la relación sílice-magnesio. Cada curva se realizó con

valores de hierro constantes de 10, 10,5 y 11% y la relación sílice-magnesio de 2, 2.1 y 2.2.

Debido a los cambios en la composición química en la escoria, la viscosidad aumenta a medida que aumenta la relación sílice-magnesio, mientras que el efecto del hierro es disminuirla, esto quiere decir que a mayor cantidad de hierro en la escoria, menor será la viscosidad.

Los cambios más drásticos se dan si cambia la relación sílice/magnesio a 2,2 y disminuye el hierro a 10%. En este caso se pasará de valores de viscosidad de 6.68 Poise a 9,05 Poise.

**Figura. 6 Viscosidad (CMSA) vs Relación Sílice-Magnesio.**



Fuente: Autor

La Figura 6 muestra diferentes valores de viscosidad para las mismas condiciones que la figura 5. Se puede observar que los valores son diferentes, esto debido a

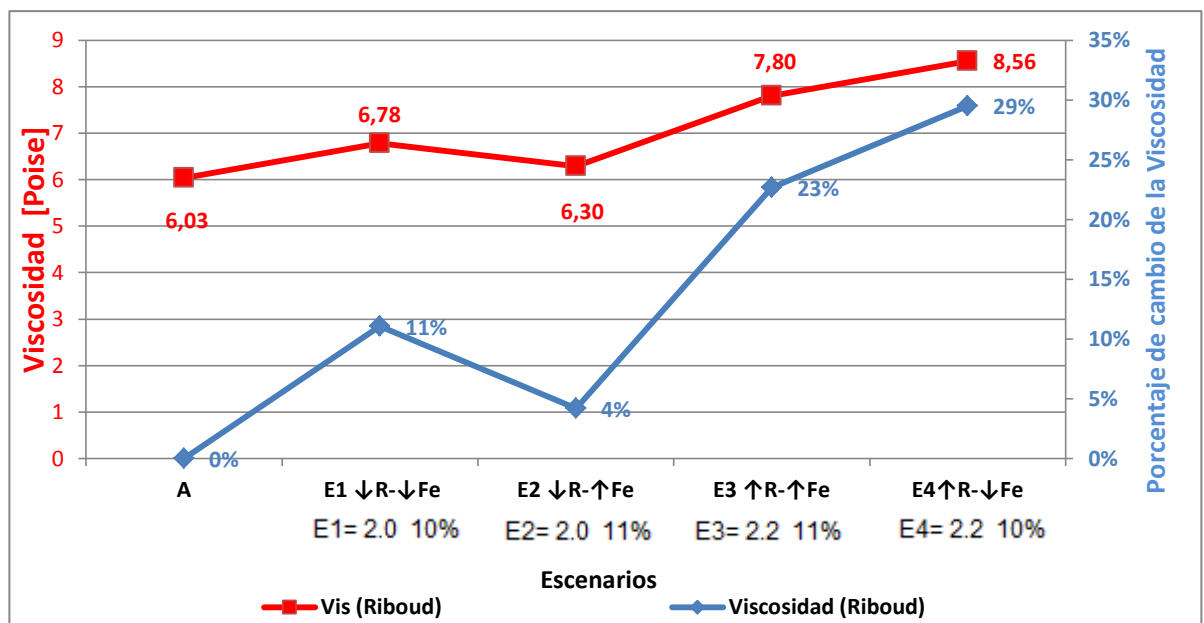
que al momento de modelar las ecuaciones se tuvieron en cuenta diferentes parámetros.

En la Figura. 5 debido a los cambios químicos en la escoria y suponiendo que cambie la relación sílice/magnesio de valores de 2, porcentajes de hierro de 11% a relación 2.2 y porcentajes de hierro de 10%, se podría inferir que habrá un cambio del 30% con respecto a la viscosidad, pasando de valores de 6,47 a 9,49 Poise.

Las gráficas anteriores se realizaron para comprender el efecto de la relación sílice/magnesio y el hierro en la viscosidad.

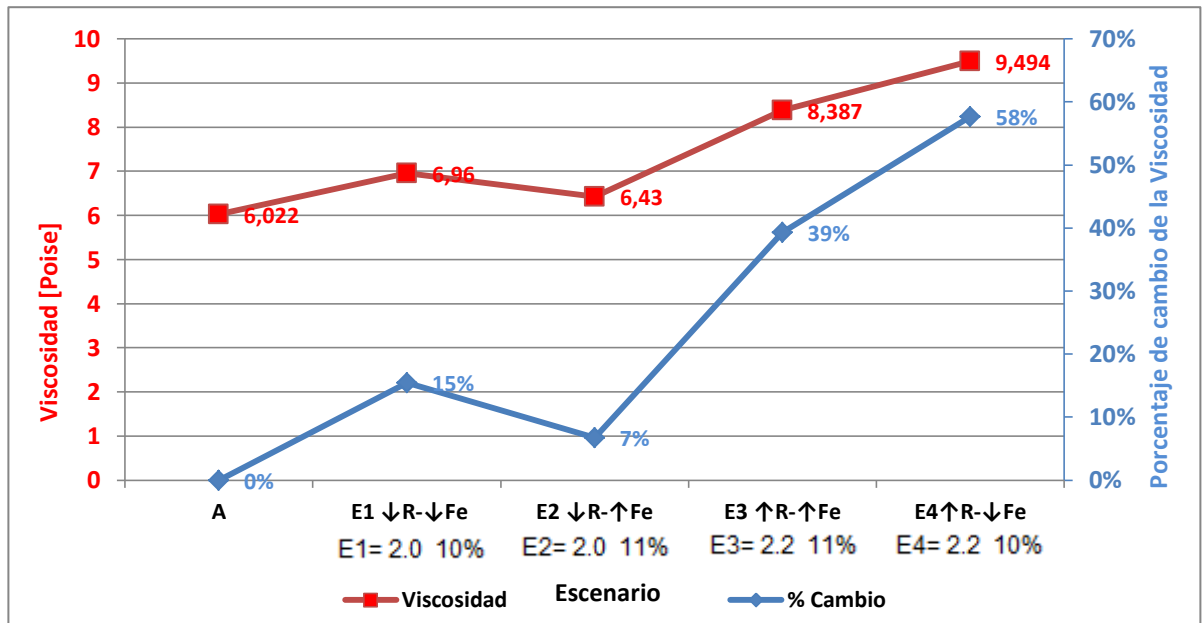
En la Figura 7 y en la Figura 8 se observa los cambios con respecto a la operación actual y sus porcentajes respectivos, de acuerdo con posibles escenarios que se han propuesto en el presente trabajo.

**Figura 7. Viscosidad (Riboud), Porcentaje de Cambio vs Relación Sílice-Magnesio**



*Fuente: Autor*

**Figura. 8 Viscosidad (CMSA), Porcentaje de Cambio vs Relación Sílice-Magnesio.**



**Fuente:** Autor

En la Figura 7 y la Figura 8 se presentan cambios con respecto al escenario A, estos cambios se deben a los aumentos o disminuciones de la relación sílice/magnesio y de los porcentajes de hierro. Se puede afirmar que al aumentar los porcentajes de hierro y manteniendo la relación sílice/magnesio constante la viscosidad disminuye, sin embargo los cambios con mayor impacto en la viscosidad se tendrán cuando se varíe la relación sílice magnesio.

Para los dos métodos anteriores, ya sea Riboud o CMSA se observan las mismas tendencias de la viscosidad, los porcentajes de cambio son mayores para el CMSA a causa de ajustes realizados por el equipo de diseño del programa SlagAn32 basado en las condiciones de operación y las propiedades químicas de la escoria en Cerro Matoso S.A.

La convección en los hornos generan impactos en la operación dado que afecta los siguientes aspectos: ritmo de fusión del horno, presencia de escoria en las coladas, temperatura del metal, pérdidas de níquel en la escoria y facilidad para sangrar el horno.

Las nuevas viscosidades con los escenarios estudiados tendrán un aumento en el más extremo de los casos (10 % Fe y relación sílice-magnesio 2.2) de un 29% con respecto a la viscosidad actual, pasando de la operación actual (A) al escenario 4 (E4).

A continuación se describe cómo afectan los aspectos mencionados anteriormente en la operación de los hornos eléctricos.

### **Ritmo de fusión del horno**

El ritmo de fusión del horno se verá afectado a causa de las menores fuerzas convectivas en el horno eléctrico, dicho esto la escoria tendrá una menor distribución de la escoria sobrecalentada [1]

### **Presencia de escoria en las coladas**

Cuando la viscosidad en las escorias es muy baja estos eventos se hacen muy frecuentes debido al arrastre de estas que genera el flujo de metal, para un control de estos eventos, el nivel de metal en el horno se aumenta para disminuir las salidas de escoria por las piqueras de metal. [5]

Existe una relación para calcular el nivel de metal en el horno, el centro geométrico del agujero del primer bloque es el sistema de referencia, cada centímetro hacia arriba a partir de este punto nos representa 27 toneladas de metal. El nivel máximo de metal en el horno es alrededor de 20 centímetros (540 Toneladas), se espera que el nivel de metal en el horno sea de 170 toneladas Esto quiere decir que el metal tendrá una altura de 6.3 cm en el horno.

**Figura 9. Bloque de la piquera de metal.**



**Fuente:** Autor.

### **Efecto del cambio de la conductividad eléctrica**

La impedancia de la escoria de Cerro Matoso S.A. en condiciones de trabajo normal está determinada en valores de alrededor de 45 mΩ.

El control para la operación de horno eléctrico está basado en el control de la impedancia total del sistema, la cual consta de la suma de la impedancia de la escoria, del arco eléctrico de los electrodos y del sistema de transformadores. A causa del aumento de la resistividad de la escoria (disminución de la conductividad por aumento de la viscosidad), la impedancia de esta incrementa, a causa de este aumento el sistema para trabajar con los valores de set point normales disminuirá la impedancia del arco, al disminuir esta y aumentar la de la escoria, la potencia de la escoria incrementa, la ecuación que rige estos comportamientos se muestra a continuación:

$$Z_{total} = Z_{escoria} + Z_{arco} + Z_{transformadores} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$PA = I^2 * R \quad \text{Ecuación 4}$$

$$PB = I^2 * R \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

*Z*: impedancia [Ω]

*PA*: Potencia del arco [W]

*PB: Potencia del baño [W]*

*I: Corriente [V]*

*R: Resistividad [ $\Omega$ ]*

El sistema de control de los hornos eléctricos cuenta con ajustes de potencia del arco y potencia del baño de escoria, para condiciones de trabajo normal se ajusta un set point de 0,45 en la relación PA/PB, debido al aumento de resistividad de la escoria la impedancia de ésta aumenta, disminuyendo del arco, al disminuir el arco disminuye PA.

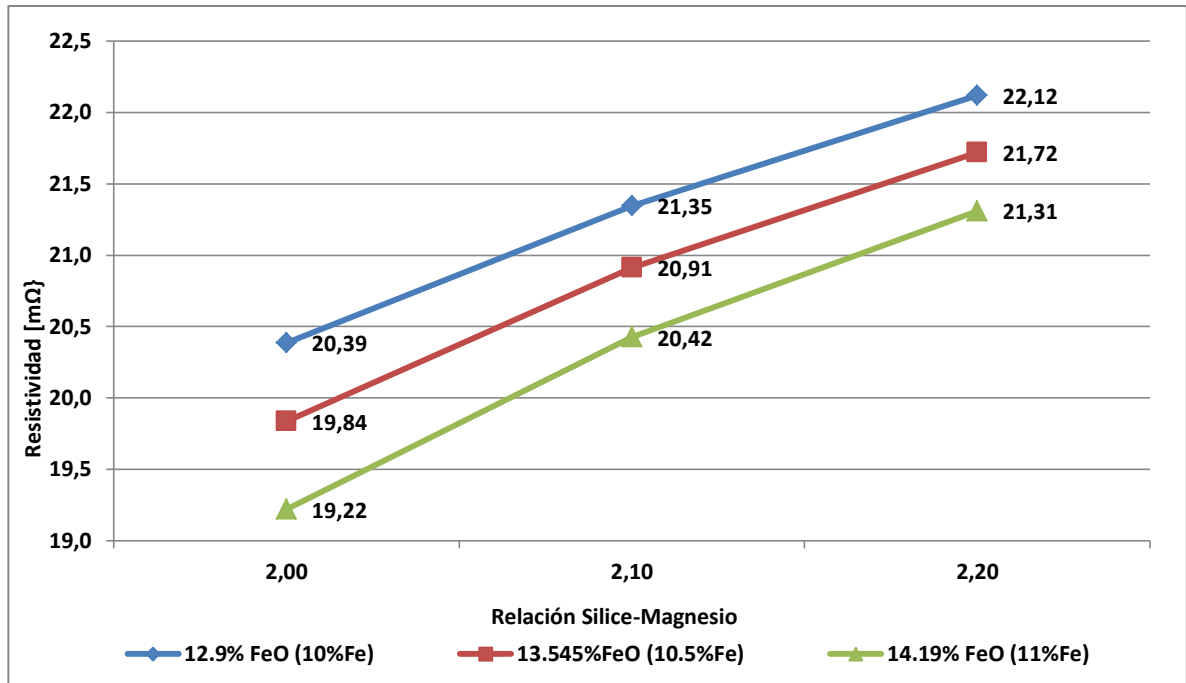
La resistividad para la escoria y el arco son diferentes debido a que los medios que conducen la corriente no son los mismos, el medio que conduce la electricidad de la escoria es ella misma, mientras que para el arco es el sistema de placas de inducción de los electrodos.

Para evitar problemas en la operación se debe ajustar los valores de la impedancia total del sistema ajustando el set point.

El impacto en el suministro de energía del horno eléctrico no se verá afectado debido a que éste depende de la impedancia del sistema de transformadores, el cual no tendrá variaciones. Se espera que no haya cambios en los transformadores.

En la Figura 10 y en la Figura 11 se muestran las tendencias y la variación de la resistividad de la escoria respectivamente.

**Figura. 10 Resistividad vs Relación Sílice-Magnesio**

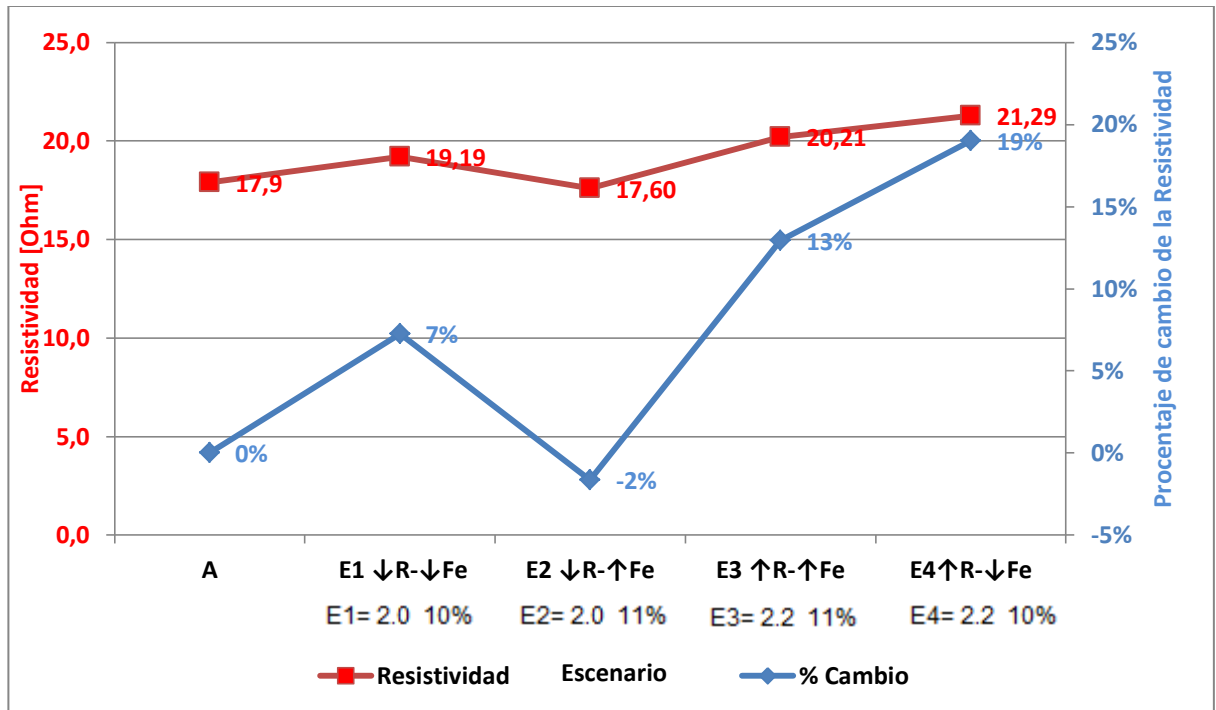


**Fuente:** Autor

La figura 10 ilustra el comportamiento de la resistividad en función de la relación sílice/magnesio. Los cambios de mayor impacto se dan si cambia la composición química de la escoria y esto afecte la relación sílice-magnesio; de esta manera pasaría de valores de 2,0 a 2,2 y aumentaría las cantidades de hierro de 10% a 11%.

La Figura 11 se observa los posibles escenarios para la operación y su porcentaje de cambio vs la resistividad.

**Figura 11 Resistividad y Porcentaje de Cambio vs Relación Sílice-Magnesio**



**Fuente:** Autor

Los cambios en la resistividad de la escoria son lo suficientemente significativos para impactar el proceso, se consideran cambios significativos aumentos o disminuciones de la resistividad porcentajes del 10%. Si aumenta la relación sílice magnesio hasta 2.2 (E4) y el porcentaje de hierro permanece en 10%, habrá un cambio de aproximadamente el 19%.

La mayor resistividad indica una mayor temperatura de la escoria bajo las mismas condiciones de trabajo.

### Consumo de electrodos

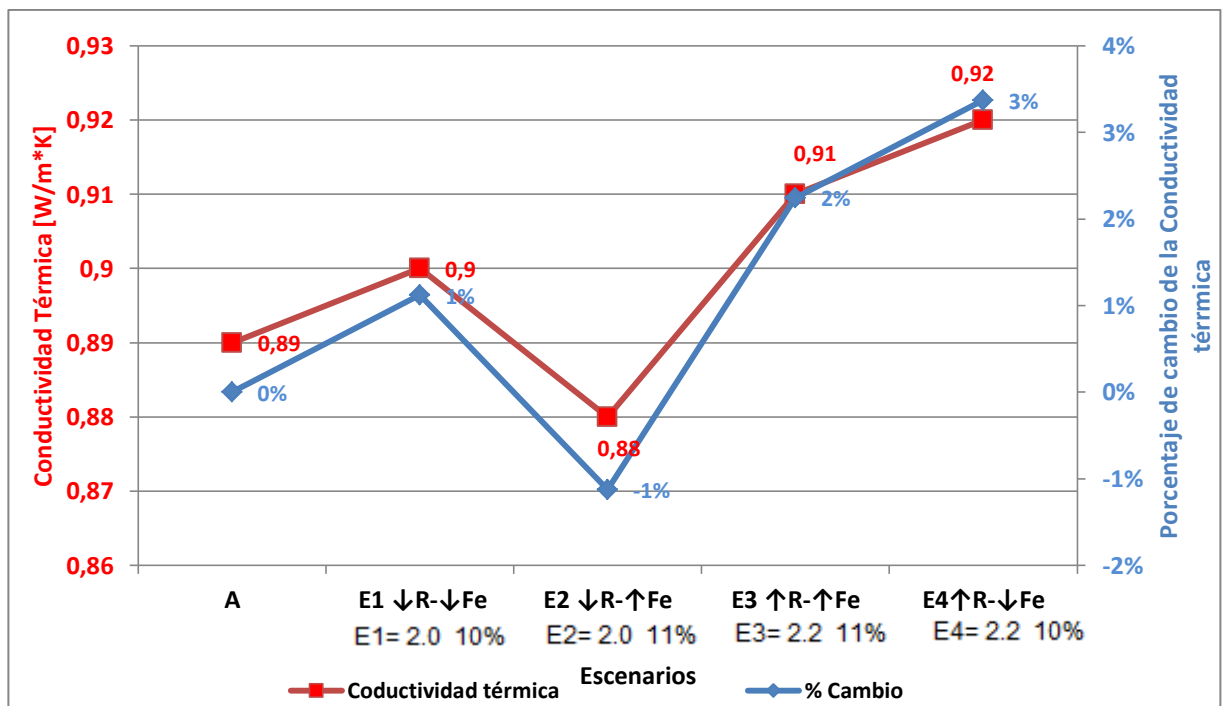
El consumo de electrodos es influenciado por los niveles de corriente, el aumento de corriente no será significativo puesto que no hay cambios en el sistema de transformadores, se debe comprobar en la práctica si las disminuciones de impedancia generan aumentos en el consumo de pasta electrodica..

### Efecto del cambio de la conductividad térmica

A causa de la menor impedancia de los electrodos los movimientos convectivos en la escoria serán mayores y la conductividad térmica no cambiará de manera significativa, en la operación del horno eléctrico con baja relación sílice/magnesio, se tiene una escoria con baja viscosidad, debido a esto mayores movimientos.

En la operación ubicada en el valle Figura 1 la viscosidad aumentará y al tener un mayor movimiento convectivo debido a la baja impedancia de los electrodos se tendrá escorias con mayor agitación debido a los campos magnéticos generados por la corriente que circula en ella. En estado sólido la escoria se ve afectada por su naturaleza y la solidificación, a continuación en la Figura 12 se observa el comportamiento de la conductividad térmica de los 4 escenarios comparados con la operación actual (A) y su porcentaje de cambio.

**Figura 12 Conductividad Térmica, Porcentaje de Cambio vs Relación Sílice-magnesio**



Fuente: Autor

La conductividad térmica no tendrá mayor modificación debido a los cambios de la composición química de la escoria ya que los porcentajes de esta propiedad varían un máximo de 3% con respecto al escenario A, estos porcentajes no son significativos para impactar la operación.

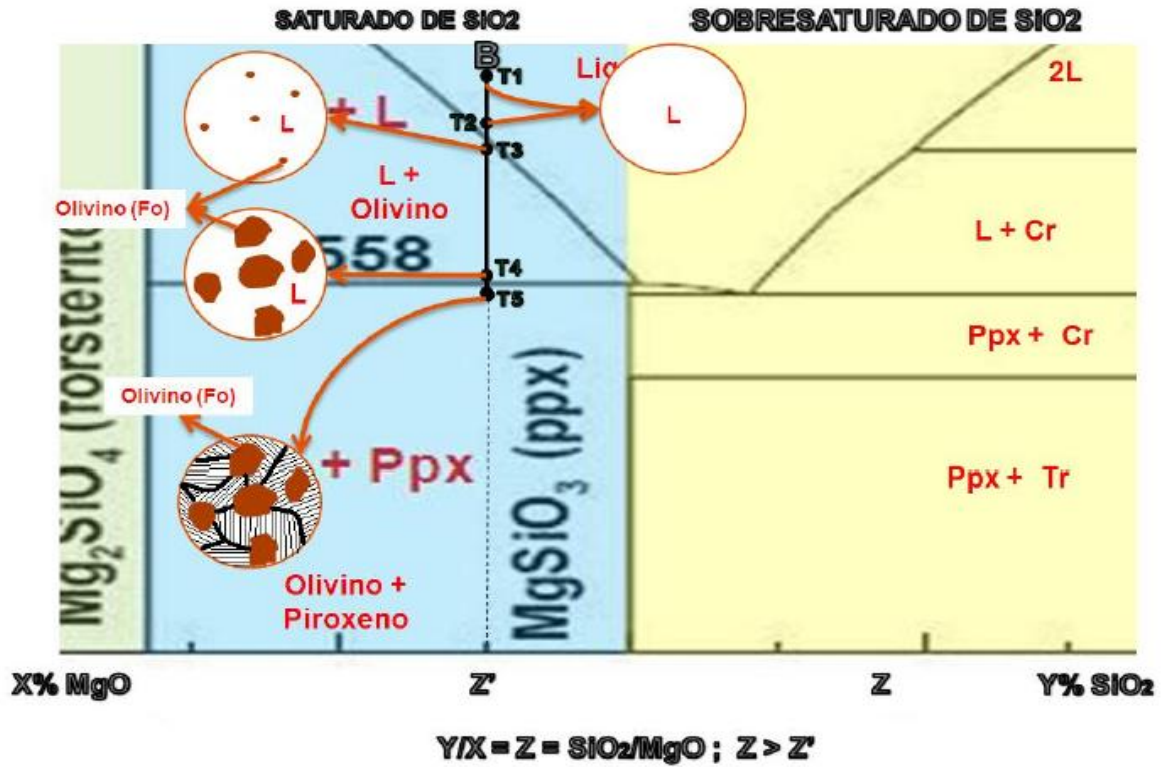
### **Solidificación**

La solidificación hace referencia al proceso químico en el cual la escoria cambia de estado líquido a sólido, producido por una disminución de la temperatura, en el estudio de la solidificación de las escorias, es de importancia las especies minerales que nuclean, crecen y se solidifican durante el proceso de enfriamiento se analizan las diferencias cuando las estas cambian su composición química.[2]

Es de gran importancia conocer la costra de escoria que se forma en el horno y la estabilidad de ésta, basada en sus principales especies mineralógicas y el comportamiento cuando se encuentran expuestas a condiciones similares a las del horno eléctrico.

Para las escorias que actualmente se encuentran en Cerro Matoso S.A., las cuales corresponde a baja relación sílice-magnesio, se analizó en base a un diagrama binario  $\text{SiO}_2\text{-MgO}$  y se encontró que la especie en mayor cantidad eran olivinos, a continuación se muestra un diagrama realizado en Factsage<sup>TM</sup>, el cual es un diagrama Pseudo-binario donde se puede apreciar como solidifican las escorias y su respectiva composición.

Figura 13. Proceso de enfriamiento y solidificación de una escoria de baja relación SiO<sub>2</sub>/MgO.



*Fuente:* Operación con Mineral de Baja relación SiO<sub>2</sub>/MgO. Montelibano, informe interno, Cerro Matoso S.A. ARANGO, H.J

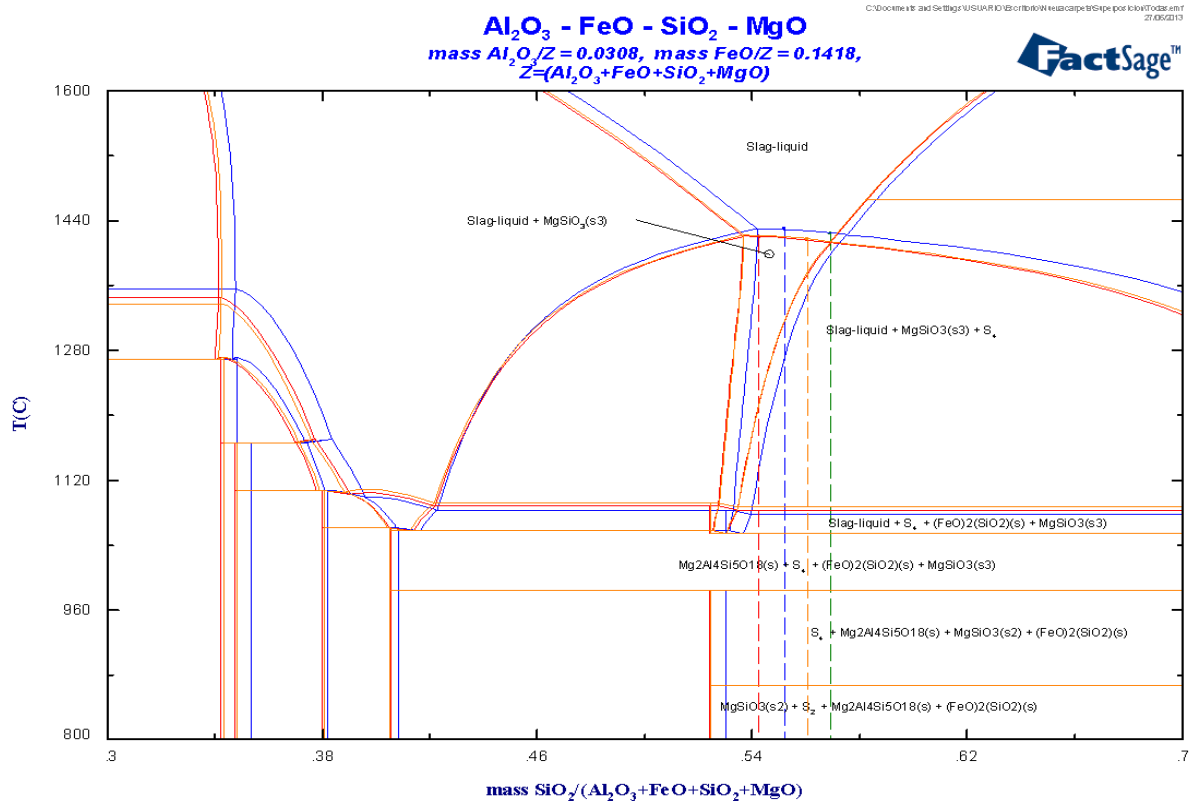
Para los escenarios propuestos a continuación se presentan la Figura 11 y la Figura 12 en las que se puede observar donde se ubican éstos y su composición, basados en la información obtenida del programa FactSage™.

Tabla 2. Posibles Escenarios de operación Futura

	E1=↓R-↓Fe		E2=↓R-↑Fe		E3=↑R-↑Fe		E4 =↑R-↓Fe	
	SiO2/MgO	%Fe	SiO2/MgO	%Fe	SiO2/MgO	%Fe	SiO2/MgO	%Fe
	2.0	10	2.0	11	2.2	11	2.2	10
SiO2	55.16%		54.22%		56.02%		56.89%	
MgO	27.58%		27.11%		25.48%		25.865%	
FeO	14.18%		15.59%		15.63%		14.18%	
Al2O3	3.08%		3.08%		2.86%		3.08%	

Fuente: Autor

Figura 14 Diagramas Pseudobinario Escorias



Fuente: Autor

Para el diagrama pseudobinario completo Figura 14 se puede observar que especies comienzan a solidificar, cabe resaltar que es de equilibrio y por lo tanto puede variar teniendo en cuenta el objeto de estudio, para predecir la composición de la escoria este diagrama puede ser de gran utilidad.

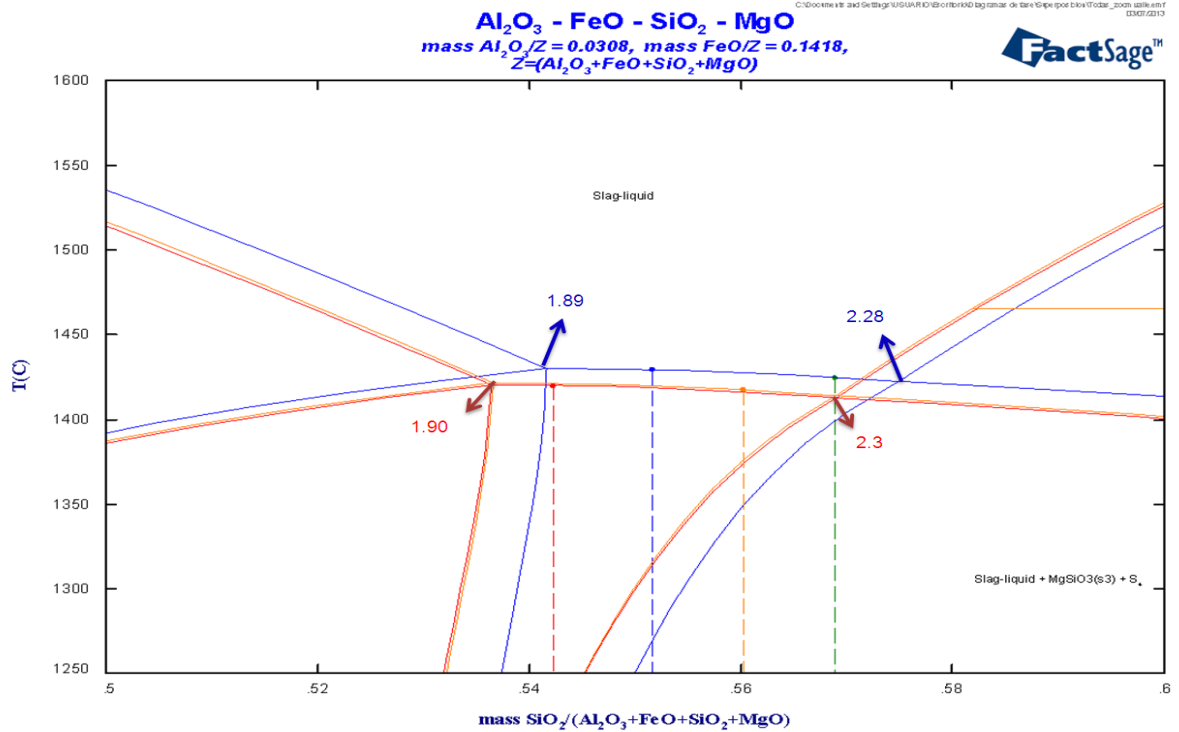
En la Figura 15 se describe cuál es el valor aproximado de la temperatura de liquidus para los escenarios propuestos y los valores exactos de la relación sílice/magnesio a las cuales se encuentra en el valle, Figura 1. Este tipo de diagramas es utilidad para conocer de manera más exacta estas temperaturas de las escorias dependiendo de su composición, en la Tabla 3 se encuentran los escenarios con su respectiva temperatura de liquidus (Aproximada).

**Tabla 3. Temperatura de liquidus de escenarios.**

<b>Escenario</b>	<b>Temperatura de liquidus [°C]</b>
<b>E1</b>	<b>1425</b>
<b>E2</b>	<b>1420</b>
<b>E3</b>	<b>1419</b>
<b>E4</b>	<b>1424</b>

*Fuente: Autor*

Figura 15. Diagrama Pseudobinario Escorias (Acercamiento).



Fuente: Autor.

En las tablas que se presentan a continuación se observan las especies que solidifican para cada escenario y su respectivo porcentaje a una temperatura de 1040 °C.

Tabla 4. Escenario de operación 1(Especies solidificadas)

<b>E1=↓R-↓Fe (SiO2/MgO=2.0, Fe=10%)</b>		
Especie	Porcentaje	
MgSiO3 (proto-estantita)	66.5%	Piroxeno
(FeO)2(SiO2) Fayalita	20.10%	Olivino
SiO2 Tridimita	5.38%	Cuarzo
Mg2Al4Si5O18	8.03%	Cordierita

Fuente: Autor.

**Tabla 5. Escenario de operación 2. (Especies solidificadas)**

<b>E2=↓R-↑Fe (SiO2/MgO=2.0, Fe=11%)</b>		
<b>Especie</b>	<b>Porcentaje</b>	
<b>MgSiO3 (proto-estantita)</b>	<b>64.48%</b>	<b>Piroxeno</b>
<b>(FeO)2(SiO2) Fayalita</b>	<b>22.10%</b>	<b>Olivino</b>
<b>SiO2 Tridimita</b>	<b>8.83%</b>	<b>Cuarzo</b>
<b>Mg2Al4Si5O18</b>	<b>4.56%</b>	<b>Cordierita</b>

Fuente: Autor.

**Tabla 6. Escenario de Operación 3. (Especies solidificadas)**

<b>E3=↑R-↑Fe (SiO2/MgO=2.2, Fe=11%)</b>		
<b>Especie</b>	<b>Porcentaje</b>	
<b>MgSiO3 (proto-estantita)</b>	<b>61.35%</b>	<b>Piroxeno</b>
<b>(FeO)2(SiO2) Fayalita</b>	<b>20.10%</b>	<b>Olivino</b>
<b>SiO2 Tridimita</b>	<b>9.69%</b>	<b>Cuarzo</b>
<b>Mg2Al4Si5O18</b>	<b>8.83%</b>	<b>Cordierita</b>

*Fuente: Autor*

**Tabla 7. Escenario de Operación 4(Especies solidificadas)**

<b>E4 =↑R-↓Fe (SiO<sub>2</sub>/MgO=2.2, Fe=10%)</b>		
<b>Especie</b>	<b>Porcentaje</b>	
<b>MgSiO<sub>3</sub> (proto-estantita)</b>	<b>61.35%</b>	<b>Piroxeno</b>
<b>(FeO)<sub>2</sub>(SiO<sub>2</sub>) Fayalita</b>	<b>20.10%</b>	<b>Olivino</b>
<b>SiO<sub>2</sub> Tridimita</b>	<b>9.69%</b>	<b>Cuarzo</b>
<b>Mg<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>Si<sub>5</sub>O<sub>18</sub></b>	<b>8.83%</b>	<b>Cordierita</b>

*Fuente Autor*

Los escenarios E3 y E4 correspondientes a la tabla 6 y la Tabla 7 respectivamente, poseen los mismos porcentajes de solidificación para cada especie, no se conoce la razón por la cual esto sucede ya que se espera que para diferentes composiciones químicas los porcentajes de las especies sean diferentes, también podemos inferir que a medida que estemos más cerca de la alta relación los porcentajes de Tridimita van a ser mayores.

Para las tablas de especies solidificadas se puede apreciar que la especie con mayor porcentaje en la solidificación es el piroxeno con alrededor de 60%, seguido por los olivinos con 20%, los valores restantes se distribuyen en cuarzo y cordierita, siendo mayor los valores de cuarzo para los escenarios E3 y E4.

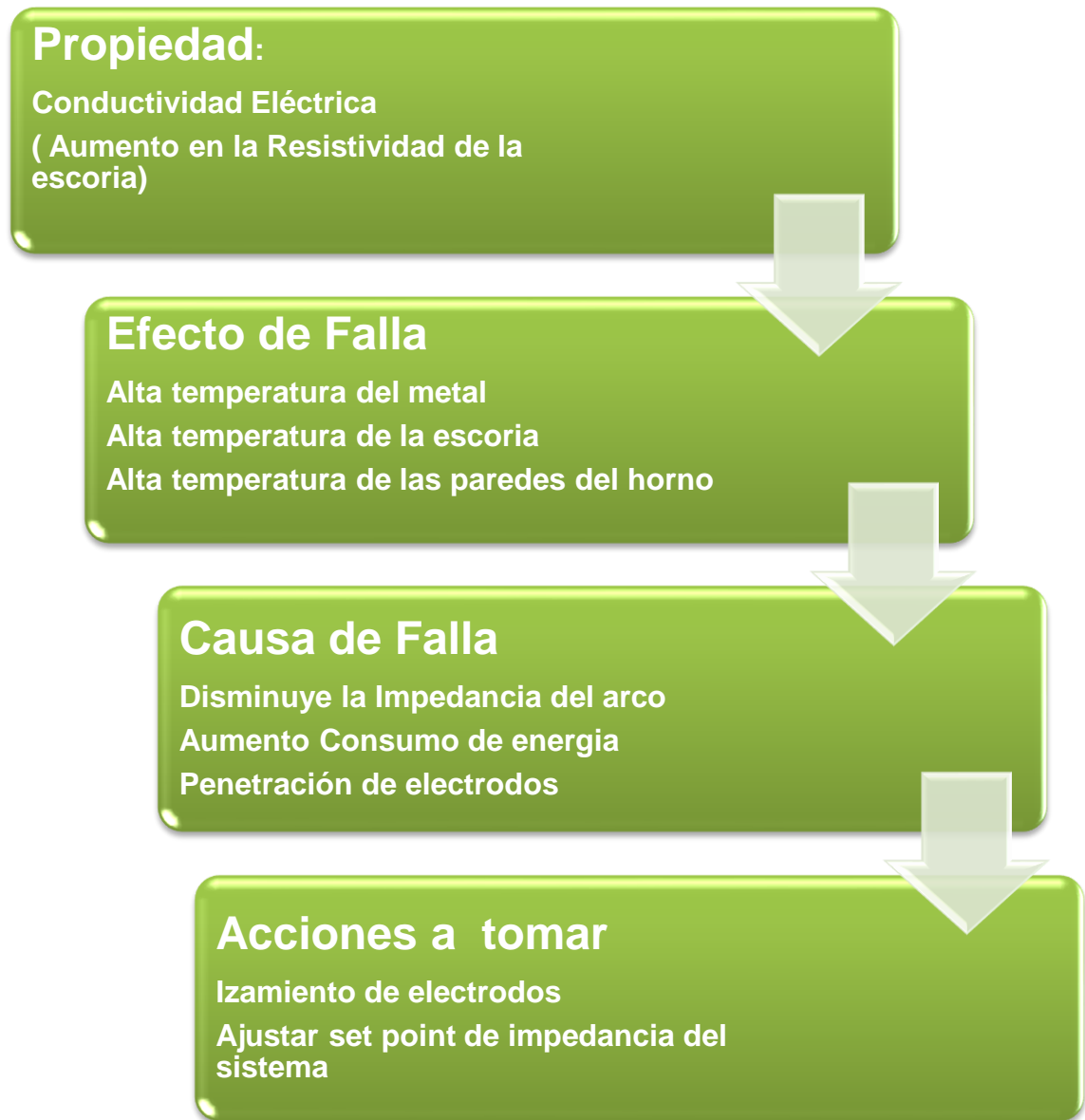
4.1.4 Generación de un modelo operativo para el funcionamiento de los hornos eléctrico en CMSA, basado en las variaciones que se podrían presentar debido al cambio de la composición química de la escoria.

Figura 16. Carta de Navegación en función de las propiedades químicas de la escoria (Viscosidad)



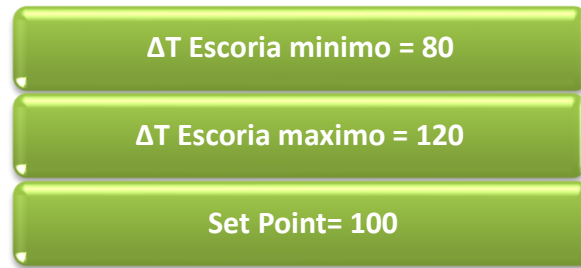
*Fuente: Autor*

**Figura 17. Carta de Navegación en función de las propiedades químicas de la escoria (Conductividad Eléctrica)**



**Fuente:** Autor

**Figura 18. Parámetros temperatura de la escoria**



*Fuente: Autor*

**Figura 19. Carta de Navegación en función de las propiedades químicas de la escoria (Conductividad Térmica).**



*Fuente: Autor*

Las Figuras 16, 17, 18 y 19, muestran la carta de navegación de los hornos eléctricos en Cerro Matoso S.A. en función de las propiedades más importantes de la escoria, es una guía práctica del manejo general de los hornos en CMSA y de los efectos globales que impactan el horno.

La tabla 8 ilustra las variables que se controlan con mayor rigor en los hornos eléctricos en CMSA.

**Tabla 8 Impactos en factores operativos.**

<b>Factor operativo</b>	<b>Posible rango</b>	<b>Tendencia</b>
Impedancia	40-45 $\Omega$	↑
$\Delta T$ Escoria	80-120 $^{\circ}\text{C}$	↑
Nivel de Metal	150-200 Ton	↓

**Fuente** Autor

Los valores observados en el posible rango son magnitudes propuestas basadas en modelos y ecuaciones que deben ser validadas en la práctica.

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para realizar el informe fue necesario de la participación de las U.N. DRKEF y S.T.O.N. en Cerro Matoso S.A., esto debido a que el proceso hace necesario que cada paso sea monitoreado de forma constante.

A lo largo de la elaboración del informe se evidenció que los programas utilizados para el control de proceso son de vital importancia para el control de los hornos, sin embargo no todos los programas cumplen a cabalidad su propósito, programas como Slagan32 y VisualTemp no son de ayuda para llevar un control de todas las propiedades de la escoria, estos programas fueron adquiridos para trabajar con relaciones sílice magnesio en rangos específicos; al cambiar la composición química de la escoria los programas arrojan valores incorrectos de las propiedades de la escoria, por ello se hizo necesario desarrollar ecuaciones en base a estos programas.

Las teorías aplicadas a los comportamientos de la escoria, están basados en estudios hechos en laboratorios[4], el comportamiento de las escorias dentro del horno eléctrico en la práctica posee algunas variantes y este trabajo no tiene como objetivo abordar esta clase de temas.

## 6. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los estudios realizados; los datos obtenidos para realizar un modelo operativo para los hornos eléctricos, los cambios químicos y como estos conllevan a cambios de las propiedades fisicoquímicas de la escoria se puede concluir.

- Antes de comenzar a realizar los estudios correspondientes se comprobó que los rangos de relación sílice/magnesio que se esperaban son menores que los que se tendrán, esto debido a que los cambios presupuestados se dieron de manera acelerada. Se esperaba que la relación sílice magnesio estuviese en un rango de 1,8 a 2, pero en la práctica se tendrán relaciones sílice magnesio entre 2 y 2,2.
- Los cambios en la composición en la escoria obedecen a modificaciones de los porcentajes de sílice, hierro y magnesio, mientras las cantidades de alúmina permanecen constantes. Se puede afirmar que la relación sílice/magnesio está entre valores 2 y 2,2 mientras que los porcentajes de hierro bajaran a porcentajes de 10% y 11%.
- La viscosidad de la escoria se incrementa a medida que aumenta la relación sílice magnesio y disminuye a medida que aumenten los porcentajes de hierro, basado en los escenarios posibles de operación se puede concluir que los aumentos de viscosidad podrían llegar hasta un 58% con respecto a la operación actual.
- La temperatura de liquidus de las escorias no se modifican de manera considerable ya que la operación actual y la operación en el valle manejan los mismos rangos de temperatura. Los porcentajes de hierro, otro factor que modifica el valle no cambiará de manera considerable para afectar estas temperaturas por lo tanto los valores de las temperaturas de liquidus serán iguales o similares a los actuales.

- La conductividad eléctrica se verá afectada por un aumento de la resistividad de la escoria, el aumento de esta resistividad tiene efectos potenciales de falla como calentamiento de la escoria y metal. Las causas de falla debido a la ocurrencia de estos efectos suelen ser una disminución de la impedancia del arco, aumento del consumo de los electrodos y posibles inmersiones de los electrodos. Para evitar fallos se debe tomar medidas al respecto; Izamiento de electrodos, ajustes de Set Point de impedancia.
- La disminución de la viscosidad ocasiona que la temperatura de la escoria sea menor en el horno debido a la falta de los movimientos convectivos generando una dificultad para realizar coladas y evacuaciones de escoria, las causas de falla suelen ser alto nivel de escoria, alto nivel de metal en el horno y aumento de la temperatura del techo del horno.
- La costra de escoria está controlada por la solidificación de las especies, en la operación en el valle se tendrá una escoria estable debido a que los porcentajes de piroxeno son alrededor del 60%. Por experiencia en la operación de los hornos de la U.N. DRKEF es de vital importancia el monitoreo de la misma con el fin de prevenir el calentamiento del horno y disminuir los consumo de agua del sistema de enfriamiento.
- Propiedades como conductividad térmica, tensión superficial y calor específico no tienen un impacto significativo en la modificación de la operación de los hornos eléctrico bajo los cambios que se presenten en la composición química de la escoria, por tanto no se incluyen en el modelo operativo o carta de navegación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EMPRESA CERRO MATOSO S.A. Manual del Proceso de Producción de Ferroníquel. Cerro Matoso S.A., 2005.
- [2] ARANGO, H.J. Operación con Mineral de Baja relación SiO<sub>2</sub>/MgO. Montelibano, informe interno, Cerro Matoso S.A. 2010.
- [3] Reduction of Furnace Power al lowest Available Tap: Dip Test results and furnace Idling study. Hatch- 2009, transmittal H333399-0000-05-124-001 Rev 0- Proyecto NOSS.
- [4] Characterization of Cerro Matoso Slags, present and future Composition – Torstein Utigard, University of Toronto, 2008.
- [5] Ferrer, Carlos Operación con baja relación SiO<sub>2</sub>/MgO 2010.
- [6] Solar, M.Y. Mechanical Slag Losses in Laterite Smelting, 2009.
- [7] Meléndez, V., Guzmán, R. Determinación de Factores de Upgrading- Operación del otro lado del Valle, 2008.
- [8] DIAZ, ANA. Diagramas ternarios Escoria Cerro Matoso S.A, [diapositivas] Informe interno Cerro Matoso S.A, 2010.
- [9] EMPRESA CERRO MATOSO S.A. Manual de la subfase reducción y fusión de escoria. Cerro Matoso S.A., 2010.
- [10] OLIVEIRA; MILLER; MADÍAS. Tensión superficial, viscosidad y densidad de algunas escorias CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.En: Metal. 1999, Vol. 35 no.2,.p.91-99.
- [11] DIAZ, ANA. Diagramas ternarios Escoria Cerro Matoso S.A, Informe interno Cerro Matoso S.A, 2008.
- [12] HALF SKYE RESOURCES INC. FENIX Feasibility Study Slag Handling Design Basis November, 2005.
- [13] LERECH OSORIO SOHAD, Granulación de escoria en régimen de baja relación de SiO<sub>2</sub>/MgO en Cerro Matoso S.A, 2010.

## BIBLIOGRAFÍA

ARANGO, H.J. Operación con Mineral de Baja relación SiO<sub>2</sub>/MgO. Montelibano, informe interno, Cerro Matoso S.A. 2010.

Characterization of Cerro Matoso Slags, present and future Composition – Torstein Utigard, University of Toronto, 2008.

DIAZ, ANA. Diagramas ternarios Escoria Cerro Matoso S.A, [diapositivas] Informe interno Cerro Matoso S.A, 2010.

DIAZ, ANA. Diagramas ternarios Escoria Cerro Matoso S.A, Informe interno Cerro Matoso S.A, 2008.

EMPRESA CERRO MATOSO S.A. Manual de la subfase reducción y fusión de escoria. Cerro Matoso S.A., 2010.

EMPRESA CERRO MATOSO S.A. Manual del Proceso de Producción de Ferroníquel. Cerro Matoso S.A., 2005.

FERRER, Carlos Operación con baja relación SiO<sub>2</sub>/MgO 2010.

HALF SKYE RESOURCES INC. FENIX Feasibility Study Slag Handling Design Basis November, 2005.

LERECH OSORIO SOHAD, Granulación de escoria en régimen de baja relación de SiO<sub>2</sub>/MgO en Cerro Matoso S.A, 2010.

MELÉNDEZ, V., Guzmán, R. Determinación de Factores de Upgrading-Operación del otro lado del Valle, 2008.

OLIVEIRA; MILLER; MADÍAS. Tensión superficial, viscosidad y densidad de algunas escorias CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. En: Metal. 1999, Vol. 35 no.2, p.91-99.

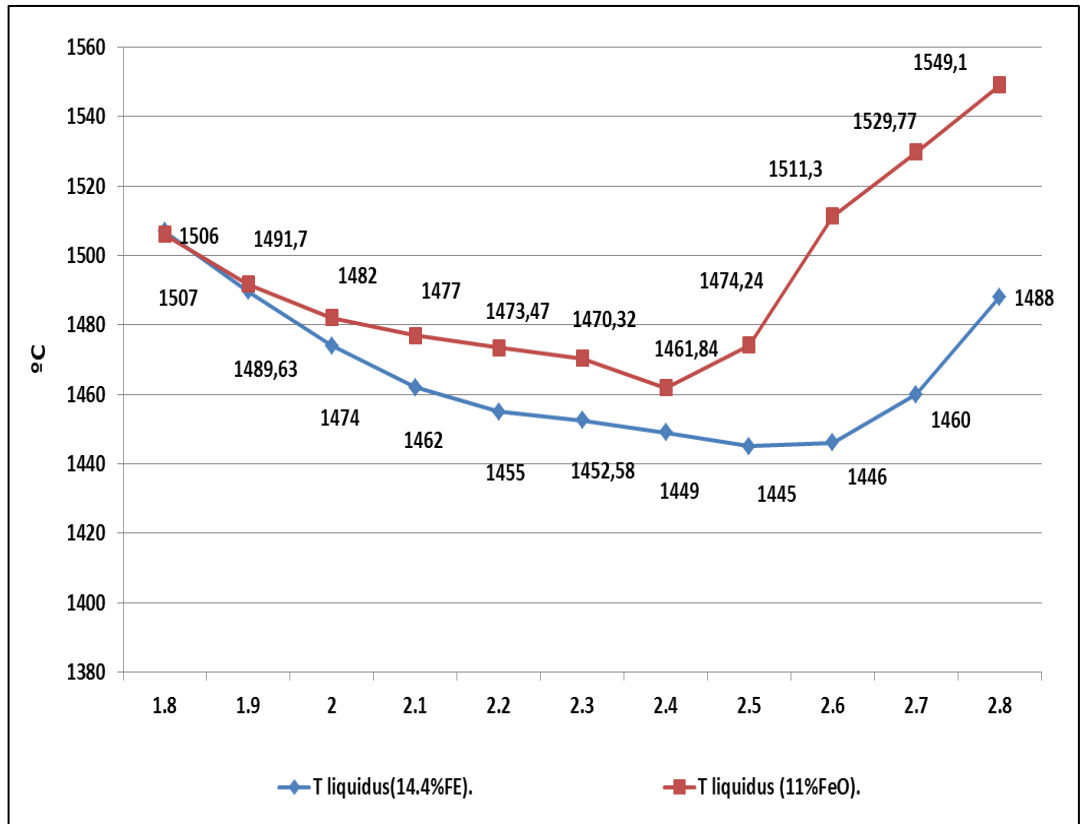
Reduction of Furnace Power at lowest Available Tap: Dip Test results and furnace Idling study. Hatch- 2009, transmittal H333399-0000-05-124-001 Rev 0- Proyecto NOSS.

SOLAR, M.Y. Mechanical Slag Losses in Laterite Smelting, 2009.

## ANEXO

### 1. Comportamiento temperatura de liquidus.

Figura. 20. Viscosidad vs Relación Sílice-Magnesio [1,8]



*Fuente Autor.*

La Figura 20 muestra el comportamiento de la temperatura de liquidus en función de la relación sílice-magnesio con composiciones constantes de hierro. Se observa que las regiones de la curva no están bien definidas. Los valores de temperatura fueron obtenidos con el programa Slagan32, con esta imagen se pudo comprobar que dicho programa no es el idóneo para realizar este tipo de análisis.

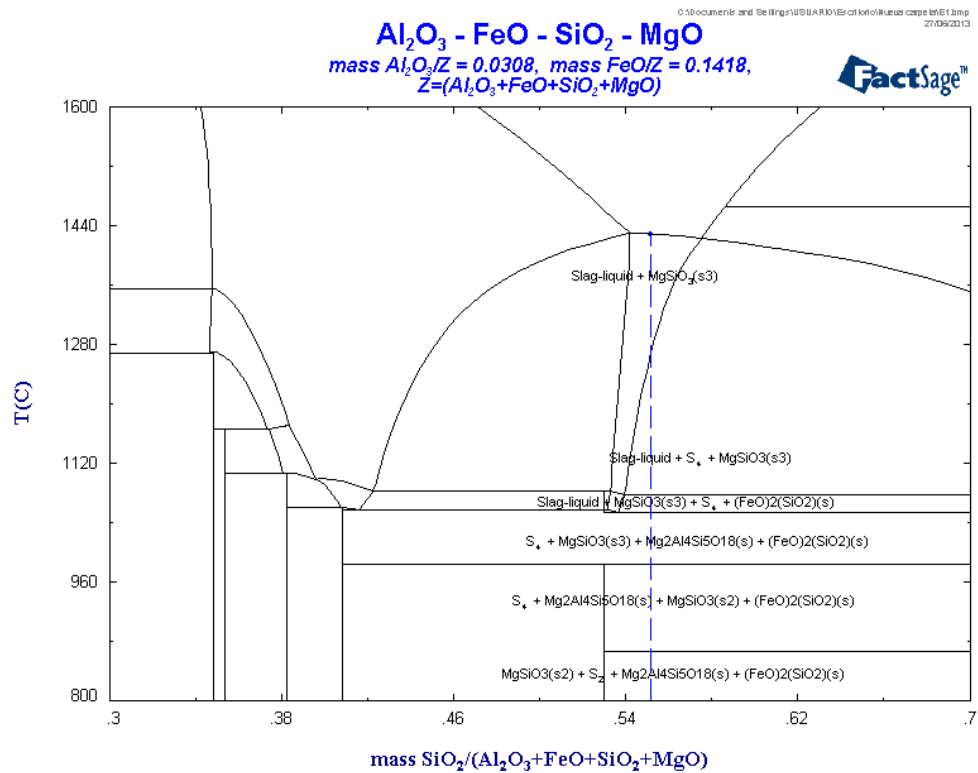
2. Imágenes de diagramas pseudobinarios de los posibles escenarios de operación.

Tabla 9. Posible escenario de operación 1.

	<b>E1=↓R-↓Fe</b>	
	<b>SiO2/MgO%Fe</b>	
	<b>2.0</b>	<b>10</b>
<b>SiO2</b>	<b>55.16%</b>	
<b>MgO</b>	<b>27.58%</b>	
<b>FeO</b>	<b>14.18%</b>	
<b>Al2O3</b>	<b>3.08%</b>	

Fuente Autor.

Figura 21. Diagrama pseudobinario Posible escenario de operación 1.



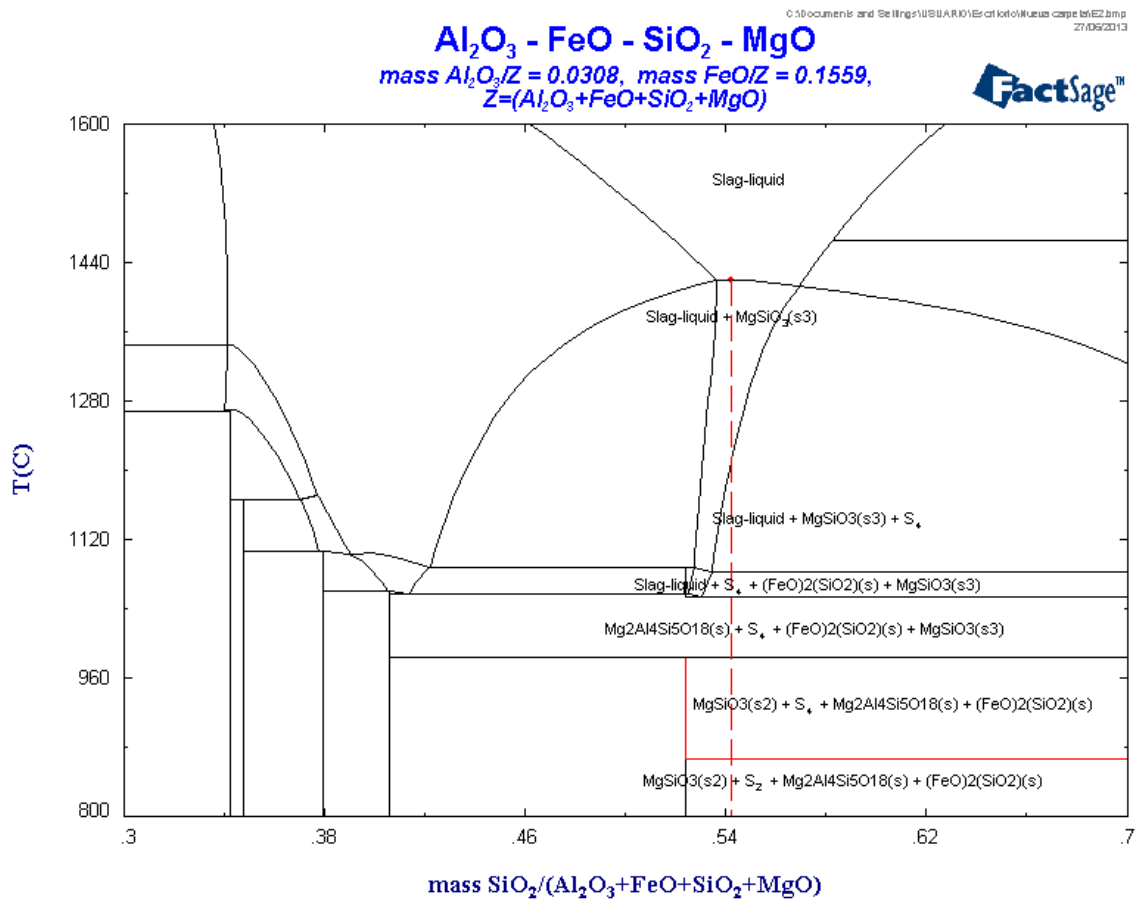
Fuente: Autor.

Tabla 10. Posible escenario de operación 2.

	<b>E2=↓R-↑Fe</b>	
	<b>SiO2/MgO%Fe</b>	
	<b>2.0</b>	<b>11</b>
<b>SiO2</b>	<b>54.22%</b>	
<b>MgO</b>	<b>27.11%</b>	
<b>FeO</b>	<b>15.59%</b>	
<b>Al2O3</b>	<b>3.08%</b>	

Fuente Autor

Figura 22. Diagrama pseudobinario posible escenario de operación 2.



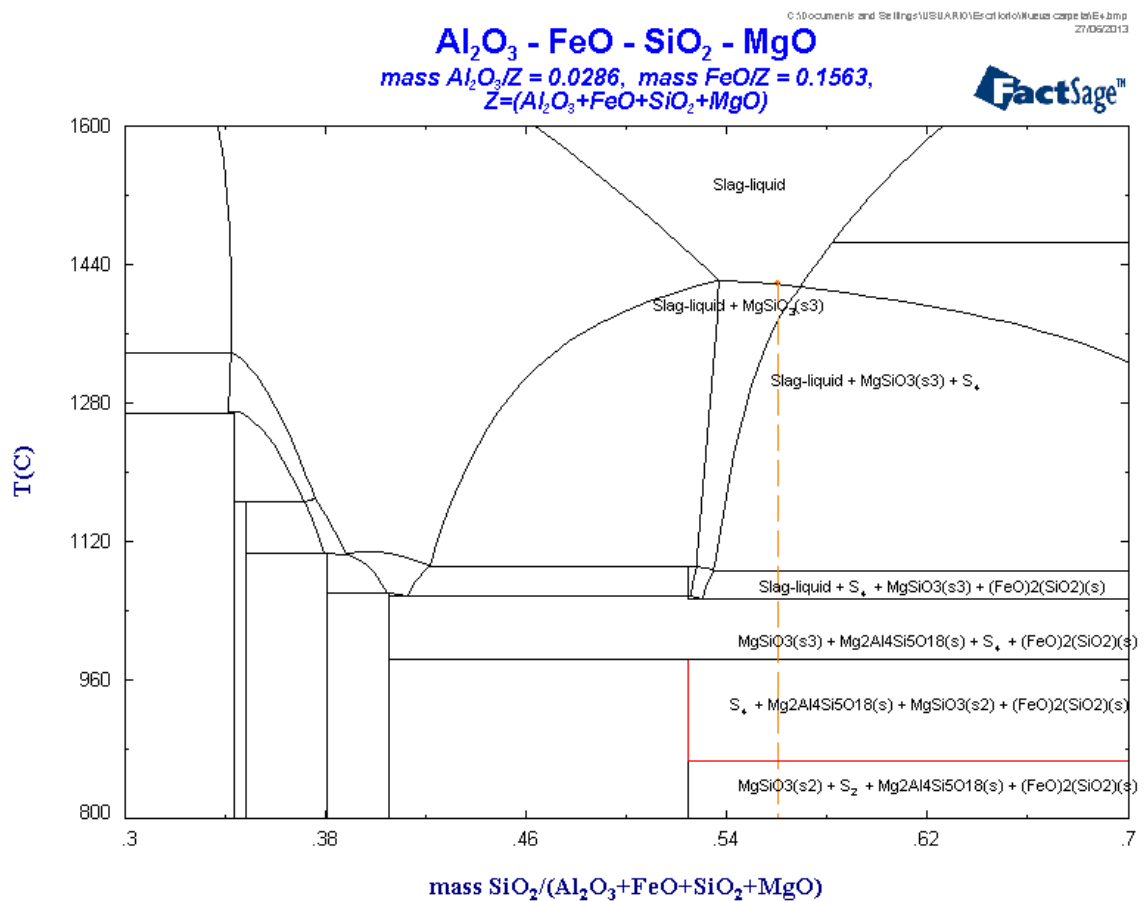
Fuente: Autor.

Tabla 11. Posible escenario de operación 3

E3=↑R-↑Fe	
SiO2/MgO%Fe	
	2.2   11
SiO2	56.02%
MgO	25.48%
FeO	15.63%
Al2O3	2.86%

Fuente Autor.

Figura 23. Diagrama pseudobinario posible escenario de operación 3.



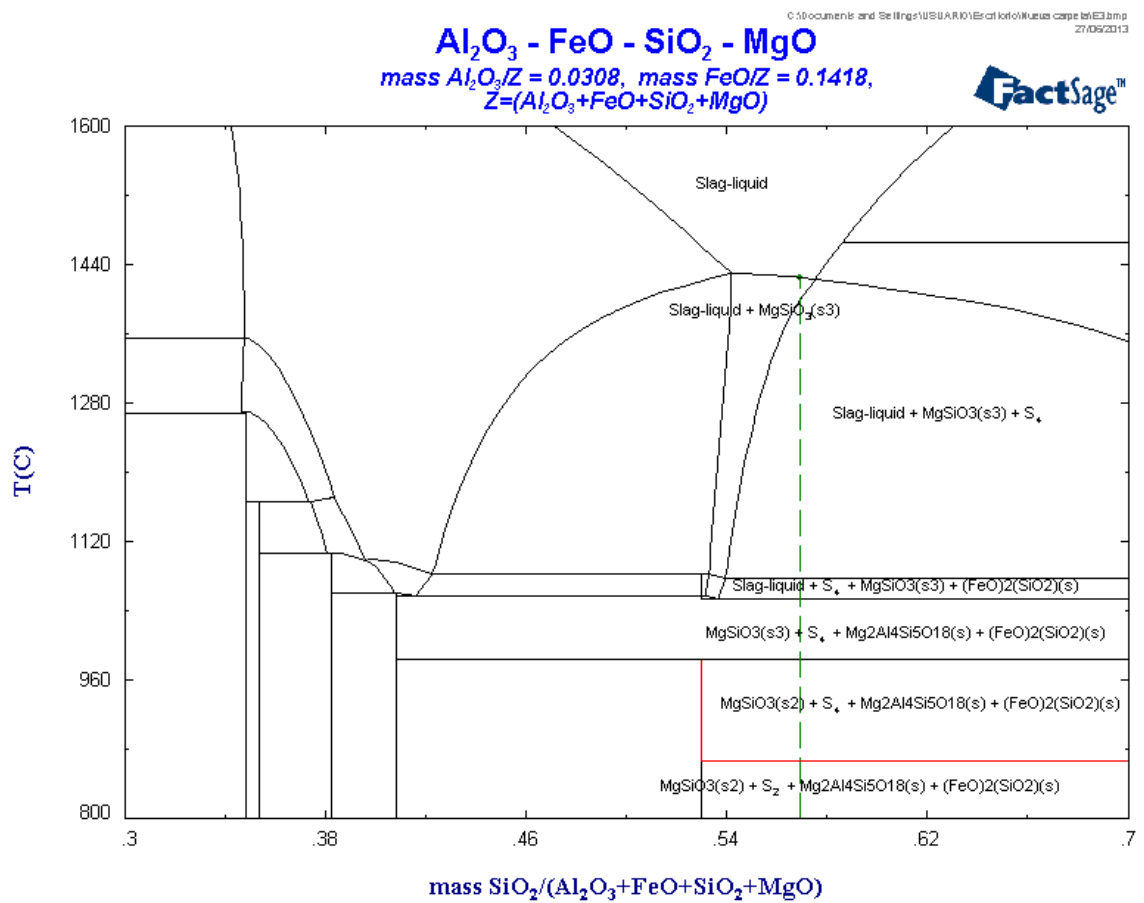
Fuente Autor.

Tabla 12. Posible escenario de operación 4.

<b>E4 = ↑R-↓Fe</b>	
<b>SiO<sub>2</sub>/MgO%Fe</b>	
	<b>2.2      10</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>56.89%</b>
<b>MgO</b>	<b>25.865%</b>
<b>FeO</b>	<b>14.18%</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>3.08%</b>

Fuente Autor

Figura 24. Diagrama pseudobinario posible escenario de operación 4.



Fuente :Autor.